Ge-conservación

Conservação | Conservation



GRUPO ESPAÑOL de CONSERVACIÓN
International Institute for Conservation of historic and artistic works

Número 29 Año 2026
ISSN: 1989-8568

Dirección Editorial: Emma García Alonso

Consejo de Redacción: Dora Arízaga Guzmán, Ana Bailão, Maite Barrio Olano, Rocío Bruquetas Galán, Pilar Fernández Colón, Rafael Fort González, Laura Fuster López, Silvia García Fernández-Villa, Marisa Gómez González, Ana Laborde Marqueze, Marta Manso, Alfonso Muñoz Cosme, Milagros Palma Crespo

Secretaria de Edición: Mª Concepción de Frutos Sanz

Maquetación: Mª Concepción de Frutos Sanz

Traducción portugués: Ana Bailão

Imagen portada: Detalle del proceso de moltura y englobe del pigmento verde óxido de cromo con el barniz preparado con la resina sintética Regalrez® 1094. Autora: Beatriz Doménech García

ISSN: 1989-8568

Esta publicación utiliza una licencia Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 3.0 Creative Commons
Se permite compartir, copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra con el reconocimiento expreso de su autoría y procedencia.
No se permite un uso comercial de la obra original ni la generación de obras derivadas.

Esta revista utiliza Open Journal Systems, software libre de gestión y publicación de revistas desarrollando, soportado y libremente distribuido por el Public Knowledge Project bajo Licencia Pública General GNU.

GRUPO ESPAÑOL de CONSERVACIÓN
International Institute for Conservation

Ge-conservación no se responsabiliza de la información contenida en los artículos ni se identifica necesariamente con ellas.
© La propiedad intelectual de los artículos pertenece a los autores, y los derechos de edición y publicación de este número son de Ge-conservación.
Rogamos que en la difusión libre de los contenidos queden patentes los créditos de los autores y la procedencia.

El Grupo Español de Conservación es una asociación independiente afiliada a *The International Institute for Conservation of Histtoric and Artistic Works*, inscrita en el Registro Nacional de Asociaciones, Sección 1ª, Nº 160.299. Sede: I.P.C.E. C/Greco, 4 28040 Madrid. Asociación Declarada de Utilidad Pública por Orden del Ministerio del Interior 3404/2009 (BOE 18-12-2009).

Ge-conservación
Conservação|Conservation

www.revista.ge-iic.com
E-mail: revista@ge-iic.org
www.ge-iic.com
E-mail: secretaria@ge-iic.org

Revista indexada en:

Índice

Artículos

Páginas

Use of geotechnologies in the reproduction and recovery of heritage, ethical reflection and case study
Fernando Manuel da Conceição Costa, Maria Julia Sobral da Fonseca, João Duarte **6**

Hybrid documentation and parametric modelling for the conservation of a modern stained-glass window in Caracas (Venezuela)
Mariolly Dávila Cordido, Renata de Mendonça Espinheira Gomes **18**

Entre la urgencia y la impotencia: la conservación del mural Port de Catarroja tras la DANA
Marta Peris Felipe **31**

Patrimonio cultural y proyecto urbano: reconversión de los bienes ferro-portuarios de la ribera central Rosarina (1983-2023)
Cecilia Galimberti **38**

Evaluation of the Efficiency of Polymethyl Methacrylate/Hydroxypropyl Methacrylate (MMA/HPMA) Copolymer for the Conservation of Mural Paintings
Mahmoud Sayed Korany, Wael Sabry Mohamed **51**

Tiempo de respuesta y variación dimensional del papel ante fluctuaciones de humedad relativa: implicaciones para su conservación preventiva
María Sobrino Estalrich, Salvador Muñoz-Viñas **64**

Antigua, quiteña y milagrosa: los valores de la imagen del "Niño Dios de Sotaquí" como articuladores de un sistema basado en la circulación de bienes
Olaya Sanfuentes, Carmen Royo Fraguas **73**

Estado de conservación del Large Temple de Sikait, Egipto. El gran templo de talco de Wadi El-Gemal
Estefanía Martín García, Luis Jordá Bordehore, Adriana Molina Pérez, Delia Eguiluz Maestro, Joan Oller Guzmán **85**

Viabilidad de la elaboración propia de colores al barniz para reintegración cromática a través de la experimentación
Beatriz Doménech-García, Vicente Guerola-Blay, María Castell-Agustí, Antoni Colomina-Subiela **107**

La aportación de la investigación científica en el estudio de la policromía del gótico valenciano en el sepulcro de Boil del Convento de Santo Domingo
Livio Ferrazza, David Juanes Barber **121**

Gestión de información para la conservación del patrimonio biocultural de Chichén Itzá, Yucatán, México
Helga Geovannini Acuña, Claudia Angélica Ocampo Flores, Alberto Emilio Ramírez Balam, Claudia García Solís **132**

Evaluation of biodeterioration control methods for fungal damage on paper based cultural heritage materials
María Domínguez Rojas, Maria Alejandra García Luna, Juan Sebastian Valencia, Esra Keles, María Camila Patiño R. **144**

Conservation Ethics and Sacred Heritage: Reflections from a Megillat Esther
Luís Pereira, Ângela Ferraz, Pedro Proença Cunha **157**

Vulnerabilidad de los sitios arqueológicos ante los impactos derivados del cambio climático
Elena García Martinez, Marta Plaza Beltrán, Adoración Martínez Carmona, Marta Lago Cerviño **168**

Reseñas

Libro: *Conservación-Restauración. Diccionario Razonado*. Ana maría Calvo Manuel
Rocío Bruquetas Galán **183**

Artículos



Use of geotechnologies in the reproduction and recovery of heritage, ethical reflection and case study

Fernando Manuel da Conceição Costa, Maria Julia Sobral da Fonseca, João Duarte

Abstract: All of us, as well as the objects that surrounds us, are in a permanent process of degradation for the simple reason that we are positioned on the surface of the Earth and interact with the atmosphere that surrounds us. The degradation of all things is an evolutionary process and inevitably leads to non-existence, within a more or less short time limit - at some point in the future, there will in fact be no pyramids in Egypt, no Mona Lisa in the Louvre, no Big Ben in London, at that point, it might consider prudent to have made at least a few copies; or not. We can also consider the hypothesis that, at that point, we have stopped giving importance to the past, only thinking about the immediate future. In this article we intend to present an ethical reflection on the crossroads at which we find ourselves and an example of a restoration that uses technology to "create new ancient art today", but which maintains it our current reality, heritage that had already been lost (in terms of its physical integrity) to the restoration through traditional methods. As a final result of the work of all the experts involved, a CNC-machined stone reproduction was reinstalled in situ to replace the unrecoverable one that was originally situated within a symmetrical sculptural setting. The particularities of the equipment used that allowed this restoration challenge to be resolved are mentioned, as well as the ethical concerns that arose throughout the entire process.

Keywords: restoration, ethics, stone, sculpture, CNC reproduction

Uso de geotecnologías en la reproducción y recuperación del patrimonio, reflexión ética y estudio de caso

Resumen: Todos nosotros, así como los objetos que nos rodean, estamos en un proceso permanente de degradación por la simple razón de que estamos posicionados en la superficie de la Tierra e interactuamos con la atmósfera que nos rodea. La degradación de todas las cosas, es un proceso evolutivo y conduce inevitablemente a la no existencia, dentro de un plazo más o menos corto - en algún momento en el futuro, de hecho, no habrá pirámides en Egipto, ni Mona Lisa en el Louvre, ni Big Ben en Londres, en ese momento, se podría considerar prudente haber hecho al menos algunas copias; o no. También podemos considerar la hipótesis de que, llegados a ese punto, hayamos dejado de dar importancia al pasado, pensando sólo en el futuro inmediato. En este artículo pretendemos hacer una reflexión ética sobre la encrucijada en la que nos encontramos y presentar un ejemplo de restauración que utiliza la tecnología para "crear hoy un nuevo arte antiguo", pero que mantiene en nuestra realidad actual un patrimonio que ya se había perdido (en cuanto a su integridad física) para la restauración mediante métodos tradicionales. Como resultado del trabajo de todos los expertos involucrados, se reinstaló in situ una reproducción de piedra mecanizada por CNC para reemplazar la irrecuperable que originalmente se encontraba dentro de un entorno escultórico simétrico. Se mencionan las particularidades del equipo utilizado que permitieron resolver este desafío de restauración, así como las preocupaciones éticas que surgieron durante todo el proceso..

Palabras clave: restauración, etica, piedra, escultura, reproducción CNC

Utilização de geotecnologias na reprodução e recuperação de património, reflexão ética e caso de estudo

Resumo: Todos nós, tal como os objetos que nos rodeiam, estamos em permanente processo de degradação pela simples razão de nos situarmos sobre a superfície do globo terrestre e interagirmos com a atmosfera que nos envolve. Desta circunstância decorre, que, inexoravelmente, padecemos de processos oxidativos - uma imprecação incontornável que, em simultâneo, nos autoriza as comodidades da nossa natureza terrena. A degradação, de todos, é um processo evolutivo e conduz inevitavelmente à não existência, num limite temporal mais ou menos curto - em algum momento do futuro, não existirão, de facto, as pirâmides no Egipto, a Mona Lisa no Louvre, ou, Big Ben em Londres, etc. – nessa altura, talvez a venha a ser considerado previdente termos feito pelo menos algumas cópias; ou não. Também podemos considerar a hipótese de, por essa altura, já termos deixado de dar importância ao passado, só pensando no futuro imediato, como a maioria dos animais que hoje nos rodeiam. Neste artigo pretendemos apresentar uma reflexão

ética sobre a encruzilhada em que nos encontramos e apresentar um exemplo de uma intervenção que faz uso de tecnologia para "criar arte antiga hoje", mas que mantém na nossa realidade atual património que já se tinha perdido quanto à sua integridade física para além dos limites da recuperação pelo restauro tradicional. Como resultado final do trabalho de todos os peritos envolvidos foi recolocada in situ a reprodução de uma escultura em pedra, produzida por CNC, para substituir a irrecuperável que originalmente se situava num enquadramento escultórico simétrico. São referidas as particularidades do equipamento utilizado que permitiram resolver este desafio de restauro, bem como as preocupações éticas surgidas ao longo de todo o seu processo.

Palavras-chave: restauro, ética, pedra, escultura, reprodução CNC

Introducción

The contribution of Conservation and Restoration in contemporary societies has been to position itself in favor of prolonging the existence of some examples of recognized human mastery, in time and space, delivering to today's descendants the heritage of our common ancestors in the best possible conditions - this apparently simple baton passing, entails, however, many difficulties and responsibilities. One of them is embodied in the ethical discussion surrounding additions, reformulations, reintegrations, copies, etc. which, paradoxically, stands in contrast to one of the most important principles of our code of ethical action, and, is addressed by Appelbaum (Appelbaum 2010) when he says "The conservator-restorer faces complex decisions that are not only technical, but also ideological, affecting the interpretation and authenticity of the work. Heritage conservation reflects the interaction between objects and human beings, requiring consideration of the social context for its adequate protection."

In general, these more proactive options, are not the ones that we consider immediately, although we do not discard them definitively, without evaluating the relative impact of their implementation in a particular case. This position is rooted, first and foremost, in a society in which we recognize that it is on the knowledge gathered in the past (in any area of science, and, whatever the length of the time period considered) that we base the research that enables the development of current and future knowledge – that is, development is also a universal and constant scientific process, which is not limited (nor was it limited) to the living generations; but even this, one day, may change.

Commonly, when faced with the need to restore the function of a given object, Humanity has made use of the technical solutions available at any given time, whether they are used in repairs, additions or restorations, regardless of the ethical argument adopted. This reflection is much more peaceful and welcoming when applied to human artistries that support us in a certain essential function, as is the case with architecture – future use depends on functional recovery. But, in (mostly decorative) works of art, produced for the delight of the observer, which do not directly determine people's existence, we allow ourselves greater philosophical considerations. On the other hand, ethics in the conservation or restoration of cultural heritage has become more relevant only in recent centuries.

This last aspect is quite evident in the variation of criteria throughout the 17th and 18th centuries, in the interventions carried out on classical statuary (Hellenic or Roman), initially recovered archaeologically from the civilizational oblivion determined by the fall of those two empires, and, later, integrated into private collections (personal or commercial - antique dealers) or museums, or both, sequentially. These interventions followed certain aesthetic norms of each era, introducing, altering or removing less consensual elements. It was common to hire sculptors (of the greatest possible caliber) to reintegrate them and allow them to be re-exhibited. This was also a wager on the technical and artistic excellence of the sculptor/restorer, as a way of valuing fractured sculpture - an interpretation that brings Western culture closer to Eastern culture, where, in Japan, the cult of family history was transposed to the restoration of ceramics using noble metals (mostly gold) to fill fractures, the "kintsugi", probably prior to the practices of the modern Italian period described.

Many variations coexist in these interventionist "freedoms", to the point where there were cases in which there was not enough information in the fractured remnant to carry out the effective reconstruction, modifying the original identity with the "updates" introduced, even if the original styles were followed in some way. This was an interventionist position, which could lead the observer to a blunder interpretation, without even preventing him (sometimes, nor even taking responsibility) situations which Marion True sums up in the exclamation "who among us has not experienced the frustration of being misled in the accurate identification of a work of art by distorting or misunderstood restorations?" (True 2003). All of us, regardless of experience, have already encountered a situation like this. In return, this stance, when confronted with current diagnostic methods, produces a great deal of information regarding the history of the evolution of restoration, as revealed by the reports of Orietta Rossi Pinelli (Pinelli 1996), among others, when she states that "the new cult of fragment recovered images that had little to do with the original, because of the alterations that were performed during the ancient restorations".

If during these centuries ethical discussion was scarce, and, experimentation and interventionism dominated, in the following century (19th) the first became influential and prominent, having taken root in opposite poles of two broader currents: classicism and romanticism. As a figurehead of the first we find Viollet-Le-Duc (from whose performance we were recently remembered of in 2019's

fire, by the collapse of the pinnacle of the Notre Dame's church, of Paris, which had been added by him in 1860, in a monument whose construction was concluded five centuries before), which advocates that the knowledge of architecture allowed him to do so. In its opposition, defending non-intervention, even though the situation of complete ruin is reached, were positioned Wiliam Morris and John Ruskin, which began a movement whose obvious principles were proclaimed in the "Manifesto of the Society for the Protection of Ancient Buildings" (Morris, 1996). Later, Cesare Brandi joined this last group having postulated in the "Teoria del Restauro" (Brandi 1977) its ethical position and consequent limits of intervention, in particular, in architecture and painting, a field in which it even questioning the legitimacy of patina removal by saying" (...) historically, Patina documents the very passage of the work of art in time and therefore must be preserved. But its conservation is also legitimated by the aesthetics?". Let us remember that patina is formed after the work has been carried out, based on (and only mobilizing) the outermost layers as a result of use and/or passive deterioration, and, can significantly alter the original aesthetics. In other words, chemically, it is a product of deterioration that can significantly modify the original aesthetic, but it, sometimes, does have some positive return in the future stabilization of the object.

The philosophical currents that guide the practical work of the conservator-restorer today largely derive from those and can be summarized in some positions that we recurrently observe – all of them are situated between the two poles outlined in the 17th century: The one that rejects any type of restoration (let alone copying) and the one that allows it, with defensive arguments about the need for updating. Among them, there are nuances to be described in order to understand the difficulties that arise from each of them.

For some, whatever the state of conservation or degradation, no alteration/enhancement can be introduced after the artistic work has been completed and without being the work of its author. Behold, objects will wither away under our observation, and we cannot do more than preserve the existence of the remainder, at each moment. At the limit, we could today implement a preventive conservation program. It may seem limiting, but it protects copyright and is humble in foreseeing the finiteness of the work in the face of inexorable degradation processes.

Others argue that what should be preserved is the memory we have of the artistic object, since what matters is the impact of the work on the human mind. Therefore, changes can be introduced, but they must not manifestly distort the object, maintaining its connection to the author and the act of its creation. Here the difficulties are related to the combination or prevalence of some of these arguments – especially authorship and context: the authors can be multiple and across several artistic currents, as is the case of many of the largest European cathedrals.

There are also those who advocate that the longevity of the object should be promoted even if (clearly distinguishable) parts are added or de-characterized, since these actions are a mere update of the author's original concept; a very common trend in the appreciation of some religious heritage, although less used as such. Especially because in some cases the deviations aim to introduce a new functionality (for example, museum functionality) or to restore the building to an essential function that was no longer suitable (for example, the complete replacement of roofs).

It can be seen from these perspectives, that the subjective scope of the adopted solution is normally increased whenever the possibility of its conservation or maintenance was overcome by a catastrophic event (natural disaster, impactful accident/incident, etc.) in its results for the object, and, consequently, also in the decision formula of the intervention that is now being carried out will take, as well as in its depth.

From here arise the paradigms that the *corpus* of Restoration Ethics ultimately seeks to reconcile: on the one hand, dysfunctionality enables the adoption of greater depth in intervention, but distances us from historical factuality itself, which has apparently been attempted to be overcome through systematic recording and analysis. The much-recited principle of reversibility, which together with that of adequacy (True 2003) aims to ensure the documented integrity of the original beyond the technical rehabilitation solution adopted at each moment, also follows this need.

For the optimized combination of the virtues stated by the various currents, today's Conservation and Restoration practice also denotes the constant concern of not trying to deceive or mislead the receiving public, highlighting the additions beyond the original, and only disguising to a limited extent the aesthetic discontinuities (pictorial reintegration techniques, p. ex.).

Painting is, in fact, one of the areas most impacted by the latest technological developments, allowing for a deeper analytical knowledge (qualitative and quantitative) of materials, both original and those used in restoration. But also, in sculpture. Interventions in these areas gradually gravitated towards minimal restoration, preferably only structural, preserving as much of the original aesthetics as possible through the reintegration of gaps in an assumed way and moving away from the dubious statements of the past. Thus, gaps today are seen as interferences in reading, as Paul Philippot (Philippot 1996) states when he says "the lacuna, be it in a picture, sculpture or monument of architecture, appears to be an interruption of the continuity of the object's artistic form and its rhythm, since the object's completeness is no longer a necessity (and often the fragmented object has acquired a value in its fragmented state (..) the only aim of the restoration should be to reduce or eliminate the disturbance caused by lacunae in such a way that the intervention can be unmistakably identified as such".

But the greatest ethic paradox lies in the fact that, in the meantime, it is now possible for us to theoretically reproduce any object in series, exposing the difficult consensus recently obtained (which is based on the in-depth analysis of each object, record and common criteria) to new challenges, which, in the end, could make all Conservation or Restoration obsolete.

It is in this ethical discussion surrounding the recent current possibility of being able to reproduce works of art through such different supports as holograms, 3D printing with resins, virtual rendering and augmented reality, NFTs (New Tecnology File System/non-fungible tokens) and also "mechanized copying with computer support" - CNC, the core of our ethical analysis. Today, in fact, we can produce "perfect copies", which reproduce the work of art (in this case, a sculpture), even in its materiality (stone) and with traces of its specific history (small superficial irregularities that result from the deterioration of the original can be digitally recorded by the scan); but, what results is still the object that was lost? And, if it replaces it in its functionality? The intrinsic nature of all these "copies" results in a decisive differentiation with the original, as none of them reproduce the object in its "original historical nature", they are merely representations of it in other distinct realities, and there can be no confusion between the two, and, the observer is informed in advance of the circumstances of the enjoyment in which he embarks.

In fact, none of these realities, in any artistic field, have the same story, or author, or historical materiality, that is, none have the historical-cultural value that we usually attribute to them. The questions that could be raised immediately regarding the legal framework of the authorship of these copies will be dropped, since, we, who are dedicated to historical heritage, are not used to be confronted by authors to claim their rights, and, on the contrary, we assume ourselves, as their posthumous attorneys. For the historical and cultural value, we cannot fail to state that the intrinsic nature of all these "copies" results in a decisive differentiation with the original, as none of them reproduce the object in its creative nature; they are merely representations of the same object in other distinct realities, and, however suitable they may be for enjoying the original work of art from a new perspective, they have no historical-cultural value.

The production of copies, whether to fill gaps (which we referred to earlier) or for cultural dissemination, is a common practice in Conservation and Restoration in a museum context, as is digital recording (2D or 3D, rendering, etc.). The first case has been going on for decades and only aims to make reproductions available at reasonable prices (sometimes with variations in scale, material, etc.) in exchange for some funding and cultural agency for the institution. The second one aims to preserve the original (in the event that it cannot be displayed and is essential for the expository discourse). In order to analyze the issue at hand here, we will also ignore the more or less illicit circumstances in which these practices may also occur and refer only to circumstances that fall within the scope of interventions supervised (directly or indirectly) by national or international cultural institutions – in this way, the ethical issue has been obviated by the execution of copies in limited numbers, distinct materials, good documentation and registration. Until now, these reproduction operations were time-consuming, complex and expensive, and, therefore very limited and in depth considered.

Thus, the most time pressing ethical challenge that we face with the availability of these new resources is to take refuge in the convenient social conviction that we can do whatever we want, to resort to a more convenient solution without ethically analyzing our technical performance. Ironically, only a deep understanding of the context in which the object was originally produced and its physical constitution allows for a more accurate decision, and, this requires ethical consideration in the face of this renewed and increased urgency of immediacy.

Another path is being taken by Creative Conservation, which focuses on maintaining the collective memory of the historical experience or object, materializing them in a new creative reality, but informing and preserving the original context. In these cases, parts of the original object that are no longer "preserve able" are recovered in a new cultural existence, of technical, historical or artistic synthesis, by adopting a proactive and creative attitude towards the ruin of the original material context. Examples of this trend are the recovery of lost fragments of tiles reorganized into a mural based on the original pattern of the tiles themselves (Nogueira *et al*. 2024), or, the transformation and synthesis of multiple historical testimonies into a dramatization made available on video in a museum (Calvi *et al.* 2024).

This is exactly what Munõz Viñas (Viñas 2003) refers to when he says: "Nor is it possible to judge Restoration in the abstract: the same Restoration can be good, acceptable, or painful depending on the circumstances in which it was carried out. There is no such thing as a good Restoration, but rather a good Restoration of a particular object in a particular circumstance. Some readers may conclude that contemporary Restoration theory is saying that anything goes, as radical subjectivism seems to suggest: that since the authentic criteria on which Restoration work is based are subjective, it is legitimate to do whatever the protagonist (the restorer or other decision-makers) prefers. But in reality, it is saying just the opposite. It is saying that the restorer cannot do whatever he decides, what he thinks is best, what he considers most honest, what he has been taught, and that the main criterion that should guide his actions is the satisfaction of the group of subjects whom his work affects and will affect in the future."

We introduce here a case study as a corollary to this reflection, which is intended to express in words the ethical challenges that we are facing, not day by day, not as a position for or against, but rather as the voicing of a challenging situation for conservative ethics.

In this sculptural set of two figures that originally supported symmetrical religious statues one day, the reproduction was obtained from data collected from the only one that was in a good state of conservation, after being inverted symmetrically, to result in the original position of the sculpture that did no longer fulfill the necessary function. The methodological decision was perfectly supported by current ethics, especially in view of its specific preservation circumstances, and, it maintains the original contextualization, but there is a new reality, different from the original, even as it is committed to it.



Figures 1 y 2.- Resulting reproduction from sculpture.

Case study

Introduction to technology

The history of reproduction and replication of sculptures in 3D has evolved significantly, boosted by the advancement of digitalization and three-dimensional printing technology. This practice dates back to traditional molding and copying techniques, but the digital revolution completely transformed the process, making it more accessible, precise and versatile.

Historically, the duplication of sculptures was carried out by direct molding or casting processes, such as the lost wax method. These methods allowed for the creation of physical copies, but could be limited in terms of amount, precision and details, as well as being time-consuming and somewhat invasive for the original works.

With the invention of photogrammetry at the beginning of the 20th century, it is possible to capture three-dimensional shapes using photographs. This process was a precursor to modern 3D digitization techniques, allowing objects to be reproduced at different scales. However, the first photogrammetry methods were complicated and still could not guarantee detailed reproduction of textures.

Starting in the 1980s and 1990s, the first 3D scanners emerged that used laser light and projection technology to capture the three-dimensional shape of objects, including sculptures. In this phase, structured light begins to gain relevance. Structured light projects patterns onto the object, allowing the cameras to capture the distortion of the projected lines, or to, in turn, translate them into a precise three-dimensional model.

The use of structured light and laser scanners allows detailed capture of sculptures in high resolution, opening new possibilities for museums, archaeologists and conservators. An emblematic example is the digitalization project of Michelangelo's sculpture "David", made in the 1990s, which used laser technologies to create a highly detailed digital reproduction of the work. This pioneering work demonstrates the ability of two 3D scanners to capture works of art on a large scale and with extreme precision.

The achievement of 3D printing has revolutionized even more the field of reproduction of sculptures. Beginning in 2000, 3D printing began to be used to create physical reproductions from digital models. The stereolithography technique was one of the first to be used, followed by other techniques such as fused filament fabrication (FFF) and selective laser sintering (SLS).

These technologies will allow the creation of precise reproductions of historical sculptures, from small miniatures to full-scale reproductions. The use of 3D printing also facilitates digital preservation, with replicas being used for display as original works are preserved.

The object

This case study reveals the procedure adopted for the elaboration of a replica of a sculpture in limestone that belongs to Oporto's Cathedral and in a high state of degradation. The set was made up of two symmetrical statues, one of which was not recoverable (on the left). The intervention managed to recover one of the two sculptures with approximate dimensions of 94 cm x 40 cm x 38 cm [Figure 1], which served as a model for the elaboration of the reproduction [Figure 2]. The conservation work was carried out by $CaCO_3$, Conservação do Património Artístico, Lda. and the execution of the elaboration of the reproduction by the company Eduardo Marques & Rosa, Lda.

Technical and scientific resources

— *Optics: Structured light*

The use of structured light to model stone artifacts is an advanced 3D digitalization technique that allows precise capture of the shape and texture of complex surfaces, such as sculptures and other stone objects. This method involves projecting a pattern of light (generally a grid or

stripes) onto the object and, through the distortion of these lines caused by the shape of the object, it is possible to reconstruct a highly detailed three-dimensional model. One or more cameras capture the distortions of the light pattern and the data are processed through specialized software that generates a three-dimensional digital model, precise in the order of micrometers. This modeling of stone artifacts has high precision (it is capable of capturing small details, such as fissures, textures or fine reliefs, with very high precision), and is non-invasive (there is no physical contact with the artifact, which promotes the preservation of fragile or historical objects). Compared with other methods, such as photogrammetry, structured light digitization can be quite fast, depending on the size of the object and the level of detail required, and, versatile for it can be used in a variety of materials and sizes of sculptures. Use in restoration and preservation: Digital modeling allows artifacts to be digitally preserved, and the digital model can be used to restore damaged parts or create accurate replicas.

The operating principle uses two different approaches - see figure 3.

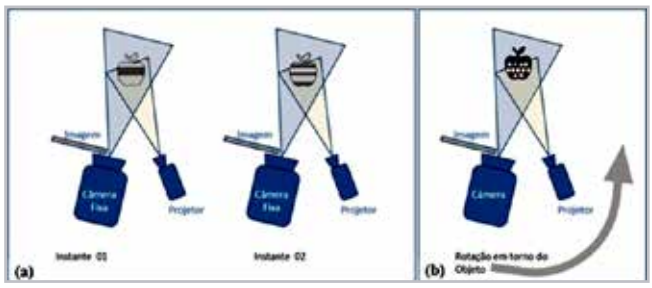


Figure 3.- Two different methodologies for digitalizing objects using structured light.

In Figure IIIa, it is observed that the camera is fixed, as is the object, and, only the two light patterns are movable. In Figure IIIb, the luminous patterns are maintained fixed but the camera and the projector are moving together around the object. In this last approach, it's possible to digitize larger objects, and, still, the deformation of the same luminous projection seen in different positions allows the realization of digitization (Balbino 2021). As various images are captured by the camera, in different positions, they allow the visualization of the same point of the object at different angles (Batlle *et al.* 1998). An example of equipment that uses this operating principle is the FARO Freestyle 3D Objects 3D Scanner [Figure 4], which was used in carrying out this work for the acquisition of digital data prior to the actual implementation of computer-assisted duplication, under specific manufacturing conditions [Figure 5].

• Practical applications:

The use of structured light has been widely referred to in works related to the reproduction and modeling of art objects, not least sculptures, taking advantage of its effectiveness in capturing the detailed geometry and textures of complex surfaces. These studies demonstrate how structured light has been essential for the digital documentation and preservation of art objects, allowing the creation of accurate reproductions and contributing to the conservation of cultural heritage. Below, some examples you will notice:

- 1. 3D Digitization of Sculptures in the British Museum: One of the most successful examples of using structured light to model sculptures was a 3D digitalization project carried out at the British Museum. Antique and valuable sculptures digitized with high precision for digital preservation and subsequent studies, allowing the creation of precise digital replicas (British Museum 2025).

- 2. EU "3D Icons" Project: The 3D Icons project, funded by the European Union, focuses on the digitization of cultural heritage, including iconic sculptures from across Europe. Structured light was one of two methods applied to ensure the detailed capture of shapes and textures of works of art, allowing the creation of three-dimensional models that could be used for study and online display (3D-ICONS 2025).

- 3. Sculpture by Michelangelo – "David": The 3D digitization project of Michelangelo's sculpture David involves the use of structured light technologies to capture the model in great detail. This work was conducted with the objective of creating a complete digital replica of the sculpture, with micrometric precision, being one of the most important references in the use of structured light for Renaissance art (Euronews 2025).

- 4. Study of Roman Sculptures at the Louvre Museum: Another relevant example was the use of structured light to digitize Roman sculptures at the Louvre Museum. This work involves detailed documentation for conservation and research purposes, allowing the creation of high-resolution digital replicas that are used both in virtual exhibitions and in scientific studies on ancient sculptural techniques (Louvre 2025).

— *Image acquisition: Artec Eva portable 3D scanner*

For data acquisition, an Artec Eva portable 3D scanner was used [Figure 4], which is a 3D scanner widely used to capture objects quickly and accurately.

Artec Eva's main features are Structured Light technology, great portability, high resolution, capture speed, software compatibility and versatility in diverse applications (light and easy to handle); it has fast capture speed, facilitating the digitization of objects in motion to capture large surfaces in less time; works with software compatible with



Figures 4 y 5.- Figure 4: The portable Artec Eva scanner. Figure 5 Industrial facility for manufacturing object reproduction

various others 3D modeling and processing software, such as Artec Studio; is adaptable in its application (archaeology, medicine, product design, entertainment and industry) due to its versatility and precision. Thus, the Artec Eva is a valuable tool for professionals who need high-quality 3D digitization, allowing you to capture and preserve the essential details of physical objects – it's technical specifications can be consulted in (Artec 3D 2025).

— Sculptural execution: CNC Quadrix DV 1000

The Quadrix DV 1000 is a CNC machine, installed in an industrial manufacturing facility for replicas [Figure 5], with 5 interpolated axes, developed by Donatoni, is ideal for precise cutting and modeling of materials such as marble, granite and other natural stones. The machine is equipped with a vertical Z-axis path of 800-900 mm and allows the use of 1000 mm diameter blades, providing a 405 mm depth cutting capacity. (Fresator 2025).

This machine stands out for its versatility in different types of cuts, including inclined, curved and circular cuts. It is also capable of performing 2D and 3D operations, such as creating complex profiles and sculptures. With EasyStone CAD/CAM software, the operator can draw and import 2D and 3D files, in addition to using a laser scanning system to capture geometric shapes and surfaces. The Quadrix DV 1000 includes advanced features, the automatic tool change, remote assistance and the Move System, which makes it easier to move parts during the cutting process, increasing efficiency and reducing material waste.

Methodology of use

The data acquisition process with the use of the scanner, follow the following steps:

- Object Preparation: The stone statue was cleaned and positioned in a stable and supported manner to avoid movement during capture [Figures 6a and 6b].

- Structured Light Design and Image Capture: A portable 3D scanner emits patterns of light on the surface of the object. The distortions in these patterns caused by the geometry of the object are fundamental for the modelling. The same device records the images of the projected patterns. Analyzing these images allows to calculate the depth and shape of the surface. In figures 6 you can see some aspects of the acquisition of two data sets by the scanner.



Figuras 6 a y b.- Structured light image capture from different sculpture positions.

- Data Processing: The acquired data are processed by 3D modeling software, which reconstructs the surface of the object in a digital model. Figure 7a shows the processing and verification of data acquisition by the scanner, in loco. Figure 7b shows the result of the laboratory process, ensuring the resulting model is suitable to be introduced into the CNC machine. Given the specificities of the project, the model of figure 7b resulting from the acquisition of the original model, was manipulated as it was mirror transformed into the final model.



Figures 7 a y b.- Structured light image capture from different sculpture positions.

- Digital model reproduction: The 3D model, after verification, was reproduced in similar stone using a CNC creating a 3D replica.

The replication process through the use of a CNC machine includes several stages necessary to execute the final model [Figure 10].

The first step is to select the type of stone most suitable for the reproduction you intend to perform [Figure 8]. For this purpose, it was chosen of a "Preto Ruço" block (commercial name), lithological type with chromatic and physical



Figures 8, 9 y 10.- Figura 8: The limestone block of "preto ruço" before modelling. Figure 9: An aspect of the CNC during operations. Figure 10: Final result of the CNC machine operating process.

characteristics most approximate to the lithological type of the original pieces.

After choosing the lithological type, the data modeled from the scanner acquisition will be introduced into the CNC using the PLY format (Library of Congress 2025), a format used to create 3D model data.

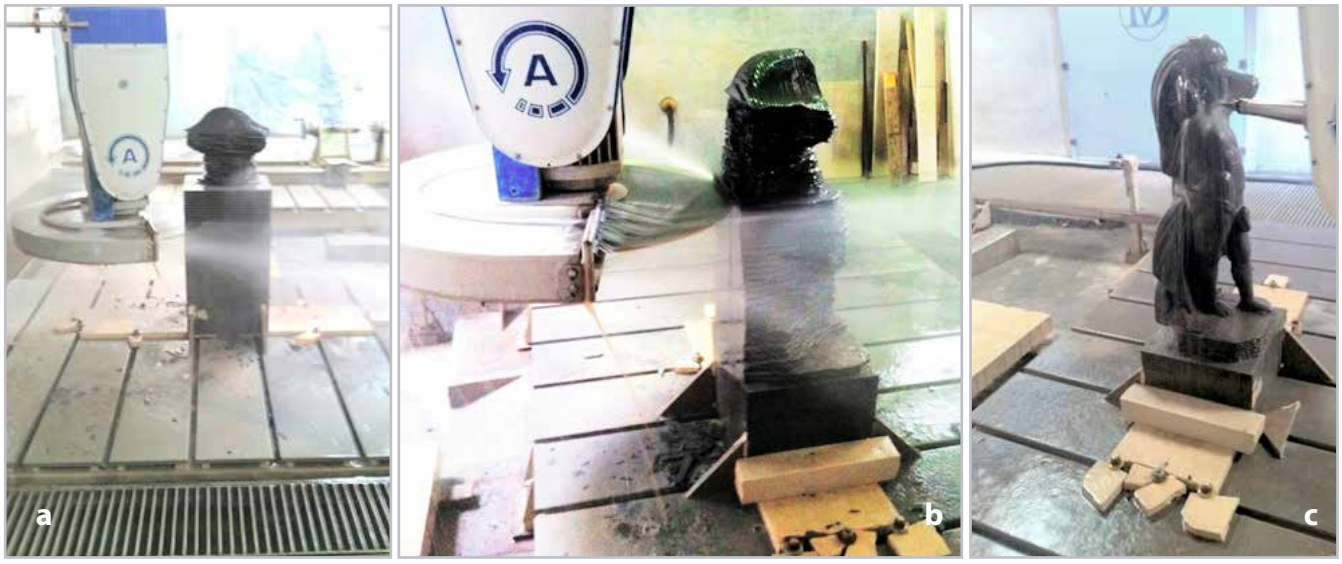
Gathered the model software and the CNC block (for material support), the manufacturing process of the reproductin begins. The process, initially, with a diamond cutting disc on the stone block, it will be cropped taking into account the outer limits of the digital model. The result is a rough model, with the existing dimensions of the 3D model obtained from the scanner [Figures 11a,b,c], which will be later perfected with the final resolution.

At the next stage, after the parallelepiped is cut with the dimensions of the digital model, the machine replaces the cutting tool with a precision one [Figures 12 a, b], which will give the model in the details of the resolution of the scanner acquisition.

In figure 12a the "refining" operation is represented with a wear tip, which can be compared to its effect in figure 12b. The effect on the upper part of the reproduction is visible, which resembles the textural configuration and details of the original piece. The final phase of "refinement" of the model in progress.

Finally, as it has been done for thousands of years, the final touch of the stonemason, to retouch the imperfections that the model may present [Figure 13].

As a result, a symmetrical replica was obtained, using the use of structured light technology and numerical control machine (CNC), according to the material chosen, with similar appearance and original details.



Figures 11 a, b, c.- Various stages of stone block cutting on a CNC machine



Figures 12 a, b.- Course and results obtained from the refinement phase.



Figures 13.- Retouch phase by the stonemason.

The use of these techniques allows us to reproduce a historical piece with incalculable artistic value that over time has been degraded and lost, trying as far as possible to preserve the artistic details of the original sculptures.

In figures 14, we can observe the aspects of the final replica sculpture [Figure 14a] and her position in situ [Figure 14b].



Figures 14.- Final reproduction and her reposition in situ

— Operating Gains - Replica Execution Time

Let us make here an approach, which we consider very important, to quantify the execution time of the 3D replica, focusing only on the stages of data acquisition by structured light scanner and execution on the CNC. This temporal quantification is crucial, allowing to quantify the efficiency and planning of operations, or, its cost, quality obtained, rapid prototyping capacity (in product development environments, the ability to raise prototypes quickly is essential) and predictability and effectiveness.

In this specific case, the approximate execution time of each phase are:

Task	Hours
Execution of structured light scanner survey	2
Processing of acquired data	16
Programming of cutting and CNC machines	4
Model execution on the CNC	64
Hand finishing	64
Total	150

— Final considerations on the intervention

The creation of sculpture replicas using structured light and CNC is a fascinating process that combines art and technology. Structured light enables 3D scanning of sculptures, capturing every detail of the original work accurately (Figures 16). This data is then used to create a physical replica using CNC machines, which carve the chosen material following the digital specifications. This method not only preserves the artistic details of the original sculptures, but also allows for the mass reproduction of works of art, facilitating access and cultural appreciation. Furthermore, digital documentation of sculptures can be enriched with metadata standards and ontologies, ensuring that information about the works is preserved and easily accessible for future generations.

The creation of reproductions of sculptures raises significant ethical issues, especially with regard to copyright and the integrity of the original work. Structured light technology enables detailed capture of the three-dimensional form of a sculpture, while CNC machines can reproduce these forms accurately. However, technical reproduction, as discussed by Walter Benjamin (2018), alters the perception of authenticity and uniqueness of the original work of art. The copyright law, Code of Copyright and Related Rights, approved by Decree-Law No. 63/85, is the cornerstone of this legal protection. In the context of replication of works of art, the code stipulates that reproduction of copyrighted works is permitted in certain circumstances, such as for private use, criticism, or education, as long as it does not impair the normal exploitation of the work or cause unjustified harm to the legitimate interests of the author.

However, the creation of reproductions of works of art can raise complex issues related to the author's moral and patrimonial rights, requiring careful analysis on a case-by-case basis. Furthermore, preventive conservation in museums, including that of replicas of classical plaster sculptures, highlights the importance of preserving the integrity of the materials and the physical and chemical stability of the works, which is fundamental to maintaining their meaning and value over time. Therefore, when creating replicas, it is essential to consider not only the technical aspects, but also the cultural and historical impact of these reproductions, ensuring that they do not compromise the original values and the artist's intention. Discussing these ethical issues is crucial to maintaining respect for art and its history while navigating the possibilities that new technologies offer.

Conclusion

In short, the greater circulation of scientific knowledge and the development of new reproduction techniques have made decisions in this area even more complex. More than definitively embracing any of the positions (historical, current or updated) conveyed or in force, we submit this matter for discussion, at the same time as we inform about the analysis carried out. We keep in mind the internal questioning (normally prior to the intervention, which remains even after it: Can we do everything without any criteria? Does it really not matter what material remains persists from the original? All options are possible and ethical acceptable? In what cases do we believe that this methodology respects current conservation and restoration principles? What is the difference between completing an artistic object as an improved artistic recreation without having a record of it and using new technologies to complete what is missing from an object based on another similar work?

In this particular case, the difficulty lay in the fact that the original was too degraded and incomplete, and could not be reattached to its original location due to its fragility (disappearance of almost half of its volume). Unlike other solutions that allow 3D printing but in resin, such as, for example, the case study of the Monument to the Polish Diaspora Bond with the Homeland, (Suchocki 2023), but do not replace the original in situ, in this case CNC allowed the obtaining of a reproduction made of material with identical characteristics and repositioned in the original sculptural context. In fact, resin reproductions, at different scales, can allow flexibility of handling, improve a deep understanding of the object, and even support the planning of complex intervention processes, but, do not replace the object in its original context, thus, they are not part of a restoration process, strictly speaking but rather museology. Furthermore, we emphasize that even in this case where the reproduction is in stone, but manual finishing was necessary.

From the point of view of data acquisition, this technique presents an advantage in terms of time efficiency and the data transformation necessary to obtain the reproduction compared to others that use georeferencing, multiple object and complex targets, which may be more suitable, efficient and of greater value when used for buildings and sites such as those in the iHeritage Project, (Caravello 2024), (Liu *et al.* 2025).

We still have doubts regarding the application of this methodology in the generic resolution of these restoration problems, especially from a deontological point of view.

Agradecimentos

Ao Centro de Geociências da Universidade de Coimbra, Fundação para a Ciência e a Tecnologia (UIDB/00073/2025 e UIDP/00073/2025),à IQGeo-Serviços, Lda. e Eduardo Marques e Rosa, Lda. para a realização do projecto.

References

3D-ICONS - 3D Digitization of Icons of European Architectural and Archaeological Heritage. http://3dicons-project.eu/. [consulted: 03/04/2025].

APPELBAUM, B. (2010). "Methodology Conservation Treatment". *Journal of the American Institute for Conservation*. 49: 53-55. https://doi.org/10.2307/41320433

ARTEC 3D. "Scanner Artec Eva | Best Structured-light 3D Scanning Device". https://www.artec3d.com/es/portable-3d-scanners/artec-eva?keyword=artec%20eva&gad_source=1&gad_campaignid=12711727109&gbraid=0AAAAAD76GcMpmBOt1cxmF3Fdla1767R--&gclid=Cj0KCQiAyP3KBhD9ARIsAAJLnnamqGXIKw0-PO8zm8XQqZA5E2ZVZT4bod6hGtTEjIzUeyrp_jHyszUaAm-9EALw_wcB

BALBINO, F. (2021). "*Caracterização Metrológica de Scanners Ópticos Tridimensionais por Projeção de Luz Estruturada Aplicados a Ensaios de Coletes Balísticos*", Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro.

BRANDI, C. (1977). *Teoria del Restauro*. Torino: Giulio Einaudi Editore.

BATLLE, J., MOUADDIB E., SALVI J. (1998). "Recent progress in coded structured light as a technique to solve the correspondence problem: a survey". In *Pattern Recognition*, 31 (7): 963-982. https://doi.org/10.1016/S0031-3203(97)00074-5

BENJAMIN, W. (2017). "The work of art in the age of mechanical reproduction". In: A Museum studies approach to heritage. Routledge, 226-243.

BRITISH MUSEUM, UK: "Jadeite Cabbage, Unknown, Qing dynasty (1644-1911), National Palace Museum, Taiwan". https://artsandculture.google.com/story/hAXhy-4s3wl8KA?hl=en. [consulted: 03/04/2025].

CALVI, L., HOVER, M., de BRITO, M. (2024). "Preservation and memory in the age of new media". In *HeriCC 1ST International Conference Heritage, Conservation and Creativity - Cultural Heritage in transformation*, TECHN&ART, Polytechnic University of Tomar, 9 October 2024

CARAVELLO, E. (2024). "Geotecnologie per i siti UNESCO del Mediterraneo. Il progetto iHeritage: ICT Mediterranean platform for UNESCO cultural heritage". Bollettino della Società Geografica Italiana serie 14, 7(2): 169-179. https://doi.org/10.36253/bsgi-7450

EURONEWS. (2021). "O David, de Miguel Ângelo, está a ser reproduzido em 3D". https://pt.euronews.com/cultura/2021/04/14/o-david-de-miguel-angelo-esta-a-ser-reproduzido-em-3d. [consulted: 3/4/2025].

FRESATOR. "Soluções para a indústria dos mármores, granitos e aglomerados". https://www.fresator.pt/. [consulted: 03/04/2025].

KEMP, J. (2023). "Conservators, creativity, and control". In *Studies in Conservation*. https://doi.org/10.1080/00393630.2025.2484910

LIBRARY OF CONGRESS, Sustainability of Digital Formats: Planning for Library of Congress Collections. "Polygon File Format (PLY) Family". https://www.loc.gov/preservation/digital/formats/fdd/fdd000501.shtml. https://docs.fileformat.com/3d/ply/. [consulted: 03/04/2025].

LIU, J.; WILLKENS, D.;GENTRY, R. (2025). "Developing a Practice Based Guide to Terrestrial Laser Scanning (TLS) for Heritage Documentation". *Heritage*, 8 (8), 313. https://doi.org/10.3390/heritage8080313

LOUVRE, Paris. https://www.louvre.fr/en/exhibitions-and-events/exhibitions/masterpieces-from-the-torlonia-collection. [consulted: 03/04/2025].

MORRIS, W. (1996). "Reading 31: Manifesto of the Society for the Protection of Ancient Buildings". In *Historical and Philosophical Issues in the Conservation of Cultural Heritage*, Berland, D. (coord). Los Angeles: The Getty Conservation Institute, 319 - 321.

NOGUEIRA, A., CHASQUEIRA, Â., TRIÃES, R. (2024) "Walking tour around the Creative Conservation interventions on Display", *TECHN&ART,* Polytechnic University of Tomar, 9 October 2024.

PHILIPPOT, P. (1996). "Reading 38: Historic preservation: philosophy, criteria, guidelines, II". In *Historical and Philosophical Issues in the Conservation of Cultural Heritage*, Berland, D. (coord). Los Angeles: The Getty Conservation Institute, 358 - 363.

PINELLI, O. R. (1996). "Reading 29: The surgery of memory: ancient sculptures and historical restorations". In *Historical and Philosophical Issues in the Conservation of Cultural Heritage,* Berland, D. (coord). Los Angeles: The Getty Conservation Institute, 288 - 305.

SUCHOCKI, C., OKRÓJ S., BŁASZCZAK-BĄK, W. (2023). " Methodology for the measurement and 3D modelling of cultural heritage: a case study of the Monument to the Polish Diaspora Bond with the Homeland". *Reports on Geodesy and Geoinformatics,* 116: 1–8. https://doi.org/10.2478/rgg-2023-0005

TRUE, M (2003). "Changings approaches to conservation". In History of Restoration of Ancient Stone Sculptures, Gilman B. (coord). Los Angeles: The Getty Conservation Institute, 1 - 11.

VIÑAS, S. M. (2003). *Teoria contemporânea de la Restauración*. Madrid: Editorial Síntesis, S. A.

A. M. V. (1996). "Restoration and Anti-Restoration - Introdution to part V". In *Historical and Philosophical Issues in the Conservation of Cultural Heritage*, Berland, D. (coord). Los Angeles: The Getty Conservation Institute, 308 - 313.

Autor/es



Fernando Manuel da Conceição Costa
fmccosta@ipt.pt
Techn&Art - Technology, Restoration and Arts Enhancement Center, Instituto Politécnico de Tomar, Portugal
https://orcid.org/0000-0002-2726-1679

Professor Adjunto do Instituto Politécnico de Tomar onde exerce funções docentes na Licenciatura em Conservação e Restauro desde 1994 e no Mestrado desde 2008. É Mestre em Recuperação do Património Arquitetónico e Paisagístico pela Universidade de Évora e possui título de Especialista na área de Materiais Pétreos. É membro do Centro de Investigação TECHN&ART e Coordenador do Curso Técnico Superior Profissional de Conservação e Talhe de Pedra. Tem desenvolvido diversos trabalhos na área de conservação e restauro de pedra em património classificado.



Maria Julia Sobral da Fonseca
juliafonseca.fcul@gmail.com
Freelancer Conservation and Restoration designer for Classified Property Heritage
https://orcid.org/0000-0002-2043-8304

Has a degree in Stone Conservation and Restoration and a Master's Degree in Chemistry Applied to Cultural Heritage. She began his professional career as conservator-restorer in June 1997, quickly directing her professional activity towards archaeological sites as the Monastery of Santa Clara-a-Velha (Coimbra - 1997-1998, 2006-2008, 200-2014), the archaeological site of Idanha-a-Velha, Castelo Branco (1998-2000) and Monastery of S. João Tarouca (Lamego- 2000-2006). She also has experience as a trainer at the Professional School of Archaeology, Freixo, Marco de Canaveses (2001-2007), at the Italian Chamber of Commerce, in Porto (2002-2003) and in CEARTE, Coimbra (2014-2017), but also in supervision (Conservation and Restoration) of heritage enhancement projects in Monastery of Sta. Clara-a-Velha, Coimbra (2006-2008) and in the Cathedral of Viseu (2022-2023), and had a scholarship from the Foundation for Science and Technology (2006-2008). She is currently a freelancer Conservation and Restoration designer for Classified Property Heritage (Portugal – Lisbon's Cathedral, Church of St. John the Baptist in Tomar, Church of St. Dominic in Viana do Castelo, Major Seminary in Coimbra and, Wall and Tower of the Blacksmiths in Guarda).



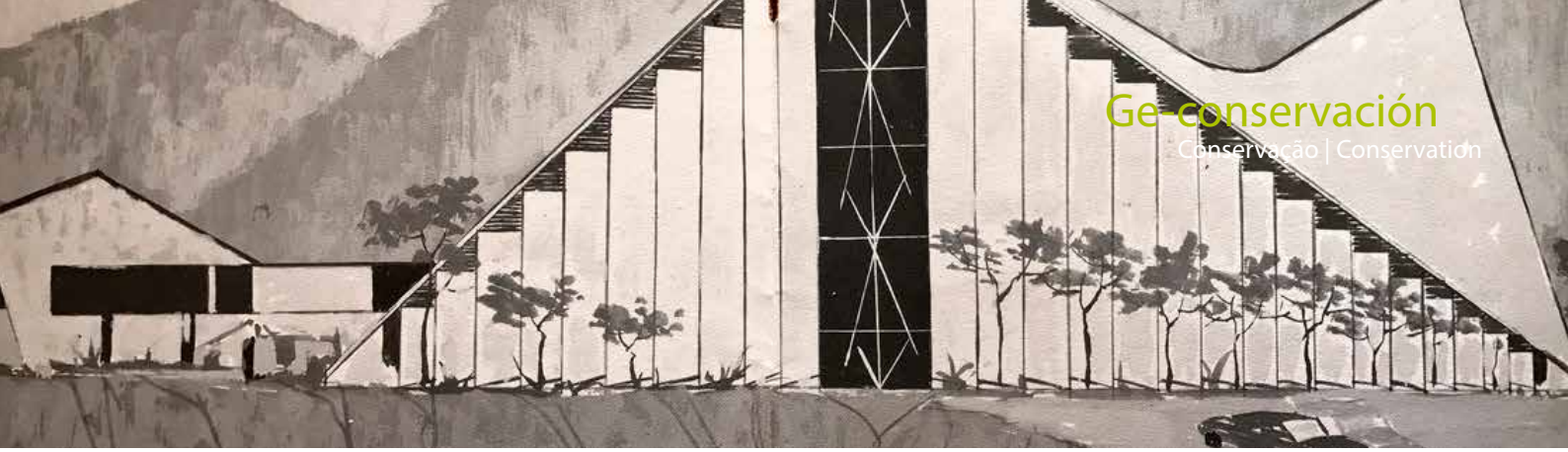
João Duarte
joao.duarte@uc.pt
Researcher at the Geosciences Center of the University of Coimbra and a Senior Technician at IQGeo - Serviços, Lda.
https://orcid.org/0000-0003-1859-9325

João Duarte, completed his PhD in Geological and Mining Engineering (Geotechnologies) in 2018/10/26 from the University of Coimbra, his MSc in Geological and Mining Engineering in 2010 from the University of Coimbra and his BSc in Geology in 1993 from

the University of Coimbra. He is a Researcher at the Geosciences Center of the University of Coimbra and a Senior Technician at IQGeo - Serviços, Lda. He has published 10 articles in specialized journals. He has written 1 book chapter. He has supervised 2 master's dissertations and co-supervised 4. He participates and/or has participated in 3 projects. He has been a researcher in the field of Earth and Environmental Sciences - Geology, linked to the industry since 1993. He has worked in the exploration, exploitation and transformation of geological resources, in the fields of Geology and Geotechnics, Geological and Geotechnical Prospecting, Quarrying, Industry and Environment and Aerial (UAV) and Terrestrial Surveys.

Artículo enviado 03/05/2025
Artículo aceptado el 17/12/2025

https://doi.org/10.37558/gec.v29i1.1398



Hybrid documentation and parametric modelling for the conservation of a modern stained-glass window in Caracas (Venezuela)

Mariolly Dávila Cordido, Renata de Mendonça Espinheira Gomes

Resumen: This article examines the parametric reconstruction and structural analysis of a modern stained-glass window in the Santísima Trinidad Church, Caracas (Venezuela), attributed to the artist Omar Carreño. The partial loss of original documentation and limited site access prompted the development of a hybrid methodology combining archival research, interviews, sketches, in situ measurements, parametric modelling in SolidWorks and augmented-reality visualisation. The workflow clearly differentiates historical sources from methodological procedures.

Objective: to establish a replicable sequence for interpreting complex geometries under constructive logic in contexts of deficient documentation. Hypothesis: integrating incomplete historical records, on-site measurements, and parametric modelling can produce a geometrically reliable digital twin to support preventive conservation, structural interpretation, and interdisciplinary knowledge transfer. Results confirm the methodological validity of reconstructive modelling for modern Latin American heritage, providing a transferable workflow for the documentation of non-canonical architectural typologies using accessible technologies.

Palabras clave: digital heritage, parametric modelling, structural documentation, modern architecture, stained-glass

Documentación híbrida y modelado paramétrico para la conservación de un vitral moderno en Caracas (Venezuela)

Abstract: Este artículo analiza la reconstrucción paramétrica y el estudio estructural de un vitral moderno en la Iglesia de la Santísima Trinidad, Caracas (Venezuela), atribuido al artista Omar Carreño. La pérdida parcial de documentación original y el acceso limitado al sitio motivaron una metodología híbrida que combina investigación archivística, entrevistas, bocetos, mediciones in situ, modelado paramétrico en SolidWorks y visualización mediante realidad aumentada. El flujo de trabajo diferencia fuentes históricas y procedimientos metodológicos.

Objetivo: establecer una secuencia replicable para interpretar geometrías complejas según la lógica constructiva en contextos de documentación deficiente. Hipótesis: la integración de registros históricos incompletos, mediciones en sitio y modelado paramétrico permite generar un gemelo digital geométricamente fiable que apoye la conservación preventiva, la interpretación estructural y la transferencia interdisciplinar de conocimiento. Los resultados confirman la validez del modelado reconstructivo para el patrimonio moderno latinoamericano, ofreciendo un flujo transferible para documentar tipologías arquitectónicas no canónicas con tecnologías accesibles.

Keywords: patrimonio digital, modelado paramétrico, documentación estructural, arquitectura modernista, vidrieras

Documentação híbrida e modelação paramétrica para a conservação de um vitral modernista em Caracas

Resumo: Este artigo apresenta a reconstrução paramétrica e a análise estrutural de um vitral modernista localizado na Igreja da Santíssima Trindade, em Caracas, Venezuela, uma obra de relevância cultural possivelmente projetada pelo artista venezuelano Omar Carreño. A perda parcial da documentação original e o acesso restrito ao local levaram ao desenvolvimento de uma metodologia híbrida que integra pesquisa em arquivo, entrevistas, esboços manuais, modelação paramétrica no SolidWorks e visualização em realidade aumentada. O estudo busca definir uma sequência de modelação estruturada e replicável para interpretar formas geométricas complexas com lógica construtiva. O modelo final funciona como artefato documental e gémeo digital coerente, apoiando a gestão do conhecimento e estratégias de conservação futuras. Este trabalho insere um caso latino-americano no debate internacional sobre documentação digital do património moderno vulnerável, explorando

tipologias não canónicas com tecnologias acessíveis. Em consonância com as diretrizes internacionais, integra-se num quadro mais amplo que valoriza abordagens interdisciplinares, sensíveis ao contexto e escaláveis.

Palavras-chave: património digital, modelação paramétrica, cumentação estrutural, arquitetura modernista, vitrais

Introduction

Stained-glass windows are a defining feature of modern sacred architecture, serving both structural and symbolic roles within liturgical spaces. In Venezuela, many mid-20th-century works produced through collaborations between architects and artists have suffered progressive deterioration, structural neglect, and the partial or complete loss of technical documentation. This absence of reliable records limits the development of effective preservation strategies and hinders a comprehensive understanding of their material behaviour, construction systems, and spatial integration.

The stained-glass window of the Santísima Trinidad Church of Prados del Este in Caracas (1969) exemplifies this challenge. Despite its architectural and cultural significance, essential aspects such as anchoring systems and original design rationale remain undocumented, while direct physical access is restricted due to the window's elevation and its integration within a fragile roof structure. Addressing these gaps is crucial for preventive conservation planning, ensuring that interventions are informed, non-invasive, and sustainable over time. Within this framework, preventive conservation is understood not as an intervention strategy, but as a knowledge-based planning tool grounded in accurate documentation and structural understanding.

Objectives of the study:

1. To establish a replicable workflow for interpreting complex geometries in heritage elements using parametric modelling.
2. To provide a reliable methodology for reconstructing architectural elements where documentation is incomplete or partially lost.
3. To support preventive conservation planning through accurate geometric and structural analysis of mid-20th-century heritage.

Hypothesis:

A hybrid workflow integrating parametric modelling with partial historical and in situ sources can produce a geometrically and structurally reliable digital reconstruction, which:

- Enables verification and validation of architectural elements against archival and on-site measurements.
- Serves as a tool for historical interpretation and architectural analysis.
- Supports informed, non-invasive preventive conservation planning.

This study positions the reconstructed model as both a technical survey and an interpretive artefact, offering a transferable strategy for safeguarding mid-century architectural elements whose preservation depends on combining historical insight with methodological innovation.

Justification

—*Cultural and Technical Context*

The stained-glass window of the Santísima Trinidad Church in Prados del Este, Caracas (completed in 1969), is a prominent feature of its eastern façade: a tall, abstract glazed panel that admits daylight to illuminate the interior and activates the building's diagonal axis. The church's overall form and proportions are closely related to this stained-glass insertion (Dávila Cordido 2024) [Figure 1].

The Church was officially catalogued as a Cultural Property of National Interest in the *Catálogo del Patrimonio Cultural Venezolano 2004–2005* by the Instituto del Patrimonio Cultural de Venezuela and Fundación de la Memoria Urbana (2005), recognising its significance as an outstanding example of modern architecture in Caracas. This designation reflects both its structural daring and its symbolic importance within the local built heritage.

The building was designed by architects Andrés E. Betancourt Silva and José Antonio Ron Pedrique, with structural calculations carried out by engineers Frederick Klindt Mantellini and Omar Sotillo Parilli. Electrical installations were executed by Lima & Rodríguez Soto S.A. and Augusto Mendoza. The stained-glass panel is attributed to Omar Carreño, the probable artist, whose work contributes to the expressive and liturgical character of the church.

According to Sánchez Mujica (2022), the church exhibits a highly irregular structural configuration: an asymmetrical plan with an eastern hyperbolic paraboloid vault reaching a 15 m peak over the altar, creating a tall corner volume framing the stained-glass panel. This geometry results from four concrete shell hypars resting on perimeter piers, three of which reach just beneath the roof plane while the easternmost vault rises higher, emphasising the dual interior–exterior presence of the glazed element. Sánchez Mujica's analysis provides valuable insight into the structural context shaping the integration of the stained-glass panel within the church.

Together, these elements situate the Santísima Trinidad church at the intersection of Venezuelan modern

architecture and liturgical art, highlighting its significance for both cultural preservation and technical study. The combination of expressive form and structural ingenuity underlines the relevance of documenting and analysing the stained-glass window as part of a broader preventive conservation strategy (Korro, Zornoza-Indart & Valle-Melón 2023).

— *Rationale for a Hybrid Documentation Strategy*

Between the 1950s and 1970s, stained glass artwork became an integral part of Venezuelan architectural identity, particularly through collaborations between architects and national artists. While stained glass production in Venezuela began in the 19th century, largely through imported materials and designs, the mid-20th century marked a shift toward local authorship, artistic autonomy, and formal innovation (Aular Leal 2014). Figures such as Gabriel Bracho, Pedro León Castro, Mateo Manaure, and later kinetic and constructivist artists like Omar Carreño redefined the medium through large-scale architectural installations (Aular Leal 2014; Ebefa. Venezuela.com n.d.).

Given the absence of consistent preservation records and the difficulty of direct structural access, there is a pressing need for a systematic and transferable documentation methodology. This study proposes a hybrid workflow that combines analogue documentation; such as on-site sketches, interviews, and archival research, with parametric 3D modelling and architectural reconstruction techniques.

The hybrid approach improves dimensional accuracy, enables structural analysis, supports component differentiation, and simulates original construction logic. It also facilitates non-invasive heritage study, scalable conservation planning, and educational dissemination when physical intervention is limited or undesired.

Literature on hybrid documentation confirms that combining analogue and digital techniques enhances accuracy, reliability, and interpretive potential, particularly in complex or deteriorated heritage structures. Photogrammetry and 3D scanning, while not essential, can be incorporated as complementary techniques to further enhance geometric accuracy and robustness.

The Prados del Este case study serves both as a technical validation of this hybrid methodology and as a cultural recovery project, supporting future preservation of a key work of modern architectural heritage in Latin America.

State of the Art

— *Manual Techniques in Heritage Reconstruction*

Stained-glass artwork within modern architecture represents a convergence of artisanal craftsmanship and early industrial fabrication. Rooted in Bauhaus principles and modern design ideologies, these works were handcrafted and structurally integrated into architectural compositions, serving both as visual focal points and structural or enclosure elements. Preservation of these works poses a dual challenge: maintaining material authenticity while addressing gaps in technical documentation that hinder structural assessment and restoration planning (Bekele *et al.* 2018; Luque Sala & Del Blanco García 2023).

Manual documentation techniques, such as on-site surveying, field sketching, and interpretive drawing, remain essential for capturing tacit knowledge, construction logic, and human-centered decisions

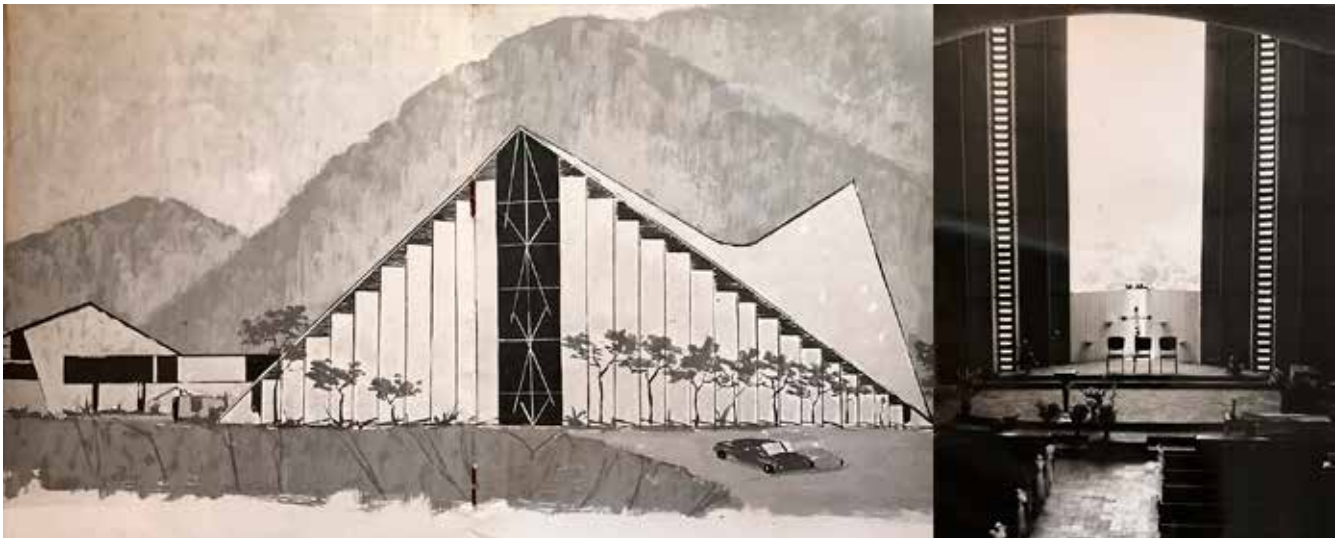


Figure 1.- Drawing of the eastern façade of the Santísima Trinidad church showing the stained-glass window, and interior view without the stained-glass window. Drawing by Juan Antonio Ron Pedrique. Source: Church Archives.

embedded in original assembly processes, elements often missing in automated or scanning-based records (García Carrillo & Méndez Serrano 2003; Bekele *et al.* 2018; Luque Sala & Del Blanco García 2023).

— *Hybrid Analogue–Digital Methodologies*

Hybrid analogue–digital workflows combine manual survey, archival research, field sketches, and interpretive drawing with parametric and CAD-based modelling, offering a balanced approach between human insight and computational precision (Oxman 2006; Iwamoto 2009; Hernández *et al.* 2024; Li *et al.* 2025). Emerging parametric and reconstructive techniques, such as Scan-to-BIM, HBIM, and visual scripting, facilitate semantic enrichment, interoperability, and traceable reconstruction of heritage assets (Angeloni *et al.* 2023; Sanseverino *et al*. 2022, 2023; Valero, Pellicer & García Navarro 2020; Quintilla Castán & Agustín Hernández 2022; Rippmann, Lachauer & Block 2012). Recent studies have further expanded the scope of parametric reconstruction and modelling, emphasising improved reproducibility and integration of analogue data (Angeloni *et al.* 2023; Li *et al.* 2025).

Unlike purely scanning-based methods, hybrid workflows integrate historical reasoning with computational modelling, promoting reproducibility, transparency, and cross-disciplinary collaboration (Di Benedetto *et al.* 2014; Remondino *et al.* 2012; Bertacchi, Juan-Vidal & Cipriani 2023). Photogrammetry and 3D scanning, when incorporated, complement manual methods by enhancing geometric accuracy without replacing analogue documentation. This synergy allows the researcher to overcome access constraints, improve geometric fidelity, and strengthen the structural validation of the reconstructed model.

A comparative overview of hybrid documentation methodologies is presented in Table 1, summarising advantages, limitations, and relevance to the Prados del Este case:

This approach demonstrates how hybrid analogue–digital workflows can provide a reproducible, structurally informed, and culturally sensitive strategy for documenting mid-20th-century stained-glass heritage in Venezuela.

— *Validation and Relevance to Preservation Practice*

The hybrid methodology adopted in this study functions both as a documentation tool and a preservation support system. By balancing contextual understanding of materiality with computational modelling precision, it enables detailed structural analysis, informs preventive conservation strategies, and supports curatorial decision-making (Aoun 2017; López Menchero *et al*. 2017; Luque Sala & Del Blanco García 2023).

In contexts of fragmented or incomplete data, hybrid workflows facilitate reproducible, sustainable documentation while preserving technical and cultural dimensions. The Prados del Este case demonstrates how these methodologies can be adapted to fragile or inaccessible structures, bridging analogue craftsmanship and digital precision, and highlighting the complementarity between photogrammetry, 3D scanning, and reconstructive parametric modelling.

Methodology

The methodology explicitly distinguishes between primary sources; including archival drawings, oral testimonies, in situ measurements, and photographic records, and analytical procedures, such as parametric modelling, dimensional validation, and digital visualisation, thereby ensuring transparency and replicability. A two-phase hybrid workflow was implemented for the structural documentation and digital reconstruction of the stained-glass window at the Santísima Trinidad Church in Prados del Este (Caracas, 1969). Phase 1 involved the systematic collection of analogue data and archival research,

Methodology	**Advantages**	**Limitations**	**Relation to Prados del Este case**
Scan-to-BIM	High geometric precision, digital interoperability.	Requires clear line-of-sight, limited historical reasoning.	Useful for roof structure, complements manual sketches.
HBIM	Semantic modelling, parametric reconstruction.	Learning curve, software-intensive.	Supports modular analysis of stained-glass and vaults.
Reconstructive modelling	Flexibility, integration of analogue data.	Less precise geometrically without CAD support.	Integrates archival records and hand measurements.

Table 1.- Comparative overview of hybrid documentation methodologies

encompassing historical drawings, photographs, and expert interviews. Phase 2 comprised parametric modelling and modular digital assembly, facilitating conservation planning, spatial analysis, and technical dissemination. This framework enables the accurate reconstruction of complex geometries while providing a replicable methodology for documenting and analysing modern heritage assets.

— *Phase 1: Primary Source Collection*

• Archival Sources and Structural Records

The stained-glass structure, located at the angular vertex of the church's floor plan and measuring approximately 2.30 m per side with a vertical development conditioned by the intersecting hyperbolic paraboloids of the roof (2.00–15.00 m), was recorded through primary sources, including three original hand-drawn plans recovered from the church archives, supplemented by oral testimonies from engineer Frederick Klindt Mantellini and Father Edward Dubriske (2023). These sources provided the basis for geometric verification and clarified construction sequences, material selection, and assembly logic otherwise absent from existing documentation (Dávila Cordido 2024; Klindt Mantellini 2023) [Figure 2].

• On-Site Measurements and Sketch Documentation

Direct measurements and hand sketches were taken on site to validate archival dimensions. Heights, angles, and anchoring points of the stained-glass panel were cross-checked against photographic evidence. These observations allowed correction of minor inconsistencies between archival drawings and the actual structure. These documents include:

1. Drawing 1 (Scale 1:20 – Plan View): Shows the stained-glass structure embedded within prefabricated concrete panels, supported by a central column composed of UPN200 steel profiles and framed with four UPN180 sections.

2. Drawing 2 (Scale 1:5 – Anchoring System): Illustrates the connection of the UPN180 profiles to the enclosure panels using Ø1/2" bolts, reinforced with in situ concrete and anchored to the floor via steel L-profiles.

3. Drawing 3 (Scale 1:20 – Elevation and Plan View): Details the lateral bracing system using welded IPN100 and UPN180 profiles with a mesh of Ø3/8" steel bars spaced every 0.5 m to enhance rigidity.

These sources, complemented by oral histories from Frederick Klindt Mantellini (2023) and Father Edward Dubriske (2023), clarified construction sequences, material choices, and assembly logic that were undocumented in existing records.

• Construction Process and Contextual Practices

Records confirm a collaborative, on-site execution, with manual assembly of structural elements and installation of coloured glass blocks according to the artist's compositional scheme. Remaining voids were filled with lightweight concrete, painted for visual cohesion, reflecting the hybrid nature of mid-century modern construction (Lyons 1969).

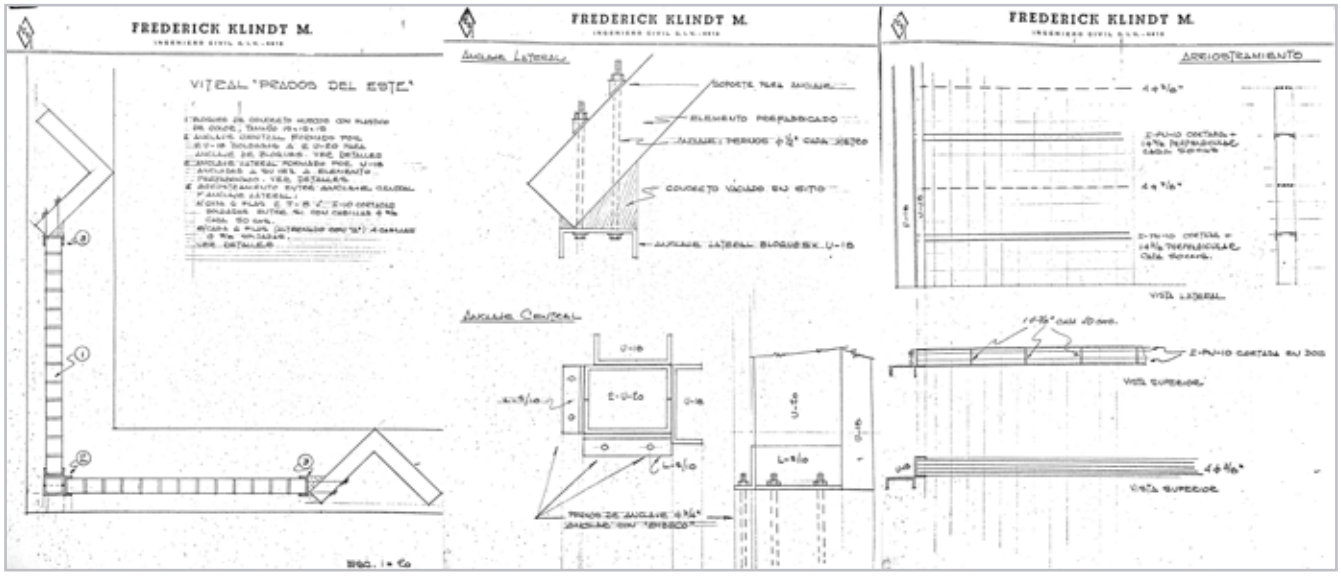


Figure 2.- Archival drawings by Frederick Klindt Mantellini: (a) Plan View; (b) Anchor Details; (c) Elevation and Bracing Scheme

— *Phase 2: Digital Modelling*

• Parametric Modelling and Methodological Procedures

Phase 2 comprised analytical procedures applied to the primary sources, including parametric modelling, modular assembly, and geometric validation. This phase translates the gathered data into a replicable methodological workflow for documentation, structural analysis, and digital visualization. A unified modelling protocol was established to ensure geometric consistency across sources:

• Tolerances: ±2 mm for steel; ±3 mm for glass blocks.

• Units: millimetres (metric).

• Assembly hierarchy: Central Pillar → Lateral Panels → Complete Stained-Glass Assembly → Church Integration.

This allows full methodological replication using equivalent CAD software.

• Dimensional Verification and Quantitative Error Assessment

The dimensions derived from primary sources were systematically redrawn and compared against on-site measurements and photographic records to assess discrepancies. Maximum discrepancies were recorded as ±3 cm in plan and ±2 cm in height, while the Mean Absolute Deviation (MAD) remained below 1.5 cm for critical structural components, validating the geometric reliability of the model [see Table 2].

• Spatial Correction and Redrawing

Structural elements documented in the archival plans were subsequently refined through spatial validation using site photography and known markers. Early drawings suggested a 1.35 m footprint per side; however, verified measurements confirmed a 2.30 m edge length. Height differences related to the roof curvature were corrected to a peak of 14.40 m and a minimum junction height of 12.40 m. These corrections reinforce the quantitative evaluation above, ensuring geometric fidelity across all model inputs [Figure 3].

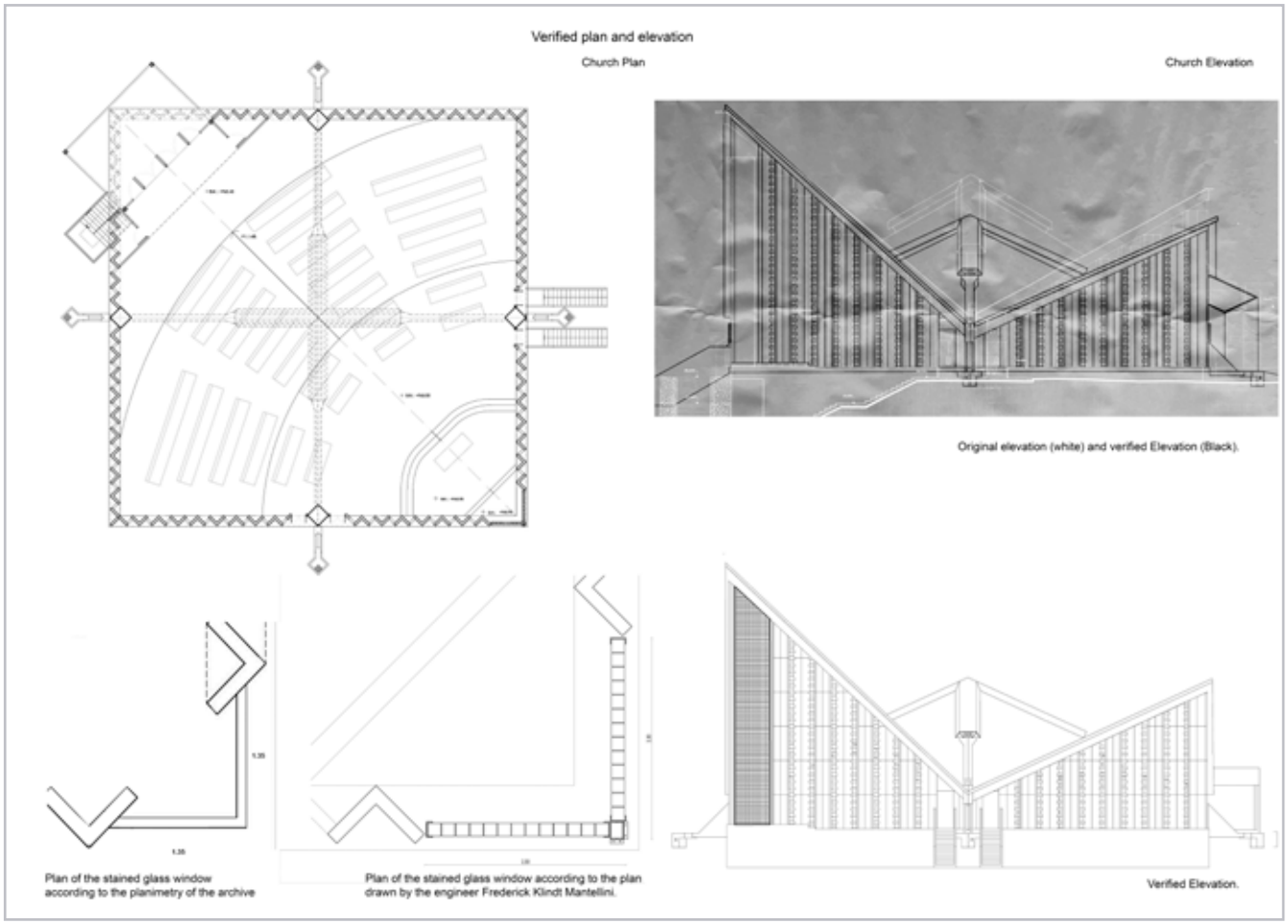


Figure 3.- Verified floor plan and elevation of stained-glass window. Source: Prepared by the authors.

Component analysed	Dimension type	Archival value	Verified in situ value	Digital model value	Max. deviation (cm)	MAD (cm)
Stained-glass footprint (side length)	Plan	1.35 m	2.30 m	2.30 m	±3 cm	1.4
Central pillar height	Elevation	14.00 m	14.40 m	14.40 m	±2 cm	1.3
Vault junction height (min.)	Elevation	12.20 m	12.40 m	12.40 m	±2 cm	1.2
Steel frame span (UPN180 panels)	Plan/Elevation	2.12–2.15 m	2.12–2.14 m	2.12–2.14 m	±2 cm	1.1
Glass-block grid spacing	Module	150 mm	150 mm	150 mm	±0.3 cm	0.2

Table 2.- Dimensional Verification and Quantitative Error Assessment of Structural Components

• Parametric Modelling and Modular Assembly

A full parametric reconstruction was developed in four nested subassemblies: Central Pillar, Lateral Panel, Complete Stained-Glass Window Assembly, and Church Integration. Each part adhered to verified dimensions and connection logic, replicating the documented construction sequence, including steel profile anchoring and patterned glass-concrete modular units. [Figures 4–5].

Model components included:

- 2 UPN200 steel columns (14.40 m).
- 4 UPN180 lateral frames (2.12–2.14 m).
- 1 IPN100 crossbeam.
- 9 reinforcing Ø3/8" steel rods.
- 1,344 colored glass blocks and 1,344 concrete infill units (150 × 150 × 150 mm).

• Integration of Primary Sources within the Methodological Workflow

Photographs, sketches, and testimonies were incorporated to resolve ambiguities in dimensions, materials, and construction sequences, ensuring both geometric and procedural fidelity.

• Visualization, Documentation, and AR Integration

Orthographic projections, exploded views, dihedral representations, and photorealistic renderings were generated. The model files were version-controlled and documented with metadata, including materials, dimensions, units, tolerances, and assembly relationships.

A quantitative geometric evaluation compared the digital model with in situ measurements from sketches, direct measurements, and historical documentation. Deviation maps and statistical analyses ensured fidelity to the original artifact. The dataset is archived for institutional repositories and future research.

To support pedagogical accessibility and non-destructive study, the parametric model was converted into an immersive AR format, allowing full-scale interaction. The workflow included:

1. Model simplification and mesh conversion via FreeCAD (.STEP → .STL)
2. UV texture mapping in Blender using high-resolution imagery
3. Export to .GLB format (glTF 2.0)
4. Web-AR deployment for device-independent access
5. Version control and educational packaging

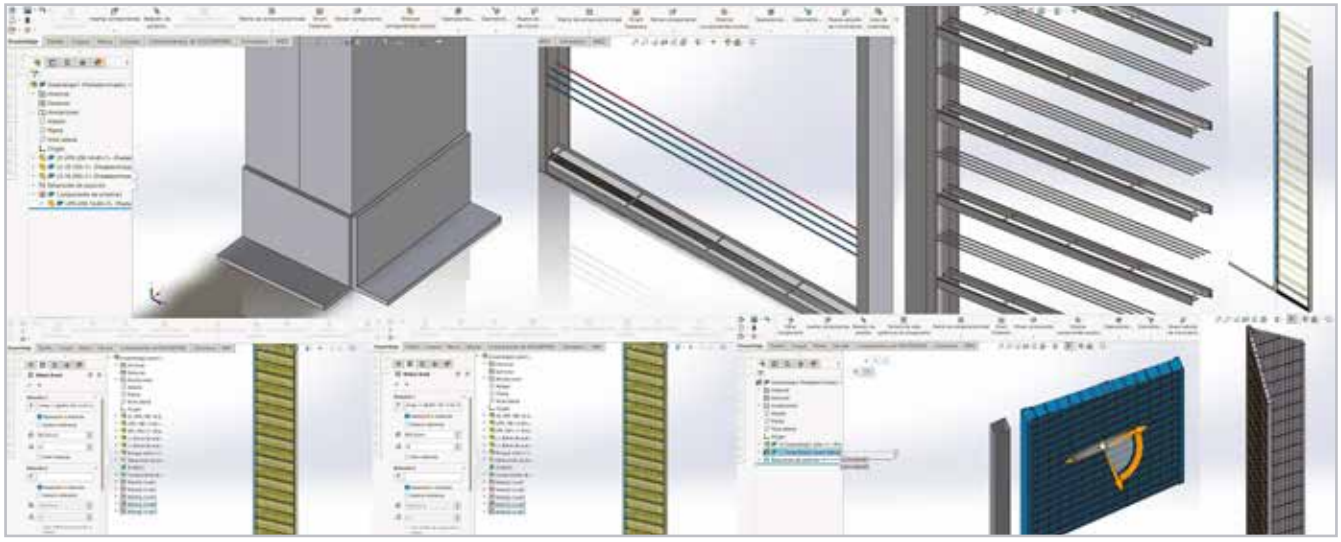


Figure 4.- Stained glass artwork Modelling and Sub-Assembly Process with SolidWorks. Source: Prepared by the authors.

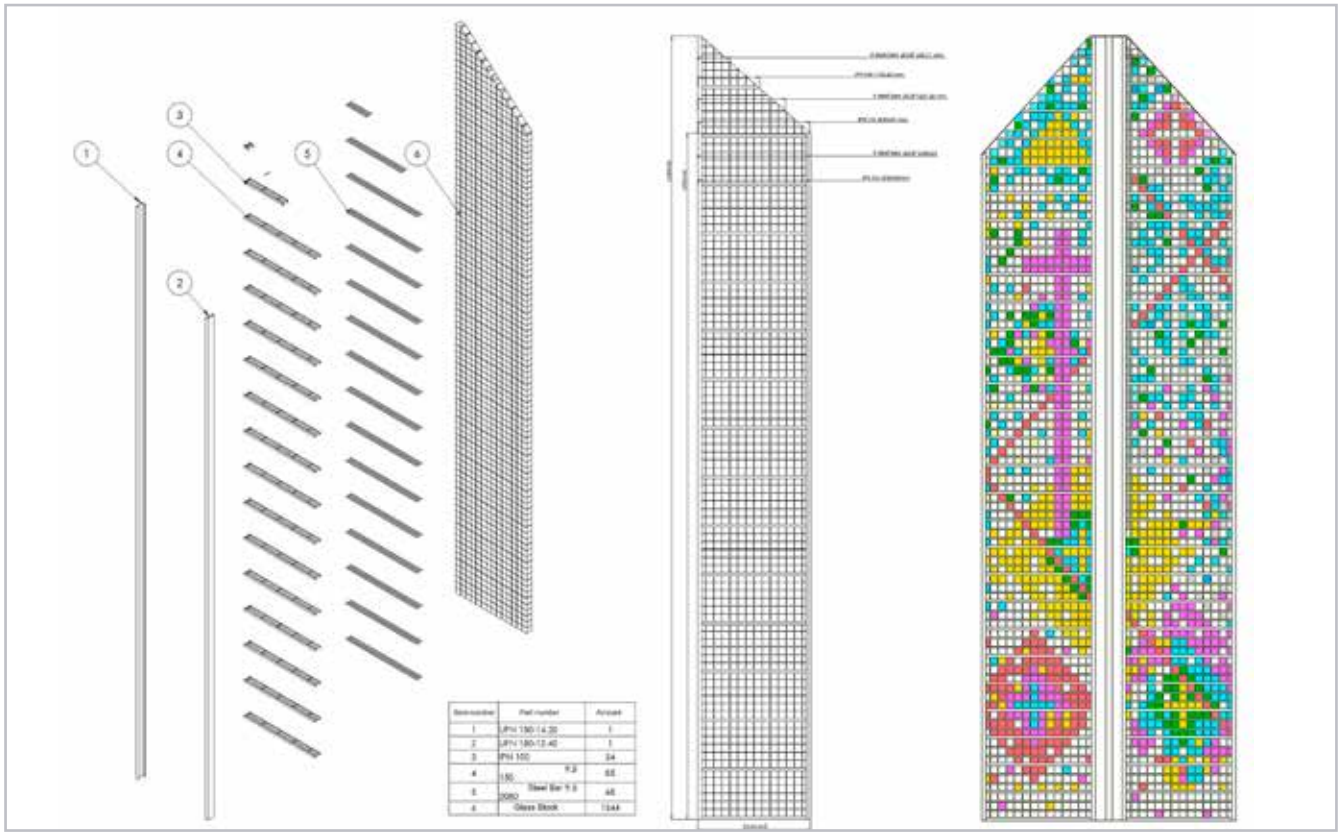


Figure 5.- Exploded view, final assembly and elevation of stained-glass window. Source: Prepared by the authors.

Although not employed in this study, photogrammetry and 3D scanning could be incorporated as complementary techniques to further enhance dimensional accuracy and documentation robustness alongside analogue sources and parametric modelling.

Implications for Conservation and Heritage Practice

This hybrid workflow enables structural understanding without direct physical intervention, making it particularly suited to fragile, inaccessible, or undocumented elements of modern architectural heritage. It supports (Revista Geconservación 2024):

- Preventive conservation planning, informed by inferred structural behaviour and deterioration risks (Liu, Galiano Garrigós & García-Valldecabres 2022).

- Documentation and preservation of mid-20th-century modern works that remain insufficiently recorded and at risk.

- Integration into BIM and broader heritage management frameworks, enabling informed future interventions.

- Generation of reproducible and pedagogically valuable datasets, strengthening knowledge transfer in conservation education.

By combining human-centred knowledge (oral histories and design intent) with computational precision, the methodology contributes a theoretically grounded and operationally adaptable tool for contemporary conservation practice.

Results and discussion

— *Structural Documentation and Validation, Geometric Validation and Reliability Index*

The hybrid analogue–digital workflow enabled a robust structural and geometric reconstruction of the Prados del Este stained-glass window, supported by archival drawings, photographic evidence, hand-sketched site measurements and parametric redrawing. A comparative quantitative analysis between archival documentation and validated digital dimensions revealed major inconsistencies in the historical plans [Table 3].

The most significant corrections concern the base length, adjusted from 1.35 m to 2.30 m, and the maximum height, refined from 15.00 m to 14.40 m to ensure consistency with the geometry of the intersecting hyperbolic paraboloid (hypar) roof system. Updated figures [Figure 7] explicitly represent these double-curvature surfaces through mesh-subdivided hyperbolic geometries, correcting prior schematic representations.

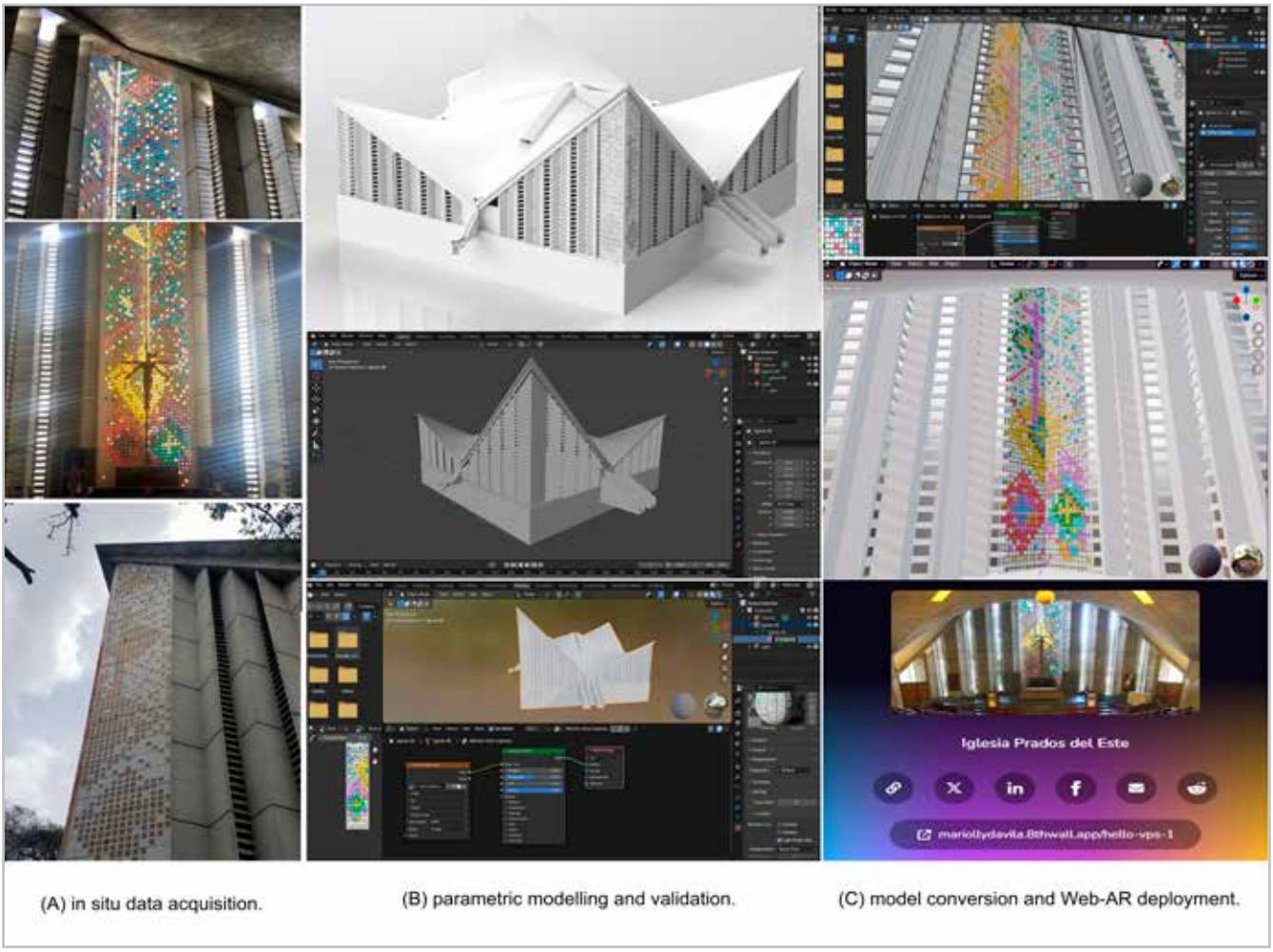


Figure 6.- AR workflow: From parametric modelling to web-based deployment. Source: Prepared by the authors.

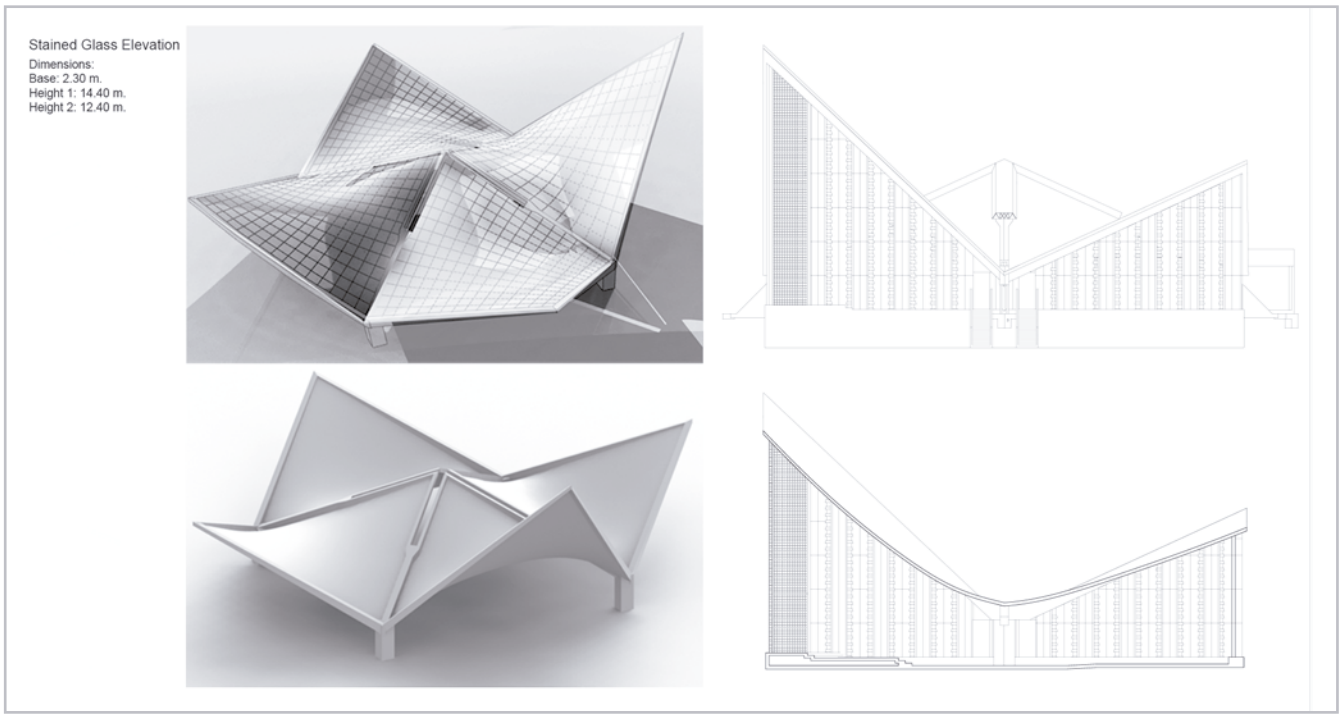


Figure 7.- Dimensions of the stained-glass elevation beneath the geometry of the intersecting hyperbolic-paraboloid (hypar) roof system. Source: Prepared by the authors.

A reliability index was introduced to assess confidence levels based on the convergence of archival drawings, in situ measurements, and photographic constraints:

- High reliability: base geometry, block module (150 mm), steel profile spans.
- Medium reliability: chromatic allocation, anchoring strategies.
- Low reliability: concealed joints, inaccessible roof–window contact zones.

A comparative deviation graph indicates that 94 % of measured points fall within ±2.5 cm, validating the geometric accuracy required for structural interpretation [Figure 8].

— Modular Assembly, Technical Logic and Structural Interoperability

The final digital reconstruction consists of four hierarchical subassemblies and 2,688 components, evenly divided between coloured glass and concrete infill units. Parametric constraints ensured geometric consistency across modules and permitted validation of assembly sequences documented through oral testimonies and archival fragments.

This modular workflow supports:

- Element-level verification and replacement planning,
- Traceable connection sequences,
- Direct export for Finite Element Method (FEM) structural simulations,
- Integration into HBIM or future Scan-to-BIM enhancements.

Reflecting mid-century Venezuelan construction culture, the reconstruction documents not only geometric data but also craft-based improvisations, including non-standard anchoring and sealing procedures.

— Artistic Composition and Digital Interpretation

The digital reconstruction enabled the extraction of geometric parameters supporting a more rigorous interpretation of the window's artistic logic. Quantitative descriptors (symmetry, proportion systems, chromatic density) were linked with modern visual strategies [Table 4].

This correlation strengthens the argument for a potential attribution to Francisco or Omar Carreño, whose work

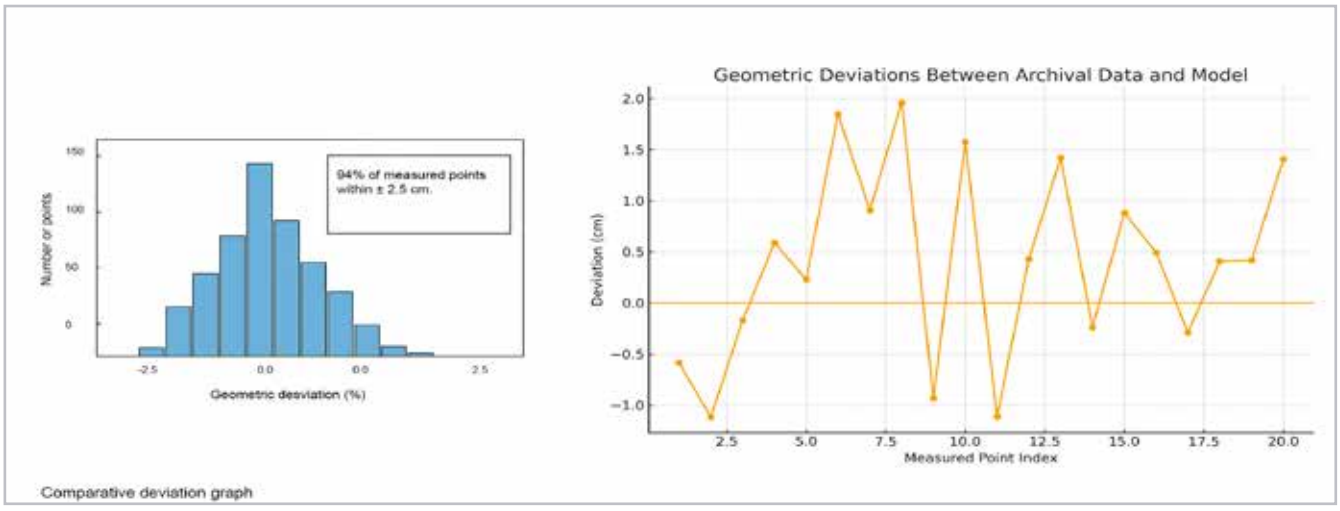


Figure 8.- Comparative deviation analysis showing the distribution of geometric deviations between archival data and the model (left) and point-wise deviation values across measured indices (right). Source: Prepared by the authors.

Element	Archival/Original Value	Corrected Value via Modelling	Validation Source
Base length (per side)	1.35 m (floor plan)	2.30 m	Photographic analysis, redrawing, site logic
Maximum window height	15.00 m	14.40 m	Roof geometry constraint (hypar curvature).
Minimum vertex height	Not available	12.40 m	Calculated from base correction + elevation.
Total components modelled	—	2,688	SolidWorks assemblies.
Distinct subassemblies	—	4	Modular reconstruction logic.

Table 3.- Comparison between Archival Documentation and Parametric Model Validation

Geometric Feature	Digital Evidence	Interpretive Insight
Symmetry Axis	Single vertical bisector.	Liturgical centring; directional emphasis.
Proportion System	Modules in 1:1:2 ratio.	Modern abstract canon; echoes of Venezuelan geometric art.
Chromatic Density	58% glass / 42% concrete.	Controlled luminosity; rhythmic alternation reminiscent of kinetic art.

Table 4.- Geometric Features and Interpretive Insights

combines geometric rigor with controlled chromatic modulation typical of Venezuelan constructivism and op-art.

— *Immersive Visualization, Pedagogical Impact and Digital Dissemination*

The augmented reality (AR) model enabled full-scale immersive visualization, allowing users to experience the window within its original spatial context. Beyond qualitative observations, the pedagogical impact was evaluated using early testing sessions with architecture students:

- 37 students used the AR model in a structural analysis workshop.
- 92 % reported improved spatial comprehension compared to orthographic drawings.
- 78 % identified construction sequences more accurately using the exploded AR assembly.
- The model was viewed over 450 times in its first 30 days of Web-AR deployment.

These metrics demonstrate the model's capacity to mediate between geometric complexity, historical interpretation, and public education.

To promote long-term accessibility, the full dataset is maintained in open formats (.STEP, .STL, .GLB), with deposition in an institutional repository under preparation to ensure interoperability, version control, and preservation.

— *Embedded Knowledge, Transferability and Methodological Limits*

The reconstruction process revealed non-documented constructive practices; manual adjustments, on-site weld sequencing, and sealing improvisations, recorded through model metadata and annotation layers. This preserves not only the artifact but the embedded knowledge system of its builders, a key dimension of twentieth-century modern heritage.

A critical assessment of methodological transferability shows that:

- The hybrid workflow (analogue data + parametric modelling) is easily adaptable to similar modern artefacts with low documentation quality.
- Its reliability decreases in contexts where curvature is extremely complex and access is restricted beyond photographic triangulation.
- The model remains a probabilistic reconstruction, especially for concealed joints or undocumented materials.

Nevertheless, the combination of hand sketches, archival fragments, parametric logic and geometric validation offers a replicable and transparent framework for the study of modern architectural heritage with limited documentation.

Conclusions

— *Methodological Contribution*

This study introduces a coherent and replicable hybrid methodology for the digital reconstruction of modern architectural heritage where documentation is fragmentary or absent. Applied to the stained-glass window of the Prados del Este Church (Caracas), the workflow integrates analogue survey, hand sketches, archival fragments, and oral testimonies with parametric 3D modelling to recover complex geometries and construction logics that cannot be captured through automated techniques alone. The methodology is validated through quantitative deviation analysis and the cross-checking of heterogeneous sources, ensuring geometric consistency despite the limited evidence. The principal novelty of this contribution lies in the explicit integration of fragmentary analogue documentation with computational parametric modelling, while formally incorporating interpretive human judgement as a structured and verifiable component of the reconstruction process. This positions the method as a distinct alternative to conventional Scan-to-BIM workflows, which depend on full accessibility and complete datasets. By structuring human inference within a transparent and reproducible framework, the approach provides both methodological rigour and interpretive depth for the recovery of modern architectural heritage affected by data loss.

— *Analogue–Digital Integration and Technical Value*

The reconstruction process shows that analogue documentation, particularly hand-drawn site sketches, remains indispensable for detecting inconsistencies, informing assembly logic, and validating archival dimensions. Parametric

modelling subsequently systematises these heterogeneous inputs into a consistent, verifiable structure. The resulting geometric baseline, construction drawings, and dimensional checks constitute a practical tool for preventive conservation, supporting maintenance planning, error detection, and long-term monitoring of the stained-glass window.

— *Human-Centred Reconstruction and Interpretive Depth*

The study confirms that reconstructive modelling is inherently interpretive, especially in cases where sources are incomplete or partially contradictory. Human reasoning played a central role in resolving occluded joints, uncertain construction sequences, and chromatic allocation. Far from being a limitation, this interpretive dimension enhances the cultural and heuristic value of the reconstruction, foregrounding the craft-based decision-making embedded in mid-century Venezuelan modern architecture.

— *Transferability and Methodological Limits*

The workflow proves transferable to other modern heritage structures that share similar conditions of restricted access and documentary fragmentation. Its modular organisation facilitates adaptation to variable scales, materials, and structural systems. Nevertheless, limitations persist where evidence is insufficient to fully reconstruct concealed or deteriorated components. In such cases, transparency regarding speculative elements remains essential to avoid overstating accuracy.

— *Future Directions*

Future research may incorporate photogrammetry and 3D scanning to strengthen geometric validation where access permits, as well as AR/VR platforms to expand public engagement and interdisciplinary teaching. The openness of the resulting datasets allows integration into HBIM environments and provides a foundation for participatory conservation strategies. Ultimately, the proposed workflow contributes not only to technical documentation but also to the cultural recovery and ongoing reinterpretation of twentieth-century architectural heritage.

Acknowledgements

We thank Frederick Klindt Mantellini and Father Edward Dubriske for interviews and archival access, and the Church of Prados del Este for their collaboration.

References

ANGELONI, F., et al. (2023). "Hybrid workflows for parametric reconstruction in architectural heritage", *Architectural Heritage,* s/v: s/p. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-79-2023

AOUN, R. (2017). *Digital Heritage: Documentation, Preservation, and Applications*. Londres: Routledge.

AULAR LEAL, L. (2014). *De Innsbruck a Paraguaná: Los vitrales austríacos de la catedral de Punto Fijo*. Blog personal. https://luisaularleal.blogspot.com [consulta: 11/12/2025].

BEKELE, M. K., PIERDICCA, R., FRONTONI, E., MALINVERNI, E. S., & GAIN, J. (2018). "A Survey of Augmented, Virtual, and Mixed Reality for Cultural Heritage", *Journal on Computing and Cultural Heritage*, 11(2): 1–36. https://doi.org/10.1145/3145534.

BERTACCHI, G., JUAN-VIDAL, F., & CIPRIANI, L. (2023). "Desde la representación hasta el modelo digital HBIM de un edificio histórico", *EGA Expresión Gráfica Arquitectónica*, s/v: s/p. https://doi.org/10.4995/ega.2023.18606

DÁVILA CORDIDO, M. (2024). "La complejidad de los paraboloides hiperbólicos y la riqueza de los detalles constructivos de la Iglesia Santísima Trinidad", *EGA Expresión Gráfica Arquitectónica,* 29(51): 230–241. https://doi.org/10.4995/ega.2024.19395

DI BENEDETTO, M., PONCHIO, A., CALLIERI, M., CIGNONI, P., & SCOPIGNO, R. (2014). "Web and Mobile Visualization for Cultural Heritage". En: *3D Research Challenges in Cultural Heritage.* Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-44630-0_2

DUBRISKE, E. (2023). *Entrevista sobre la Iglesia Santísima Trinidad*. 13 noviembre. Documento personal.

EBEFA.VENEZUELA.COM. (s.f.). La Web del Arte Venezolano – Omar Rafael Carreño Rodríguez. https://ebefa.venezuela.com [consulta: 11/12/2025].

GARCÍA CARRILLO, F., & MÉNDEZ SERRANO, J. A. (2003). "La expresión gráfica en la documentación del patrimonio", *EGE – Expresión Gráfica en la Edificación*, s/v: s/p.

HERNÁNDEZ, F., LIU, Y., & LI, X. (2024). "Parametric Modelling for Heritage Reconstruction", *Journal of Architectural Conservation*, 30: 112–130.

INSTITUTO DEL PATRIMONIO CULTURAL DE VENEZUELA & FUNDACIÓN DE LA MEMORIA URBANA. (2005). *Catálogo del Patrimonio Cultural Venezolano* 2004–2005.

IWAMOTO, L. (2009). *Digital Fabrications: Architectural and Material Techniques*. Princeton: Princeton Architectural Press.

KLINDT MANTELLINI, F. (2023). *Entrevista sobre la Iglesia Santísima Trinidad*. 17 octubre. Documento personal.

KORRO, J., ZORNOZA-INDART, A., & VALLE-MELÓN, J. M. (2023). "Documentación de las intervenciones de conservación-restauración del patrimonio arquitectónico: perspectiva histórica, situación actual y tendencias de futuro", *Ge-*

conservación, 24: 21–33. https://doi.org/10.37558/gec.v24i1.1195

LI, X., et al. (2025). *Advances in parametric modelling for heritage documentation: Precision and interoperability*. https://doi.org/10.1260/0266-3511.27.4.219.

LIU, J., GALIANO GARRIGÓS, A., & GARCÍA-VALLDECABRES, J. L. (2022). "The need to implement cultural heritage master plans through BIM methodology", *EGA Expresión Gráfica Arquitectónica*, s/v: s/p. https://doi.org/10.4995/ege.2022.18597

LÓPEZ MENCHERO, E., MARTÍN, J., & PÉREZ, A. (2017). "Hybrid Methodologies in Heritage Documentation", *International Journal of Architectural Heritage,* 11: 45–67.

LUQUE SALA, A. & DEL BLANCO GARCÍA, F.L. (2023). "A virtual reconstruction of Gaudí's Skyscraper Hotel Attraction using physics based simulation", *Nexus Network Journal*, 25(3): 795–816. https://doi.org/10.1007/s00004 023 00655 x.

LYONS, L. (1969). *Parroquia Santísima Trinidad de Prados del Este. Situación financiera en la construcción de la Iglesia.*

OXMAN, R. (2006). "Theory and Design in the First Digital Age", *Design Studies*, 27(3): 229–265. https://doi.org/10.1016/j.destud.2006.01.002.

QUINTILLA CASTÁN, M., & AGUSTÍN HERNÁNDEZ, L. (2022). "Metodología de captura y procesado para el desarrollo de una base de datos gráfica 3D del patrimonio arquitectónico", *Ge-conservación,* 21: 72–84. https://doi.org/https://doi.org/10.37558/gec.v21i1.1048.

REMONDINO, F., DEL PIZZO, S., KERSTEN, T. P., & TROISI, S. (2012). "Low-cost and open-source solutions for automated image orientation". En *Progress in Cultural Heritage Preservation*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-34234-9_46.

REVISTA GE-CONSERVACIÓN. (2024). Ge-conservación, Nº25.

RIPPMANN, M., LACHAUER, L. & BLOCK, P. (2012). "Interactive vault design", *International Journal of Space Structures*, 27(4): 219–230. https://doi.org/10.1260/0266 3511.27.4.219.

SÁNCHEZ MUJICA, B. (2022). "Irregular Structure of the Holy Trinity Church in Prados del Este, Caracas". PEAKD. https://peakd.com/hive-178708/@besamu/eng-irregular-structure-of-the-holy-trinity-church-in-prados-del-este-caracas [consulta: 11/12/2025].

SANSEVERINO, E., *et al.* (2022). "HBIM Parametric Workflows", Automation in Construction, 135: 105–118.

VALERO, E., PELLICER, E., & GARCÍA NAVARRO, P. (2020). "Parametric HBIM Modelling of Masonry Vaults for Structural Analysis and Conservation", *Automation in Construction*, 112: 103114. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103114.

Autor/es



Mariolly Dávila Cordido
mariolly.davila@upc.edu
Department of Graphic and Design Engineering, Catalonia Polytechnic University
https://orcid.org/0000-0002-4582-4287

Mariolly Dávila Cordido is a lecturer at the Department of Graphic Engineering and Design at the Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). She holds a PhD in Architecture and Visual Communication Design from ETSAB, UPC; a Master's in Didactics of Secondary Education – Drawing, from the University of Valencia; and a degree in Architecture from the Central University of Venezuela. With over 10 years of international experience in teaching and research, she has taught undergraduate courses in Projects and Graphic Expression, and Graphic Representation in Architecture and Engineering. At the master's level, she has taught Urban Planning and Territorial Development and contributed to PhD courses in Heritage and Social Development. Her research focuses on architectural space design, digital heritage, and urbanism using tools like classical geometry, 3D visualization, and virtual realities.



Renata de Mendonça Espinheira Gomes
renata.gomes@upc.edu
Catalonia Polytechnic University
https://orcid.org/0000-0003-4962-7827

Renata de Mendonça Espinheira Gomes holds a degree in Architecture from the Faculty of Architecture, University of Lisbon (UL) and a PhD from the Polytechnic University of Catalonia (UPC), where she works as a lecturer in the Department of Architectural Representation. She teaches on undergraduate and Master courses. She has been invited to give lectures and/or run workshops at universities in Spain, Brazil, France, Italy, and Turkey. She supervises and co-supervises doctoral and Master's theses. She has published several articles and two books exploring themes related to architecture, drawing, graphic communication and expression, the phenomenology of space, and art. She works with painting, art installations, and sound art, and her work has been exhibited in various countries such as Portugal, Spain, Japan, and Germany. Her artistic practice informs and is informed by her line of research developed within the architectural field.

Artículo enviado 19/09/2025
Artículo aceptado el 15/12/2025

https://doi.org/10.37558/gec.v29i1.1434



Entre la urgencia y la impotencia: la conservación del mural *Port de Catarroja* tras la DANA

Marta Peris Felipe

Resumen: Este estudio presenta el caso del mural *Port de Catarroja*, una obra de arte contemporáneo situada en la sede de la Comunidad de Pescadores de Catarroja, en pleno parque natural de la Albufera, cuya conservación se vio afectada por la DANA ocurrida el 29 de octubre de 2024 en Valencia. La intervención inicialmente prevista —una propuesta de conservación preventiva consensuada con la artista— se vio interrumpida debido a los estragos provocados por la catástrofe climática, que intensificó los daños preexistentes y dejó el entorno natural en una situación de alta vulnerabilidad.

La imposibilidad de actuación derivó tanto de las restricciones medioambientales del paraje natural protegido en el que se ubica, así como de las limitaciones económicas y administrativas del municipio tras la emergencia. Este caso plantea una reflexión urgente sobre la ausencia de protocolos de actuación ante desastres naturales en el ámbito del mural público y urbano, sugiriendo la necesidad de desarrollar protocolos de respuesta adaptables a contextos sensibles y cambiantes.

Palabras clave: DANA, patrimonio mural, conservación preventiva, arte urbano, emergencia climática, Catarroja, protocolo de actuación

Between Urgency and Constraint: The Conservation of the *Port de Catarroja* Mural after the DANA

Abstract: This study presents the case of the *Port de Catarroja* mural, a contemporary artwork located at the headquarters of the Fishermen's Community of Catarroja, in the heart of the Albufera Natural Park, whose conservation was affected by the DANA (Mediterranean storm) that struck Valencia on October 29, 2024. The initially planned intervention —a preventive conservation proposal agreed upon with the artist— was interrupted due to the devastation caused by the climate-related disaster, which intensified pre-existing damage and left the natural environment in a state of high vulnerability.

The impossibility of carrying out the intervention was the result of both the environmental restrictions of the protected natural area in which the mural is located and the economic and administrative limitations faced by the municipality in the aftermath of the emergency. This case highlights the urgent need to address the lack of protocols for responding to natural disasters in the field of public and urban murals, suggesting the development of adaptable response frameworks for sensitive and changing contexts.

Keywords: DANA, mural heritage, preventive conservation, urban art, climate emergency, Catarroja, response protocol

Entre a urgência e a impotência: a conservação do mural Port de Catarroja após a DANA

Resumo: Este estudo apresenta o caso do mural Port de Catarroja, uma obra de arte contemporânea situada na sede da Comunidade de Pescadores de Catarroja, no interior do parque natural da Albufera, cuja conservação foi afetada pela DANA ocorrida em Valência a 29 de outubro de 2024. A intervenção inicialmente prevista —uma proposta de conservação preventiva consensualizada com a artista— foi interrompida devido aos estragos provocados pela catástrofe climática, que agravou os danos preexistentes e deixou o enquadramento natural numa situação de elevada vulnerabilidade.

A impossibilidade de intervenção resultou quer das restrições ambientais do espaço natural protegido onde a obra se insere, quer das limitações económicas e administrativas do município após a emergência. Este caso suscita uma reflexão urgente sobre a ausência de protocolos de atuação perante desastres naturais no âmbito do mural público e urbano, sugerindo a necessidade de desenvolver protocolos de resposta adaptáveis a contextos sensíveis e em constante mudança.

Palavras-chave: DANA, património mural, conservação preventiva, arte urbana, emergência climática, Catarroja, protocolo de atuação

Introducción

La conservación del patrimonio mural en espacios públicos supone un reto técnico y conceptual, especialmente cuando las obras no están protegidas y se sitúan en entornos medioambientales sensibles. Este artículo presenta el caso del mural *Port de Catarroja*, obra de Lluïsa Penella i Pons, encargado por el Ayuntamiento de Catarroja en 2022 y ubicado en el muro exterior de la sede de la Comunidad de Pescadores, en pleno paraje natural de la Albufera.

El mural presenta, por un lado, una escena tradicional de la pesca y biodiversidad local, y por otro lado, un catálogo de herramientas empleadas en la pesca tradicional valenciana. Fue concebido como un homenaje a la tradición de la zona. Su emplazamiento y mensaje le otorgan un fuerte valor testimonial, tanto para la comunidad como para el imaginario colectivo de la zona.

A pesar de su reciente ejecución, la obra presentaba patologías vinculadas a su constante exposición al exterior, la técnica empleada y las condiciones de humedad del entorno.

El estudio que se presenta comenzó a desarrollarse en septiembre de 2024 con el objetivo de diseñar una propuesta de intervención y conservación preventiva basada en un análisis técnico riguroso. No obstante, la irrupción de la DANA (Depresión Aislada en Niveles Altos) el 29 de octubre, arrasó totalmente el municipio de Catarroja y su puerto, provocando un giro radical en la investigación. La obra sufrió graves daños y la intervención prevista se volvió inviable ante la situación de emergencia y la falta de recursos.

Este artículo plantea una reflexión crítica sobre la conservación del patrimonio no monumental en contextos de catástrofe. A través del caso del mural *Port de Catarroja*, se analiza la necesidad de adaptar protocolos de intervención a escenarios imprevisibles, en los que se entrecruzan la urgencia técnica, las limitaciones institucionales y la vulnerabilidad del territorio.

Antes del desastre: un mural ya en riesgo

Previo a la incidencia de la Dana, el mural objeto de estudio presentaba evidencias de vulnerabilidad y deterioro que comprometían su estabilidad y conservación a medio y largo plazo. En la superficie donde se desarrolló la obra se identificaron al menos cuatro estratos pictóricos previos, condicionando la uniformidad y estabilidad del soporte, lo que generaba propiedades físico-químicas heterogéneas que afectaban a la adherencia y durabilidad de la capa pictórica de la artista.

Para la preparación del soporte, Penella aplicó un revestimiento acrílico específico (TKROM Carrara Liso), formulado a base de copolímero acrílico estirenado. De la misma forma, utilizó productos de la serie Super Carrara Liso para realizar la pintura mural, formulados con una dispersión vinil-etilénica, buscando una transpirabilidad y resistencia al vapor.

A pesar de las medidas adoptadas, la superficie presentaba fisuras e irregularidades previas a la intervención que suponían un riesgo latente para la conservación del mural. La ausencia de una protección final, junto con la heterogeneidad del soporte y la exposición a factores ambientales tales como la humedad o la radiación



Figura 1.- Conjunto mural Port de Catarroja, realizado por la artista catarrojina Lluïsa Penella i Pons en la Comunidad de pescadores en pleno parque natural de la Albufera.

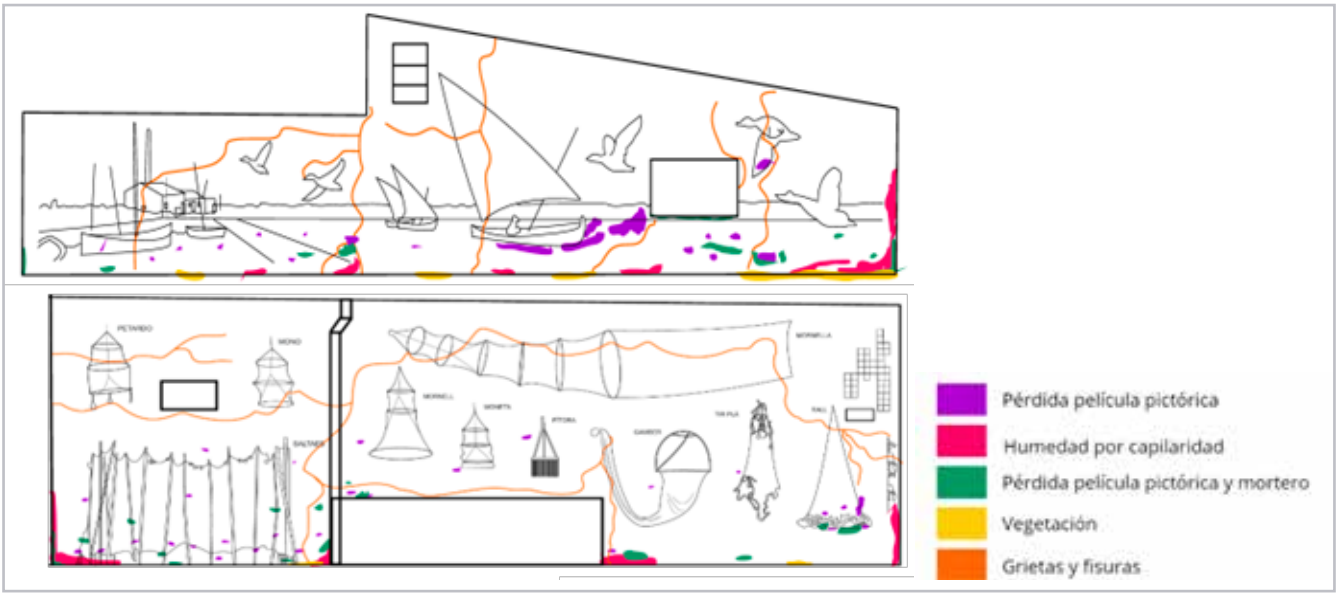


Figura 2-3.- Diagramas de daños del conjunto mural Port de Catarroja antes de la DANA

ultravioleta, había provocado la aparición de microfisuras, pérdidas de saturación cromática y desprendimientos del film pictórico.

Estas patologías ya evidenciaban que el mural se encontraba en una situación de riesgo antes del impacto de la DANA, condicionando la naturaleza y gravedad de las alteraciones posteriores, que se vieron intensificadas por el evento climático extremo.

Impacto de la DANA del 29 de octubre de 2024

La climatología de la Albufera, caracterizada por su clima mediterráneo con inviernos suaves y veranos calurosos, suele incluir episodios de precipitaciones irregulares que en ocasiones se manifiestan en eventos extremos.

El 29 de octubre de 2024, la DANA afectó gravemente más de 80 municipios, entre los que se encuentra Catarroja como uno de los más afectados. El agua alcanzó niveles de hasta cuatro metros, afectando de forma directa el entorno urbano, y de manera particular, la superficie mural donde se encuentra la obra objeto de este estudio.

Así pues, las intensas lluvias y la consiguiente inundación agravaron considerablemente los daños preexistentes del mural. En esta zona, el agua alcanzó un metro de altura aproximadamente, arrastrando vehículos, vegetación y productos químicos, entre otros. Además, el barro depositado tras la inundación comprometió la capa pictórica acelerando su degradación.

Por ello, La Conselleria del Medio Ambiente confirmó niveles de toxicidad en el lodo acumulado en la Albufera, afectando así a la conservación y estabilidad del propio mural. En un análisis de emergencia tras lo sucedido, se pudo observar la ampliación de lagunas y erosiones tanto en la capa



Figura 4-5.- Vistas aéreas de antes y después del suceso realizadas por la NASA



Figura 6.- Mural *Port de Catarroja* tras el suceso.

pictórica como en el revestimiento. También, el incremento de la humedad ambiental tras la DANA representa un factor crítico que contribuye al deterioro continuo del mural. Durante semanas, la zona mantuvo elevados niveles de humedad, favoreciendo la condensación de agua en la superficie y estratos internos del mural.

Esta saturación facilita la migración de sales solubles, provocando movimientos mecánicos entre capas y la consecuente separación y desintegración de la película pictórica. Por ello, también se detectaron eflorescencias, disgregación del material pictórico y proliferación fúngica, acelerando la degradación.

Reformulación de la propuesta de conservación

La intervención directa sobre el mural ha quedado aplazada debido a la persistencia de elevados niveles de humedad ambiental, que comprometen la estabilidad del soporte y los estratos pictóricos, imposibilitando cualquier actuación sin riesgo de provocar daños adicionales. A estas limitaciones técnicas se suma la imposibilidad económica de abordar una intervención inmediata, ya que el municipio continúa destinando sus recursos a labores urgentes de recuperación y adecuación del entorno tras el desastre ocasionado por la DANA.

En este contexto, la propuesta inicial de intervención se reformuló como una estrategia adaptable basada en la observación continua y la espera activa. Ante la imposibilidad de actuar físicamente sobre el bien, se priorizó la evaluación periódica del estado de conservación, la documentación rigurosa de los daños y la recopilación de datos que permitan fundamentar una futura intervención integral cuando las condiciones lo permitan. La experiencia acumulada durante este proceso refuerza la urgencia de promover un debate profesional multidisciplinar en torno a la gestión del patrimonio cultural en catástrofes, particularmente en contextos de difícil acceso y sin recursos normativos específicos.



Figura 7.- Mural *Port de Catarroja* tras el suceso.

Esta reformulación responde también a una serie de condicionantes añadidos, como las restricciones derivadas de la normativa de protección medioambiental de la zona, la limitada disponibilidad de medios técnicos y humanos, y el fuerte impacto económico de la catástrofe sobre la estructura administrativa y financiera del municipio.

Mientras tanto, se han ejecutado medidas de conservación preventiva con carácter de urgencia, dirigidas a mitigar una posible aceleración de los procesos de deterioro, garantizar la estabilidad del conjunto mural y salvaguardar su integridad hasta que sea posible acometer una intervención definitiva.

Más allá de los condicionantes materiales, la incertidumbre y el desasosiego generados por la imposibilidad de actuar —y por no saber cómo rescatar una obra gravemente dañada en un contexto de catástrofe— evidencian la falta de directrices claras que orienten a los profesionales de la restauración ante este tipo de situaciones extremas. Esta experiencia ha puesto de manifiesto la urgente necesidad de establecer protocolos de actuación que sirvan de guía en contextos de emergencia climática.

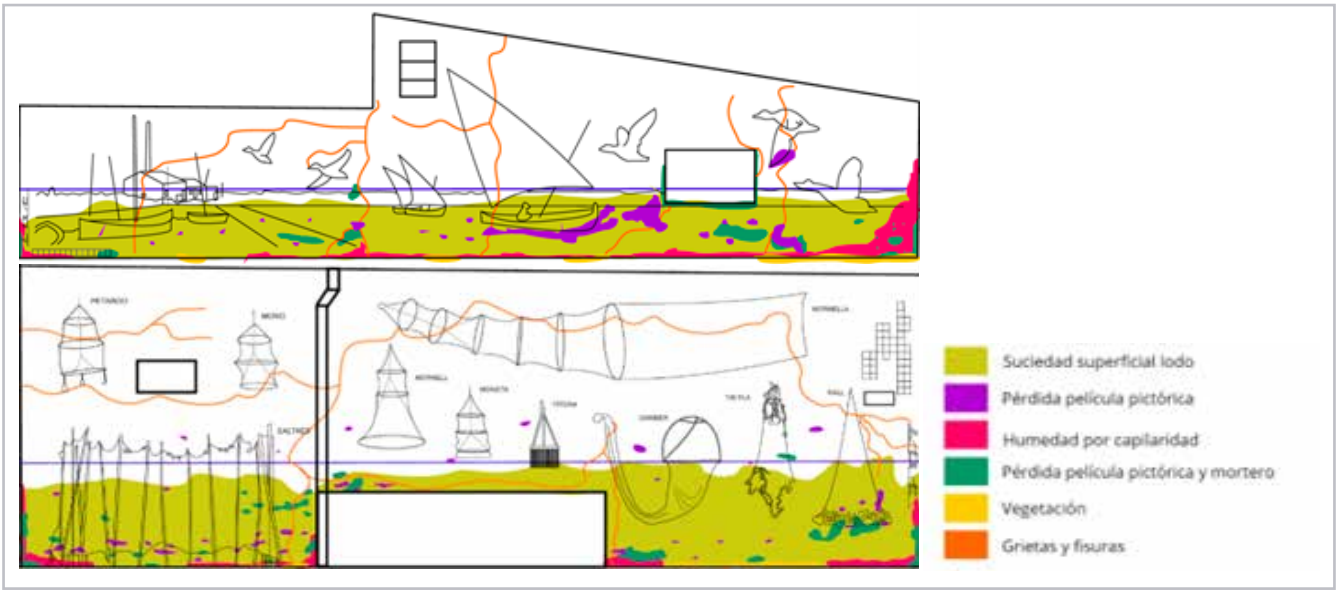


Figura 8-9.- Diagramas de daños del conjunto mural tras el paso de la DANA

Propuesta para el desarrollo de protocolos técnicos de salvaguarda del patrimonio cultural ante desastres climáticos

El caso analizado evidencia una de las principales carencias actuales en la gestión del patrimonio cultural: la inexistencia de protocolos técnicos específicos que orienten la actuación sobre bienes culturales no monumentales, como el arte público urbano, en contextos de emergencia ambiental. La creciente frecuencia de eventos meteorológicos extremos plantea nuevos desafíos para la conservación, especialmente en aquellos casos en los que la intervención física inmediata resulta inviable por condiciones técnicas, climáticas o administrativas.

En este escenario, la estrategia de intervención inicial —centrada en la estabilización material y restauración directa del bien— debió reformularse completamente, dando lugar a una actuación basada en la documentación técnica, la monitorización de las condiciones ambientales y la planificación diferida de las fases operativas. Esta reformulación no responde únicamente a la escasez de recursos técnicos y económicos del municipio afectado, sino a una ausencia estructural de directrices que permitan tomar decisiones en contextos de inaccesibilidad, falta de apoyo institucional o catástrofes de gran impacto.

Este vacío metodológico no solo dificulta la preservación de los bienes, sino que sitúa a los profesionales de la conservación-restauración ante situaciones de gran incertidumbre, en las que resulta complejo justificar técnica y deontológicamente la inacción temporal, incluso cuando esta es la única alternativa viable. Resulta prioritario, por tanto, impulsar una reflexión colectiva orientada a la creación de herramientas que permitan actuar con solvencia en estos escenarios.

Existen precedentes internacionales de gran relevancia. La inundación de Florencia en 1966 puso en evidencia la falta de preparación para la gestión del patrimonio cultural en situaciones de desastre. La respuesta, aunque improvisada, articuló redes de cooperación, impulsó protocolos de emergencia —algunos de los cuales fueron pioneros— y dio lugar a la consolidación de estructuras técnicas permanentes como el *Opificio delle Pietre Dure*. Asimismo, desde organismos como el ICCROM y el ICOM han surgido en las últimas décadas manuales y marcos conceptuales de referencia para la gestión del riesgo en el patrimonio cultural, como el *Manual de Primeros Auxilios para el Patrimonio Cultural en Tiempos de Crisis* (ICCROM, 2018) o las directrices del *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030* adoptado por la ONU, que subraya la importancia de la protección del patrimonio en la reducción del riesgo de desastres (UNISDR, 2015).

En este contexto, se propone la elaboración de un protocolo técnico de salvaguarda del patrimonio cultural ante catástrofes naturales, con especial atención a:

• La evaluación de riesgos y la identificación de bienes prioritarios en función de su exposición y vulnerabilidad.

• El diseño de procedimientos específicos para actuaciones de emergencia, estabilización preventiva y documentación rápida.

• La definición de criterios técnicos para la planificación de intervenciones diferidas en entornos inaccesibles.

• El establecimiento de redes interinstitucionales de respuesta técnica rápida, integradas por profesionales de la conservación-restauración, personal técnico de administraciones locales, cuerpos de protección civil y agentes del territorio.

Dada la complejidad de estos escenarios, se considera oportuno abrir una línea de trabajo dentro del ámbito profesional que permita elaborar una guía técnica

operativa, desarrollada por y para profesionales de la conservación-restauración, que funcione como documento de referencia en la toma de decisiones durante y después de una emergencia. El desarrollo de esta guía debería estar alineado con los principios éticos de la profesión, garantizar la trazabilidad de las actuaciones y contemplar tanto la protección de los bienes culturales como la integridad de los equipos técnicos implicados.

Desde esta perspectiva, se plantea este trabajo como una propuesta inicial que contribuya al debate técnico y metodológico en torno a la conservación en contextos de emergencia, y como llamamiento a la comunidad profesional para avanzar de forma colaborativa hacia la sistematización de este tipo de intervenciones.

Conclusiones y líneas futuras de trabajo

El estudio subraya la necesidad urgente de repensar las formas en que se aborda la conservación del patrimonio vulnerable en contextos de catástrofe natural. La ausencia de directrices claras incrementa no solo la incertidumbre técnica, sino también la carga emocional de quienes deben responder en primera línea. Este vacío metodológico puede condenar al abandono a obras de alto valor simbólico y social, especialmente aquellas que, pese a no estar catalogadas como patrimonio monumental, constituyen un eje identitario para las comunidades que las acogen.

A partir de esta realidad, se propone abrir un proceso de reflexión técnica y colectiva que permita sentar las bases para una guía operativa de intervención en patrimonio cultural afectado por desastres naturales, con especial atención a los entornos inaccesibles, vulnerables o institucionalmente desatendidos.

Líneas de trabajo iniciales que pueden plantearse como punto de partida:

• Elaborar protocolos adaptables a distintos bienes, riesgos y capacidades locales, consensuados con protección civil y entidades públicas.

• Desarrollar sistemas de evaluación remota y monitoreo preventivo con tecnologías accesibles, útiles en accesos inviables.

• Crear redes interinstitucionales de respuesta rápida para movilizar conocimientos y recursos ante emergencias sin protección legal formal.

• Incorporar criterios sociales y afectivos en la priorización, valorando el papel simbólico en la memoria colectiva.

• Impulsar desde asociaciones profesionales espacios de formación, investigación y difusión de buenas prácticas en emergencias climáticas.

Esta propuesta no pretende ofrecer una solución cerrada, sino activar un diálogo necesario dentro del campo de la conservación-restauración, ante un escenario en el que la crisis climática desafía los marcos técnicos, éticos y organizativos tradicionales. Es tiempo de generar herramientas colectivas para no dejar al margen a ningún tipo de patrimonio, ni a las personas que lo sienten como propio.

Referencias

BARATTA, G. (1999). The Florentine flood of 1966 and the birth of modern conservation. *Studies in Conservation*, 44(2), 77–84.

CARLI, M. (2000). The flood of Florence: A milestone in conservation history. *Journal of Cultural Heritage*, 1(1), 39–45.

DEAN, D. & STERRETT, D. (2013). Emergency response planning for cultural institutions: Case studies and recommendations. *Journal of Cultural Heritage*, 14(1), 29–34.

GRAU-BOVÉ, J., HIGHA, R., ORR, S. & KUMAR, P. (2024). Short note on the mapping of heritage sites impacted by the 2024 floods in Valencia, Spain. *arXiv*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.08717

ICCROM. (2018). First Aid to Cultural Heritage in Times of Crisis: Handbook and Toolkit. Roma: ICCROM.

ICOM (International Council of Museums). (2016). Disaster Risk Management for Museums. París: ICOM-DRMC.

ICOMOS. (2014). Guidelines for Emergency Preparedness. París: ICOMOS International.

MORA, P. (1967). Conservation and Restoration after the Flood in Florence: Reflections on a Disaster. *Studies in Conservation*, 12, 161–170.

MUÑOZ VIÑAS, S. (2005). Conservation of Cultural Heritage: Key Principles and Approaches. Londres: Routledge. https://doi.org/10.4324/9780080476834

MUÑOZ VIÑAS, S. y SÁNCHEZ PONS, M. (2021). Collaborative networks in cultural heritage emergencies: Case studies and challenges. *ARCHE*, (16-17-18), 34–50.

PERIS FELIPE, M. (2024). *Estudio y propuesta de conservación y restauración de la pintura mural contemporánea "Port de Catarroja".* Trabajo de Fin de Grado, Universitat Politècnica de València. Disponible en: http://hdl.handle.net/10251/219865

SÁNCHEZ PONS, M. (2020). Arte público y su conservación: Retos actuales. *ARCHE*, (16-17-18), 45–60.

STANLEY-PRICE, N. (2007). The response of the conservation profession to the flood of Florence 1966. *International Journal of Cultural Property*, 14(1), 23–40.

UNISDR. (2015). Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030. Ginebra: United Nations Office for Disaster Risk Reduction.

Autor/es



Marta Peris Felipe
martaperisfelipe97@gmail.com
Restauradora
https://orcid.org/0009-0006-8597-0074

Conservadora-restauradora de bienes culturales por la Universitat Politècnica de València e Historiadora del arte por la Universitat de València. Su trabajo se centra en la conservación de pintura mural, arte contemporáneo y en la protección del patrimonio cultural en contextos de emergencia climática, con especial atención al arte público en entornos naturales vulnerables. Actualmente forma parte del proyecto Salvem les Fotos, dedicado al rescate, intervención y preservación de fotografías y patrimonio familiar afectados por la DANA en la Comunidad Valenciana. Desarrolla su actividad como investigadora independiente y promueve la reflexión sobre la necesidad de establecer protocolos técnicos de actuación ante catástrofes naturales.

Artículo enviado 19/07/2025
Artículo aceptado el 15/12/2025

https://doi.org/10.37558/gec.v29i1.1421



Patrimonio cultural y proyecto urbano: reconversión de los bienes ferro-portuarios de la ribera central Rosarina (1983-2023)

Cecilia Galimberti

Resumen: Desde las últimas décadas del siglo XX se registra un cambio de mirada del planeamiento que prioriza el rol de la arquitectura y el proyecto urbano ante instrumentos meramente reguladores y normativos. Esta perspectiva también se articula con un nuevo abordaje del patrimonio cultural a través de la resignificación y reapropiación colectiva de distintos componentes y valores urbanos.

El presente trabajo reflexiona sobre las transformaciones viabilizadas por la dialéctica plan-proyecto urbano-patrimonio cultural, tomando como caso de estudio la costa central de la ciudad de Rosario, Argentina. En los últimos cuarenta años mediante la continuidad y articulación de políticas públicas se ha posibilitado la revalorización de su patrimonio mediante la reinterpretación de su sociedad local.

Palabras clave: patrimonio cultural, proyecto urbano, planeamiento, ribera, Rosario, bienes ferro-portuarios, políticas públicas

Cultural Heritage and Urban Project: Conversion of Ferro-Port Assets in the Central Riverside Area of Rosario (1983-2023)

Abstract: Since the last decades of the 20th century, there has been a shift in planning perspectives prioritizing the role of architecture and urban design, over merely regulatory and normative instruments. This perspective also articulates a new approach to cultural heritage by re-signifying and collective re-appropriating various urban components and values.

This paper reflects on the urban transformations made possible by the debate of planning-urban project-cultural heritage, taking the central coast of Rosario, Argentina as a case study. Over the last forty years, through the continuity and articulation of public policies, the active revaluation of its heritage has been made possible through the reinterpretation of its local society.

Keywords: cultural heritage, urban project, planning, waterfront, Rosario, ferro-port assets, public policies

Património cultural e projeto urbano: reconversão dos bens ferro-portuários da frente ribeirinha central de Rosário (1983–2023)

Resumo: Desde as últimas décadas do século XX regista-se uma mudança de perspetiva no planeamento, que passa a privilegiar o papel da arquitetura e do projeto urbano em detrimento de instrumentos meramente reguladores e normativos. Esta abordagem articula-se igualmente com uma nova forma de encarar o património cultural, através da ressignificação e reapropiação coletiva de diferentes componentes e valores urbanos.

O presente trabalho reflete sobre as transformações viabilizadas pela dialética plano–projeto urbano–património cultural, tomando como caso de estudo a frente ribeirinha central da cidade de Rosário, na Argentina. Ao longo dos últimos quarenta anos, através da continuidade e articulação de políticas públicas, foi possível promover a valorização do seu património mediante a sua reinterpretação pela sociedade local.

Palavras-chave: património cultural, projeto urbano, planeamento, frente ribeirinha, Rosário, bens ferro-portuários, políticas públicas

Introducción

La noción de proyecto urbano, como explica Busquets (1992), se posiciona como alternativa ante la disociación del plan urbanístico (reducido al campo del análisis y la zonificación) y el proyecto de arquitectura (como propuesta aislada), desde un abordaje integrador y clave de la escala intermedia. Se reconocen así, diversas generaciones o familias de proyectos urbanos según los distintos momentos o características de cada uno (Etulain y Biffis 2014). No obstante, en el presente trabajo resulta de particular interés el quiebre que se identifica a partir de la década de 1980, a partir de la transformación del planeamiento y la progresiva importancia que adquiere el proyecto urbano, especialmente en torno de la recuperación de espacio público, revalorización de la ciudad histórica y la integración de urbanismo y arquitectura (Monclús 2003). El patrimonio cultural es resignificado a través de múltiples acciones coordinadas de políticas públicas, pero legitimadas por la sociedad.

Aunque esta situación se registra en varios países, en Argentina la recuperación democrática trae consigo una nueva aproximación del patrimonio asociada a la tradición, historia e identidad, que en Rosario se vinculan a la articulación del desarrollo urbano, producción cultural y turismo (Cardini 2013). El patrimonio arquitectónico resulta clave en las políticas públicas, logrando un consenso relevante sobre los procesos de transformación urbana (Vera y Roldán 2021); y se convierte en protagonista, junto al espacio público, de la reconversión de la costa central rosarina. Se destaca que el anhelo de dicha refuncionalización ribereña data desde las primeras décadas del siglo XX, pero que se posibilita a partir de un abordaje integral y continuo en el tiempo a partir de la década de 1980 en un nuevo contexto político y desde una nueva perspectiva disciplinar.

El objetivo de este trabajo es analizar, a través del caso de la ribera central de Rosario (1983-2023), cómo la articulación entre políticas públicas continuas, un enfoque de planeamiento basado en el proyecto urbano y la resignificación del patrimonio cultural ferro-portuario, han viabilizado la transformación de una barrera infraestructural en un sistema integrado de espacios públicos y equipamientos culturales, permitiendo la reapropiación social del frente fluvial. Se parte de la hipótesis de que el éxito de esta reconversión no radica únicamente en la calidad arquitectónica de intervenciones puntuales, sino en la construcción de un proceso continuo y acumulativo, donde cada proyecto actuó como catalizador y referente para los siguientes, generando un palimpsesto urbano de alta complejidad y significado colectivo. Para ello, se emplea una metodología mixta que articula análisis documental de normativas municipales, planes urbanos (Plan Director 1991, actualizaciones 1999 y 2007-2017, Documento [5+5] 2019) y documentos de proyecto. Asimismo, estos documentos se cotejan con artículos de prensa periódica y se realizan recorridos exploratorios y registros de los componentes patrimoniales ferro-portuarios que han sido refuncionalizados en las últimas cuatro décadas.

El proyecto urbano del Parque España, encargado a Oriol Bohigas y su estudio MBM (cuyas obras inician en 1985 y es inaugurado en 1992), inicia una nueva etapa disruptiva a las precedentes, que es continuada en las últimas cuatro décadas. Desde este proyecto, el rol del patrimonio resulta eje clave para las propuestas de reconversión de la costa ocupada desde sus orígenes por instalaciones ferro-portuarias. Luego de la privatización ferroviaria en 1992 en Argentina[1], en 1996 la Empresa Ferrocarriles Argentinos firma un convenio con la Municipalidad de Rosario para analizar en forma conjunta los inmuebles en desuso o subutilizados y abordar su reconversión urbana debido a su gran valor para la memoria colectiva, reconociéndolos componentes del patrimonio cultural de Rosario. La normativa local que avala dicho convenio plantea que resulta imprescindible preservar y reacondicionar esas huellas del pasado, producto de la identidad histórica, y manifiesta sobre la "responsabilidad ante los legados culturales" que debe asumir el conjunto social (no sólo el poder público), dado que es este el que define que cierto bien tiene valor patrimonial: "cuando hablamos de la protección del patrimonio cultural, debemos tener en cuenta una variada gama de cuestiones. Estamos hablando del capital común de una cultura determinada, de un conjunto de bienes de diversa índole, ya sean tangibles o intangibles, pasados o presentes, que son asumidos como propios por una comunidad de los procesos para su preservación y rehabilitación" (Ordenanza N°6.156/1996).

La transformación de la costa del área central se propone así como estrategia de Nueva Centralidad sobre la "incorporación a la ciudad de las tierras liberadas por los procesos de reconversión ferroportuaria (…) equilibrando y completando progresivamente un frente continuo sobre un sector de costa que históricamente había quedado negado a la ciudad" (Ordenanza n°6.235, 1996), teniendo como objetivo su reconversión para actividades culturales y recreativas, posibilitando un nuevo sistema de espacios públicos estructurales de Rosario, desde una vocación colectiva en un nuevo marco democrático. En este sentido, el río se posiciona como "parte esencial del patrimonio urbano, no solo en términos de paisaje que se observa en actitud contemplativa, sino fundamentalmente en el sentido de uso colectivo" (Ibid). Es así, que el proyecto urbano resulta instrumento clave tanto para poner en relación dos partes de la ciudad dividida (el río-tejido urbano) desde una perspectiva integral, como para poder revalorizar la memoria e identidad ferro-portuaria con acciones de revitalización, otorgando nuevos usos y programas urbanos. [Figura 1]

El patrimonio cultural en el proyecto urbano

El patrimonio cultural resulta una invención, dada su capacidad para establecer discursos sobre la realidad; así como también una construcción social, por presentar la legitimación y asimilación de estos discursos (Prats 2000). Es producto de un proceso complejo y polisémico de construcción de significados que se expresa a través de valores culturales que son reconocidos a pesar de los cambios

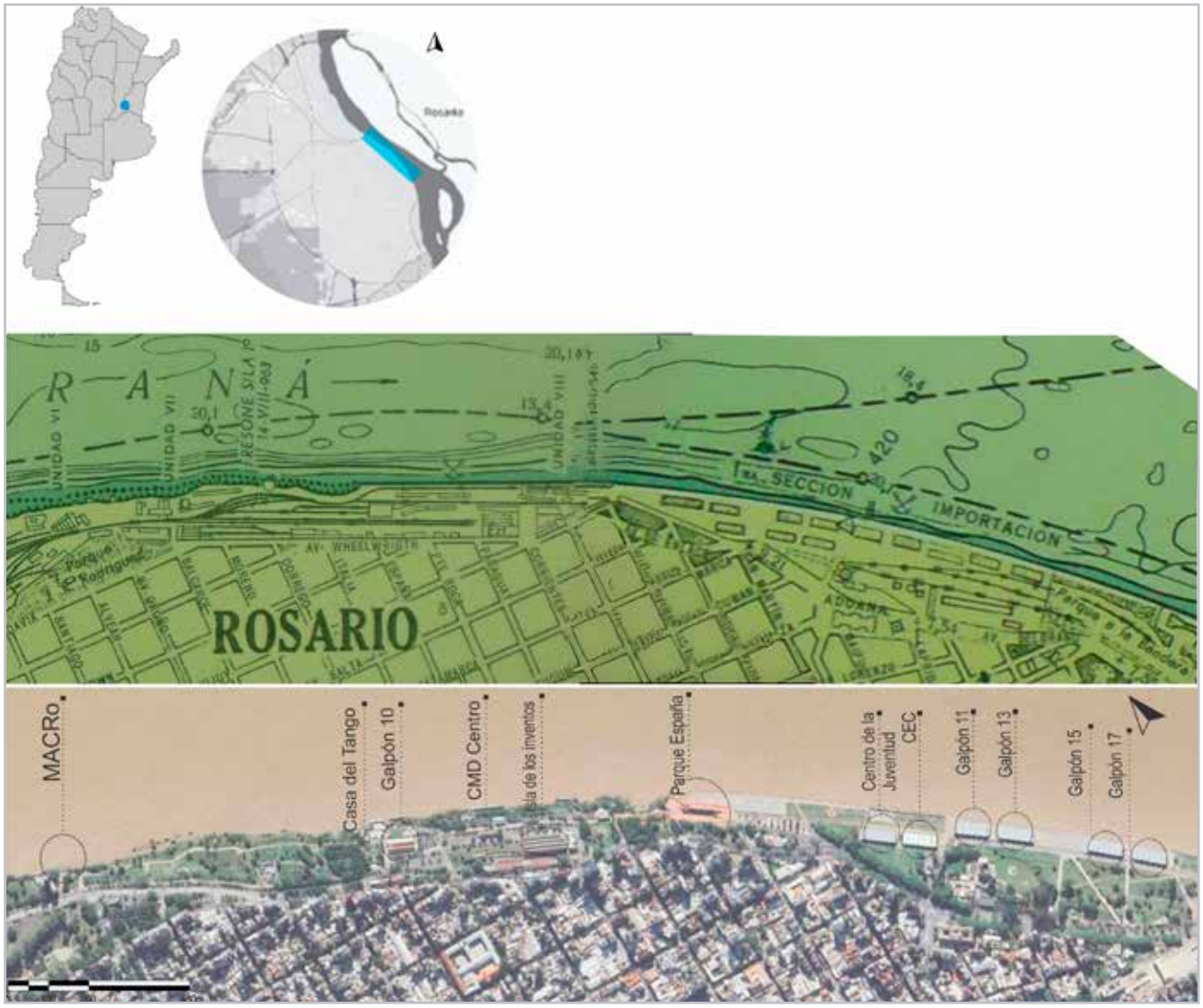


Figura 1.- Localización de la ciudad de Rosario y su costa central. Fuente: Elaboración propia en base a Carta de Navegación del Paraná (1969) e imágenes Google Earth (2024)

de época, contextos y/o categorías (García Martínez y Díaz-Sierra 2023). Especialmente, desde las últimas décadas del siglo XX, el patrimonio es abordado desde nuevas perspectivas, siendo reapropiado a través de su potencial en los instrumentos de planificación urbana, apreciando su importancia en torno a las diversas configuraciones sociales y culturales, y no como mero monumento museificado de vestigios materiales del pasado (UNESCO 2014). El patrimonio es entendido como sistema vivo de alta complejidad, al cual se le atribuyen nuevas significaciones como recursos, aumentando constantemente su valor (Magnaghi 2011). Esta mirada proyectiva del patrimonio se vincula con el nuevo rol del proyecto urbano en el planeamiento.

El proyecto urbano, como explica Manuel de Solá Morales, nace justamente a partir del reconocimiento de la complejidad y la superposición de la ciudad, en los cuales la arquitectura interviene como instrumento de ordenación urbana que parte "del amor y no del odio a la ciudad existente" reconociendo "la condición distinta de cada parte urbana, con el entendimiento de la gran ciudad como artefacto complejo, siempre más rico y diversificado" (de Solá Morales 2008: 31). Si bien este autor reconoce distintos referentes de proyecto urbano que datan más de un siglo, se identifica un cambio de paradigma significativo que, como sostiene Nuno Portas (2003), produce un resurgimiento del proyecto urbano a través de una nueva relación con el sistema de planificación. Se rechaza la concepción del plan general meramente regulador y se proclama en cambio al proyecto urbano como enfoque de diseño integral de la ciudad (Meyer 2005). Siguiendo a Oriol Bohigas, los instrumentos urbanísticos no pueden limitarse a los planes generales de carácter estrictamente normativo, sino que es necesario profundizar en las formas urbanas, para lo cual resultan clave los proyectos urbanos puntuales: "Es necesario diseñar el espacio público -es decir, la ciudad- punto por punto, área por área, en términos arquitectónicos. El plan general puede funcionar bien como programa de intenciones pero no será efectivo hasta no convertirse en la suma de los proyectos mencionados" (2019: 16).

En este sentido, el plan deja a un lado el tradicional determinismo de reglas fijas, mientras que incorpora nuevos mecanismos de regulación variable con estrategias interactivas reconociendo la diversidad de agentes, como también así, el diverso margen de configuración espacial posible. Es así como el proyecto urbano presenta características de plan-proyecto o de proyecto-plan, en relación con las lógicas de transformación de suelo. Es decir, resulta un concepto o modo de intervención "que utiliza instrumentos de planificación y/o proyecto de acuerdo con el contexto" (Portas 2003). Por lo cual, el rol del proyecto es crucial, articulándose con el plan y las políticas urbanas, vinculándose intrínsecamente en un proyecto de ciudad, el cual "es una suerte de punto de fuga en el cual se reflejan la cultura del lugar y de la época, la historia, lo vivido, la sensibilidad y las tensiones de las poblaciones que son sus protagonistas" (Secchi 2016: 125-126).

El abordaje del patrimonio y la transformación de la costa central desde las políticas públicas (1983-2023)

Rosario se desarrolla aceleradamente a mitad del siglo XIX por sus actividades portuarias, llegando a posicionarse en uno de los puertos más importantes de Argentina. En 1863 la inauguración de las obras del entonces Ferrocarril Central Argentino en las barrancas de la costa, dan comienzo a un proceso de estructuración regional de gran relevancia, adquiriendo así un fuerte perfil productivo ferro-portuario en la costa central de la ciudad. Sin embargo, a pesar de la relevancia de dichas infraestructuras, desde las primeras décadas del siglo XX se reclama que estas significan una barrera para el resto de la ciudad y se proponen diversos proyectos para su traslado y reconversión de la ribera para la generación de espacios públicos. No obstante, es recién con el retorno democrático definitivo en Argentina, en 1983, que se posibilita iniciar un proceso de continuidad de regeneración urbana, a partir de una nueva perspectiva del planeamiento local.

Entre 1984-1985 se inicia la actualización del plan desde una particular relación con el proyecto urbano. Para lo cual, se parte del reconocimiento de la ciudad real y de sus lógicas, a fin de definir los contenidos, objetivos, políticas y lineamientos programáticos. Esta nueva mirada innovadora implica: "«proceder por proyectos y no por normativas», en el convencimiento de que son los valores de cada lugar y la recreación que las demandas específicas de cada área se haga, las que permitirán que cada intervención se constituya en un aporte a la construcción de la ciudad de hoy que incorpore los valores de la ciudad heredada" (Martínez de San Vicente 1998: 111). En este sentido, se parte de una mirada proyectiva basada en el reconocimiento de la ciudad existente, resguardando sus características y particularidades. En la exposición de las primeras Jornadas de Divulgación sobre Ordenamiento Urbano que organiza la Secretaría de Planeamiento en 1987, el entonces intendente Dr. Horacio Usandizaga en el discurso inaugural planteó: "Rosario no reniega de su pasado, es más, lo reivindica y se enorgullece de él, y como tal debe entender la necesidad de preservar las imágenes urbanas que ese pasado concretó y que hoy estamos degradando inconscientemente" (Municipalidad de Rosario 1987: 4). De manera que el plan reconoce aquellas componentes primarias de mayor capacidad de permanencia y condicionantes al tejido urbano, entre las que se encuentran: la costa, tanto como factor geográfico-territorial como por su capacidad portuaria, significante clave en la vocación de los diversos tramos de ribera y sus sectores de tejido aledaños; y, el ferrocarril, como factor territorial e infraestructural fundante y condicionante a las diversas partes de la ciudad.

Los estudios y diagnósticos preliminares decantan finalmente en la presentación del Plan Director[2] al Concejo Municipal en 1991, condensando el espíritu programático y propositivo con el que fue acuñado desde las primeras tareas. La primera de sus operaciones estructurales es la Recuperación del Frente Costero, a fin de reconquistar el uso de la costa en los sectores desafectados de la actividad portuaria, proponiendo un continuo de parques públicos en el área central para usos turístico-recreativos. Entre las acciones indicadas prevé "el reciclaje de edificios existentes para uso comercial y cultural y su complementación con el equipamiento necesario" (Municipalidad de Rosario 1991: 17).

La relevancia de la conservación del patrimonio resulta uno de los tópicos que se incorporan en la agenda estatal. Ya en 1984 se establece a través del Decreto N°998 a una Comisión evaluadora integrada por representantes de la Secretaría de Planeamiento, la Secretaría de Obras Públicas, el Museo de la Ciudad (Subsecretaría de Cultura), la Facultad de Arquitectura de la Universidad Nacional de Rosario y el Centro de Arquitectos de Rosario a dictaminar sobre las condiciones de preservación de construcciones previas a 1953, manifestando su interés en "la preservación del patrimonio ambiental, urbano y arquitectónico de la ciudad" (Decreto N°998/1984). Dicho decreto marca un camino que tiene continuidad y articulación junto con otras políticas en los años siguientes. En 1987 se ratifica la creación de dicha Comisión pasando a denominarla Comisión de Preservación del Patrimonio Urbano y Arquitectónico y adicionando como función de ésta "la de difundir por los medios que se considere conveniente la actividad de la Comisión (…) para una creciente concientización de la ciudadanía sobre la preservación del patrimonio histórico, urbano" (Decreto N°2791/1987).

En 1991 se crea el Fondo de Preservación Urbanística de Rosario, a fin de "solventar una política de defensa del patrimonio urbano, arquitectónico e histórico de la ciudad" (Ordenanza N°5.278) para posibilitar el financiamiento de la restauración de edificios, sitios y monumentos de interés histórico, arquitectónico, cultural o artístico como, también, campañas de concientización comunitaria sobre la defensa del patrimonio ciudadano. Bajo el mismo espíritu, al año siguiente, también se dispone el

régimen de padrinazgo de edificaciones como de hechos de escala urbana considerados de interés, cuyo objeto sea su conservación, rehabilitación, acondicionamiento, consolidación, restauración parcial y/o total. Esto se realiza bajo la premisa que sostiene que "el diseño futuro de la ciudad se apoya en el patrimonio arquitectónico y urbanístico legado por las generaciones que la han construido y habitado. A las generaciones futuras, la obligación de conservar la riqueza del patrimonio edilicio de Rosario, para su admiración y disfrute" (Ordenanza N°5.492/1992). Por otra parte, en 1993 a la entonces Subsecretaría del Área Municipal de Cultura se le otorga el rango de Secretaría de Cultura, Educación y Turismo; entre sus funciones se destaca la de "preservación del patrimonio cultural y artístico rosarino" (Ordenanza N°5.724/1993), lo que posibilita la articulación de diversas políticas que articulan la conservación de tanto el patrimonio tangible como intangible, que posteriormente se materializa en diversos proyectos urbanos.

Estas primeras acciones contribuyen a que en 1996 se ponga en marcha el Programa Municipal de Preservación del Patrimonio Histórico, Urbano y Arquitectónico, que depende de la Secretaría de Planeamiento de la Municipalidad de Rosario, a fin de aplicar normativas, control y supervisión de obras relacionadas con la protección patrimonial. A su vez, en el 2000 se crea el Programa de Preservación, Conservación y Difusión del Patrimonio Industrial de la ciudad de Rosario que tiene como objetivo principal: "la preservación y conservación de los edificios y enclaves industriales de la ciudad que por sus características materiales, constructivas, tipológicas, estéticas o históricas, puedan ser valorados como patrimoniales" (Ordenanza N°7.065, 2000). Al año siguiente, se establece la realización, por parte de dicho Programa, de un Plan de Rutas del Patrimonio Industrial que unan los diversos componentes de dicho patrimonio productivo (del cual las instalaciones ferro-portuarias resultan clave) en coordinación con el Ente de Turismo de Rosario (ETUR) y la Secretaría de Cultura y Educación de la Municipalidad de Rosario a fin de "garantizar la utilización y la difusión de las mismas en su potencialidad educativa y turística" (Ordenanza N°7.237, 2001). El nuevo siglo trae aparejadas diversas acciones tendientes a la revalorización y resguardo del patrimonio en su sentido más amplio, enfocado a lo edilicio. Entre ellas destacan el Inventario y catalogación de Edificios y Sitios de Interés Patrimonial (Ordenanza N°7.156, 2001) y sus diversas actualizaciones a través de los años, en íntima articulación con una perspectiva amplia del proyecto urbano y su aplicación en diversas estrategias de planeamiento.

En 1999 se presenta la actualización del Plan Director, dando continuidad a las políticas en curso y al espíritu del documento anterior. La propuesta se sustenta sobre cuatro proyectos estructurales[3], siendo el primero, el Sistema ciudad-río (siguiendo con la Operación Estructural La Recuperación del Frente Costero del documento anterior). Estos se articulan con las políticas del Plan, entre las que se encuentra La preservación del Medio Ambiente y del Patrimonio Construido, prosiguiendo con las disposiciones ya iniciadas de preservación y estableciendo un marco general al documento del plan. A fin de poder profundizar sobre el proyecto urbano de la ribera, en el 2003 se crea el Programa para el Desarrollo de la Costa, focalizando en la generación de nuevos espacios públicos junto a la reconversión y reutilización de las áreas desafectadas de uso ferro-portuario. El nuevo siglo trae aparejado diversos proyectos concretados (que desarrollaremos a continuación); de manera que, el nuevo Plan Urbano (2007-2017) consolida los postulados ya en curso de reconversión integral de la costa (teniendo también al Frente Costero como una de sus seis Operaciones Estructurales) e incorporando nuevos instrumentos de actuación en torno a la preservación del patrimonio[4].

En el marco del debate internacional de la Nueva Agenda Urbana y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en 2019 se presenta el Documento Base para la Actualización del Plan Urbano Rosario [5+5] teniendo como foco principal al ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles), en el cual se sitúa la protección del patrimonio ambiental y cultural. Se hace hincapié en su "significativo patrimonio que reúne gran valor histórico, arquitectónico, espacial, funcional, simbólico-cultural y social" que genera "un fuerte sentido de pertenencia por parte de todos los ciudadanos" (Municipalidad de Rosario 2019: 83). Se continúan así las políticas de preservación a través de diversas estrategias y promoción de acciones, como también, los proyectos en torno a la recuperación ribereña.

El rol del patrimonio en los proyectos urbanos de la costa – (1983-2023)

En los cuarenta años de recuperación democrática definitiva en Argentina, podemos identificar cuatro etapas diferentes en torno a los proyectos urbanos realizados que abordan la recuperación del patrimonio cultural en la costa rosarina:

— *Primera etapa (1983-1992)*

En esta etapa, se desarrollan acciones y políticas patrimoniales vinculadas a los primeros proyectos ribereños asociados a la reutilización de los componentes ferro-portuarios. El proyecto que resulta un impulso inicial de la regeneración de la costa central es el Parque España, símbolo de un modo diferente de diálogo entre el río y el tejido urbano, así como de las marcas y componentes identitarios clave para la ciudad. En esta propuesta, a cargo del estudio de arquitectura catalán MBM Arquitectes, el rol del patrimonio es central en la estrategia proyectual, dado que definen resguardar y rehabilitar los muelles originales de madera y refuncionalizar cinco túneles portuarios de almacenaje para nuevos espacios de uso cultural (por ejemplo, salas de exposiciones y biblioteca del Centro Cultural Parque de España). Si bien es gestado y

proyectado a fines de la década de 1970, su incorporación dentro del programa conmemorativo del quinto centenario del descubrimiento de América ocasiona que el inicio oficial de sus obras, con la colocación de la piedra fundamental, sea en 1985 y su inauguración (del primer sector proyectado, correspondiente al edificio del Complejo del Centro Cultural) sea en 1992, coincidente con los 500 años del mencionado descubrimiento (Galimberti 2015 2020).

Asimismo, en esta década comienza la apertura del entonces sector productivo a través de demolición de muros y nuevos desarrollos viales, algunos de los cuales implican la refuncionalización de determinados componentes históricos como, por ejemplo, la transformación del original túnel de ferrocarriles para su incorporación al trazado vial. Dichas tareas traen consigo justamente el fuerte debate en torno a la preservación o no de gran cantidad de equipamientos existentes del sistema ferroviario y portuario. En este sentido, podemos identificar que la primera década del retorno democrático marca significativamente el camino a las acciones posteriores, identificando aquellas construcciones y marcas relevantes a proteger y reivindicar junto al acceso público, mediante la generación de un nuevo balcón al río. [Figura 2]

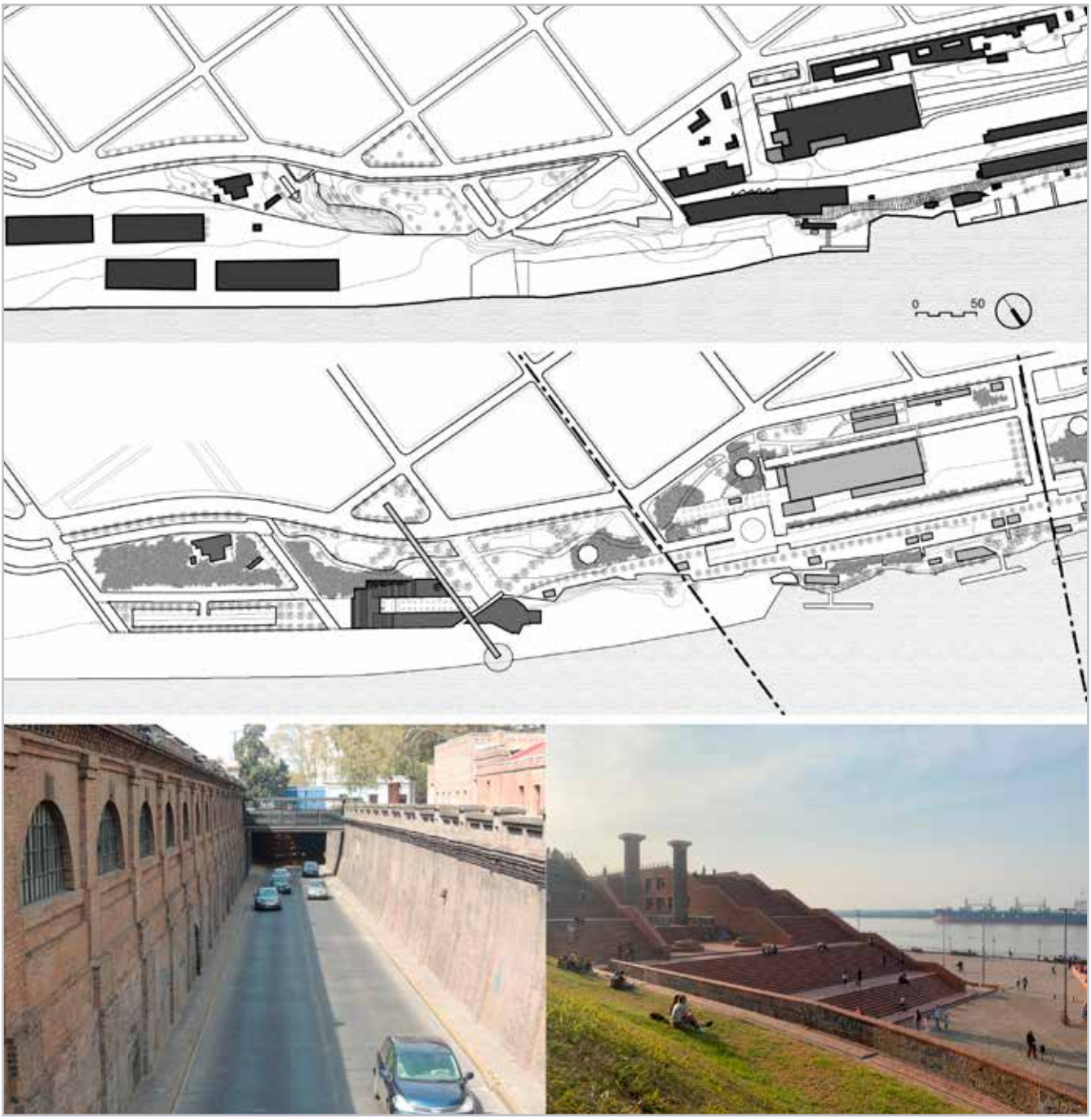


Figura 2.- Arriba: Cartografía estado de situación existente en 1983. Medio: Proyecto Urbano propuesto por el estudio MBM. Debajo: Ex túnel ferroviario (actual Av. Illia) y Parque España. Fuente: Elaboración planimétrica y fotografías de la autora.



Figura 3.- Centro de la Juventud y CEC. Fuente: Fotografías de la autora.

—*Segunda etapa (1992-2000)*

La inauguración del Complejo Cultural del Parque de España en 1992 impulsa la reconversión de los galpones portuarios aledaños al mismo. Dichas edificaciones presentan la característica de ser grandes espacios cubiertos de planta libre, originalmente destinados para el almacenaje de productos portuarios, lo que posibilita una diversidad de actividades. La reconversión urbana se articula con políticas públicas culturales y de desarrollo social. Es así, que bajo la Ordenanza N°5.940 de 1994, se crea el Programa Espacios para la Juventud con el fin de desarrollar ámbitos de promoción de la reflexión, creatividad y acción para jóvenes en inmuebles que brinden el marco propicio para dichas propuestas. Se lleva a cabo en este contexto la rehabilitación del entonces Galpón 9 para alojar al Centro de Expresiones Contemporáneas (CEC) que, promovido por la Secretaría de Cultura, se inaugura el 7 de diciembre de 1995. Bajo el mismo impulso, y dado la versatilidad de estos componentes portuarios, se continua con la restauración del galpón contiguo, denominado Centro de la Juventud y gestionado por la Secretaría de Promoción Social a fin de resultar un espacio de encuentro permanente para los jóvenes de la ciudad que se inaugura en 1998. [Figura 3]

— *Tercera etapa (2000-2010)*

La tercera etapa, se caracteriza por una serie de inauguraciones de procesos iniciados en la etapa previa. En pocos años se ponen en funcionamiento diversos equipamientos, mayormente culturales y administrativos, en edificaciones restauradas del pasado productivo rosarino, junto a nuevos parques. En esta etapa se destaca la regeneración urbana del predio de la ex Junta Nacional de Granos y del área correspondiente al ex Ferrocarril Central Argentino.

El sector de la Junta Nacional de Granos es adquirido por la Municipalidad de Rosario, la cual en 1996 llama a un Concurso Nacional Abierto de Anteproyectos por Ordenanza N°6.133. El sector correspondiente al área del proyecto presenta 10.3 ha, con un frente sobre el río



Figura 4.- Ex Silos Davis, actual MACRo. Fuente: Fotografías de la autora.

hacia el norte y sobre el tejido urbano hacia el sur de 850 m, presentando dos silos de almacenaje de granos, uno perpendicular al río (Silos Davis), del cual se exige su preservación y refuncionalización y otro, paralelo al curso de agua, cuyo resguardo queda a criterio de los proyectistas (y finalmente es demolido). Esta reconversión presenta un abordaje integral que no solo prevé la intervención edilicia sino un proyecto multiescalar que incorpora estrategias de sistematización vial, generando nuevas conexiones y conectividad, junto a nuevos espacios públicos, fortaleciendo la continuidad de dicha red e incrementando en gran medida su superficie (con preponderancia de áreas verdes). En este contexto, se establece el reciclaje del denominado Silo Davis como un nuevo museo de arte contemporáneo (dada la necesidad de expansión del Museo de Bellas Artes Juan B. Castagnino), denominándolo MACRo (Museo de Arte Contemporáneo de Rosario). Se restaura principalmente la torre vertical para alojar las salas de exposición, depósito y oficinas administrativas y se agrega una estructura liviana lindante que contiene la circulación vertical (conjunto de escaleras y ascensor). Los ocho cilindros se han posicionado a lo largo de los años en un ícono representativo por su pintura exterior que se renueva por concurso cada seis años aproximadamente (Galimberti 2023). Si bien se realiza una primera exhibición el 9 de diciembre de 2003 en un pequeño sector, la inauguración oficial se realiza el 16 de noviembre de 2004. [Figura 4]

El predio lindante, correspondiente originalmente al Ferrocarril Central Argentino, es cedido a la Municipalidad de Rosario en 1999 y también es sujeto a una importante reforma y apertura a la ciudad. Si bien hay diversos componentes edilicios que son demolidos, otras edificaciones son reconocidas de gran valor para su preservación [Figura 5]. Por un lado, se destaca el conjunto perteneciente a la Estación Rosario Central, en cuyo sector principal, luego de años de su desafectación ferroviaria, se plantea su recuperación para albergar un "espacio destinado a la construcción de saberes múltiples referidos a la ciencia, la tecnología y la sociedad" (Decreto N°0073/2003), denominado Isla de los Inventos, que se inaugura en octubre de 2003 con la exposición interactiva "Trenes de agua y barcos de riel" y junto a otros espacios,



Figura 5.- Ex Silos Davis, actual MACRo. Fuente: Fotografías de la autora.



Figura 6.- Isla de los Inventos. Fuente: Fotografías de la autora.

entre los que se destacan la revalorización del patrimonio cultural de la ciudad como "Los Andenes de la Estación y El Ferrocarril: Inventando el pasado" (Helman y Korowaj 2014).

Esta propuesta, a cargo de la Secretaría de Cultura y Educación, se articula con otros espacios educativos innovadores bajo el lema de Tríptico de la Infancia[5], que incluye juego, arte, ciencia y naturaleza [Figura 6]. Asimismo, otro conjunto edilicio de oficinas correspondientes a la mencionada Estación (en la que se encuentra la Torre del Reloj), también es sujeto a remodelación, para destinarlo al Centro Municipal de Distrito Centro (CMD Centro), en el marco del proceso de descentralización que inicia Rosario a mediados de la década de 1990 (inaugurado oficialmente el 19 de septiembre de 2005). En dicho sector también se localiza la construcción en la que funcionó la primera estación de pasajeros (hasta la inauguración de la mencionada Rosario Central), posteriormente utilizada como depósito de cargas y denominada Galpón 10 (habilitada hasta 1977) (Ferrer y Fernández Priotti 2001).

Desde la década de 1980 se debate, por su relevancia histórica, la necesidad de su preservación. En 2004 se produce la concesión a privados para su remodelación integral mayormente enfocada a localizar un complejo gastronómico, realizando, además, la regeneración del espacio público aledaño [Figura 7].

También se preserva el conjunto de edificaciones correspondientes a los tanques de aguas ferroviarios, destinados en 1998 para el Centro Cultural Casa del Tango promovido por la Secretaría de Cultura de la Municipalidad de Rosario y en articulación con la Secretaría de Planeamiento, a cargo del proyecto urbano, realizando un abordaje integral. Por un lado, se declara al Tango como patrimonio cultural y artístico de la ciudad de Rosario (Ordenanza N°7.737, 2004), por lo cual el Municipio se compromete a promover, las actividades vinculadas a sus distintas manifestaciones artísticas, reconociéndolo como expresión cultural distintiva de la ciudad. Mientras que, por otro, se resguarda la memoria ferro-portuaria de la ciudad, revalorizando los vestigios materiales característicos de su identidad. [Figura 8]



Figura 7.- Ex Galpón N°10. Fuente: Fotografías de la autora.



Figura 8.- Actual Complejo Cultural Casa del Tango. Fuente: Fotografías de la autora.

— Cuarta etapa (2010-2023)

Desde el 2010 se retoma la transformación del complejo de galpones portuarios ubicados al sur de los previamente restaurados CEC y Centro de la Juventud. A través de un acuerdo conjunto entre la Provincia de Santa Fe y la Municipalidad de Rosario se promueve la Ciudad Joven. Como explica el entonces intendente Miguel Lifschitz, con este proyecto urbano "se recupera un patrimonio arquitectónico que tiene que ver con el pasado portuario, y se le dará un uso cultural relacionado con la juventud, que ya se apropió de ese espacio (…) los jóvenes tendrán la posibilidad de ejercitar su derecho a la cultura" (Rosario 12, 31 de agosto de 2010). El área de intervención presenta 126.000 m^2, cuya superficie ocupada por los cuatro galpones a intervenir es de aproximadamente 12.000 m2. Se realiza una intervención integral del predio con parquización y dotación de mobiliario urbano, junto a la restauración estructural de los galpones, y a tareas de reparación y sustitución de aberturas, pintura e instalación de servicios necesarios para su apertura al público. [Figura 9]

Realizado en dos etapas de actuación, finalmente los cuatro galpones inaugurados en 2019 comprenden: El Galpón 11, "El Muelle", destinado a culturas urbanas emergentes, con infraestructura adecuada para experimentación de imagen y sonido y entornos digitales; el Galpón 13, "La Mutualidad", que lleva adelante diversas propuestas de construcciones colectivas colaborativas; el Galpón 15, "El fabuloso Mundo del Cuerpo", destinado a actividades como danzas, teatro, técnicas corporales, entre otras, en los cuales el cuerpo ocupa un lugar central de las experiencias y, funcionando, a su vez, la Escuela Municipal de Artes Urbanas (EMAU)[6]; y, el Galpón 17, "Mercado de Frutos Culturales", que consiste en una tienda de bienes rosarinos y santafesinos en lo que se destaca la creatividad de objetos diversos. Asimismo, las explanadas exteriores resultan espacios de exposiciones y manifestaciones artísticas y culturales. [Figura 10]

Resultados y discusión

El análisis de las cuatro décadas de intervenciones en la ribera central de Rosario permite identificar un conjunto



Figura 9.- Proceso de reconversión de ex galpones portuarios (año 2012). Fuente: Fotografías de la autora.



Figura 10.- Franja del Río: Izq. Derecha. Mercado de Frutos Culturales. Fuente: Fotografías de la autora.

de resultados que aporta una comprensión integral de los procesos contemporáneos de reconversión urbano-patrimonial. En primer lugar, se evidencia la conformación de una lógica de actuación sostenida que articuló diagnósticos, normativas, políticas culturales y proyectos urbanos bajo una visión pública integrada. Esta continuidad institucional posibilitó una transformación acumulativa en la que cada intervención se coordinó en un marco mayor, reforzando una identidad territorial basada en la memoria ferro-portuaria y en la apertura progresiva del espacio público ribereño.

Los resultados también muestran que el patrimonio industrial desempeñó un papel estructurador en la redefinición del frente costero, no solo como conjunto de piezas edificadas, sino, como sistema de trazas, vacíos, infraestructuras y espacialidades capaces de orientar nuevas narrativas urbanas. La recuperación y resignificación de galpones, túneles, silos y estaciones ferroviarias favoreció la consolidación de una red cultural continua que transformó antiguos enclaves productivos en ámbitos de sociabilidad, creación artística y experimentación educativa. Este proceso se desarrolló sobre la base de un diálogo constante entre preservación y proyecto, donde la permanencia material de los bienes se combinó con estrategias de actualización funcional y junto a la construcción de nuevos espacios públicos que restituyeron el vínculo histórico entre la ciudad y el río.

La discusión de estos resultados en relación con el debate internacional sobre *waterfronts* evidencia que las primeras etapas de la reconversión de la costa central de Rosario se diferencian de otros procesos guiados por lógicas de mercado, dado que su transformación se apoyó en la priorización de equipamientos culturales, espacios de uso colectivo y políticas inclusivas, antes que en desarrollos inmobiliarios intensivos. A diferencia de intervenciones que generan fragmentos urbanos desconectados, en Rosario, con el retorno democrático definitivo, la ribera fue concebida como un sistema unitario, capaz de incorporar capas sucesivas sin perder la memoria productiva que la originó. La dialéctica entre plan, proyecto y patrimonio operó, así, como un mecanismo proyectual que permitió abordar simultáneamente las escalas arquitectónica, urbana y territorial. Asimismo, resulta central la noción de patrimonio como recurso activo: más que un conjunto de elementos a conservar, se convirtió en una matriz conceptual y operativa que orientó decisiones espaciales, políticas y culturales. Su tratamiento no se limitó a la protección normativa, sino que derivó en: la generación de valor público, la activación de prácticas ciudadanas y la producción de una nueva identidad ribereña. La experiencia rosarina revela, por tanto, que la conservación del patrimonio industrial puede desempeñar un rol decisivo en la construcción de proyectos urbanos contemporáneos, al mismo tiempo que señala desafíos futuros vinculados al mantenimiento de las infraestructuras recuperadas, la sustentabilidad de los usos culturales y la necesidad de marcos normativos que acompañen la evolución del sistema ribereño.

Conclusiones

La trayectoria de transformación de la ribera central de Rosario permite afirmar que la interacción entre proyecto urbano, políticas públicas y preservación patrimonial puede constituir una estrategia eficaz para reorientar territorios marcados por la obsolescencia industrial hacia nuevas configuraciones espaciales, culturales y sociales. Más allá de los resultados específicos documentados, el proceso analizado demuestra que el patrimonio ferro-portuario puede desempeñar un papel estructural en la formulación de proyectos urbanos contemporáneos cuando es interpretado no solo como un conjunto de objetos a proteger, sino como una matriz activa desde la cual leer y reescribir la ciudad. La evolución de la ribera rosarina pone en evidencia que la conservación, cuando adopta un enfoque proyectual, es capaz de operar simultáneamente sobre los planos material, simbólico y programático, generando transformaciones de alcance metropolitano.

En este sentido, uno de los aportes más significativos del caso radica en mostrar cómo la continuidad institucional y la estabilidad de una visión urbana compartida pueden consolidar procesos que trascienden los ciclos político-administrativos. El proyecto urbano deja de ser un instrumento coyuntural para convertirse en un dispositivo de largo plazo que orienta decisiones, habilita nuevas prácticas y permite sedimentar una identidad colectiva. Esta perspectiva resulta especialmente relevante para ciudades latinoamericanas, donde la fragmentación de políticas suele obstaculizar la consolidación de proyectos territoriales duraderos.

Asimismo, la experiencia de Rosario sugiere que la integración entre patrimonio y paisaje fluvial constituye un campo fértil para repensar la relación entre memoria, espacio público y sociedad. El frente ribereño recuperado no solo restableció la continuidad física entre ciudad y río, sino que redefinió las formas de habitar, representar y experimentar este territorio. Así, el patrimonio industrial dejó de ser un remanente del pasado productivo para convertirse en un soporte del presente y un recurso para imaginar futuros posibles.

Sin embargo, a pesar de los avances logrados, aún se plantean desafíos que requieren atención como, por ejemplo, la manutención de las estructuras rehabilitadas, la sostenibilidad de los usos culturales, la regulación de dinámicas emergentes (como la turistificación o la presión inmobiliaria) y la necesidad de reforzar las políticas de conservación preventiva. Estos aspectos representan cuestiones estratégicas para preservar la integridad del sistema ribereño, a los que se suman los retos contemporáneos vinculados al cambio climático, la gestión del riesgo y la adaptación del territorio fluvial, que demandan enfoques integrales capaces de articular patrimonio, ambiente y justicia espacial.

Por lo expuesto, la experiencia rosarina contribuye a enriquecer los debates sobre la conservación activa del patrimonio industrial al demostrar que su potencia radica en la capacidad de activar procesos de transformación

urbana abiertos, inclusivos y de largo aliento. La ribera central de Rosario se consolida, entonces, como un laboratorio donde se ensayan formas de hacer ciudad que reconocen la densidad histórica del territorio, valoran la memoria colectiva y promueven un proyecto urbano sustentado en la relación entre paisaje, cultura y ciudadanía.

Notas

[1] Se destaca que en 1992 se sanciona la Ley nacional n°24.146 a través de la cual "el Poder Ejecutivo nacional deberá disponer la transferencia a título gratuito a favor de provincias, municipios y comunas, de bienes inmuebles innecesarios para el cumplimiento de sus fines o gestión de la Administración Pública nacional, sus empresas o entes descentralizados" (Ley nacional N°24.146/1992)

[2] Actualización del Plan Regulador y Bases Documentales para la Revisión del Código Urbano.

[3] Que cada uno consiste en "un gran proyecto hecho de proyectos e intervenciones menores sobre componentes y sitios urbanos" (Municipalidad de Rosario 1999)

[4] Por ejemplo, las áreas de protección y el convenio de esfuerzo compartido de preservación.

[5] Junto a La Granja de la Infancia y el Jardín de los Niños.

[6] En el 2001, a partir de un subsidio del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) a la Municipalidad de Rosario se realiza la ocupación del galpón 17 para talleres de artes circenses. Sin embargo, es recién en 2014 que se formaliza y acuña el nombre de Escuela Municipal de Artes Urbanas, produciéndose el traslado del galpón 17 al 15 (Godoy 2022).

Referencias

BOHIGAS, O. (2019). Discurso tras la recepción del Premio Medalla de Oro del RIBA (Traducción Patricia Allen). *A&P Continuidad*, 10: 12-17. https://doi.org/10.35305/23626097v6i10.199

BUSQUETS, J. (1992). Evolución del planeamiento urbanístico en los años ochenta en Barcelona: Del Plan General Metropolitano a la recuperación urbana de la ciudad. *Ciudad Y Territorio Estudios Territoriales,* 93: 31–52. https://recyt.fecyt.es/index.php/CyTET/article/view/83809

CARDINI, L. (2013). Políticas culturales y patrimonio en la ciudad de Rosario, Argentina. Boletín de Antropología. *Universidad de Antioquia*, (28), 46: 124-142 https://doi.org/10.17533/udea.boan.19523

ETULAIN, J. C. Y GONZÁLEZ BIFFIS, A. (2014). La evolución del proyecto urbano: Intervenciones urbanas y cambios de paradigmas. *Cuaderno urbano,* 17: 173-196. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1853-36552014000200008&lng=es&tlng=pt.

FERRER, A. y FERNANDEZ PRIOTTI, C. (2001). *Ferrocarriles en Rosario*. Rosario: Asociación Rosarina Amigos del Riel.

GALIMBERTI, C. (2015). *La reinvención del Río Procesos de transformación de la ribera de la Región Metropolitana de Rosario,* Argentina. Rosario: UNR Editora - A&P Ediciones.

GALIMBERTI, C. (2020). Refounding the urban horizon line: parque de España, MBM arquitectes (1979-1992). Proyecto, progreso arquitectura, 23: 106-121. http://dx.doi.org/10.12795/ppa.2020.i23.07

GALIMBERTI, C. (2023). Re-imagining the Port Heritage of Rosario: From Grain Storage Silos to the Museum of Contemporary Art of Rosario (Argentina). *Disegnarecon*, 16(31), 21-1. https://doi.org/10.20365/disegnarecon.31.2023.21

GARCÍA MARTINEZ, E. y DÍAZ-SIERRA, R. (2023). El patrimonio cultural en las evaluaciones de impacto ambiental. *Ge-Conservacion*, 23(1): 18-27. https://doi.org/10.37558/gec.v23i1.1148

GODOY, S. (2022). La formación de las Artes Urbanas en Rosario. Transformación espacial, prácticas artísticas e integración gubernamental. *Cuadernos de antropología social*, 56: 51-69. https://dx.doi.org/10.34096/cas.i56.11441

HELMAN, Ma C. y KOROWAJ, M. (2014). Análisis del proyecto urbano. Tríptico de la Infancia de la Ciudad de Rosario. *VI Foro Sur-Sur PreALAS Patagonia* (7 al 9 de mayo). http://prealas2014.unpa.edu.ar/sites/prealas2014.unpa.edu.ar/files/ckeditor/46/Analisis%20de%20proyecto%20urbano.%20Triptico%20de%20la%20infancia....pdf

MAGNAGHI, A. (2011). E*l proyecto local. Hacia una conciencia del lugar*. Barcelona: Universitat Politecnica de Catalunya.

MARTÍNEZ DE SAN VICENTE, I. (1998). La sutil belleza de la ciudad aluvional. *Summa+,* 33: 110-119.

MEYER, H. (2005). Del Plan al Proyecto y hacia la Perspectiva. En A. Font, M. Corominas y J. Sabaté (Eds.), *Los territorios del urbanista. 10 años Máster UPC en Proyectación Urbanística*, 41-49. Barcelona: Universitat Politécnica de Catalunya.

MONCLÚS FRAGA, F.J. (2003). El «modelo Barcelona» ¿una fórmula original? De la «reconstruccion» a los proyectos urbanos estratégicos (1979-2004). *Perspectivas urbanas / Urban perspectives,* 3: 27-41.

MUNICIPALIDAD DE ROSARIO (1987). *Jornadas de Divulgación sobre ordenamiento urbano y aspectos ferroportuarios de la ciudad de Rosario.* Secretaría de Planeamiento.

MUNICIPALIDAD DE ROSARIO (1991). *Actualización del Plan Regulador y Bases Documentales para la Revisión del Código Urbano*. Secretaría de Planeamiento.

MUNICIPALIDAD DE ROSARIO (2019). *Documento base para*

la actualización del Plan Urbano Rosario [5+5]. Secretaría de Planeamiento.

PORTAS, N. (2003). El surgimiento del proyecto urbano. *Perspectivas Urbanas/Urban Perspectives*, 3. https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/555/art03-2.htm?sequence=2&isAllowed=y

PRATS, L. (2000). El concepto de patrimonio cultural. *Cuadernos de antropología social*, 11: 115-136.

ROSARIO 12 (2010). *Un espacio para la creatividad.* 31 de agosto de 2010 https://www.pagina12.com.ar/diario/suplementos/rosario/9-25120-2010-08-31.html

SECCHI, B. (2016). *Primera lección de urbanismo*. Lima: Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Pontificia Universidad Católica del Perú.

SOLÁ-MORALES DE, M. [1987] (2008). La segunda historia del Proyecto Urbano. *DEARQ-Revista de Arquitectura,* 1: 30-41. https://www.redalyc.org/pdf/3416/341630310003.pdf

UNESCO (2014). *Gestión del Patrimonio Mundial Cultural.* Paris: UNESCO / ICCROM / ICOMOS / UICN. https://icomos.es/wp-content/uploads/2021/02/activity-827-3-2_compressed.pdf

VERA, P. y ROLDÁN, D. (2021). La invención turística de Rosario (Argentina). El patrimonio, la costa y el bulevar. *Turismo y Patrimonio*, 17: 79-98. https://doi.org/10.24265/turpatrim.2021.n17.05

Autor/es



Cecilia Galimberti
cecilia.galimberti@gmail.com
CURDIUR (CONICET-UNR)
Universidad de la Costa (Barranquilla, Colombia)
https://orcid.org/0000-0001-9030-0143

Doctora en Arquitectura y Arquitecta por la Universidad Nacional de Rosario (UNR), Argentina. Es Directora del Doctorado en Arquitectura y Profesora Titular del Área de Teoría y Técnica Urbanística (FAPyD-UNR). Es Investigadora del CONICET con sede en el Centro Universitario Rosario de Investigaciones Urbanas y Regionales (CURDIUR, UNR-CONICET). Es Profesora internacional en la Universidad de la Costa (Barranquilla, Colombia), donde integra el Grupo de Investigación ARUCO. Sus líneas de investigación se orientan al estudio de las transformaciones urbano-territoriales contemporáneas, el planeamiento y proyecto urbano-territorial, el paisaje y el patrimonio cultural, las dinámicas de metropolización, los ámbitos fluviales y costeros y las relaciones entre ambiente, territorio y sostenibilidad, desde enfoques multiescalares y multiactorales. Ha dirigido y codirigido proyectos de investigación acreditados a nivel nacional e internacional, así como tesis de doctorado y maestría en Argentina, Ecuador y Colombia. Es integrante de la Red Designing Heritage Tourism Landscape y de redes académicas orientadas a paisaje, patrimonio y territorio. Ha realizado estadías de investigación en el DUOT de la Universitat Politècnica de Catalunya (Barcelona) y en el IETU de la Universidad de la República (Montevideo). Su tesis doctoral obtuvo el Segundo Premio Arquisur Investigación y la Segunda Mención Provincial a Tesis de Doctorado en Ciencias Sociales de la Provincia de Santa Fe. Cuenta con más de cincuenta publicaciones en revistas científicas indexadas. Participa como evaluadora de artículos, proyectos y tesis a nivel internacional e integra comisiones académicas de carreras de posgrado vinculadas a arquitectura, urbanismo, diseño y paisaje.

Artículo enviado 22/09/2025
Artículo aceptado el 20/12/2025

https://doi.org/10.37558/gec.v29i1.1435



Evaluation of the Efficiency of Polymethyl Methacrylate/ Hydroxypropyl Methacrylate (MMA/HPMA) Copolymer for the Conservation of Mural Paintings

Mahmoud Sayed Korany, Wael Sabry Mohamed

Abstract: This study investigates the mural paintings in tomb TT81 of the 18th Dynasty, belonging to Ineni, in the Theban Necropolis, a UNESCO World Heritage Site in Egypt. It examines the composition, structure, and techniques of the mural layers, as well as main deterioration patterns and contributing factors. Cross-sectional examination, stereomicroscopy, and scanning electron microscopy assessed stratigraphy, paint layer details, and microstructure. X-ray diffraction identified pigments and fillers, and ATR-FTIR determined the paint medium. The efficiency of Polymethyl Methacrylate/Hydroxypropyl Methacrylate (MMA/HPMA) copolymer in consolidating murals under sudden microclimatic changes was evaluated. Samples treated with 1%, 2%, and 3% copolymer were analysed using microscopy, colorimetry, and water contact angle measurements. Results revealed animal glue tempera with Egyptian blue, green, red and yellow ochre, and carbon black. Previous deterioration included coloration changes, cracking, flaking, vandalism, and prior resin–oil restorations. The 2%–3% copolymer effectively consolidated layers, improved water resistance, and minimized visual alterations.

Keywords: Theban Necropolis, scanning electron microscopy, tempera, microclimate, flash floods, consolidation

Evaluación de la eficiencia del copolímero de metacrilato de metilo/hidroxipropil metacrilato (MMA/HPMA) para la conservación de pinturas murales

Resumen: Este estudio investiga las pinturas murales de la tumba TT81 de la Dinastía XVIII, perteneciente a Ineni, situada en la Necrópolis Tebana, sitio inscrito en la Lista del Patrimonio Mundial de la UNESCO en Egipto. Se examinaron la composición, estructura y técnicas de las capas murales, así como los principales patrones de deterioro y los factores que contribuyen a ellos. El examen de secciones transversales, la estereomicroscopía y la microscopía electrónica de barrido permitieron evaluar la estratigrafía, los detalles de la capa pictórica y la microestructura. La difracción de rayos X identificó los pigmentos y cargas, mientras que el ATR-FTIR determinó el medio pictórico. Se evaluó la eficacia del copolímero de metacrilato de metilo/hidroxipropil metacrilato (MMA/HPMA) en la consolidación de murales sometidos a cambios microclimáticos bruscos. Las muestras tratadas con copolímero al 1 %, 2 % y 3 % fueron analizadas mediante microscopía, colorimetría y medición del ángulo de contacto con el agua. Los resultados revelaron el uso de témpera con cola animal y pigmentos como el azul egipcio, ocre verde, rojo y amarillo, y negro de carbón. El deterioro previo incluía cambios de coloración, agrietamiento, descamación, vandalismo y restauraciones antiguas con resina y aceite. El copolímero al 2 % –3 % consolidó eficazmente las capas, mejoró la resistencia al agua y minimizó las alteraciones visuales.

Palabras clave: Necrópolis Tebana, microscopía electrónica de barrido, témpera, microclima, inundaciones repentinas, consolidación

Avaliação da eficiência do copolímero de polimetilmetacrilato/hidroxipropilmetacrilato (MMA/HPMA) para a conservação de pinturas murais

Resumo: Este estudo investiga as pinturas murais da tumba TT81 da 18.ª Dinastia, pertencente a Ineni, na necrópole tebana, classificada como Património Mundial da UNESCO, no Egito. Analisa-se a composição, a estrutura e as técnicas das camadas murais, bem como os principais padrões de deterioração e os fatores que para eles contribuem. A estratigrafia, os detalhes da camada pictórica e a microestrutura foram avaliados através de observação em corte estratigráfico, estereomicroscopia e microscopia eletrónica de varrimento. A difração de raios X permitiu identificar pigmentos e cargas, e a ATR-FTIR foi utilizada para determinar o aglutinante pictórico. Foi avaliada a eficiência do copolímero de polimetilmetacrilato/hidroxipropilmetacrilato (MMA/HPMA) na consolidação de pinturas murais sujeitas a alterações microclimáticas súbitas. Amostras tratadas com 1%, 2% e 3% de copolímero foram analisadas

por microscopia, colorimetria e medições do ângulo de contacto com a água. Os resultados revelaram uma têmpera de cola animal com azul egípcio, ocres verde, vermelho e amarelo, e negro de fumo. A deterioração prévia incluía alterações de cor, fissuração, destacamentos, vandalismo e intervenções anteriores com resina–óleo. O copolímero a 2%–3% consolidou eficazmente as camadas, melhorou a resistência à água e minimizou as alterações visuais.

Palavras-chave: necrópole tebana, microscopia eletrónica de varrimento, têmpera, microclima, cheias repentinas, consolidação

Introduction

Luxor, or Ancient Thebes, and its necropolis are a UNESCO World Heritage Site, containing numerous temples and tombs. Theban tombs, especially in Sheikh Abd el-Qurna, exhibit exceptional artistry and reveal the social, religious, and political contexts of ancient Egypt through their mural paintings and inscriptions (Moussa *et al.* 2009).

These murals face serious threats from environmental conditions, including temperature and humidity fluctuations (Marey, 2009), flash floods (Demas and Agnew 2012), wind-driven suspended particles and sand (Mikayama *et al.* 2015), biological deterioration, human impact, and the geological structure of the tombs. High temperatures and fluctuations damage plaster and paint layers, causing cracking, peeling, flaking, delamination, pigment fading, superficial erosion, and accelerated biological growth (Moussa 2007). Flash floods threaten structural stability, particularly in tombs carved into the shale of the Esna Formation, causing swelling, shrinkage, and rock deterioration (Wüst & McLane 2000; Hemeda 2021). Humidity promotes fungal and mold growth, the lixiviation of the materials and the dangerous salts effects. Human activities—including vandalism, tourism, and incompatible restoration—further exacerbate deterioration (Abd El-Tawab & Abu El-Hassan 2021). Previous restorations often used materials incompatible with the original compositions, such as insoluble nylon coatings that are difficult to remove and may harbor bacteria (Moussa *et al.* 2021).

Conservation of these murals, particularly from the Eighteenth Dynasty, is essential. Natural and synthetic adhesives commonly used include gelatine, rabbit skin glue, isinglass, Klucel G, BEVA 371, Evacon R, Mowilith 20, and Paraloid B-72 (Poulis *et al.* 2022). Acrylic polymers such as Paraloid B-72, and Lascaux Hydroground 750 have been used to protect wall paintings (Refaat *et al.* 2020). Other consolidants—polyvinyl acetate, polyvinyl alcohol, polyacrylates, silicone–acrylate copolymers, gelatine, Primal AC33, Ketone Resin N, Laropal A81, and calcium alkoxides—address flaking, powdering, surface disruption, and paint loss, also it has been used the ethyl silicate for the consolidation and the hydrophobic protective effect (Su et al., 2018; Farmakalidis et al., 2016; Becherini *et al.* 2018). Nanocomposite polymers based on TEOS and SiO_2–Al_2O_3 have been tested as superhydrophobic protective films (Marey Mahmoud 2022).

Polymethyl Methacrylate/Hydroxypropyl Methacrylate (MMA/HPMA) is a copolymer combining the stability of PMMA with the adhesion and flexibility of HPMA, suitable for consolidating mural paintings (Abdel-Maksoud *et al.* 2024). PMMA is transparent, moisture-resistant, and UV-stable, preserving optical properties while resisting heat and flash floods (Ali *et al.* 2015; Kavda *et al.* 2023; Adaikalam *et al.* 2024; Ali 2021; Prasad & Lal 2023). HPMA's hydroxyl groups enhance adhesion via hydrogen bonding and strengthen mechanical properties, allowing penetration of microcracks (Briggs & Jialanella 2010; Trujillo-Lemon *et al.* 2007). Similar acrylic systems have successfully conserved other artifacts (Abdel-Kareem & Nasr 2010; Hassan & Mohamed 2017; Abdel-Maksoud *et al.* 2024).

Despite the wide use of acrylic-based polymers in different conservation fields, their application in mural painting conservation remains controversial, particularly due to issues related to compatibility, permeability, and long-term behavior. Therefore, the present study does not propose MMA/HPMA as a general protective or preventive treatment for mural paintings. Instead, it aims to experimentally evaluate, under controlled laboratory conditions, the consolidating and adhesive efficiency of the MMA/HPMA copolymer when applied at low concentrations, with particular focus on its penetration capacity, crack-filling ability, and short-term response to environmental stress. The study explicitly recognizes the need to distinguish between laboratory-based performance and potential in situ application, which must remain strictly limited and carefully controlled.

The case study is the tomb TT81 in Sheikh Abd el-Qurna, part of Ancient Thebes and its UNESCO World Heritage necropolis. TT81, dating to the 18th Dynasty, belongs to Ineni, an architect and official under Amenhotep I–Thutmose III. The tomb has a T-shaped layout with a transverse hall leading to a pillared hall, a central axial passage, and an inner chamber with a shrine of four statues. Walls feature inscriptions and scenes highlighting Ineni's achievements, royal projects, and religious devotion, including a small chapel for ritual activities to ensure his safe passage to the afterlife (Porter & Moss 1970; Dziobek 1992).

Materials and Methods:

—*Experimental Setup*

• *Preparation of Mural Painting Samples*

Four mural painting mock-up samples with the same stratigraphic structure and composition as the archaeological samples were prepared. Each sample consists of a coarse preparatory ground layer, followed by a fine preparatory ground layer, then a whitewash layer, and finally a paint

layer composed of hematite red pigment mixed with animal glue. Then the mock-ups were kept at room temperature for 21 days (Marey Mahmoud 2022). The first sample serves as the control, while the other three samples were treated with MMA/HPMA at concentrations of 1%, 2%, and 3%.

• *Accelerated Ageing of Mural Painting Samples*

The artificial ageing of the mural painting mock-up samples was performed in an oven (OCT.40, Chem-Tech Egypt) at the Oil Paintings Laboratory, Faculty of Archaeology, Luxor University. Samples were exposed to temperatures of 50–70 °C and relative humidity of 40–60% (Alemam 2021). Temperature and humidity were periodically raised and lowered to simulate seasonal, and daily variations. Each cycle comprised 8 h of exposure followed by 4 h at room temperature (Marey Mahmoud 2022), repeated 10 times (Ramadan *et al.* 2024). MMA/HPMA was applied by brushing at room temperature and pressure, repeated three times with 30 min intervals. Treated samples were cured for 15 days (Darwish 2013).

The application protocol adopted in this study is intended solely for experimental evaluation and does not represent a standardized conservation treatment. MMA/HPMA was applied by soft brushing under ambient laboratory conditions, following light surface pre-humectation to enhance penetration and reduce surface accumulation. The consolidant was applied in three successive applications with controlled intervals, allowing partial solvent evaporation between layers. This methodology was selected to simulate localized consolidation scenarios rather than large-scale or preventive treatments.

• *Preparation of Polymethyl methacrylate / Hydroxypropyl methacrylate (MMA/HPMA) by Emulsion Polymerization*

In a 250 mL round-bottom flask, poly (MMA-co-HPMA) was prepared by emulsion copolymerization of methyl methacrylate (MMA) and hydroxypropyl methacrylate (HPMA) at a 90:10 weight ratio. The emulsion contained 10% monomer mixture with sodium dodecyl sulfate (SDS) as emulsifier. The mixture was stirred for 30 min at room temperature, then heated to 70 °C. The initiator (PPS) was added, and stirring continued for 5 h. All components—monomer mixture, emulsifier, and initiator—were dissolved in the aqueous phase prior to polymerization.

— *Analytical and Investigative Techniques for Mural Painting Samples and Evaluation of MMA/HPMA Conservation Efficiency*

Various analytical and investigative techniques were employed to identify the components, structure, and techniques of the mural painting layers (Ali *et al.* 2021), and to assess key factors contributing to their deterioration. Since the samples were not subjected to prior restoration or conservation treatments, their preservation state remains unaltered, reflecting authentic characteristics (Cortea *et al.* 2024). These techniques were also applied to evaluate the efficiency of MMA/HPMA in conserving the mural painting samples.

• *Stereomicroscope Investigation*

A bench-top research zoom stereomicroscope (Discovery V.20) with reflected light and a Zeiss Axiocam ERC5S digital camera, at the Conservation Department, Faculty of Archaeology, Luxor University, Egypt, was used to examine cross-sections of mural painting samples at various magnifications. It also enabled detailed observation of the paint layer surface (Mohie & Korany 2025), including aged experimental samples before and after MMA/HPMA treatment. The examination assessed changes in surface texture, consolidant penetration, and its effectiveness in stabilizing the paint layer and filling microcracks.

• *Scanning Electron Microscope (SEM) Investigation*

A SEM Model JSM 5400 LV, equipped with an EDX Link ISIS detector from Oxford Instruments under high vacuum, at the Scanning Electron Microscope Unit, Assiut University, Egypt, was used to examine the microstructure and surface morphology of the mural painting samples. This enabled detailed investigation of pigment particles, layer adhesion, and deterioration features, providing insights into the samples' structural integrity and composition. SEM analysis was also applied to aged experimental samples before and after MMA/HPMA treatment to assess the material's penetration, its effect on pigment cohesion, and its role in filling intergranular voids and microcracks in the paint layers.

• *X-ray diffraction (XRD) Analysis*

X-Ray Diffraction equipment, Model PW/1480 with a Fe-Filter, operating at 40 kV and 30 mA with a scanning speed of 0.02/sec, at XRD Lab., Faculty of Archaeology, Cairo University, Egypt, was used to identify the pigment materials in the paint layer, the whitewash, and the filler materials in the ground layer.

• *Attenuated Total Reflection Fourier transform infrared (ATR-FTIR) spectroscopy Analysis*

Attenuated Total Reflection (ATR)-FTIR spectra were obtained using an ALPHA II FTIR spectrometer (Bruker Optik GmbH, Germany) in the range 4000–400 cm^{-1} with a resolution of 4 cm^{-1} at the National Research Centre, Dokki, Cairo, Egypt. This analysis was employed to identify the paint medium or binding materials in the paint layers. FTIR spectroscopy can characterize both organic (e.g., binders)

and inorganic (e.g., pigments) materials. It measures the fraction of infrared light absorbed at specific wavelengths, producing spectra that reflect molecular vibrational modes. Each spectrum acts as a chemical fingerprint, enabling the identification of minerals and providing insights into their molecular structure (Jiménez-Desmond & Pozo-Antonio 2025).

• *Transmission Electron Microscope (TEM) Investigation*

A JEM-1230 electron microscope (JEOL Ltd., Japan), set to 200 kV, at the National Research Centre, Dokki, Cairo, Egypt, was used to characterize the shape and size of the prepared MMA/HPMA.

• *Colorimetric Measurements*

A portable colorimeter (FRU-WR10, Shenzhen Wave Optoelectronics Technology Co., Ltd., China) was used at the Conservation Department, Faculty of Archaeology, Luxor University, Egypt. Operating within the CIELAB colour system, the device measures colour differences (ΔE) using the formula: $\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(\Delta L^*)^2+(\Delta a^*)^2+(\Delta b^*)^2}$, where L* represents lightness, a* the red–green coordinate, and b* the yellow–blue coordinate (Baiza *et al.* 2021; Becherini *et al.* 2018). Colour changes in aged experimental samples were recorded before and after MMA/HPMA treatment. L*, a*, and b* values were measured at three random locations per sample, avoiding cracks. Measurements were also taken on an untreated control sample, comparable in pigment, binding medium, and painting technique, to ensure accurate comparison (Becherini *et al.* 2018).

• *Contact Angle Measurements*

Contact angle measurements were performed using a goniometer (OCA 15EC, DataPhysics Instruments GmbH, Germany) operating at 24 V DC with a maximum power of 70 W. A high-resolution IDS camera captured droplet images on sample surfaces, enabling precise angle measurements to assess the wettability of aged experimental samples before and after MMA/HPMA treatment at 1%, 2%, and 3% concentrations. Measurements were carried out at the Textile Laboratory, Centre of Excellence for Innovative Textile Products and Technology, National Research Centre, Cairo, Egypt.

Results and Discussion:

— *The Case Study Mural Painting Structure*

• *Cross-Section*

Examination of cross-sectional samples from the case study mural painting—including fragments that had fallen near the wall, about 2 mm away—revealed a stratigraphy consisting of the tomb wall (either carved rock or constructed sections), a coarse preparatory plaster layer, a finer plaster layer, and a very thin whitewash layer, topped by a single pigment layer [Figures 1a–1e]. In some samples, the artist applied a red pigment layer followed by an additional green layer [Figure 1f].

• *Vertical Photo Microscope (VPM)*

Stereomicroscopic examination was carried out to investigate the fine artistic details of the paint layers, the granulometry

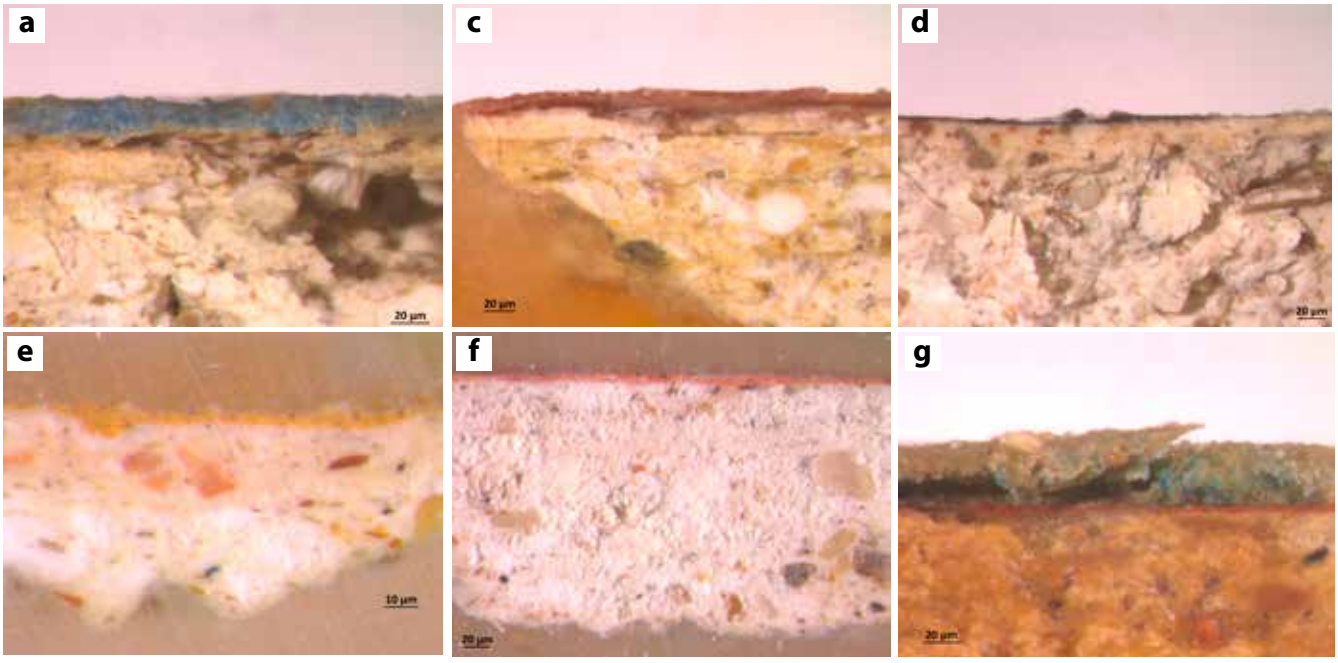


Figure 1.- Cross-section examination of paint layer samples showing: (a) blue sample; (b) red sample; (c) black sample; (d) yellow sample; (e) light pink sample; (f) green sample. (Source: Authors own work).

of the pigments, and to assess deterioration phenomena. The observations revealed that the paint layer was smoothly applied, suggesting that the pigments were finely ground to achieve this finish. Various signs of deterioration were detected, including surface dirt and contaminants, as well as darkening and colour alterations in certain pigment particles.

For example, the green pigment sample [Figure 2a] showed darkening, appearing almost brown, while the blue pigment [Figure 2b] displayed a shift to a pale blue, milky hue, or even green. Some red pigment particles [Figure 2c] had changed to yellow or orange. Efflorescence of salts was also observed, likely due to the migration of sulfate salts from the ground into the paint layer under the combined influence of humidity and heat. This process may lead to sulfation, where calcite crystals are replaced by gypsum (Ali *et al.* 2021). Biological activity could also be sources of sulfates. The black pigment sample [Figure 2d] showed evidence of possible biological colonization, warranting further investigation.

Microbial activity can also contribute to pigment discoloration through the production of metabolic pigments and by utilizing organic compounds within the paint as nutrients (Moussa *et al.* 2021). Evidence of insect infestation, likely from termites, was observed as holes and tunnel-like structures affecting the blue and black paint layers as well as the ground layer [Figures 4b, 4f] (Abd El-Tawab & Abu El-Hassan 2021). Powdering of the yellow pigment layer was also noted [Figure 2e], and traces of a substance, possibly a consolidant from previous restoration, were identified in the red and black samples [Figures 2g, 2h].

The observed surface characteristics—such as chromatic muting, micro-craquelure due to shrinkage, and certain darkening—are consistent with the natural ageing of tempera mural paintings and with original execution techniques. These features should not be systematically interpreted as deterioration requiring corrective intervention. In accordance with conservation ethics, it is essential to distinguish between patina, natural material ageing, and actual structural damage. The objective of conservation is neither to recover the original appearance nor to intensify colour saturation, but to stabilize the material condition while preserving historical authenticity and visual integrity.

- *Scanning Electron Microscope (SEM)*

Scanning electron microscopy revealed poor cohesion between pigment particles in the green, blue, and yellow samples [Figures 3a–3c], with numerous voids and pores. Sulfate salt crystals were observed, likely originating from the preparatory layers as a result of temperature and humidity fluctuations. Dust particles and surface contaminants were also present, distributed irregularly across the surface. In contrast, the red pigment particles (Fig. 3d) appeared cohesive and uniformly distributed, forming a more compact and homogeneous layer compared with the green, blue, and yellow samples. This indicates that the red pigment was better mixed and likely contained a higher binder content. Nevertheless, fine cracks and voids were present in the red layer, suggesting environmental stress or mechanical damage as contributing factors.

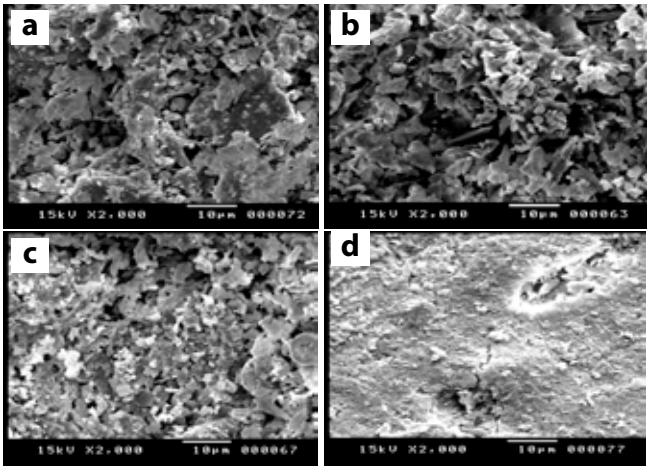


Figure 3.- Scanning electron microscope (SEM) micrographs of paint layer samples showing: (a) green sample; (b) blue sample; (c) yellow sample; (d) red sample.

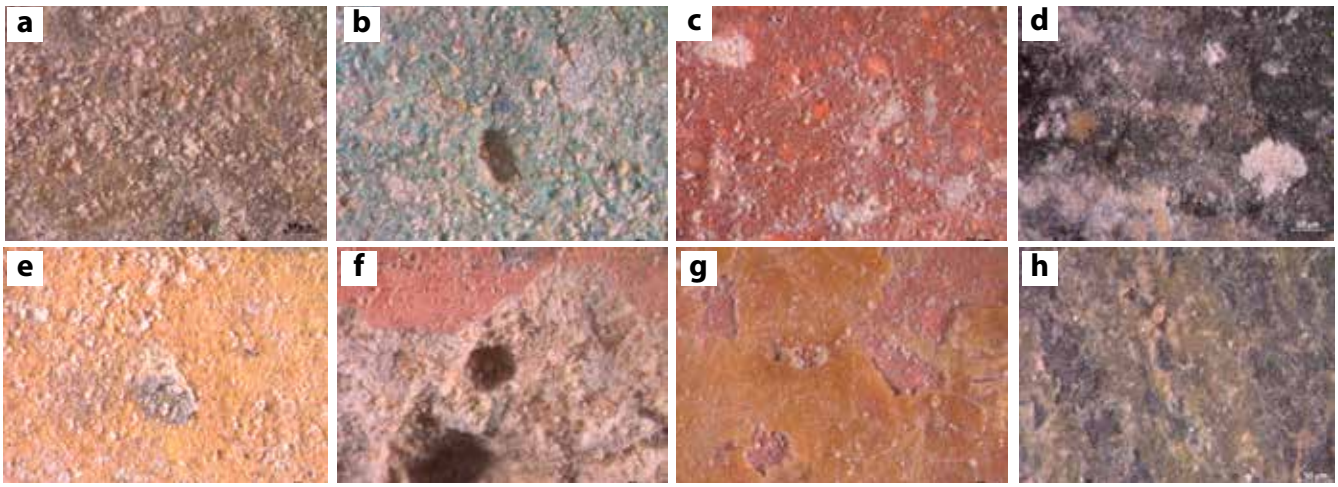


Figure 2.- Stereomicroscope examination of paint layer samples showing: (a) green area; (b) blue area; (c) red area; (d) black area; (e) yellow area; (f) ground layer; (g) another red area; (h) another black area. (Source: Authors own work)

— *The Case Study Mural Painting Composition and Technique*

• *Painting Layer*

- Pigment Materials:

Pigments used in ancient Egypt offer a fascinating area of study, as the Egyptians employed both natural and synthetic materials. Analysing these archaeological pigments provides insights into ancient technological advancements, cultural exchange, and informs conservation and restoration practices (Marey 2009). X-ray diffraction analysis of the pigment samples revealed that the artist used Egyptian green ($CaSiO_3$) as a green pigment [Figure 4a] and Egyptian blue ($CaCuSi_4O_{10}$) as a blue pigment [Figure 4b]. Red ochre (hematite, Fe_2O_3) served as the red pigment [Figure 4c], graphite (C) as the black pigment [Figure 4d], and yellow ochre (goethite, FeO(OH)) as the yellow pigment [Figure 4e].

- Paint Medium:

ATR-FTIR analysis of the mural paint layer indicates it is likely animal glue tempera, evidenced by strong protein-associated bands (Amide I, II, III). Key bands were observed at Amide I: 1622 cm^{-1}, Amide II: 1507 cm^{-1}, and Amide III: 1320 cm^{-1}, characteristic of collagen-based materials (Derrick, Stulik,

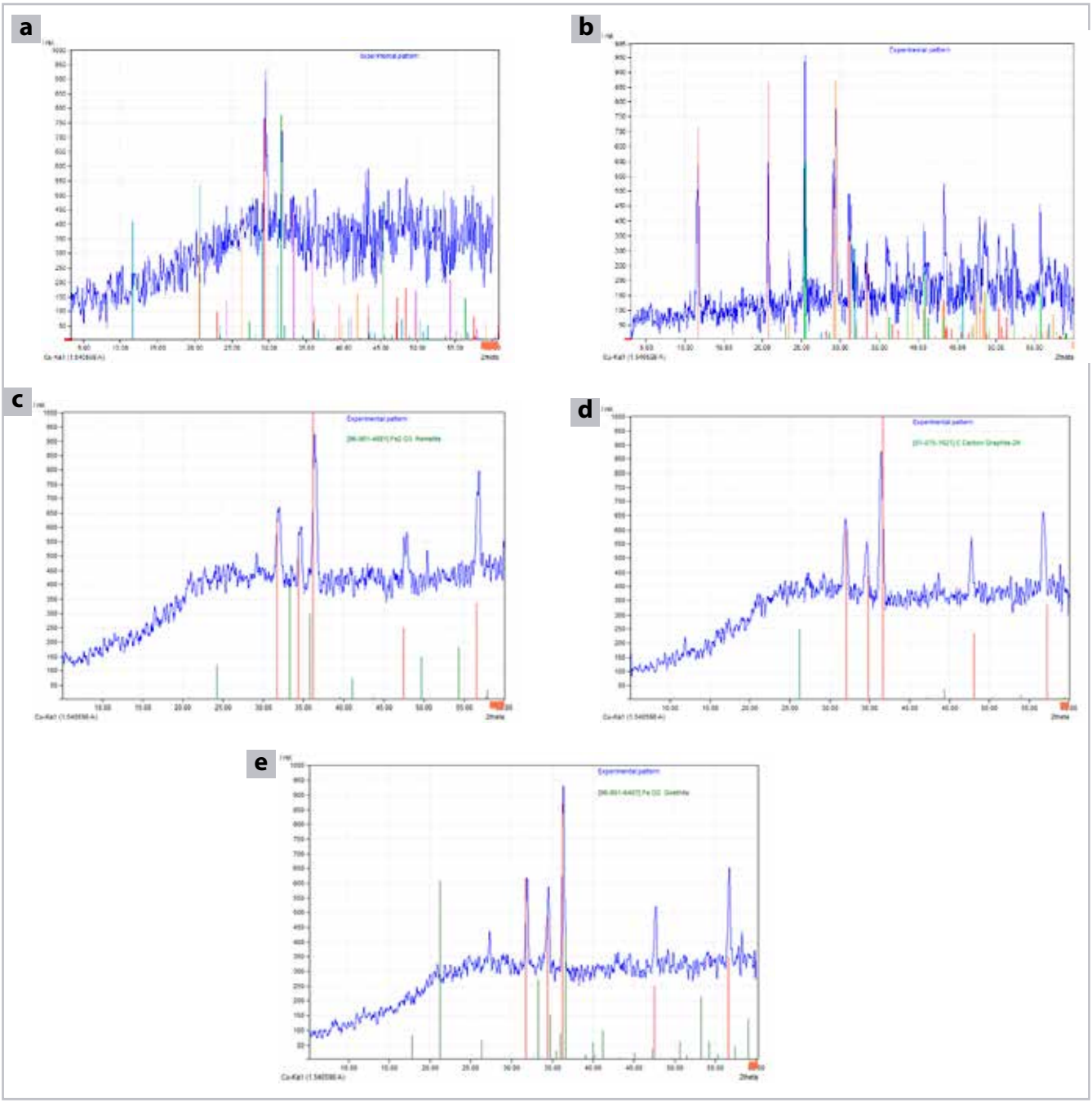


Figure 4.- XRD spectra of paint layer samples showing: (a) green sample; (b) blue sample; (c) red sample; (d) black sample; (e) yellow sample.

and Landry 1999). The spectrum [Figure 5a] shows a broad O–H/N–H stretching band at 3400.56 cm^{-1}, with distinct Amide I (C=O stretching), Amide II (N–H bending/C–N stretching), and Amide III (C–N/N–H) bands, confirming a polypeptide backbone typical of historical tempera binders (Derrick, Stulik, and Landry 1999; Mazzeo *et al*. 2008; Stamboliyska 2021). Peaks in the fingerprint region (1107.05, 1031.07, 874.28 cm^{-1}) may indicate carbohydrate residues, 798.80 cm^{-1} suggests C–H bending in aromatic residues, and 912, 889, 867 cm^{-1} indicate Si–O vibrations from substrate or pigments (Cortea *et al.* 2024). The ATR-FTIR spectrum of a yellow layer on red and black pigments [Figure 5b] reveals a lipidic or plant-derived resinous medium, likely a drying oil or resin-oil mixture from past restoration (Colombini and Modugno, 2009). Ester C=O stretching at 1735.09 cm^{-1}, aliphatic C–H stretches at 2854–2924 cm^{-1}, broad O–H at 3400.30 cm^{-1}, and C–O–C bands at 1244.91, 1156.47, and 1097.63 cm^{-1} confirm the presence of aged lipidic or resinous material (Mazzeo *et al.* 2008).

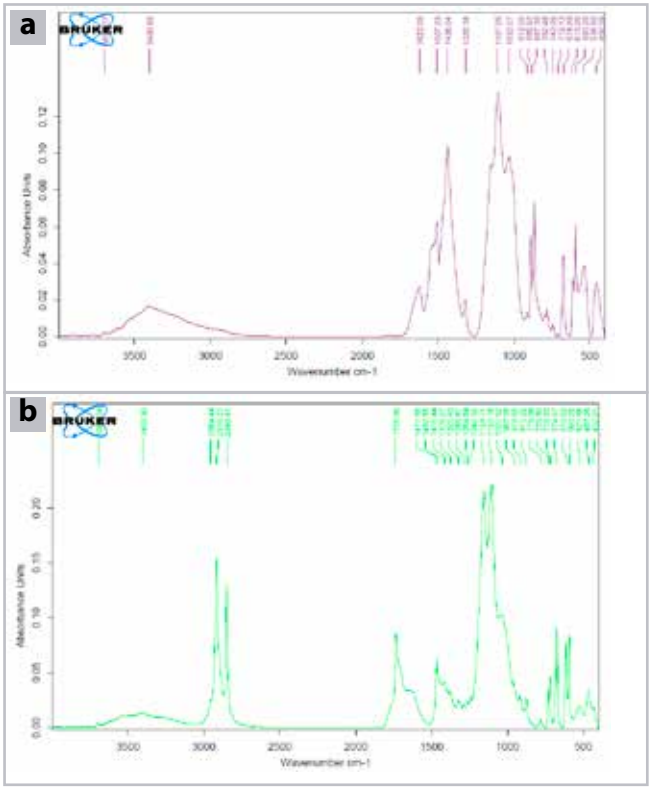


Figure 5.- ATR-FTIR spectra showing: (a) binding medium of the paint layer; (b) consolidant material, possibly applied during a previous restoration intervention or used as a varnish layer.

• *Ground Layer*

Artists typically did not apply pigments directly onto the stone substrate but first applied preparatory plaster layers topped with a whitewash layer (Moussa *et al.* 2021). X-ray diffraction analysis of the ground layers revealed that the whitewash consisted of calcium sulfate dihydrate ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$, gypsum) (Fig. 6a). The presence of anhydrite ($CaSO_4$) suggests gypsum transformation under elevated temperatures (Korany 2016). The fine plaster layer was composed of calcium carbonate ($CaCO_3$, powdered limestone) and gypsum (Abdelaal 2018) [Figure 6b], whereas the coarse plaster layer contained calcium carbonate, gypsum, and quartz (SiO_2) [Figure 6c]. Both coarse and fine plaster samples also showed traces of halite (NaCl).

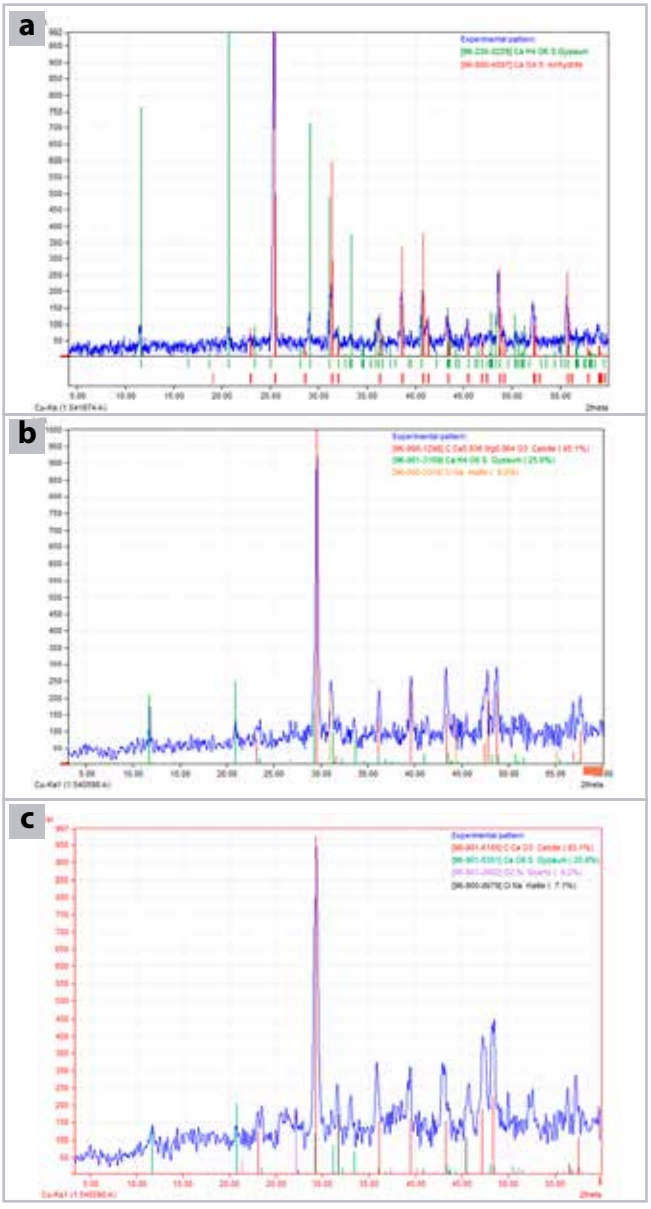


Figure 6.- XRD spectra of preparatory ground (priming layer) samples showing: (a) whitewash sample; (b) fine plaster sample; (c) coarse plaster sample.

— *Preservation State of the Case Study Mural Painting*

The mural shows deterioration due to climatic, biological, geological, and anthropogenic factors. Past vandalism [Figure 7a] likely weakened the structure, and undocumented restoration efforts may have further affected stability and visual integrity. Geologically, the tomb ceiling shows faulting [Figure 7b] and is partly built in the expansive Esna Shale Formation, which undergoes swelling and shrinkage, causing irreversible deterioration (Wüst & McLane 2000). Arid conditions further fracture the rock, while limestone and shale weathering fills fractures with secondary minerals (Moussa 2007).

Biological threats include wild bee nests and droppings[Figure 7c], introducing staining and biochemical damage. Salt migration, driven by heat, low humidity, and biological activity, contributed with the paint deterioration (Emara & Korany 2016). Thermal stress has caused cracking of plaster and paint layers, while ceiling instability and original application flaws added mechanical stress [Figures 7d–7f]. Fine plaster and whitewash show flaking [Figure 7g], peeling [Figure 7h], and blanching [Figure 7i], worsened by seasonal temperature–humidity shifts. Salt efflorescence crystallizes and rehydrates, expanding and causing cracking, powdering, and flaking (Marey 2009).

XRD analysis confirmed halite recrystallization, while gypsum dehydrates to anhydrite, weakening plaster and causing fissures (Korany & Elhazmy 2019). Pigment fading—especially blue and yellow—is evident [Figures 7j–7k]; Moussa *et al.* 2021). Water, debris, and dust from rain or flash floods also damage surfaces [Figures 7l–7m]. Artistic techniques, such as applying red over undried white, produced colour shifts [Figure 7n].

In summary, TT81's heterogeneous mural layers, combined with high temperature, humidity fluctuations, and geological instability, undergo differential expansion and contraction, producing micro-cracks, delamination, and progressive deterioration (Doehne & Price 2010).

The observed deterioration phenomena—such as pigment powdering, microcracking, salt efflorescence, and chromatic alterations—are common in mural paintings located in subterranean contexts. These conditions do not

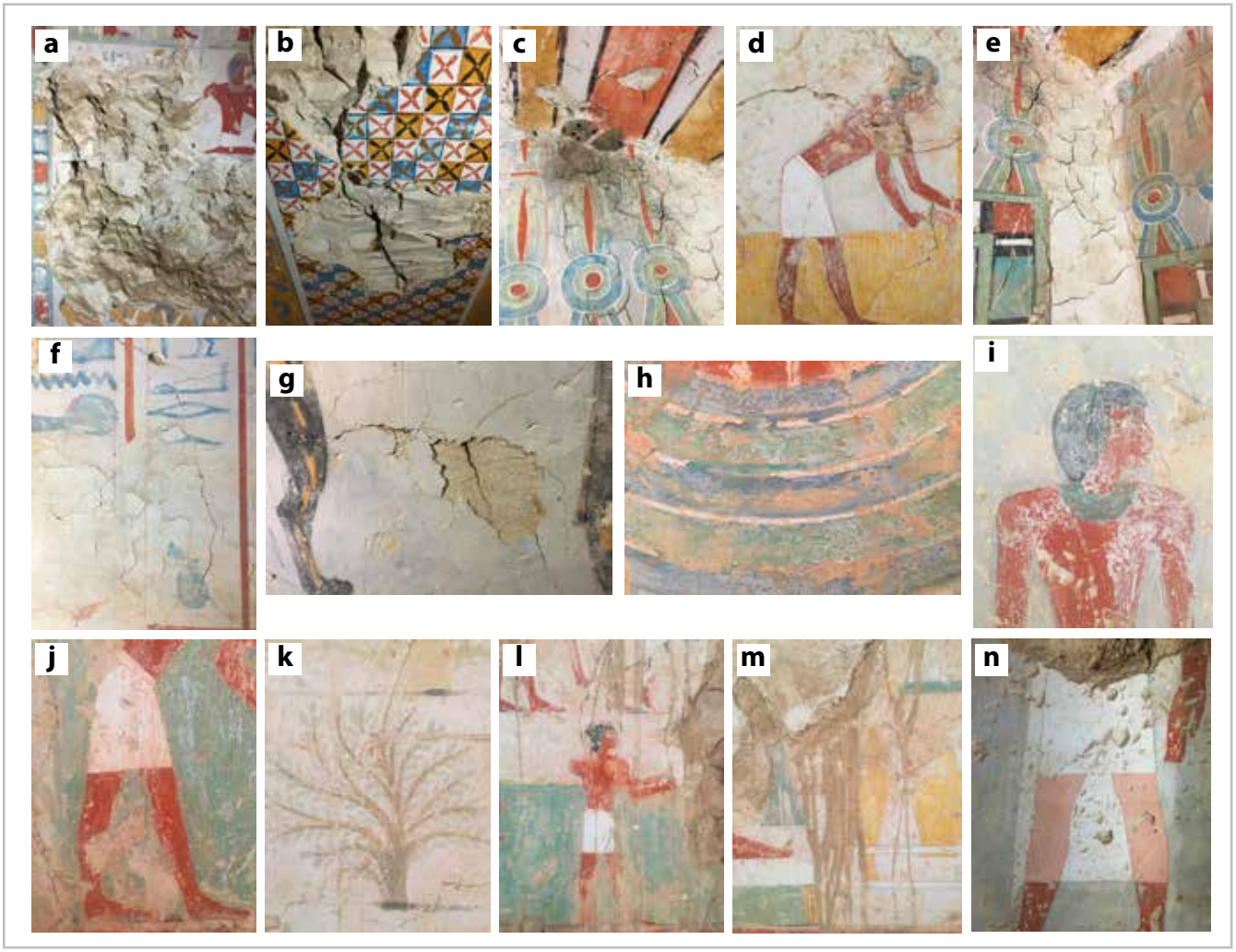


Figure 7.- Illustrates various forms of deterioration in the TT81 tomb: (a) intentional human-induced damage or vandalism and destruction from earlier periods; (b) a geological issue, specifically separation or faulting in the tomb ceiling; (c) biological deterioration, namely the presence of wild bee nests or droppings; (d) cracking in the paint layers caused by geological issues; (e) cracking in the paint layers due to improper techniques employed by the artist during application; (f) cracking in the paint layers resulting from fluctuations in high temperature and relative humidity; (g) separation or flaking of the preparatory ground and paint layers; (h) flaking of the paint layer; (i) blanching of the paint layer or efflorescence of salts on the surface; (j) colour change in the paint layer; (k) fading of the paint layer; (l) impact of water and debris from rain or sudden flash floods on the deterioration of the tomb's mural paintings; (m) further impact of water and debris from rain or flash floods on mural deterioration; (n) improper technique employed by the artist in applying red paint over the white layer before it had dried. (Source: Authors own work)

necessarily justify general consolidation treatments. In many cases, localized desalination, surface cleaning, and removal of extraneous materials represent more appropriate conservation measures. Accordingly, any potential use of MMA/HPMA should be strictly limited to localized areas exhibiting active flaking or powdering, and it must never be employed as a preventive treatment or for extensive surface coverage.

— Evaluation of MMA/HPMA Efficiency in the Conservation of Experimental Mural Painting Samples

• *Characterization of the Morphology and Microstructure of the Prepared MMA/HPMA*

TEM micrographs of the prepared MMA/HPMA copolymer showed well-dispersed, nearly spherical nanoparticles with relatively homogeneous sizes ranging from 66 nm to 71 nm, confirming their nanoscale dimensions. The particle boundaries were clearly defined with minimal agglomeration [Figure 8a]. Figure 8b reveals a uniform distribution and dense, coherent arrangement of particles, indicating excellent film-forming properties. These morphological characteristics confirm that the emulsion polymerization process successfully produced stable nanosized MMA/HPMA copolymer particles with uniform shape and distribution. The nanoscale size is advantageous for improving penetration and adhesion in consolidation treatments. Furthermore, the absence of large clusters or phase separation indicates successful copolymerization of MMA and HPMA into a homogeneous hybrid material, beneficial for crack treatment, pore filling, reduction of material powderiness, and creating a water-repellent layer.

While the nanoscale dimensions of the MMA/HPMA particles may favour penetration into microcracks and intergranular voids under laboratory conditions, the formation of continuous or dense polymeric films must be regarded with caution. In mural painting conservation, particularly in hypogean environments, the development of occlusive layers may interfere with vapour permeability and exacerbate moisture-related deterioration. Therefore, film-forming behaviour observed at higher concentrations should be considered a potential risk factor, reinforcing the necessity of restricting application to minimal, localized zones and avoiding surface coating effects.

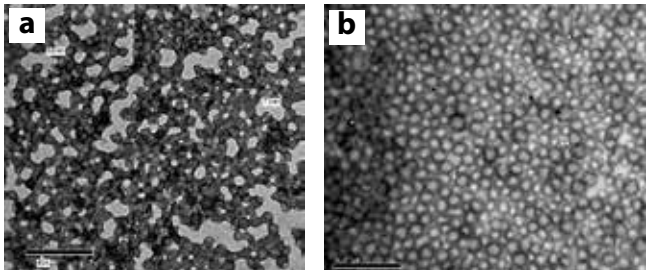


Figure 8.- TEM micrographs of the prepared MMA/HPMA showing: (a) MMA/HPMA particles morphology after the synthesis process; (b) homogeneous dispersion between MMA and HPMA.

• *Scanning Electron Microscope (SEM) Investigation of Experimental Samples Before and After Treatment*

SEM micrographs of the treated aged samples, compared with the untreated control [Figure 9a], showed that the 1% concentration formed a thin, irregular surface layer with incomplete coverage, though it penetrated pores and filled cracks [Figure 9b]. The 2% concentration produced a more uniform surface layer and moderately filled pores and cracks, maintaining the surface properties [Figure 9c]. The 3% concentration formed a noticeably thicker and more continuous layer [Figure 9d].

SEM observations indicate that increasing MMA/HPMA concentration leads to progressive filling of pores and microcracks; however, higher concentrations also promote the formation of a more continuous surface layer. While this behavior may improve short-term cohesion, it also highlights a critical conservation concern. The formation of continuous or semi-occlusive polymer films may interfere with vapor permeability, which is essential for the long-term stability of mural paintings, particularly in underground environments where moisture exchange is unavoidable. Therefore, concentrations leading to excessive surface film formation should be considered unsuitable for in situ application.

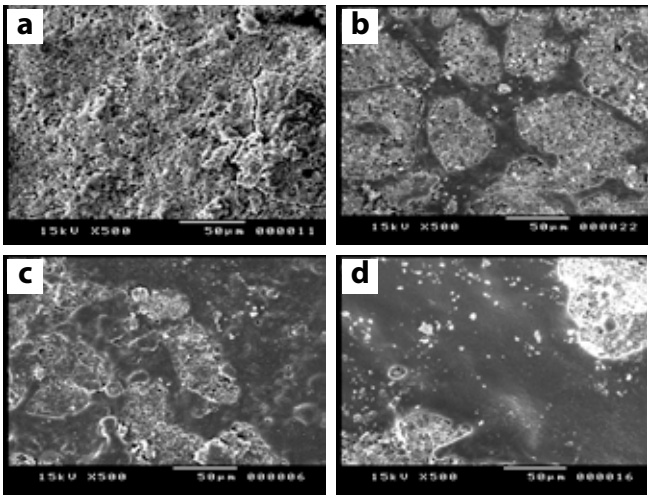


Figure 9.- Scanning electron microscope (SEM) micrographs of the experimental samples showing: (a) aged untreated sample; (b) aged treated sample 1%; (c) aged treated sample 2%; (d) aged treated sample 3%.

• *Stereomicroscope Investigation of Experimental Samples Before and After Treatment*

Microscopic examination of the treated aged samples, compared with the untreated control [Figure 10a], revealed no visible change in appearance. The 1% MMA/HPMA treatment did not fill microcracks, nor did it form a uniform protective layer, resulting in limited surface protection [Figure 10b]. In contrast, the 2% treatment effectively filled cracks, achieving an optimal balance between pore penetration, crack filling, and surface layer formation [Figure 10c]. The 3% treatment

not only filled cracks but also formed a thin surface film in some areas, creating a thicker, more homogeneous layer with noticeable material accumulation within cracks [Figure 10d].

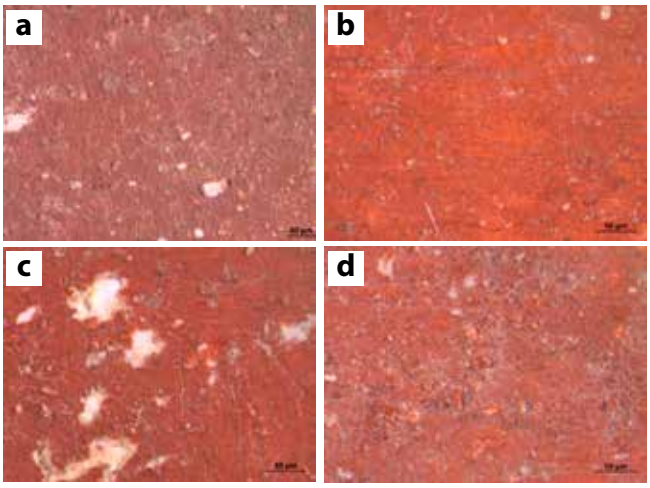


Figure 10.- Stereomicroscope examination of the experimental samples showing: (a) aged untreated sample; (b) aged treated sample 1%; (c) aged treated sample 2%; (d) aged treated sample 3%. (Source: Authors own work)

• *Colorimetric Measurements of Experimental Samples Before and After Treatment*

The colorimetric analysis of artificially aged experimental samples before and after treatment is presented in Table 1. The untreated sample showed baseline values of L* = 50.97, a* = 14.01, and b* = 8.43, reflecting darkening from artificial ageing.

Following treatment, colour changes varied with MMA/HPMA concentration. The 1% sample showed moderate change (ΔE = 8.00), primarily due to increased redness (Δa* = +4.47), yellowness (Δb* = +6.20), and slight darkening (ΔL* = –2.38). The 2% sample exhibited the highest shift (ΔE = 20.29) with decreased lightness (ΔL* = –4.99) and strong increases in chromatic components (Δa* = +11.86, Δb* = +15.69). The 3% sample showed milder impact (ΔE = 12.86).

All treated samples exceeded the perceptibility threshold (2 < ΔE < 3) (Limbo & Piergiovanni 2006). The pronounced ΔE for the 2% treatment reflects enhanced red pigment saturation rather than a detrimental effect, consistent with reports that consolidants can intensify red hues without altering pigment structure (Baiza *et al.* 2021; Becherini *et al.* 2018).

The ΔE difference between 1% and 3% treatments is only 4 units, within visually acceptable limits, confirming the consolidant does not significantly alter appearance. ΔE ≥ 5 is generally acceptable in conservation practice (Baiza *et al.* 2021).

The chromatic changes observed after treatment, particularly the increase in color saturation, should not be interpreted as a conservation objective. Variations such as color fading, micro-craquelure due to shrinkage, and surface darkening are often inherent characteristics of aged tempera mural paintings and may form part of the historical patina. These features should not be systematically classified as deterioration. The aim of conservation is not to recover the original appearance or enhance chromatic intensity, but to stabilize the material while respecting the natural ageing processes of its constituent materials.

Sample	Colour values			Colour difference			Total colour difference
	*L**	*a**	*b**	*ΔL**	*Δa**	*Δb**	*ΔE*
aged untreated sample	50.97	14.01	8.43	---	---	---	---
aged treated sample 1%	50.03	19.26	15.07	- 2.38	4.47	6.20	8.00
aged treated sample 2%	45.48	27.19	25.68	- 4.99	11.86	15.69	20.29
aged treated sample 3%	47.82	21.40	18.47	- 1.87	7.21	10.48	12.86

Table 1.- Table 1. Shows the colour change values of aged untreated and treated experimental samples.

• *Contact Angle Measurements of Experimental Samples Before and After Treatment*

Water contact angle (CA) measurements for the experimental samples before and after treatment [Figure 11] showed that the untreated sample (0°) absorbed water readily. Treatment improved water resistance: 1% MMA/HPMA yielded a CA of 31.7°, 2% reached 53.3°, and 3% achieved 58°, indicating progressively enhanced repellency.

CA is a key indicator of surface wettability, with regimes defined as superhydrophilic (CA < 5°), hydrophilic (5° < CA < 90°), hydrophobic (90° < CA < 150°), and superhydrophobic (CA > 150°) (Manoudis et al., 2017). Lower angles reflect higher water spreadability; higher angles indicate greater water repellency.

Although all treated surfaces remain hydrophilic (CA < 90°), the increasing CA with higher MMA/HPMA concentrations demonstrates reduced water absorption. Symmetry between left and right CA values confirms uniform application of the consolidant and homogeneity of surface properties.

Although contact angle measurements demonstrate a reduction in surface wettability with increasing MMA/HPMA concentration, all treated samples remain within the hydrophilic range. This finding confirms that the copolymer does not render the surface impermeable; however, even partial reduction of surface permeability may pose risks in the presence of internal moisture pathways. In cases of sudden water ingress, such as flash floods, the application of synthetic copolymers may exacerbate deterioration by hindering evaporation and promoting salt mobilization. Consequently, MMA/HPMA cannot be considered a protective solution against flooding or moisture-related damage.

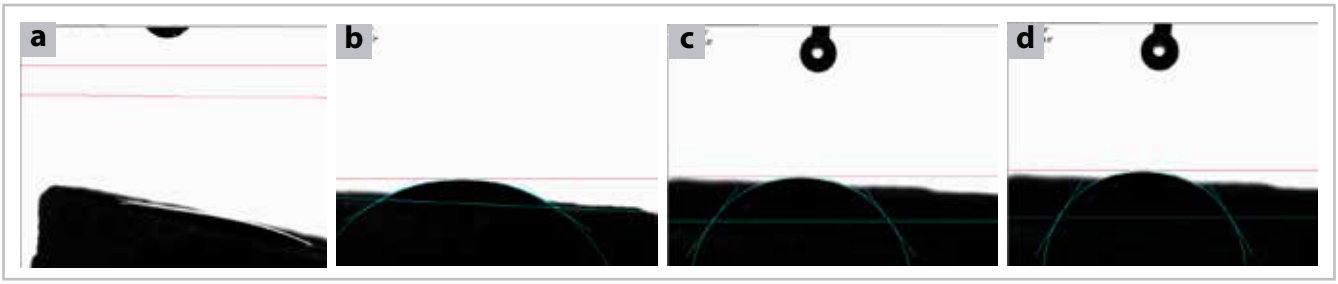


Figure 11.- Static contact angle measurement (wettability) of the experimental samples showing: (a) aged untreated sample; (b) aged treated sample 1%; (c) aged treated sample 2%; (d) aged treated sample 3%.

Conclusion

This study provides a comprehensive assessment of the materials, techniques, and deterioration of the mural paintings in tomb TT81, offering insights into their historical execution and current conservation challenges. Analytical results confirm the use of animal glue tempera with traditional pigments, including Egyptian blue, Egyptian green, red and yellow ochre, and carbon black. Documented deterioration—colour changes, cracking, flaking, vandalism, and residues from previous restorations—highlights the need for targeted conservation strategies. Experimental evaluation of Polymethyl Methacrylate/ Hydroxypropyl Methacrylate (MMA/HPMA) copolymer showed that 2% and 3% concentrations provide effective consolidation, balancing structural reinforcement with minimal visual alteration while significantly improving water resistance. These benefits are particularly relevant for mitigating risks from flash floods, moisture fluctuations, and extreme temperatures combined with microclimatic variations. The findings support integrating MMA/HPMA copolymer at optimized concentrations into conservation protocols for mural paintings at environmentally vulnerable heritage sites, contributing to their long-term preservation.

Acknowledgments

The authors would like to acknowledge the Permanent Committee for Egyptian Antiquities at the Ministry of Tourism and Antiquities, as well as to the West Bank Antiquities Zone, especially Al-Qurna Antiquities Area, for their invaluable support and approval to conduct a study on selected samples from the mural paintings in tombs located in the Sheikh Abd el-Qurna region.

References

ABD EL-TAWAB, N.A. & ABU EL-HASSAN, R. (2021). 'Technical examination and state of conservation of wall painting at the Theban tomb TT15 at Dra' Abu El-Naga Necropolis, Western Thebes, Luxor, Egypt', I*nternational Journal of Conservation Science*, 12(4): 1391–1406.

ABDELAAL, S. (2018). 'New approach for the study of wall paintings in Abu El-leaf monastery, Fayoum Oasis, Egypt', International *Journal of Conservation Science*, 9(3): 429–438.

ABDEL-KAREEM, O. & NASR, H. (2010). 'Enhancing the long-term durability of historical wool textiles using water dispersed nano polymers', *Journal of American Science*, 6(10): 1186–1194.

ABDEL-MAKSOUD, G., ABDALLAH, A., YOUSSEF, R., ELSAYED, D., LABIB, N., MOHAMED, W.S. & IBRAHIM, M. (2024). 'Evaluation of the efficiency of polyacrylamide and poly(MMA-HEMA) for the consolidation of vegetable-tanned leather artifacts', *Pigment & Resin Technology*, 53(3): 283–293. https://doi.org/10.1108/PRT-02-2022-0014.

ADAIKALAM, K., VIKRAMAN, D., LEE, D.-H., CHO, Y.-A. & KIM, H.-S. (2024). 'Optical and UV shielding properties of inorganic nanoparticles embedded in polymethyl methacrylate nanocomposite freestanding films', *Polymers*, 16(8): 1048. https://doi.org/10.3390/polym16081048.

ALEMAM, E. (2021). Cleaning of wall paintings by polyvinyl alcohol–borax/agarose (PVA–B/AG) double network hydrogels: Characterization, assessment, and applications. PhD thesis. University of Antwerp, Faculty of Design Sciences, Belgium.

ALI, M.F., EL-SHAFEY, H. & MAHMOUD, H.M. (2021). 'Multianalytical techniques of Al-Bīmāristān Al-Mu'ayyidi mural painting at historic Cairo: Contribution to conservation and restoration', *Scientific Culture*, 7(2): 33–47. https://doi.org/10.5281/zenodo.4465494.

ALI, N.A. (2021). 'Zinc oxide on polymethyl methacrylate prepared by pulsed laser deposition in artistic and aesthetic application', *Egyptian Journal of Chemistry*, 64(9):4791–4795. https://doi.org/10.21608/EJCHEM.2021.49047.3003.

ALI, U., KARIM, K.J. BT. A. & BUANG, N.A. (2015). 'A review of the properties and applications of poly(methyl methacrylate) (PMMA)', Polymer Reviews, 55(4): 678–705. https://doi.org/10.1080/15583724.2015.1031377.

BAIZA, B., GIL, M., GALACHO, C., CANDEIAS, A. & GIRGINOVA, P.I. (2021) .'Preliminary studies of the effects of nanoconsolidants on mural paint layers with a lack of cohesion', *Heritage*, 4(4): 3288–3306. https://doi.org/10.3390/heritage4040183.

BECHERINI, F., DURANTE, C., BOURGUIGNON, E., LI VIGNI, M., DETALLE, V., BERNARDI, A. & TOMASIN, P. (2018). 'Aesthetic compatibility assessment of consolidants for wall paintings by means of multivariate analysis of colorimetric data', *Chemistry Central Journal,* 12(98). https://doi.org/10.1186/s13065-018-0465-7.

BRIGGS, P.C. & JIALANELLA, G.L. (2010). 'Advances in acrylic structural adhesives', in D.A. Dillard (ed.) *Advances in Structural Adhesive Bonding*. Cambridge: Woodhead Publishing,132–150. https://doi.org/10.1533/9781845698058.1.132.

COLOMBINI, M.P. & MODUGNO, F. (2009). 'Organic materials in art and archaeology', in Colombini, M.P. & Modugno, F. (eds.) Organic Mass Spectrometry in Art and Archaeology. Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd.

CORTEA, I.M., GHERVASE, L., RATOIU, L., ȚENTEA, O. & DINU, M. (2024) .'New insights into the materials and painting techniques of ancient wall paintings from the Roman province of Dacia: A minimally invasive multi-method approach', *Heritage*, 7(9): 5268–5294. https://doi.org/10.3390/heritage7090248.

DARWISH, S. (2013). 'Evaluation of the effectiveness of some consolidants used for the treatment of the 19th century Egyptian cemetery wall painting', *International Journal of Conservation Science*, 4(4): 413–422.

DEMAS, M. & AGNEW, N. (eds.) (2012). *Valley of the Queens: Assessment Report. Volume 1: Conservation and Management Planning*. Los Angeles: Getty Conservation Institute.

DERRICK, M.R., STULIK, D. & LANDRY, J.M. (1999). *Infrared Spectroscopy in Conservation Science*. Los Angeles: Getty Conservation Institute. Available at: https://www.getty.edu/publications/virtuallibrary/0892364696.html

DOEHNE, E. & PRICE, C.A. (2010). *Stone Conservation: An Overview of Current Research. 2nd edn.* Los Angeles: Getty Conservation Institute.

DZIOBEK, E. (1992). *Das Grab des Ineni: Theben Nr. 81*. Mainz am Rhein: Verlag Philipp von Zabern.

EMARA, A.S. & KORANY, M.S. (2016). 'An analytical study of building materials and deterioration factors of Farasan heritage houses, and the recommendations of conservation and rehabilitation (German House case study)', *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 216: 561–569. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.12.021.

FARMAKALIDIS, H., DOUVAS, A., KARATASIOS, I., SOTIROPOULOU, S., BOYATZIS, S., ARGITIS, P., CHRYSSOULAKIS, Y. & KILIKOGLOU, V. (2016). 'Accelerated thermal ageing of acrylic copolymers, cyclohexanone-based and urea-aldehyde resins used in paintings conservation', *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, 16: 213–228. https://doi.org/10.5281/zenodo.163773.

HASSAN, R. & MOHAMED, W.S. (2017). 'Effect of methyl methacrylate/hydroxyethyl methacrylate copolymer on optical and mechanical properties and long-term durability of paper under accelerated ageing', *International Journal of Conservation Science*, 8(2): 237–250.

HEMEDA, S. (2021). 'Geo-environmental monitoring and 3D finite elements stability analysis for site investigation of underground monuments: Horemheb tomb (KV57), Luxor, Egypt', *Heritage Science,* 9(17). https://doi.org/10.1186/s40494-021-00487-3.

JIMÉNEZ-DESMOND, D. & POZO-ANTONIO, J.S. (2025). 'Fourier transform infrared (FTIR) database of historical pigments: A comparison between ATR-FTIR and DRIFT modalities', *Applied Sciences*, 15, 3941. https://doi.org/10.3390/app15073941.

KAVDA, S., GOLFOMITSOU, S. & RICHARDSON, E. (2023). 'Effects of selected solvents on PMMA after prolonged exposure: Unilateral NMR and ATR-FTIR investigations', *Heritage Science,* 11(63). https://doi.org/10.1186/s40494-023-00881-z.

KORANY, M.S. & ELHAZMY, M.A. (2019). 'Traditional architecture in Jazan region: A study of the most important factors of deterioration and proposals for restoration and conservation (Abu Soma Palace case study)', *Tourism and Archaeology Journal*, 31(1):1–20. https://doi.org/10.33948/1077-031-001-001. (Translated from Arabic).

KORANY, M.S. (2016). 'Archaeological houses at Farasan: The deterioration factors and the recommendations of restoration and conservation applied on Alrufai House', *Journal of Archaeology and Heritage Studies*, 7: 187–209. https://doi.org/10.33948/1643-000-007-007. (Translated from Arabic).

LIMBO, S. & PIERGIOVANNI, L. (2006). 'Shelf life of minimally processed potatoes. Part 1. Effects of high oxygen partial pressures in combination with ascorbic and citric acids on enzymatic browning', *Postharvest Biology and Technology*, 39: 254–264.

MANOUDIS, P.N., GEMENETZIS, D. & KARAPANAGIOTIS, I. (2017) 'A comparative study of the wetting properties of a superhydrophobic siloxane material and rose petal', Scientific Culture, 3(2):7–12. https://doi.org/10.5281/zenodo.438182.

MAREY MAHMOUD, H. (2022). 'An effective polymer nanocomposite based on tetraethoxysilane (TEOS) and SiO_2–Al_2O_3 nanoparticles for super protection of damaged ancient Egyptian wall paintings', *Pigment & Resin Technology*, 51(3): 344–353. https://doi.org/10.1108/PRT-01-2021-0013.

MAREY, H. (2009). *Study of the chromatic changes of the ancient pigments in some wall paintings in Egypt and the procedures of conservation*. PhD thesis. Aristotle University of Thessaloniki, Faculty of Engineering, Greece.

MAZZEO, R., PRATI, S. & QUARANTA, M. (2008). 'Attenuated total reflection micro-FTIR characterisation of pigment–binder interaction in reconstructed paint films', *Analytical and Bioanalytical Chemistry,* 392: 65–76. https://doi.org/10.1007/s00216-008-2126-5.

MIKAYAMA, A., HOKOI, S., OGURA, D., OKADA, K., & SU, B. (2015). 'Effects of Drifting Sand Particles on Deterioration of Mural Paintings on the East Wall of Cave 285 in Mogao Caves, Dunhuang,' *Energy Procedia,* 78:1311-1316. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.146

MOHIE, M.A., & KORANY, M.S. (2025). Comprehensive study of materials and techniques for the structural conservation of a Maramaldo painting on canvas from the 19th century by Eleuterio Pagliano. *Pigment & Resin Technology*. https://doi.org/10.1108/PRT-05-2025-0050

MOUSSA, A. (2007). *Assessing the decay agents of wall paintings in Al Qurna and Wadi El-Natrun regions, Egypt*. PhD thesis. Aristotle University of Thessaloniki, Faculty of Science, Greece.

MOUSSA, A., BADAWY, M. & SABER, N. (2021). 'Chromatic alteration of Egyptian blue and Egyptian green pigments in Pharaonic Late Period tempera murals', *Scientific Culture*, 7(2):1–15. https://doi.org/10.5281/zenodo.4465458.

MOUSSA, A.M.A., KANTIRANIS, N., VOUDOURIS, K.S., STRATIS, J.A., ALI, M.F. & CHRISTARAS, V. (2009). 'The impact of soluble salts on the deterioration of Pharaonic and Coptic wall paintings at Al Qurna, Egypt: Mineralogy and chemistry', *Archaeometry*, 51:292–308. https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.2008.00422.x.

PORTER, B. & MOSS, R.L.B. (1970). *Topographical Bibliography of Ancient Egyptian Hieroglyphic Texts, Reliefs, and Paintings*. 2nd edn. Vol. 1, Part 1: *Theban Necropolis*. Revised by E.W. Burney. Oxford: Griffith Institute.

POULIS, J.A., MOSLEH, Y., CANSELL, E., CIMINO, D., PLOEGER, R., RENÉ DE LA RIE, E., MCGLINCHEY, C.W. & SEYMOUR, K. (2022). 'Mechanical and physical characterization of natural and synthetic consolidants', *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 117(B): 103015. https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2021.103015.

PRASAD, S.G. & LAL, C. (2023) 'Spectroscopic investigations of optical bandgap and search for reaction mechanism chemistry due to γ-rays irradiated PMMA polymer', *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 13(2):187. https://doi.org/10.33263/BRIAC132.187.

RAMADAN, S., EL-KHOLY, S.A. & ELHAGRASSY, A.F. (2024). 'Comparative study on the effect of chitosan, chitosan nanoparticles, and SiO_2-loaded chitosan for the consolidation of the painted stone', *Journal of Cultural Heritage*, 70: 312–322. https://doi.org/10.1016/j.culher.2024.10.006.

REFAAT, F., MAREY MAHMOUD, H., EL-SABBAGH, B. & BRANIA, A. (2020). 'Evaluating thermal and UV stability of some protective coatings for historical murals in Egypt', *Advanced Research in Conservation Science*, 1(2): 31–47. https://doi.org/10.21608/arcs.2020.28415.1003

STAMBOLIYSKA, B., TAPANOV, S., VELCHEVA, E., YANCHEVA, D., ROGOZHEROV, M., GLAVCHEVA, Z., LALEV, G. & DIMITROV, M. (2021). 'The altar wall paintings of the catholicon "The Nativity of the Virgin", Rila Monastery, Bulgaria: Identification of the painting materials by means of vibrational spectroscopic techniques complemented by EDX, XRD and TGA analysis', *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 247, 119087. https://doi.org/10.1016/j.saa.2020.119087.

SU, B., ZHANG, H., BINJIAN, Z., DEQIANG, J., ZHANG, R. & XIANG, T. (2018) 'A scientific investigation of five polymeric materials used in the conservation of murals in Dunhuang Mogao Grottoes', Journal of Cultural Heritage, 31:105–111.

TRUJILLO-LEMON, M., JONES, M. & STANSBURY, J. (2007). 'Hydrogen bonding interactions in methacrylate monomers and polymers', Journal of Biomedical Materials Research Part A, 83:734–746. https://doi.org/10.1002/jbm.a.31448.

WÜST, R.A.J. & MCLANE, J. (2000). 'Rock deterioration in the Royal Tomb of Seti I, Valley of the Kings, Luxor, Egypt', *Engineering Geology*, 58:163–190.

Author/s



Mahmoud Sayed Korany
mahmoudsayed.sca@gmail.com
Conservation Department, Faculty of Archaeology, Luxor University, Luxor, Egypt.
https://orcid.org/0000-0001-6384-0910

Mahmoud Sayed Korany is a member of the academic staff in the Conservation Department, Faculty of Archaeology, Luxor University. He holds an M.A. and a Ph.D. in Archaeological Conservation from Cairo University. He has supervised M.Sc. and Ph.D. theses in archaeological conservation and has published extensively in international peer-reviewed journals. He also serves as a reviewer for several international journals and as an editorial board member of a number of academic periodicals. He is the author of several books and has taught courses on the conservation and restoration of archaeological artifacts through part-time appointments at various faculties and institutes. In addition, he has participated in national and international research projects on cultural heritage preservation and management. He has also taken part in several restoration projects of historic buildings and in the conservation of museum artifacts, as well as in numerous archaeological excavation missions within and outside Egypt. Moreover, he is a member of the expert committees responsible for inspecting architecturally significant historic buildings and for developing conservation and management plans for archaeological sites in Egypt.



Wael Sabry Mohamed
wsabry1976@yahoo.com
Polymers and Pigments Department, National Research Centre, Dokki, Giza, Egypt.
https://orcid.org/0000-0001-5246-7620

Wael Sabry Mohamed is a Professor in the Department of Polymers and Pigments at the National Research Centre. He holds a Ph.D. from the University of Stuttgart, Germany, specializing in the application of nanotechnology in polymers. He has served as principal investigator for numerous internal scientific projects and participated in several external and international projects. He has supervised many M.Sc. and Ph.D. theses and has authored over 100 publications in high-impact international journals. He has also presented at numerous international conferences, both in Egypt and abroad.

Artículo enviado 18/10/2025
Artículo aceptado el 29/01/2026

https://doi.org/10.37558/gec.v29i1.1454



Tiempo de respuesta y variación dimensional del papel ante fluctuaciones de humedad relativa: implicaciones para su conservación preventiva

María Sobrino Estalrich, Salvador Muñoz-Viñas

Resumen: La respuesta del papel a las fluctuaciones de humedad relativa ambiental (HR) constituye un factor determinante para su conservación, exposición y almacenamiento, especialmente en obras de gran formato. Este estudio analiza el comportamiento dimensional de tres tipos de papel sometidos a cambios controlados de HR, registrando las variaciones longitudinales y transversales en intervalos de 5 minutos hasta que se alcanza el equilibrio higroscópico con el ambiente. Los resultados muestran que la mayor parte del cambio dimensional ocurre durante los primeros 10–15 minutos tras la alteración de la HR, estabilizándose antes de los 20 minutos en todos los casos. Se confirmó además un comportamiento marcadamente anisotrópico: las expansiones fueron más lentas y pronunciadas en dirección transversal (CD) que en la dirección de fabricación (MD). El papel envejecido mostró menor respuesta y una estabilización más rápida, lo que sugiere una reducción en su capacidad de absorción y desorción de agua, asociada a su envejecimiento. Estos resultados, permiten comprender los mecanismos y tiempos de respuesta del papel frente a las variaciones de HR ambiental, y aportan criterios útiles para la conservación preventiva, especialmente en el contexto actual de flexibilización de las condiciones ambientales en instituciones culturales.

Palabras clave: humedad relativa, conservación preventiva, papel, variaciones termohigrométricas, gran formato, anisotropía

Response time and dimensional variation of paper to fluctuations in relative humidity: implications for its preventive conservation

Abstract: The response of paper to fluctuations in relative humidity (RH) is a key factor in its conservation, display, and storage, particularly for large-format artworks. This study examines the dimensional behavior of three types of paper under changing moisture conditions, measuring longitudinal and transversal variations every five minutes until equilibrium was reached. The results show that most dimensional change occurs within the first 10–15 minutes after a change in RH, and that stabilization occurs within 20 minutes in all cases. As expected, pronounced anisotropic behavior was observed: expansion was slower and more pronounced in the cross direction (CD) than in the machine direction (MD). The aged paper showed a less pronounced response and faster stabilization, suggesting a reduced capacity for water adsorption and desorption, associated with fibre ageing. These findings provide a basis for understanding how and when paper responds to changes in RH, and offer useful criteria for preventive conservation, particularly in the context of increasing flexibility in environmental conditions within cultural institutions.

Keywords: relative humidity, preventive conservation, paper, thermo-hygrometric variations, large-format, anisotropy

Tempo de resposta e variação dimensional do papel perante flutuações de humidade relativa: implicações para a sua conservação preventiva

Resumo: A resposta do papel às flutuações da humidade relativa ambiental (HR) constitui um fator determinante para a sua conservação, exposição e armazenamento, especialmente no caso de obras de grande formato. Este estudo analisa o comportamento dimensional de três tipos de papel submetidos a alterações controladas de HR, registando as variações longitudinais e transversais em intervalos de 5 minutos até que seja atingido o equilíbrio higroscópico com o ambiente. Os resultados mostram que a maior parte da variação dimensional ocorre durante os primeiros 10–15 minutos após a alteração da HR, estabilizando antes dos 20 minutos em todos os casos. Confirmou-se ainda um comportamento marcadamente anisotrópico: as expansões foram mais lentas e mais pronunciadas na direção transversal (CD) do que na direção de fabrico (MD). O papel envelhecido apresentou uma resposta menor e uma estabilização mais rápida, o que sugere uma redução na sua capacidade de absorção e dessorção de água, associada ao processo de envelhecimento. Estes resultados permitem compreender melhor os mecanismos e os tempos de resposta do papel face às variações de HR ambiental e fornecem critérios úteis para a conservação preventiva, especialmente no contexto atual de flexibilização das condições ambientais em instituições culturais.

Palavras-chave: humidade relativa, conservação preventiva, papel, variações termo-higrométricas, grande formato, anisotropia

Introducción

Las obras cuyo soporte es el papel constituyen una parte fundamental del patrimonio cultural, tanto por su valor artístico como documental. Este material posee una naturaleza altamente higroscópica, lo cual significa que su comportamiento dimensional y mecánico está directamente relacionado con las condiciones ambientales, en especial con la humedad y la temperatura. La absorción o desorción de humedad ambiental por parte de las moléculas de celulosa constitutivas del papel puede provocar cambios dimensionales, ondulaciones o tensiones internas en las obras (Banik y Brückle 2018: 97-98). Estos fenómenos no solo afectan a la apariencia estética de las obras, sino que condicionan su estabilidad mecánica, limitan su manipulación y condicionan la interacción con los materiales que forman parte del montaje. Comprender, pues, la relación entre las obras en papel y su entorno resulta esencial para anticipar y controlar estas variaciones, y por tanto sus consecuencias visibles.

Son muchos los autores que han estudiado el comportamiento del papel frente a los cambios en la humedad ambiental. Desde finales del siglo XIX ya se realizaban estudios sobre los efectos de la humedad en la estabilidad del papel, principalmente desde el punto de vista de la producción industrial. Asimismo, otros estudios posteriores más completos examinaron factores estructurales y químicos que influyen en la estabilidad dimensional del papel expuesto a cambios en la humedad ambiental, como el tipo y el grado de encolado, la longitud de la fibra, el contenido inicial de agua, entre otros, aportando un conocimiento más profundo y detallado sobre las variaciones dimensionales del papel (Caulfield 1988: 87-97; Larsson, Hoc y Wågberg 2009: 356-371). Estudios recientes suman a los factores anteriores otros como el contacto interfibrilar, el aumento de tamaño correspondiente a la celulosa, hemicelulosa y a la lignina, la densidad, porosidad, entre muchos otros (Lindner 2018: 1-17).

La mayoría de estudios realizados al respecto están orientados hacia la fabricación y optimización industrial del papel, donde el control dimensional se considera un parámetro crítico vinculado a los procesos de secado, encolado, generación de tensiones internas, etc. (Kiely 1927: par 17-21; Carson 1944: 1-11; Caulfield 1988: 87-97; Niskanen, Kuskowski y Bronkhorst 1997: 103-109; Larsson, Hoc y Wågberg 2009: 356-371; Lindner 2018: 1-17; Vonk, Geers y Hoefnagels 2020: 62-71). En el campo de la conservación, sin embargo, los estudios realizados respecto a la influencia de la humedad en las obras de papel suelen abordar otras cuestiones como la interacción directa con el agua durante tratamientos acuosos como baños, desacidificación o laminaciones, o la solubilidad de tintas u otras técnicas sustentadas. Otras investigaciones relevantes dentro del ámbito museístico se han centrado en el impacto de las condiciones ambientales sobre materiales patrimoniales, estableciendo límites seguros para cada tipo de material, teniendo en cuenta parámetros como humedad, temperatura, iluminación o contaminantes (Mecklenburg y Tumosa 1999: 69-74; Pavlogeorgatos 2003: 1457-1460). La bibliografía sobre este aspecto es igualmente extensa. Cabe destacar el libro de Banik y Brückle *Paper and Water: A Guide for Conservators*, por consolidar en un único volumen el conocimiento teórico y experimental sobre la interacción entre el agua y el papel y sus implicaciones para la conservación de este material.

La tendencia actual es ampliar los parámetros de temperatura y humedad en las instituciones por cuestiones energéticas y de sostenibilidad (Anderson *et al.* 2010; Atkinson 2014: 205-210; Coelho *et al.* 2020: 1-4; Lucchi 2018: 180-183; Pavlogeorgatos 2003: 1457-1460), siempre teniendo en cuenta la seguridad de las piezas. Sin embargo, la relajación de los parámetros ambientales plantea nuevas preguntas para el conservador-restaurador: ¿en qué medida las fluctuaciones de humedad relativa (HR) ambiental, aun dentro de los rangos considerados seguros, afectan a la estabilidad dimensional de las obras en papel? ¿Con qué rapidez se dan estos cambios dimensionales una vez producida una alteración en la HR?

El presente artículo se centra en las consecuencias perceptibles que presentan las fluctuaciones de HR —que en la mayoría de los casos son reversibles y no necesariamente dañinas— pero que a veces dificultan sobremanera la exposición y el almacenaje de obras en papel, especialmente las de gran formato (Facini y Evans, 2003: 111-117; Benvestito, 2007: 51-52; Brockman y Mellon, 2020: párrafos 1-10; Filter, 1994:1-6; Machačko, 2019: 159-161; Mecklenburg y Tumosa, 1999: 69-74). En este contexto, el estudio persigue dos objetivos principales: por un lado, cuantificar las variaciones dimensionales del papel ante cambios de HR en distintos tipos de soporte; por otro, determinar en qué intervalo temporal se concentran dichas variaciones. Este enfoque resulta especialmente útil, ya que nos permite valorar la rapidez de respuesta del material frente a fluctuaciones ambientales y comparar la respuesta dimensional entre distintos tipos de papel. A su vez, esto permite prever posibles alteraciones morfológicas —un aspecto particularmente relevante en obras de gran formato, donde incluso pequeñas variaciones porcentuales pueden tener consecuencias perceptibles—.

Metodología experimental

En los experimentos se emplearon tres tipos de papel con distintos niveles de calidad, composición y envejecimiento:

- Papel A: Se trata de un papel continuo gris, 100% reciclado, a partir de recortes de periódico, cuyo gramaje es de 80 g/m^2. Es un papel sin colorantes, encolantes, blanqueantes ni cargas. Al ser un papel heterogéneo en color— ya que se realiza a partir de remanentes de papeles de periódico— no se recoge información en la ficha técnica del fabricante respecto al brillo, blancura o cualquier característica estética (Papeles Rasepe, s.f.:

1-2). Este tipo de papel se ha seleccionado por su alta reactividad higroscópica, derivada de su bajo grado de encolado y cargas, y de su composición a partir de fibras cortas y recicladas (Roberts 1996: 155-160).

- Papel B: Es un papel blanco cuyo gramaje es de 80 g/m^2. Se fabrica a partir de fibra de eucalipto exclusivamente, con cargas minerales, almidón y encolantes. En este caso, la ficha técnica presenta datos como la opacidad, blancura, brillo, etc. que, si bien no son relevantes para este estudio, pueden consultarse en la misma (C.A.D Plotters 2018: 1-5). Este papel se ha elegido ya que es indicado para impresión *ink-jet*. Además, es un soporte ampliamente utilizado en documentos e impresos contemporáneos.

- Papel C: Corresponde a tres ejemplares originales de carteles cinematográficos de la película "No hago la guerra… prefiero el amor", que se estrenó el año 1966 en Italia y en 1967 en España. Se trata de una impresión *offset* en un papel de 80 g/m^2. Este papel, de aproximadamente 60 años de antigüedad, se ha empleado para comparar la reacción de papeles nuevos con papeles que presentan cierto grado de envejecimiento y han estado sometidos a múltiples cambios en las condiciones ambientales.

Durante la formación de los papeles fabricados industrialmente, las fibras adquieren una dirección preferente, a lo que denominamos MD (*machine direction*), restringiendo la deformación de la hoja en dirección longitudinal. Al aumentar la humedad relativa, las fibras en MD apenas varían en longitud, pero sí experimentan una expansión significativa en su eje transversal debido a la absorción de moléculas de agua. Dado que esta expansión ocurre perpendicularmente al eje de las fibras, y estas se encuentran alineadas con la MD, el incremento dimensional se manifiesta principalmente en CD (*cross direction*). Este fenómeno explica por qué la expansión total en CD puede multiplicar varias veces la observada en MD (Muñoz Viñas 2008: 245).

De cada tipo de papel se fabricaron tres probetas de 100 x 70cm, para constatar la reproducibilidad de los resultados. En todos los casos la MD es paralela al lado largo del papel, y la CD es perpendicular a la misma. La elección de este formato responde a la necesidad de emplear muestras de dimensiones suficientes para registrar las mediciones con precisión. Asimismo, es un formato ampliamente empleado en carteles publicitarios y cinematográficos.

Antes de comenzar el testado, las muestras fueron aclimatadas durante 24 h a 23 ± 2ºC siguiendo las condiciones dictadas por las normas UNE 7522:1997 y EN 20187:1993 (AENOR 1993; 1997) y entre 50 ± 2% de humedad relativa. Las pruebas se realizaron en una cámara de humedad, que permitía mantener la humedad estable con una variación máxima de un 4%. Cada muestra se colocó sobre un soporte totalmente plano e inerte sin fijación, de modo que el crecimiento y el decrecimiento fueran libres y sin restricciones de ningún tipo. Previamente se realizaron marcas en lápiz de grafito en las zonas de medida, para asegurar que las mediciones se realizaran siempre en el mismo lugar: se hicieron tres puntos de medición por cada dirección de fibra, dos perimetrales y uno central, tanto en la MD como en la CD, empleando una regla milimetrada con un error instrumental máximo de 0,3 mm. Durante las pruebas, la HR en la cámara de humedad se mantuvo en 85 ± 2 %, mientras que, en el exterior, mediante un sistema de climatización, se mantuvo a 52 ± 2 %. En ambos casos se monitorizaron las condiciones ambientales mediante un termohigrómetro digital.

El experimento se desarrolló en tres fases principales:

- Acondicionamiento y medición preliminar: Medición de las probetas tras la aclimatación según la norma UNE 7522:1997 y EN 20187:1993 descritas anteriormente.

- Las muestras fueron trasladadas al interior de la cámara de humedad, a 85 ±2% de humedad relativa. Se tomaron mediciones de cada punto de la muestra cada 5 minutos, hasta que cuatro registros consecutivos mostraran la misma medida dentro del margen de error instrumental —0,3 mm—. Este fue el criterio adoptado para considerar a la muestra en equilibrio con la humedad ambiental, aunque las muestras se mantuvieron un total de dos horas en la cámara de humedad para comprobar que no había más crecimiento.

- Una vez alcanzada la estabilización en la cámara de humedad, las probetas se sacaron y se expusieron de nuevo al ambiente del laboratorio —52% ±2% — repitiendo el mismo protocolo de medición.

El cambio entre condiciones de humedad fue intencionalmente rápido y no refleja — o no debería— las condiciones habituales en instituciones o museos. En este caso, el propósito de aplicar un cambio tan brusco en las condiciones ambientales fue observar la respuesta máxima de los materiales provocando la variación más amplia posible. Este enfoque ofrece dos ventajas: en primer lugar, proporciona un límite superior en el rango de variación dimensional de los papeles testados, y, en segundo lugar, permite acotar un tiempo de reacción y de estabilización. Bajo gradientes más suaves, la magnitud de la variación será menor, pero los tiempos de reacción y estabilización pueden considerarse extrapolables, así como la relación entre el crecimiento de la MD y CD.

Las mediciones obtenidas en cada ensayo se transformaron en porcentajes de variación dimensional respecto a la longitud inicial de las probetas, mediante la relación:

$$\Delta L(\%)=(L_t - L_0)/L_0 \times 100$$

donde L_t corresponde a la longitud registrada en cada intervalo de tiempo y L_0 a la longitud inicial en condiciones ambientales 52 ±2%.

Para cada tipo de papel y dirección (MD y CD) se calcularon los valores a partir de tres probetas testadas para comprobar la homogeneidad de los resultados y determinar si presentan patrones similares.

Resultados

Los resultados obtenidos reflejan el comportamiento dimensional de los tres tipos de papel en las condiciones anteriormente especificadas. En todos los casos, las mediciones se expresan como porcentaje de cambio respecto a la longitud inicial y se representan en función del tiempo de exposición. La información derivada permite observar tanto la magnitud total de la expansión o contracción como la velocidad de estabilización en cada dirección de la fibra (MD y CD). Aunque no se mencionen las mediciones explícitamente, todas las muestras se consideraron estabilizadas tras cuatro mediciones sin cambios dimensionales (lo que equivale a 20 minutos sin cambios). De manera preventiva, las probetas permanecieron un total de dos horas en las condiciones especificadas anteriormente, para verificar su estabilidad; en ningún caso se registró crecimiento adicional.

— *Papel A*

En este caso, como resultaba esperable, el crecimiento en CD es mucho mayor que en MD. Los datos porcentuales de crecimiento total en las tres probetas respecto al tamaño inicial de la hoja oscilan entre un 0,10 y 0,25% en MD, lo cual equivale a un crecimiento medio de 0,17 cm. Por el contrario, los datos de crecimiento en CD se sitúan entre el 0,55 y 0,98%, siendo el crecimiento medio de 0,53 cm a lo ancho de las probetas. Estos valores reflejan la marcada anisotropía característica de este tipo de papel.

El gráfico anterior [Figura 1] corresponde al crecimiento porcentual en cada intervalo de tiempo. Como puede observarse, la mayor parte del crecimiento total se centra en los primeros 10 minutos, pero existen diferencias entre las direcciones de fibra: En MD la mayoría del crecimiento, en torno al 75% de media, se produce en los primeros minutos, y en torno al 95% tras los primeros 10 minutos; tras los 15 minutos no hay más movimientos. Sin embargo, el crecimiento en CD se realiza de manera ligeramente más gradual, en promedio, un 50% del crecimiento ocurre en los primeros 5 minutos, alrededor de un 85% en los primeros 10 minutos de exposición a la HR. Tras 20 minutos no hay más movimientos.

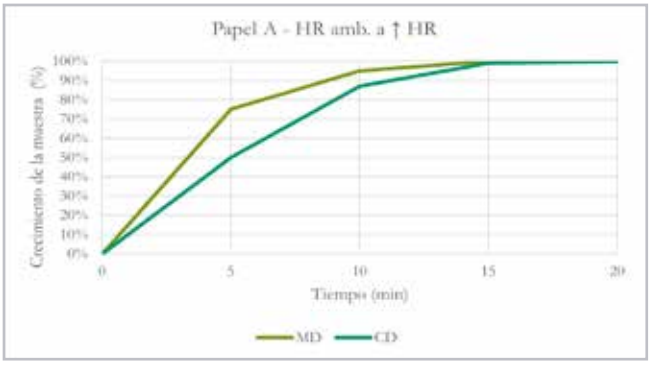


Figura 1.- Porcentaje de crecimiento del Papel A tras el paso de humedad relativa ambiental a elevada

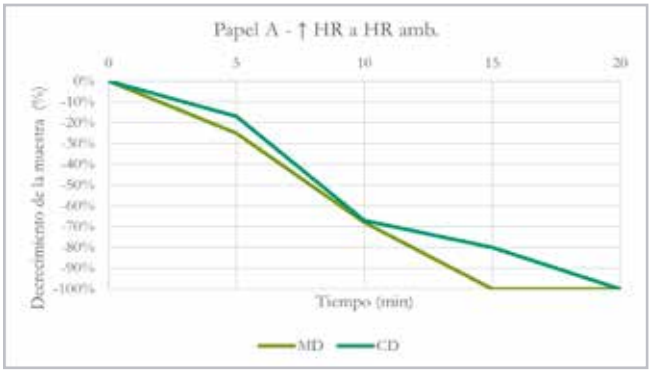


Figura 2.- Porcentaje de decrecimiento del Papel A tras el paso de humedad relativa elevada a ambiental

Este gráfico [Figura 2] corresponde a las mediciones realizadas en la siguiente fase —al someter las probetas a HR ambiental, tras haber sido sometidas a elevada HR—. El cambio dimensional en esta fase en esta y en las probetas posteriores se expresará en negativo, ya que se trata de un decrecimiento o encogimiento del papel. Como puede observarse, en ambas direcciones el decrecimiento es más progresivo que el crecimiento. Durante la fase de absorción, el 95% del crecimiento dado en MD se concentró en los primeros 10 minutos; posteriormente el 43% del crecimiento se produjo en el lapso entre 5 a 10 minutos de exposición. Con posterioridad a los 15 minutos no se observaron movimientos adicionales, finalizando la prueba con un decrecimiento de entre 0,33 y 0,40 cm, lo que sería equivalente a entre un 0,33 a un 0,40% en relación con la medida inicial. La CD se equilibra a los 20 minutos, es decir, es más progresiva, aunque tiene en común con la MD que la mayoría del decrecimiento se produce en el lapso entre los 5 y 10 minutos —en este caso correspondería al 50% del decrecimiento total—. Tras los 20 minutos de exposición, no hay más movimiento, lo cual se traduce en un decrecimiento medio de entre 0,35 y 0,53 cm, lo que equivaldría a entre el 0,55 y el 1,01% respecto a la medida inicial.

Es importante añadir que, respecto a las medidas iniciales, hay un encogimiento de entre 0,15 y 0,2 cm en MD debido al estrés mecánico durante el proceso de fabricación, también denominado built-in stress (Muñoz Viñas y Amorós Solera, 2008: 235-239; Moret de la Asunción, 2020: 26-27; Báguena Clemente, 2024: 24-25). En CD no se encuentran discrepancias respecto a la medida inicial, pese a que el crecimiento en esta dirección ha sido mucho mayor.

— *Papel B*

En este caso, como cabía esperar, también el crecimiento en CD es mayor que en MD. Respecto al MD, se observa

un crecimiento entre el 0,05 y el 0,17% respecto a la medida inicial, lo que se traduce en los mismos valores de crecimiento en centímetros. En CD, el crecimiento medio porcentual respecto a la medida inicial oscila entre 0,64 y 0,76% lo que se traduce en un crecimiento de entre 0,45 y 0,53 cm. La marcada diferencia entre ambas direcciones confirma de nuevo la marcada anisotropía del papel industrial.

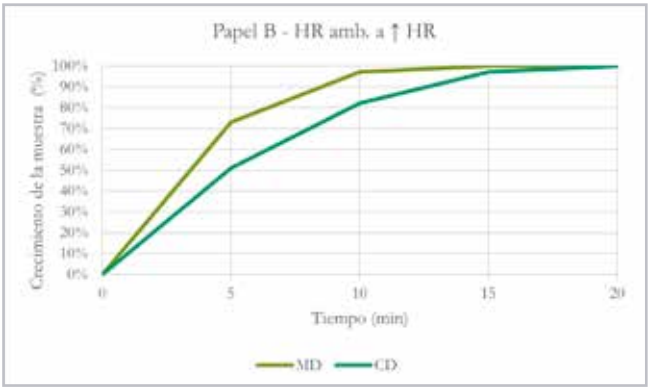


Figura 3.- Porcentaje de crecimiento del Papel B tras el paso de humedad relativa ambiental a elevada

Respecto a la distribución temporal de estos cambios [Figura 3], se observan similitudes con el papel A, en cuanto a que la gran mayoría del crecimiento se engloba en los primeros 15 minutos de exposición. Asimismo, se observa la misma tendencia de MD a crecer en los primeros minutos de exposición, así como la de CD a tener un crecimiento más progresivo y prolongado en el tiempo en comparación. En MD, el 73% del crecimiento total ocurre en los primeros 5 minutos; tras 10 minutos de exposición, se ha producido un 96% del crecimiento total. Tras los 15 minutos de exposición no se producen más movimientos dimensionales.

Por lo que respecta a CD, la expansión es también más gradual, y mantiene el mismo patrón general, centrándose la mayoría del crecimiento en los primeros 10 minutos de exposición.

Este gráfico, [Figura 4], corresponde a las mediciones realizadas en la tercera fase, tras el retorno de las probetas a condiciones ambientales tras alcanzar el equilibrio en

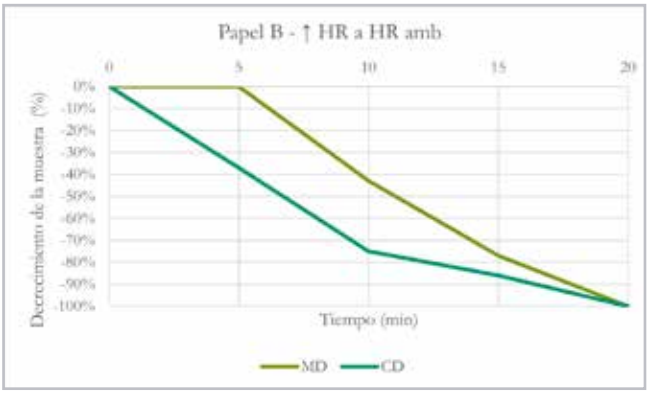


Figura 4.- Porcentaje de decrecimiento del Papel B tras el paso de humedad relativa elevada a ambiental

elevada HR. En general, los tiempos corresponden al mismo patrón que el papel A, pero con la particularidad de que la MD no crece en los primeros 5 minutos de exposición en ninguna de las tres probetas. Sin embargo, el tiempo en el que hay un cambio dimensional activo sigue siendo de 15 minutos. Partiendo de la base de que los cambios dimensionales en MD son muy reducidos, puede que el decrecimiento en el lapso tras los 5 minutos de exposición a HR ambiental estuviera por debajo del umbral de error, es decir, por debajo de 0,3 mm. No se detectaron variaciones posteriores a los 20 minutos.

Respecto a las variaciones en CD, se observa un comportamiento análogo al papel A: durante los primeros 5 minutos, se produce un cambio equivalente al 36% de media del cambio dimensional total; posteriormente, tras los 10 minutos de exposición se da el 74% del decrecimiento total; tras 15 minutos, se da el 84% del cambio dimensional total. Finalmente, a los 20 minutos se estabiliza y no se percibe ningún cambio más.

Tras la finalización de las pruebas, solamente se detectó una discrepancia en el tamaño de la hoja respecto a la medida inicial. Esta discrepancia de 0,02 cm se sitúa dentro del margen de error instrumental, y por tanto no es significativa.

— *Papel C*

En este caso, como en los casos anteriores, también el crecimiento en CD es mayor que en MD en condiciones de elevada HR. Respecto a las mediciones en MD, hay un crecimiento de entre el 0,13 y 0,18% en relación con el tamaño original, lo que se traduce en un crecimiento de entre 0,13 a 0,18 cm en el tamaño de las probetas. En relación con la CD, el crecimiento en relación al tamaño original es de entre el 0,36 y el 0,48%, es decir, entre 0,25 y 0,33 cm en estas probetas.

El comportamiento observado confirma la anisotropía del material, aunque con una respuesta dimensional reducida. Esta menor amplitud de cambio se asocia al envejecimiento del papel, que disminuye su capacidad de absorción y desorción de humedad (Erhardt, Tumosa y Mecklenburg 1999: 504; Muñoz Viñas y Amorós Solera 2008: 235-239; Muñoz Viñas 2008: 245-247; Muñoz Viñas 2006: 145-150). En el caso del papel C —el único de los testados que presenta envejecimiento natural—, dicho proceso implica la acumulación progresiva de transformaciones irreversibles de naturaleza fisicoquímica en la celulosa, como la escisión de cadenas glucosídicas, la oxidación y el *crosslinking* (Erhardt y Mecklenburg 1995: 247). Según Zervos (2010: 20), el envejecimiento también favorece la denominada "hornification", término que describe los cambios irreversibles en la capacidad de absorción, desorción y retención de agua tras ciclos repetidos de variación de humedad y temperatura. Estos fenómenos explican la menor respuesta dimensional del papel C frente a los papeles A y B.

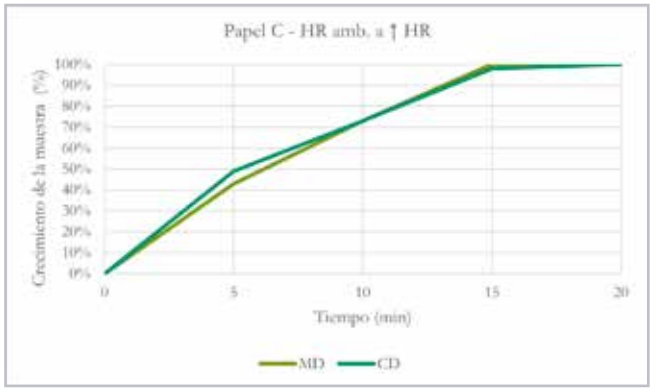


Figura 5.- Porcentaje de crecimiento del Papel C tras el paso de humedad relativa ambiental a elevada

El gráfico [Figura 5] evidencia una respuesta más heterogénea que en los papeles A y B. Si bien en MD se siguen produciendo la totalidad de los cambios dentro del rango de los 15 minutos de exposición: de media el 42% de los cambios se producen en los primeros 5 minutos y, cuando terminan los 10 minutos de exposición, se ha dado el 72% del crecimiento total. Destaca el lapso de los 5 a 10 minutos en la probeta 3, en el que no se producen cambios.

En CD las variaciones son aún más erráticas. La probeta 2 muestra una respuesta inicial intensa (un 87% del crecimiento total se produce a los 5 minutos de exposición, seguida por un cambio nulo durante los siguientes 5 minutos. La probeta 1 muestra una concentración del crecimiento en los primeros 10 minutos, donde se produce un 93% del crecimiento. Por último, en la probeta 3 el cambio es progresivo en los primeros 10 minutos, hasta acumular un 40% del cambio dimensional, sin embargo, la mayoría del mismo se produce a los 15 minutos (55%), y finalmente se produce un cambio muy ligero.

Respecto a los cambios dimensionales cuando las hojas se someten a HR ambiental tras su exposición a HR ambiental superior al 80% [Figura 6], los datos presentan una mayor homogeneidad entre las probetas que en la fase anterior. En este caso, el decrecimiento en MD se concentra en los 5 primeros minutos, con casi el 70% del decrecimiento total. Las probetas 1 y 3 no presentan cambios entre los 5 y 10 minutos.

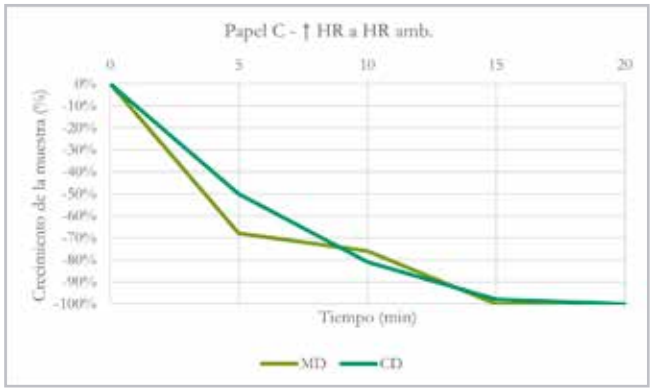


Figura 6.- Porcentaje de decrecimiento del Papel C tras el paso de humedad relativa elevada a ambiental

Aun así, todas las probetas se estabilizan a los 15 minutos, sin cambios posteriores.

El decrecimiento en la CD, si bien la mayoría del cambio dimensional se produce durante los primeros 5 minutos (50%), este se ralentiza progresivamente hasta alcanzar el equilibrio, llegando al 81% a los 10 minutos y al cambio total a los 15 minutos. Tras este tiempo no se observan más cambios.

No se detectaron discrepancias de tamaño respecto a las medidas iniciales, lo que indica que las probetas correspondientes al papel C recuperaron completamente sus dimensiones tras las pruebas, sin registrar variaciones apreciables dentro del umbral de medición. Este comportamiento es coherente con el comportamiento esperable en papeles envejecidos.

Discusión

La variación dimensional observada en las tres tipologías de papel sigue patrones claros y coherentes entre sí y entre los tres tipos de papeles testados. La respuesta dimensional en el ciclo de HR ambiental a HR elevada, la variación es generalmente más rápida que a la inversa, situándose la gran mayoría del cambio dimensional entre los 10 y 15 minutos de exposición a 85 ± 2%. Además, los resultados muestran una respuesta inicial más intensa de media en todos los casos, situándose la mayoría del crecimiento en los primeros 10 minutos.

En contraposición, en el ciclo opuesto, de HR elevada a HR ambiental, se ha observado que el equilibrio llega tras los 20 minutos, y presenta una variación dimensional más progresiva respecto al ciclo anterior, esto concuerda con los estudios de Lindner (2018: 9-10) y de Jarrell (1927) —citado en la tesis doctoral de Larsson (2008: 4)—. Este patrón está presente en los papeles nuevos, —A y B— mientras que en el papel envejecido —C— no se observaron diferencias significativas entre los ciclos: en ambos casos el equilibrio se alcanzó a los 15 minutos y los porcentajes de cambio dimensional se distribuyeron de forma más homogénea en el tiempo. Se produce, como es esperable, cierta histéresis que, sin embargo, en este contexto no consideramos relevante.

Por el contrario, sí que es relevante la diferencia de comportamiento entre MD y CD: Los cambios en MD son mucho más rápidos y pequeños, mientras que en CD más lentos y grandes. Estos resultados son coherentes con los obtenidos por Niskanen, Kuskowski y Bronkhorst (1997: 106-109), según los cuales, la tasa de deformación tras un cambio rápido de humedad depende tanto de la orientación de las fibras como del sentido de intercambio higroscópico (absorción o desorción). En sus ensayos concluyeron que las deformaciones en CD se desarrollaron más lentamente, y no alcanzaron el equilibrio hasta los 20 minutos de exposición. En cambio, las variaciones en MD fueron más rápidas. Según estos autores esto se debe a que la relajación de las tensiones internas generadas durante el secado del papel favorece una expansión inmediata en MD —aunque su magnitud total sea menor—. De hecho, nuestras probetas reproducen un comportamiento similar al

identificado por Niskanen, Kuskowski y Bronkhorst: aunque las magnitudes de crecimiento y las características de los papeles (gramaje, composición, etc.) difieran entre sí, tienden a seguir un mismo patrón de comportamiento temporal frente a un cambio brusco en la humedad relativa ambiental.

Aunque los efectos del envejecimiento sobre la celulosa han sido ampliamente descritos en la literatura (Zervos, 2010: 3; Erhart *et al.* 1999: 501-506; Mecklenburg y Tumosa 1999: 60-64; entre otros), los resultados obtenidos en este estudio permiten observar cómo dichos procesos se traducen en los cambios dimensionales. En las muestras del papel C (cartel envejecido), las variaciones dimensionales registradas fueron bastante menores que en los papeles nuevos, y tendieron a estabilizarse en torno a los 15 minutos. Esto sugiere una pérdida significativa de la capacidad de higroexpansión e higrocontracción del papel.

En el contexto del debate actual sobre la sostenibilidad ambiental en museos, estos hallazgos pueden resultar interesantes. Diversos autores han defendido la posibilidad de ampliar los rangos de temperatura y humedad relativa con el fin de reducir el consumo energético sin que ello implique comprometer la integridad de las obras (Anderson *et al.* 2010; Atkinson 2014: 205-210; Lucchi 2018: 180-183; Coelho *et al.* 2020: 1-4; Padfield 1994: 1-10); No obstante, esta es una cuestión que debe valorarse de manera individual considerando la naturaleza del material, el estado de conservación, las técnicas sustentadas, el tamaño de la obra, entre muchos otros factores. El comportamiento del papel C —un papel envejecido naturalmente— respalda parcialmente esta tendencia: su menor variación dimensional sugiere que, las oscilaciones moderadas de humedad pueden no generar deformaciones apreciables. Sin embargo, obras más recientes o higroscópicas podrían presentar respuestas mucho más marcadas frente a los mismos cambios ambientales.

Si bien el objetivo de este artículo no es cuestionar si las condiciones climáticas tradicionales son o no adecuadas, sino aportar una perspectiva complementaria, los datos obtenidos permiten reflexionar sobre la rapidez con la que las obras en papel responden a los cambios de humedad ambiental. El hallazgo de que la mayor parte de la expansión o contracción ocurre en los primeros 10–15 minutos tras la exposición a un cambio de HR constituye una información relevante para la gestión preventiva. Ello sugiere que, en entornos con control ambiental estable, las fluctuaciones breves pero intensas pueden generar respuestas visibles en papeles muy higroexpansivos en pocos minutos. Asimismo, si la fluctuación es breve y vuelve al estado inicial, también la obra podría revertir ese cambio de manera igualmente rápida.

Conclusiones

El presente estudio ha analizado el comportamiento dimensional de tres tipos de papel frente a cambios en la humedad relativa ambiental, observando patrones consistentes en la temporalización de las respuestas dimensionales. En la mayoría de los casos, la mayor parte de la variación dimensional se produce durante los primeros 10-15 minutos de exposición al pasar de condiciones ambientales normales (52 ± 2 %) a elevada HR (85 ± 2 %). La respuesta dimensional producida en el ciclo contrario, de elevada HR a HR ambiental, resultó más progresiva y se produjo durante los primeros 15-20 minutos de exposición. Asimismo, la diferencia entre las direcciones de fibra resulta evidente: los cambios en dirección transversal (CD) fueron mayores y más lentos que en la dirección de fabricación (MD), reproduciendo el comportamiento anisotrópico descrito por la literatura.

Desde la perspectiva de la conservación preventiva, estos resultados aportan información útil: aun cuando las fluctuaciones se mantengan dentro de rangos permisibles, el modo en que se produce el cambio —más gradual o más brusco— puede condicionar la respuesta dimensional del papel. Cuando la variación se produce de forma rápida, dicha respuesta puede desencadenarse casi de inmediato, favoreciendo la aparición de deformaciones perceptibles, mientras que cambios más progresivos tienden a pasar desapercibidos. Este aspecto resulta especialmente relevante en obras de gran formato, en las que pequeñas variaciones dimensionales pueden traducirse con mayor facilidad en alteraciones visibles de la planimetría, como ondulaciones o arrugas. En este sentido, dado que en la práctica pueden darse oscilaciones de HR en los espacios de exposición—ya que forman parte de la realidad operativa de muchos espacios museísticos—, la rapidez de la respuesta observada sugiere que una deformación puntual no debería requerir acciones inmediatas cuando el marco ambiental se mantiene dentro de rangos aceptables, siempre que se trate de episodios aislados, y considerando que el material puede tender a recuperar su estado previo en un intervalo de tiempo reducido; no obstante, la gestión preventiva debería seguir orientada a evitar fluctuaciones innecesarias o repetidas que incrementen la probabilidad de que se produzcan distorsiones visibles persistentes o patologías a largo plazo.

La menor respuesta dimensional y la estabilización más rápida observadas en el papel envejecido, indican que la antigüedad del soporte y su estado de conservación influyen en la magnitud del cambio dimensional y en el tiempo de respuesta del material ante fluctuaciones de HR. A efectos prácticos, este resultado es relevante porque sugiere que, bajo condiciones ambientales comparables, no todas las obras en papel presentan la misma susceptibilidad a manifestar deformaciones visibles ni el mismo ritmo de estabilización. En consecuencia, al planificar la exposición y el almacenaje, resulta pertinente considerar estas diferencias para anticipar qué obras pueden mostrar respuestas más marcadas y cuáles presentan menos reactividad frente a las oscilaciones ambientales —dentro de los rangos seguros—.

Estos resultados, aunque preliminares, aportan una base cuantitativa para comprender la velocidad real de respuesta del papel frente a variaciones ambientales. En el contexto actual, donde las instituciones culturales buscan equilibrar sostenibilidad energética y conservación, los datos obtenidos

pueden contribuir a definir estrategias más realistas que minimicen riesgos sin requerir un control ambiental excesivamente estricto.

Referencias

AENOR (1997). UNE 7522:1997. *Temperaturas de ensayo preferentes*. Madrid: Asociación Española de Normalización.

AA.VV.(2010). "The plus/minus Dilema: The Way Forward in Environmental Guidelines", En *International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works Dialogues for the New Century Discussions on the conservation of cultural heritage in a changing world.* Milwaukee: American Institute for Conservation.

ATKINSON, J. K. (2014). "Environmental conditions for the safeguarding of collections: A background to the current debate on the control of relative humidity and temperature", Studies in Conservation 59(4): 205-212. https://doi.org/10.1179/2047058414Y.0000000141

BÁGUENA CLEMENTE, M. (2024). *Evaluación de las técnicas de alisado por tensión: un estudio de las variaciones dimensionales del papel,* Trabajo Fin de Máster. Universitat Politècnica de València, Valencia.

BANIK, G. y BRÜCKLE, I. (2018). *Paper and water: a guide for conservators.* Munich: Siegl

BENVESTITO, C. (2007). "Venice in pieces: Preservation and display of a pieced and folded woodcut", *Paper Conservator: Journal of the Institute of Paper Conservation*, 31: 51-56 https://doi.org/10.1080/03094227.2007.9638653

BROCKMAN, M., MELLON, A. (2020). "Larger than Life: The Conservation Treatment of an Oversized Poster", Unframed. Los Ángeles: Los Ángeles County Museum of Art (LACMA) https://unframed.lacma.org/2020/04/20/larger-life-conservation-treatment-oversized-poster [consulta: 14/10/2025]

BRANDBERG, A., MOTAMEDIAN, H. R., KULACHENKO A., HIRN, U. (2020). "The role of the fiber and the bond in the hygroexpansion and curl of thin freely dried paper sheets", *International Journal of Solids and Structures,* 193-194: 302-313. https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2020.02.033

C.A.D PLOTTERS INK-JET (2018). *Opaco ink-jet 80-90 grs. Safety data sheet*.

CARSON, F. T. (1944). *Effect of humidity on physical properties of paper.* Washington: Department of Commerce. United States of America.

CAULFIELD, D. F. (1988). "Dimensional Stability of Paper: Papermaking Methods and Stabilization of Cell Walls", *Wood Science Seminar 1: Stabilization of the Wood Cell Wall*, 87-98.

COELHO, G. B. A., ENTRADAS SILVA, H., Y HENRIQUES F. M. A. (2020). "Impact of climate change in cultural heritage: from energy consumption to artefacts' conservation and building rehabilitation", *Energy and Buildings* 224: 1-19. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110250

EDWARDS SMITH, N. (1992). "The Mounting and Framing of a Large Work of Art on Paper; a Case Study – Victoria and Albert Museum", *Conservation Journal*, 03: 1-6.

ERHARDT, D., TUMOSA, C., MECKLENBURG, M. (1999). "Material consequences of the ageing of paper" En: *ICOM Committee for Conservation 12th Triennial Meeting Lyon*: 501-506

ERHARTD, D., MECKLENBURG, M. (1995). "Accelerated vs. Natural Aging: Effect of Aging Conditions on the Aging Process of Cellulose" En: VANDIVER, J. R et al. (eds.) *Materials Issues in Art and Archaeology IV* MRS Symposium Proceedings. Pittsburg: Materials Research Society ,352: 247-270. https://doi.org/10.1557/PROC-352-247

FACINI, M. S., Y EVANS, D. (2003). "Big Paper, Big Problems: Preservation Issues of Large Format Works on Paper", The Book and Paper Group Annual 22: 111-117

FILTER, S. (1994). "Historic Intent: Lodovico Ughi's Topographical Map of Venice; A Large Wall Map as an Historic Document, a Work of Art, and a Material Artifact", *The Book and Paper Group Annual*, 13: 1-6

KIELY, H. U. (1927). "The Effect of Moisture on Paper", *Joint Session of the Connecticut Valley Mill Superintendents and Printing House Craftsmen*. https://cool.culturalheritage.org/byauth/kiely/moisture.html [Consulta 10/10/2025]

LARSSON, A. (2008). *Dimensional Stability of Paper. Influence of fibre-fibre joints and fibre wall oxidation*, Tesis Doctoral. Royal Institute of Technology, Stockholm.

LARSSON, P., HOC, M., WÅGBERG, L. (2009). "The influence of grammage, moisture content, fibre furnish and chemical modifications on the hygro- and hydro-expansion of paper" *Advances in Pulp and Paper Research*, 355-388. https://doi.org/10.15376/frc.2009.1.355.

LINDNER, M. (2018). "Factors affecting the hygroexpansion of paper", *Journal of Materials Science,* 53:1-26. https://doi.org/10.1007/s10853-017-1358-1

LUCCHI, E. (2018). "Review of preventive conservation in museum buildings", *Journal of Cultural Heritage*, 29: 180-193. https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.09.003

MACHAČKO, L. "Problems of the conservation of artworks on large-format paper supports", *Works of Art on Parchment and Paper: Interdisciplinary Approaches*. Liubliana: Univerze v Ljubljani, 159-164. https://doi.org/10.4312/9789610602743

MECKLENBURG, M., TUMOSA C. H. (1999). "Temperature and relative humidity effects on the mechanical and chemical stability of collections", *ASHRAE Journal,* 64-79.

MORET DE LA ASUNCIÓN, A. (2020). *Impacto de los sistemas de alisado en tensión sobre el papel*, Trabajo Fin de Máster. Universitat Politècnica de València, Valencia.

MUÑOZ VIÑAS, S. (2006). "Understanding paper flattening (I). Principles and problems of common flattening techniques", *Arché*,1: 145-150.

MUÑOZ VIÑAS, S. (2008) "Anisotropía y creep. Recomendaciones para el alisado por presión del papel" 1*7th International Meeting on Heritage Conservation*, 245-247.

MUÑOZ VIÑAS, S., AMORÓS SOLERA, F. (2008). "Alteración del tamaño de las hojas en el alisado por presión" *17th International Meeting on Heritage Conservation,* 235-239.

MUÑOZ VIÑAS, S. (2009). "The impact of conservation pressure-flattening on the dimensions of machine-made paper" *Restaurator,* 30(3): 181-198. https://doi.org/10.1515/rest.012

NISKANEN, K., KUSKOWSKI, S.J. y BRONKHORST, C. (1997). "Dynamic hygroexpansion of paperboards", *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 12(2): 102-110.

PAPELES RASEPE (s.f). *Papel Gris Perla – Estraza. Ficha técnica: papel plisadores* [Ficha técnica] Disponible en: https://rasepe.com/wp-content/uploads/2022/05/R-PAPEL-GRIS-PERLA-ESTRAZA-PAPEL-PLISADORES.pdf [Consulta: 15/10/2025]

PADFIELD, T. (1994). "The role of standards and guidelines. Are they a substitute for understanding a problem or a protection against the consequences of ignorance?" *Durability and Change: The Science, Responsibility, and Cost of Sustaining Cultural Heritage*. Sussex: John Wiley and sons: 191-199

PARSA SADR, A., MARACHECHI, S., SUKER, A., BOSCO, E. (2024). "Chemo-mechanical ageing of paper: effect of acidity, moisture and micro-structural features", *Cellulose* 11: 6923-6944

PAVLOGEORGATOS, G. (2003). "Environmental parameters in museums", *Building and Environment,* 38: 1457-1462. https://doi.org/10.1016/S0360-1323(03)00113-6

ROBERTS, J. (1996). *The chemistry of paper*. Letchworth: Royal Society of Chemistry

SUGARMAN, J. E, Y VITALE, T. J. (1992) ."Observations on the drying of paper: Five drying methods and the drying process", *Journal of the American Institute for Conservation*, 31(2): 175-179.

VONK, J., GEERS, M. Y HOEFNAGELS (2020). "Full-field hygro-expansion characterization of single softwood and hardwood pulp fibers", *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 61: 61-74 https://doi.org/10.1515/npprj-2020-0071

ZERVOS, S. (2010). "Chapter 5. Natural and accelerated ageing of cellulose and paper: A literature review" En: *Cellulose: Structure and Properties, Derivatives and Industrial Uses*. Nueva York: Nova Science Publishers.

Autor/es



María Sobrino Estalrich
maria.s.estalrich@gmail.com
Universitat Politècnica de València
https://orcid.org/0009-0009-9630-0350

María Sobrino Estalrich realizó sus estudios de grado y máster en la Universitat Politècnica de Valencia (UPV) y actualmente está cursando un doctorado dentro del Programa de Doctorado en Conservación y Restauración de la misma universidad. Su investigación doctoral se enmarca en el proyecto europeo GreenArt, en el que también colabora como investigadora en la UPV. Su campo de estudio se centra en la restauración de obra gráfica y la investigación de nuevos materiales. Asimismo, ha participado en trabajos para el Taller de Obra Gráfica y Documental del Instituto de Restauración del Patrimonio de la UPV como restauradora de diferentes ocasiones.



Salvador Muñoz-Viñas
smunoz@upv.edu.es
Universitat Politècnica de València
https://orcid.org/0000-0003-0781-2645

Salvador Muñoz Viñas es Catedrático de conservación y restauración del papel en la Universitat Politècnica de València, y responsable del Taller de Obra Gráfica del Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio. Su trabajo se centra en la restauración del papel y en la filosofía del patrimonio cultural. A lo largo de su carrera, ha impartido cursos sobre estos temas en numerosas entidades nacionales y extranjeras, como por ejemplo el ICCROM, el British Museum o la Sorbona, y ha trabajado como Visiting Scholar en la Universidad de Harvard en diversas ocasiones. En 2015 fue nombrado Distinguished Visiting Professor por la New York University. Sus obras sobre restauración del patrimonio han sido publicadas en español, inglés, chino, coreano, italiano y otros idiomas.

Artículo enviado 05/01/2026
Artículo aceptado el 16/02/2026

https://doi.org/10.37558/gec.v29i1.1483



Antigua, quiteña y milagrosa: los valores de la imagen del "Niño Dios de Sotaquí" como articuladores de un sistema basado en la circulación de bienes

Olaya Sanfuentes, Carmen Royo Fraguas

Resumen: La imagen del "Niño Dios de Sotaquí" es una escultura de madera policromada que congrega comunidades en una de las celebraciones religiosas con mayor convocatoria del norte de Chile. Titular de la parroquia santuario, forma parte de la historia del pueblo de Sotaquí y de la identidad de sus habitantes. En el marco de su restauración y desde la perspectiva de los estudios materiales de la religión, se realiza un ejercicio analítico de deconstrucción de los valores que le atribuye la comunidad feligresa. Entre ellos, se desarrollan las creencias sobre su antigüedad, su supuesta procedencia quiteña y su carácter milagroso, a partir de la hipótesis preliminar de que la imagen es un actor fundamental, que es necesario mantener en buen estado, para que el sistema de circulación de bienes instalado en torno a ella funcione exitosamente.

Palabras clave: escultura de madera policromada, escultura del Niño Dios, escultura quiteña, imagen religiosa, Niño Dios de Sotaquí, Sotaquí, valores

Ancient, from Quito and miraculous: the values of the 'Niño Dios de Sotaquí' image as key agents in a system based on the circulation of goods

Abstract: The image of the "Niño Dios de Sotaquí" is a polychromed wood sculpture that draws together communities during one of the most widely attended religious celebrations in northern Chile. As the patron image of its parish sanctuary, it is part of the history of the town of Sotaquí and is deeply embedded in the identity of its inhabitants. Within the framework of its restoration and from the perspective of the material religion studies, an analytical exercise was conducted to examine the values ascribed to it by the parish community. These include beliefs about its antiquity, its alleged Quito provenance, and its miraculous nature. The analysis is based on the preliminary hypothesis that the image acts as a key agent, and that its preservation in a good condition is essential for maintaining the circulation of goods around it.

Keywords: Niño Dios de Sotaquí, polychromed wood sculpture, Quito provenance sculpture, religious image, sculpture of Baby Jesus, Sotaquí, values

Antiga, de Quito e miraculosa: os valores da imagem do "Niño Dios de Sotaquí" como articuladores de um sistema baseado na circulação de bens

Resumo: A imagem do "Menino Deus de Sotaquí" é uma escultura em madeira policromada que reúne comunidades numa das celebrações religiosas com maior afluência no norte do Chile. Titular da paróquia-santuário, faz parte da história da localidade de Sotaquí e da identidade dos seus habitantes. No âmbito do seu restauro e a partir da perspetiva dos estudos materiais da religião, realiza-se um exercício analítico de desconstrução dos valores que lhe são atribuídos pela comunidade de fiéis. Entre estes, desenvolvem-se as crenças relativas à sua antiguidade, à sua suposta proveniência quiteña e ao seu carácter milagroso, com base na hipótese preliminar de que a imagem constitui um ator fundamental, que é necessário manter em bom estado, para que o sistema de circulação de bens estabelecido em seu torno funcione com sucesso.

Palavras-chave: escultura em madeira policromada, escultura do Menino Deus, escultura de Quito, imagem religiosa, Niño Dios de Sotaquí, Sotaquí, valores

Introducción

El pueblo de Sotaquí es uno de los principales centros de peregrinación religiosa de Chile. Está ubicado al norte del país, en la provincia de Limarí, Región de Coquimbo. Miles de personas acuden al lugar cada año, el domingo siguiente al 6 de enero, para celebrar la Fiesta Grande del "Niño Dios de Sotaquí", una imagen que se conserva en la iglesia santuario homónima.

El templo, que fue construido en la década de 1890, ha permanecido intermitentemente clausurado debido a los daños provocados por varios sismos acontecidos en la zona [Figura 1]. Pese a ello, la actividad litúrgica se ha mantenido activa en un espacio parroquial próximo y no han cesado las festividades religiosas asociadas al Niño Dios. Por su relevancia arquitectónica, sumada a la tradición devota popular en torno a la imagen, el inmueble fue declarado Monumento Nacional en la categoría de Monumento Histórico, según la ley 17.288 del Consejo de Monumentos Nacionales (2006).

El "Niño Dios de Sotaquí" es una escultura de madera policromada de bulto redondo y mediano formato, que iconográficamente responde a un Niño Jesús Salvador del Mundo, con la mano derecha bendiciendo y con la palma izquierda en posición de sostener el orbe. Aunque aparece representado desnudo, siempre se presenta vestido y con sus atributos característicos (diadema, sagrado corazón y orbe) ante la comunidad feligresa [Figura 2].

La historia de devoción activa de esta imagen tiene una larga trayectoria que se inicia con un hallazgo, transitando desde el culto en el espacio privado de una familia local hasta su donación a la iglesia en 1873 (*Crónica de la parroquia de Sotaquí 1886*), año en el que es reconocida como titular de la parroquia. Es así como, en el marco de los 150 años de su entronización en 2023, la comunidad solicitó la restauración de la escultura que, tras un intenso trabajo en terreno, fue trasladada a la capital santiaguina para ser intervenida en la Unidad de Patrimonio Construido y Escultórico del Centro Nacional de Conservación y Restauración (CNCR). La salida de la imagen del pueblo de Sotaquí supuso un hecho histórico, sin precedentes, que permitió su estudio y análisis en profundidad.

Por aquel entonces, el CNCR participaba en un proyecto dirigido por la investigadora responsable en la Pontificia Universidad Católica de Chile, cuyo objetivo era el estudio



Figura 1.- Parroquia Santuario del Niño Dios de Sotaquí durante la Fiesta Grande de enero del año 2023 (Fotografía: Carmen Royo Fraguas, Archivo CNCR).



Figura 2.- Imagen del "Niño Dios de Sotaquí" después de su restauración, vestido y con sus atributos característicos, sobre un anda ubicada en la entrada del salón parroquial, tras haber sido descendido de su altar, durante la liturgia previa a una procesión (Fotografía: Carmen Royo Fraguas, Archivo CNCR).

de esculturas del Niño Jesús desde la perspectiva de los estudios de la cultura material, pesquisando cómo se dispersan a diversos regímenes de valoración simbólica, más allá de su sacralidad original, en función de los agentes históricos con quienes se relacionan.

En este contexto, la imagen se convirtió, además, en un caso de estudio emblemático dentro de la investigación, lo que permitió indagar no sólo en su historia material, sino también sobre la incidencia que sus valores tienen en su conservación, avalando la hipótesis preliminar de que es un actor fundamental para la comunidad, que es necesario mantener en buen estado, para que todo un sistema basado en la circulación de bienes funcione exitosamente. Nos apoyamos, principalmente, en las ideas de Marcel Mauss contenidas en su Ensayo sobre el don (Mauss 2009), donde analiza que el intercambio de regalos y bienes en sociedades tradicionales colabora en los mecanismos de cohesión social y sentido de pertenencia. En nuestro trabajo, la figura del Niño Dios, con su agencia y presencia, funciona como un actor más en este sistema. En definitiva, como argumenta David Chidester (Chidester 2018: 8), "el estudio de la religión se ha convertido en el estudio de los flujos, el estudio de la religión en movimiento a través de la circulación de personas, objetos, tecnología, dinero, imágenes de posibilidades humanas e ideas de solidaridad humana".

El objetivo de este artículo es presentar el desarrollo de dicha hipótesis a partir de una deconstrucción y análisis de los valores que la comunidad atribuye a la imagen: el "Niño Dios de Sotaquí" es considerado antiguo, quiteño y milagroso. La forma en que las personas atribuyen valor a los objetos permite entender no sólo las prácticas económicas, sino prácticamente todo el comportamiento humano (Munck y Dries 2015), si bien éste es un ejercicio meramente analítico, ya que a pesar de que la escultura suma y yuxtapone valoraciones, para la comunidad es un objeto indivisible.

Metodología

Este trabajo se instala teórica y metodológicamente en los llamados estudios materiales de la religión. Para los fines de nuestra hipótesis, esto implica que el enfoque no está centrado en la religión propiamente tal, sino en las condiciones materiales de la posibilidad de negociar lo humano (Chidester 2018: 4). A diferencia de las tradicionales teorías formalistas e iconográficas de estudio de la imagen, que ponen el énfasis en lo visual, la aproximación al objeto se hace incluyendo la materialidad como un componente esencial de la interpretación. La idea, como argumenta Michael Yonan (2011), es no desmaterializar el arte.

Las etapas coinciden con la cronología del proyecto de investigación (2020-2023) y la limitación temporal para finalizar la intervención de la escultura antes de su aniversario. Pueden resumirse en: revisión teórico bibliográfica general previa, estudio preliminar de la obra, trabajo con la comunidad de manera presencial en Sotaquí y, por último, ejecución de análisis y discusión interdisciplinar de resultados. Si bien la investigación y la intervención de restauración responden a proyectos distintos, quedaron ineludiblemente imbricadas, retroalimentándose del trabajo interdisciplinar de ambos equipos profesionales para la consecución de sus objetivos particulares.

La principal fuente de información es la misma escultura del Niño Dios. En términos de los métodos utilizados para obtener información de la escultura y su contexto de uso, las investigadoras —desde sus experticias disciplinares, pero siempre con un objetivo compartido— se valieron del trabajo con archivos parroquiales, especialmente el de la Parroquia Santuario del Niño Dios de Sotaquí; artículos de prensa regional e imágenes históricas; de entrevistas con personas clave y de la observación y registro de emociones e ideas emanadas de *focus groups* realizados con la comunidad feligresa.

Tanto las entrevistas como los *focus groups* se realizaron presencialmente en el pueblo de Sotaquí o localidades aledañas (Ovalle, Huallillinga) entre los años 2021 y 2022. Las entrevistas personales contaron con planificación previa, sin embargo, aquellas colectivas —de dos o más personas— se dieron con cierta espontaneidad en el transcurso de las estancias en terreno, por lo que, salvo excepciones, no fueron grabadas, aunque sí registradas. Se trabajó con personas clave de la comunidad religiosa de Sotaquí y algunas relacionadas con la historia de la imagen, incluyendo al presbítero rector del santuario en los años de la investigación, familia directa del párroco alemán José Stegmeier, quien asumió el cargo de la parroquia en 1939 y la regirá durante más de treinta años; el presidente de la Cofradía del Niño Dios de Sotaquí y quienes la integran (en especial, las mujeres que lo visten y remozan); el historiador local Sergio Peña y otros investigadores independientes de la zona, entre las más relevantes.

En el caso de los *focus groups* se convocó a personas relacionadas con la imagen a lo largo de su historia, principalmente, la comunidad devota habitante en el pueblo, integrantes de la Cofradía y Bailes Chinos (agrupaciones de músicos y danzantes expresión de la devoción popular característica de la zona norte y centro del país). Se realizaron dos llamados, en días y horarios distintos, en el salón parroquial del santuario, cuyas sesiones contaron aproximadamente con 10 personas y una duración de tres horas. En ambos grupos se utilizó un listado de preguntas previamente elaborado y la dinámica fue conducida por las autoras, quedando grabada y posteriormente transcrita en documentos no publicados.

Sumado a lo anterior, se realizó observación participante, destacando la asistencia a la Fiesta Grande del año 2023, tras la restauración de la imagen; y se recopilaron opiniones y comentarios extraídos de redes sociales. Además, se

valieron de la información documental, técnica y analítica resultante del proceso de conservación y restauración. Específicamente, para el estudio material, se realizó una exhaustiva exploración visual apoyada con observación bajo lupa binocular y microscopio digital portátil; además, se solicitó documentación visual general y de detalle, complementada con estudios por imagen mediante fluorescencia inducida por radiación ultravioleta y rayos X. Los análisis de laboratorio se enfocaron en las policromías y consistieron en análisis elemental mediante fluorescencia de rayos X portátil (pXRF) y análisis estratigráfico por microscopía de luz polarizada. Cabe especificar que, para la exposición de resultados, se utiliza la distinción entre policromía, repolicromía y repinte establecida por el Grupo Latino de Trabajo sobre Escultura Policromada (Ruiz de Arcaute 2009: 74-75).

Resultados y Discusión

Los valores que se asocian a la escultura son varios y variados. Los primeros registros de la talla aparecen a finales del siglo XIX en las crónicas de la parroquia (1886). Desde entonces a la actualidad, hay valores que se caracterizan por permanecer en el tiempo. Es así como se han transmitido las ideas de que es antigua, quiteña y milagrosa, articulando una serie de narrativas y prácticas que se traslapan configurando un sistema de valores en el que colaboran tanto el presente como el pasado, la memoria y la historia.

Los tres valores que aquí desglosaremos en forma separada están contenidos y diluidos a través del tiempo y en diversos soportes. Los tiempos de la historia y de la memoria se funden y conviven en la forma de experimentar la devoción contemporánea. En cuanto a los soportes en los que esos valores pueden rastrearse, están los de los textos escritos, el de la oralidad y, últimamente, los medios digitales que sostienen las redes sociales.

— *Una escultura antigua en un pueblo antiguo*

En primer lugar, se dice que la escultura del "Niño Dios de Sotaquí" es antigua. Se cuenta que esta imagen está relacionada con el pueblo a partir de un tiempo lejano y en relación con cronologías que no son precisas, lo que le proporciona un origen mítico cargado de simbolismo. Las personas de Sotaquí conocen por tradición heredada en forma oral la historia de la imagen, pero la narrativa está registrada, de igual manera, en las crónicas parroquiales del pueblo y en las noticias de prensa local de mediados del siglo XX. El sustrato básico de la historia se ha transmitido de generación en generación sin mayores modificaciones, lo que demuestra la importancia de esta narrativa original y unificadora. El tiempo del Niño Jesús es un tiempo inmemorial y sagrado, y compartir esta creencia es un factor que colabora en la cohesión social del pueblo (Chidester 2018: 48).

Ya en 1886, se encuentran los primeros registros de la aparición de la escultura del Niño Jesús en las crónicas parroquiales de Sotaquí. Las palabras ahí contenidas hacen un ejercicio de memoria respecto de un evento pasado sin fechas, envuelto en leyenda y tornada en fundacional de una cronología sagrada que comienza con un hallazgo [Figura 3]. Este mito del origen de la escultura es uno de los que proporciona mayor sentido de identidad a los habitantes de Sotaquí. Y es que la valoración que actualmente lleva a cabo la comunidad descansa, en parte, en esta memoria compartida respecto de la antigüedad de su imagen votiva.

La supuesta antigüedad de la escultura es un atributo que le otorga valía entre la comunidad feligresa y convierte a la imagen en un objeto único dentro del universo de lo que conocen [Figura 4]. El que sea antiguo le confiere un sello distintivo, aun cuando esa antigüedad no sea datable. La percepción es que es tan antigua que podría ser "del tiempo de los españoles" (*Focus Groups* Comunidad de Sotaquí, 2 de marzo, 2022).

La creencia de que la imagen es antigua va acompañada de otra que piensa que el pueblo de Sotaquí es asimismo de larga data. En Sotaquí se dice que el pueblo fue un asentamiento indígena, donde se habrían instalado luego los españoles. Con autoconciencia y orgullo, hay habitantes que repiten esta creencia, que se transmite también a través de publicaciones realizadas desde la comunidad y en reportajes audiovisuales que circulan en redes sociales. José Silvestre manifestaba: "Sotaquí es bastante viejo: basta con decir que fue pueblo indígena: tanto como viejo e indígena ha sido adicto a la religiosidad", según se consigna en el libro de Ortiz (Silvestre en Ortiz 2016: 5).

En el libro parroquial del pueblo (1886) se encuentra un documento de una visita eclesiástica de 1914. Ahí se señala que la parroquia es una de las más antiguas de la diócesis, aunque no consta la fecha de su creación. No obstante, ya figura como tal en 1648.

Sotaquí es un pueblo hermano de Andacollo, un pueblo minero distante en 100 kilómetros y donde se venera a la Virgen María. Madre e hijo están relacionados y las devociones a ambas figuras hacen confluir a fieles e historias a éstos asociadas. Andacollo también está registrado como un pueblo que se hunde en la historia de Chile y de la región de Coquimbo. En carta al rey de España, ya en 1607, el entonces Gobernador de Chile afirmaba: "El cerro de Andacollo es uno de los ríos de oro que hay en el mundo" (Solano 1867: 13, citado en Contreras y González 2011: 33).

No es nuestra intención cotejar la veracidad de estos datos, sino develar la idea de la antigüedad de este pueblo y el de Sotaquí en las tradiciones locales. Es esta historia supuestamente antigua la que, entre otros factores, ha colaborado en la cohesión de estas comunidades.

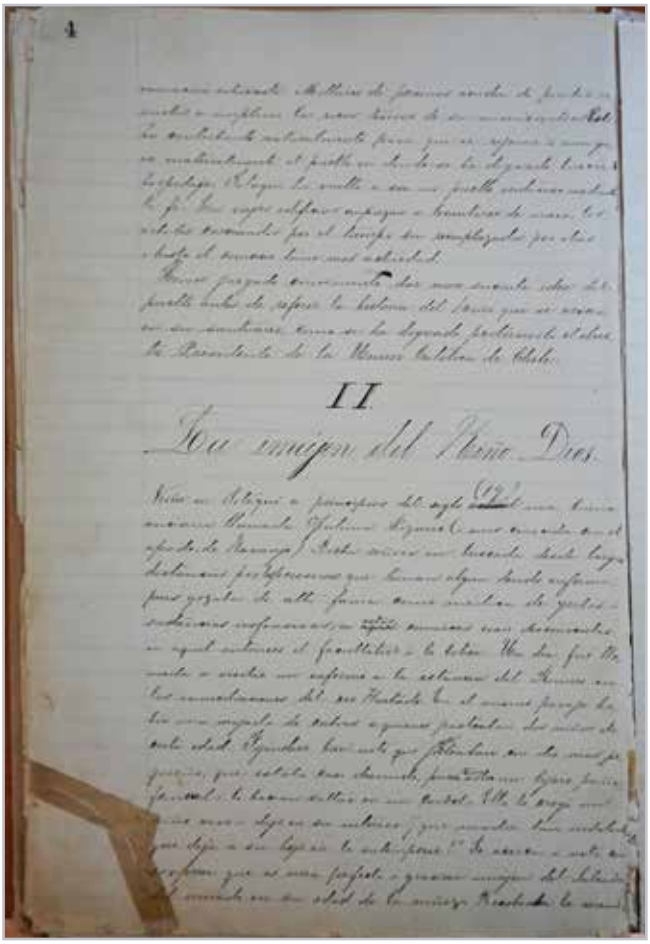


Figura 3.- Página nro. 4 del libro de crónicas de la parroquia de Sotaquí, abierto por el cura Félix Alejandro Zepeda Álvarez en 1886, donde aparece el inicio del relato sobre el hallazgo de "La imájen del Niño Dios".



Figura 4.- Imagen del "Niño Dios de Sotaquí", 4 de enero de 1907 (Fotografía: Archivo parroquial de Sotaquí).

— Una escultura quiteña en la región

Las personas de Sotaquí repiten que la escultura es quiteña, idea que ha quedado fijada en la literatura, ya que un historiador local así lo ha consignado en sus publicaciones (Peña 1996: 28).

Si la escultura fuese quiteña, entonces, probablemente hubiera sido ejecutada en el siglo XVIII, época en la que en la Audiencia de Quito se desarrolló una escuela de facturación de esculturas en madera policromada que fue muy apreciada en la época. Hoy, el estilo quiteño de escultura se describe como la apropiación indígena del estilo español, especialmente el del escultor Francisco Salzillo, junto con otras influencias flamencas e italianas. Este estilo se caracterizaba por la inminencia del movimiento, una expresión inocente en los personajes representados y el uso de determinadas técnicas como estrategia de verosimilitud y naturalismo (Palmer 1987).

Así como otras esculturas propias de la modernidad occidental, las de la escuela quiteña eran de madera: era un material disponible, no tan caro como otros y, a veces, considerado vivo, operando como un cuerpo humano con venas, humores, sangre y tez. "La alianza entre forma y material emerge del entendimiento moderno de la madera como similar a la carne y al cuerpo humano" (Neilson 2014: 223). La talla de la escultura de Sotaquí está realizada al uso, mediante unión de bloques de diferentes tamaños. Entre éstos, se encuentra la cabeza, que además presenta mascarilla, una técnica muy apreciada en la época porque permitía colocar ojos de vidrio o cristal coloreado por el interior (Gallegos de Donoso 1994: 7), contribuyendo así al realismo de las imágenes [Figura 5]. En Quito fue muy común el uso de metal fundido de plomo para su ejecución (Cazzaniga y Terán 1983: 48), si bien, en este caso, aparece una mascarilla tallada con una característica cavidad interna de forma rectangular.

Por tratarse de una imagen desnuda, las zonas de color de la policromía se reducen a la piel y el cabello. En ambos casos, la imaginería quiteña utilizó técnicas distintivas: encarnaciones pulimentadas y cabellos dorados bruñidos. Si bien el estudio de policromías en imágenes religiosas se complejiza en la medida en que hayan sido intervenidas a lo largo del tiempo, es posible hacer algunas



Figura 5.- Ojos dispuestos mediante la técnica de la mascarilla en la cabeza (Fotografía: Trinidad Pérez Vigneaux, Archivo CNCR).

aproximaciones, entendiendo, en cualquier caso, que su estado históricamente auténtico es su estado presente (Muñoz 2004: 88).

Actualmente, el cabello presenta un repinte marrón que cubre un dorado anterior, observable a simple vista a través de las faltas de policromía. Además de la lámina metálica de oro, se distinguen los estratos de bol rojo y base de preparación subyacentes [Figura 6a], que remiten al uso de la técnica de dorado al agua, única con la que es posible bruñir el metal hasta dejarlo brillante (Carrassón 2006: 6).

En el caso de las encarnaciones, los estudios y análisis realizados en el marco de la intervención (Leiva y Amaya 2023; Salazar 2023) no permiten definir con exactitud el número y características de las secuencias polícromas. Las muestras estratigráficas analizadas (rostro, cuerpo, brazos y manos) arrojaron una elevada variabilidad en el número de estratos que, si bien puede deberse a las limitaciones propias de la extracción (Leiva y Amaya 2023), podría dar cuenta de las divergencias en la evolución material de dichas zonas.

De hecho, a simple vista, es posible observar diferencias entre la zona del rostro y las manos, y aquella correspondiente al resto del cuerpo. Se identifica una repolicromía casi total en el cuerpo, a la que se suman repintes de diferente extensión. En el rostro y las manos también aparecen repintes sobre la encarnación visible [Figura 6b] que, si bien no ha podido definirse como una repolicromía, presenta estratos subyacentes en tonalidades que oscilan entre rosado y anaranjado, las que podrían haber correspondido a encarnaciones anteriores (Salazar 2023).

Tradicionalmente, para el encarnado de imágenes se han utilizado dos técnicas que difieren en un acabado final mate o brillante, siendo el segundo una de las características más destacadas de esta escuela y que se consigue mediante la técnica del pulimento. Como refiere Gallegos (1994: 7): "el brillo del encarnado quiteño es inigualable". Este fulgor no se aprecia hoy en el rostro del Niño sotaquino, aunque, considerando su trayectoria en culto activo, no es posible descartar que hubiera estado presente en los estratos subyacentes.

Respecto a los materiales, la paleta de color de las encarnaciones es bastante acotada. En general, el color se obtiene a partir de una mezcla base de pigmento blanco y rojo, que se modifica en función de la fisionomía y edad (González 2020: 36). En la escultura del "Niño Dios de Sotaquí", los análisis por pXRF (Leiva y Amaya 2023) arrojaron presencia de plomo (Pb), que podría indicar el uso de albayalde, un pigmento blanco utilizado desde la antigüedad y recomendado en la tratadística para estos fines (González 2020). Otros elementos identificados que podrían estar asociados a pigmentos blancos son cinc (Zn) y bario (Ba), posiblemente relacionados con sulfato de bario, blanco de cinc, litopón, o alguna de sus mezclas; que, sin embargo, no comenzaron a utilizarse hasta el siglo XIX (Feller 1986: 47, 170-171; Eastaugh, Walsh y Chaplin 2008: 242). Además, la repolicromía de la encarnación del cuerpo contiene titanio (Ti) de manera diferencial, sugiriendo que el estrato visible pudo haber sido realizado con una mezcla que incluye blanco de titanio, solo disponible a partir de principios del siglo XX (West-FitzHugh 1997: 296).

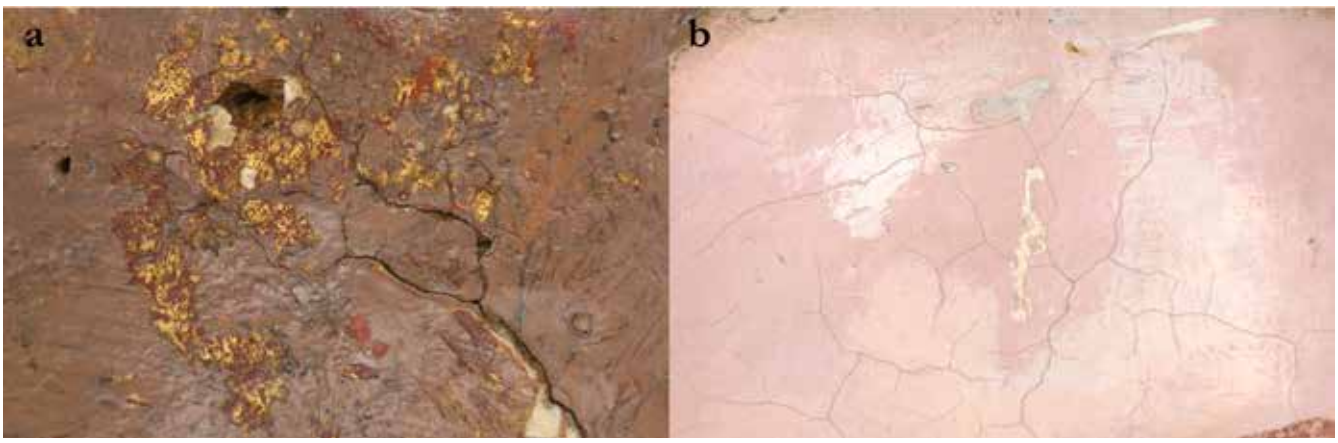


Figura 6.- Faltas de policromía que dejan a la vista estratos subyacentes confirmando la presencia de repolicromías y repintes: a) zona del cabello (sin peluca), b) zona de la encarnación del rostro (Fotografías: Trinidad Pérez Vigneaux, Archivo CNCR).

Los análisis realizados no permiten definir la ubicación de los elementos descritos en la estratigrafía. A este respecto, solo puede indicarse la presencia de inclusiones que emiten fluorescencia verde bajo luz ultravioleta en algunas de las muestras (Leiva y Amaya 2023), sugiriendo la presencia de cinc específicamente en dichos estratos (Feller 1986: 172). También queda pendiente la identificación de posibles sustancias orgánicas, como materias colorantes rojas, entre las que destacaría el carmín, cuyo uso para realizar encarnaciones ha sido ampliamente documentado (Siracusano 2005: 94; Parrilla 2009: 162, 165; Sánchez y Quiñones 2009: 56). Respecto al uso de rojos, solamente se identificó mercurio (Hg) de manera puntual, que podría asociarse al uso de bermellón en alguno de los estratos (Leiva y Amaya 2023).

En definitiva, aunque en la escultura se observan ciertos aspectos que podrían referir a la imaginería quiteña, éstos conviven con las múltiples transformaciones que ha sufrido a lo largo del tiempo, lo que impide confirmar su origen o acotar un contexto de manufactura con la información existente a la fecha. La escultura podría ser de facturación local, proveniente de Quito, pero menos espectacular que otras que llegaron a Chile; o bien producto de un escultor quiteño, avecindado en el país tras la crisis de la Audiencia de Quito, después del tratado borbónico de Libre Comercio (Kennedy 2007; Ortiz 2007). Pese a ello, si la escultura es o no auténticamente quiteña, no importa a las asignaciones de valor que la comunidad hace de su imagen (Lixinxki 2022).

— Niño Jesús milagroso

En tercer lugar, esta es una imagen de valor sagrado. La encarnación del Verbo viene a significar la presencia de Dios en la historia, que se conmemora a través de la representación en imágenes que acerquen el misterio de esta aparente ausencia. En tanto imagen en culto activo y parte de una tradición cristiana que considera que sus imágenes religiosas son representaciones de una realidad numinosa, esta escultura mimética del Niño Dios en su infancia es considerada mágica, poderosa y milagrosa.

Por este motivo, es también querida, cuidada y respetada. La escultura no es tratada como tal sino considerada como un niño. Los comentarios de algunas personas entrevistadas en los *focus groups* (2 de marzo, 2022) son muy elocuentes al respecto: "Esa imagen yo no la miro como escultura. Para mí no es una escultura". Otra señora señala en forma enfática: "Pero Él es una imagen sagrada, nosotros nos referimos a Él como una imagen, no como una escultura. Me va a disculpar, pero, para mí, no es una escultura". Y es que para la gente de Sotaquí, la escultura tiene poder presentacional más que representacional, como argumenta David Chidester (Chidester 2018: 82), aunque como diría, por su parte, Valeriano Bozal (Bozal 1987: 28), "todo conocimiento es un reconocimiento en el mismo sentido en que toda presentación es una representación".

El poder de la imagen está incluido en la mirada, en el tocar, en el vestir, en el besar. La imagen no es sólo lo que representa, sino también la identificación con quienes se relacionan con ella. Porque en aquella imagen hay presencia y, muchas veces, la representación está supeditada a la misma (Freedberg 2009: 46). La comunidad feligresa de Sotaquí vive la presencia del mismo Niño en esa escultura de madera policromada. Y no es solamente porque la escultura parece un niño, sino porque para las personas de Sotaquí es el Niño Jesús y esa es la razón por la que realizan prácticas votivas. Su actitud y expectativas, condicionadas por su cultura y forma de vivir, así como por el trato ritual de la imagen, son más importantes que las similitudes miméticas (Maniura y Shepherd 2006: 24).

Tanto en documentos públicos como en entrevistas privadas, la tradición configura una historia de milagros de la escultura. En las crónicas parroquiales (1886), ya a finales del siglo XIX, se deja constancia de su naturaleza milagrosa. El párroco escribe entonces: "'Si yo quisiera contarle todos los milagros que me ha hecho el Niño Dios no tendría cuando acabar' me decía en el candor de la inocencia un anciano a quien le hacía preguntas en este sentido, al mismo tiempo que abundantes lágrimas bañaban sus rugosas mejillas". Páginas más adelante, el presbítero relata varios prodigios con detalles. A modo de muestra:

> Marcelina Sanchez es una jóven que vive en una estancia llamada Punilla en la costa limítrofe al puerto de Tongoi. Todo su capital para ganarse la vida con honradez y hacer el bien consistía en un ganado de ovejas. Durante tres años le entró la peste que no le quedaron sino unos pocos corderitos. Le prometió al Niño Dios que todos los años le traería una ofrenda a su santuario, si le conservaba su ganadito. Esta fué la bendición de Dios. La peste cesó por completo, i con gozo ve aumentar sus ovejas, también ha sido fiel a su promesa, porque de año en año recorre a pié como veinte leguas para ver al Niño Dios. (Crónicas parroquiales 1886)

Con el pasar de los años, la certeza de que es una imagen milagrosa no ceja y llegan a rendirle culto desde distintos lugares, porque como señala una prensa local de mediados del siglo XX, la imagen es milagrosa (Rovinovitch 1972: 10), tiene poderes sobrenaturales y divinos (Freedberg 2009: 64).

Según la comunidad feligresa de Sotaquí, los milagros asociados a la imagen siguen ocurriendo en el siglo XXI: maridos con enfermedades terminales que sanan, mujeres que tuvieron muchos hijos siendo antes infértiles, personas con enfermedades de base que no murieron al infectarse con coronavirus, otras con marcapasos que se mejoraron del corazón, y un largo etcétera de relatos. Una mujer, al preguntarle por esta faceta del Niño, respondió:

> En mi caso, para mí es muy milagroso y, cuando tengo problemas, acudo a Él y me da la tranquilidad que yo necesito. Cuando me siento sola, cuando tengo pena, le pido que me dé fuerza y yo sé que es así. Todo lo que le he pedido me lo ha concedido. (F*ocus Groups* Comunidad de Sotaquí, 2 marzo 2022)

— Valores en circulación

Los valores fundamentales de la escultura son muy importantes para el funcionamiento de la comunidad. El pueblo se define en relación con su escultura y se distingue de otras comunidades aledañas, como la ya mencionada Andacollo, cuya legendaria escultura de la Virgen también articula la identidad de sus habitantes. Estas imágenes proporcionan identidad y están al centro de diversas transacciones emocionales entre la comunidad devota, cuyos sistemas de creencias y prácticas, constituyen el contexto en que se dan esos intercambios.

Respecto a lo identitario, la imagen acompaña al pueblo, pero este también la ha acompañado históricamente en una relación de reciprocidad. El pueblo construye una imagen de un Niño Dios milagroso y la imagen constituye al pueblo de Sotaquí como uno donde se puede ir a pedir milagros a ese Niño. De aquí emana una energía psíquica compartida que se nutre de raíces temporales y espaciales, siendo motor en el cultivo intencional de valores compartidos. Hombres y mujeres ordenan sus vidas creando objetos e interactuando con ellos. Las cosas con que interactúan, entonces, les son inseparables y constituyen el marco de experiencia que pone orden y proporciona estabilidad (Csiksentmihalyi y Rochberg-Halton 1981: 16).

Por otra parte, la idea de que esta escultura es importante para la comunidad se materializa en varias publicaciones locales, en plataformas digitales y redes sociales, con el ánimo de rescatar la historia de la imagen y del pueblo en relación con ella. Desde afuera de la comunidad también se ha reparado en la importancia de la talla para la identidad sotaquina, como puede apreciarse en el libro que hace unos años escribiera Uribe (1974) acerca de Sotaquí y Andacollo en relación con sus respectivas imágenes. El interés de ciertas instituciones que rescatan y promueven el conocimiento del patrimonio cultural chileno, es también garante de la importancia de la imagen para el pueblo de Sotaquí (Consejo de Monumentos Nacionales 2006).

El que se le adjudique una procedencia quiteña también es un bien inmaterial que se cree importante fijar entre la comunidad devota y el público general. Como si esta procedencia le otorgara una calidad intrínseca, idea que debe alimentarse, fijarse y comunicarse para avalar que la escultura tiene un valor artístico y que, entonces, el pueblo de Sotaquí tiene una pieza importante. Los atributos de metales preciosos o materiales que los imitan que la han adornado a través de los años son muestra de que debe estar acompañada de elementos valiosos y estéticos, conformando una suerte de sistema de buena calidad, en el que cada uno de estos elementos tributa a la riqueza e importancia de la imagen.

En el relato de la comunidad, la percepción sobre su procedencia y su antigüedad avala la distinción del Niño sotaquino respecto de las réplicas que se veneran en localidades cercanas, como Huallillinga o la capilla de El Romeral en Río Hurtado. La devoción al "Niño Dios de Sotaquí" es tal que se encarna en varios cuerpos, aunque ninguno es percibido con la condición del anterior, porque éste es el que se considera antiguo y quiteño.

Además, el que se crea que la escultura es milagrosa es lo que explica todos los bienes materiales que circulan en función de ella. Por una parte, articula el calendario religioso local a partir de distintas celebraciones, entre las que destacan la tradicional Fiesta Grande, el domingo posterior al 6 de enero, y su respectiva Fiesta Chica, el 6 de septiembre, que fue establecida posteriormente [Figura 7].

Según la prensa local, aparentemente, los homenajes al Niño milagroso sirven de justificación y excusa para festejos que muchas veces terminan en desbandes y abuso de alcohol, tal como grafica esta noticia de prensa:

> Desde ayer se han trasladado a la vecina villa de Sotaquí, innumerables peregrinos con motivo de la Fiesta del Niño. Estos peregrinos, contra la voluntad del Alcalde, bailarán cuecas, tomarán tragos —cortos y largos— y a muchos se les «pasará la mano» con el «tinto», para rendir un homenaje al niño milagroso. Cuentan que, hay más de cien «promesas» que consisten en tomarse cinco litros de Vino de Samo Alto, en el reducido espacio de una hora; debiendo quedar, después, en condiciones de llegar hasta el Niño por sus propios pies, desde dos cuadras de distancia. Ojalá no haya ningún extranjero observador por aquellos lados para que no se lleve la impresión que es de imaginarse, después que vea a los «promeseros» criollos. (*Diario El Regional* 1945)



Figura 7.- Imagen en procesión al hombro de personas voluntarias, rodeada de los tradicionales bailes religiosos y el peregrinaje reunido durante su Fiesta Grande del año 2023 (Fotografía: Carmen Royo Fraguas, Archivo CNCR).

Se justifican las libaciones porque las fiestas deben resultar "como Dios manda", según reza otra fuente periodística (*Diario La Provincia* 1938). La relación entre la fiesta del Niño con las celebraciones con mucho alcohol no ha estado libre de conflictos: bien conocido fue el padre alemán y párroco de Sotaquí, José Stegmeier; quien utilizó todo tipo de estrategias para luchar contra los desmanes alcohólicos de la fiesta de su parroquia. Stegmeier usó el púlpito para criticar duramente a las autoridades municipales que daban permisos para las fondas (los establecimientos temporales donde se come, bebe y baila en las celebraciones chilenas), por considerarlos culpables de la propagación del vicio del alcohol. Quien escribía la nota, criticaba, por su parte, la actitud autoritaria del cura alemán, comparándolo con el mismo Hitler (*Diario La Provincia* 1950a). En la actualidad, las celebraciones no están exentas de conflictos, como refieren los diarios digitales locales en relación al comercio ambulante que llega desde todo el país (*Diario El Día* 2024).

Puesto que la imagen es considerada como un verdadero niño, se le compran zapatos y se le confeccionan vestimentas que agrandan su extenso ajuar. Como tal, se lo trata con palabras y gestos cariñosos. Sin embargo, lo que más se espera de la comunidad devota es que pague sus "mandas". Un titular de mediados del siglo XX señalaba: "Miles de romeros de todos los pueblos arribarán hoy a Sotaquí. Pagarán mandas al milagroso Niño Dios" (*Diario La Provincia* 1950b) [Figura 8]. Cuando hablaba de todos los pueblos, se refería a gente que vendría de todo Chile y desde el extranjero. Desde la costa, "hasta la cordillera relavada, donde el viento tiene fuerza de potro que nunca conoció el redil, llegarán romeros hasta los pies del Niño Dios de Sotaquí, para hacerle la ofrenda de su humildad". Actualmente, el Niño Dios es también peregrino, trasladándose desde Sotaquí a las comunidades aledañas para acompañarlas en sus festejos religiosos.

En su Fiesta Grande, la comunidad sotaquina hace descender la imagen de su altar para sacarla en procesión sobre andas que lo trasladan hasta El Paltal, al hombro de personas voluntarias y rodeado de los bailes religiosos tradicionales del norte chileno. El Paltal es un terreno aledaño donde los bailes saludan a la imagen, se ofrecen misas y se prenden velas [Figura 9]. Estas escenas se repiten durante varios días, mientras se pagan las mandas en honor al milagroso. Todos estos dones son para agradecer a la imagen, mantenerla contenta y que devuelva con buenas cosechas, buena salud, sanación de enfermedades y abundancia de trabajo. Hay personas que peregrinan hasta Sotaquí para hacer mandas para el año siguiente, pero hay otras que retornan a devolver las mandas hechas al Niño por los milagros por él concedidos. Incluso en prensa pueden encontrarse referencias a personas que habrían sanado mediante mandas (*Diario La Provincia* 1952).


os Orquestas: Una Serenense y una Local
lo por señoritas expertas en el ramo.- Asista Ud.
Miles de romeros de todos los pueblos arribarán hoy a Sotaquí
Pagarán mandas al milagroso Niño Dios
AVISO

Figura 8.- Noticia del Diario La Provincia, 7 de enero de 1950.



Figura 9.- Celebración litúrgica en honor al Niño milagroso en El Paltal (Fotografía: Carmen Royo Fraguas, Archivo CNCR).

La fiesta al Niño Dios sigue siendo fundamental para las personas de Sotaquí y sus alrededores. La comunidad feligresa del pueblo relata con entusiasmo las características de su fiesta, describiéndola como masiva. "Es increíble cómo una pequeña imagen puede convocar a tanta gente", manifiesta emocionado un feligrés (Focus Groups comunidad de Sotaquí, 2 de marzo, 2022).

Hoy en día, las mandas se hacen al frente de la puerta del salón parroquial [Figura 10]. En el pasado no fue así. En todas las fuentes de prensa se repite que las mandas se hacían frente a la imagen del Niño Dios, por lo que su presencia era fundamental en la experiencia contractual entre la divinidad y el creyente. Pero también se mencionan los milagros espirituales. En un artículo periodístico se señala una petición al Niño para que "siga entregando sus sublimes milagros que dan alivio a las almas atormentadas, a engrandecer lo bueno, a esclarecer más la luz del saber, a despejar las incógnitas de la incertidumbre…" (*Diario La Provincia* 1960).

Para que el sistema articulado en torno al "Niño Dios de Sotaquí" siga funcionando es necesario que la escultura se mantenga de manera "que no cambie su esencia" (*Focus Groups* Comunidad de Sotaquí, 2 de marzo, 2022). En este sentido, para la comunidad, su intervención parece convertirse en una suerte de certificación que avala las creencias vertidas sobre el objeto mismo, siendo en la práctica, además, un medio para que la imagen permanezca durante muchos más años, esto es, siga siendo milagrosa por mucho tiempo.



Figura 10.- Entrada del salón parroquial habilitada como zona para mandas e intenciones de misa por parte de la comunidad feligresa (Fotografía: Carmen Royo Fraguas, Archivo CNCR).

Conclusiones

El análisis de los valores que la comunidad feligresa asocia a la imagen del "Niño Dios de Sotaquí" permite confirmar la hipótesis preliminar sobre el papel fundamental que ejerce, no sólo como articulador identitario, sino como elemento nuclear de un sistema basado en la circulación de bienes, cuyo régimen de valores es necesario mantener para que dicho sistema siga funcionando de manera exitosa.

Entre las atribuciones de valor identificadas, se han analizado las creencias de que la escultura es antigua, quiteña y milagrosa.

La creencia de que la escultura es antigua está fuertemente arraigada en la narrativa popular local y se respalda en el registro de las crónicas parroquiales sobre su hallazgo, a lo que se suma la idea de que el pueblo de Sotaquí también tiene un lejano origen en la historia de Chile. Es así como la antigüedad de la imagen pareciera servir de distintivo sobre otras veneradas en la zona, pese a que ésta no sea datable a través de la documentación pesquisada.

Su procedencia quiteña es otra creencia que se ha reiterado en el tiempo, un supuesto también consignado en publicaciones de historiadores locales. Situar su manufactura durante el siglo XVIII alimenta su valor histórico y la instala dentro de la producción de la Audiencia de Quito, otorgándole cierta superioridad técnica y material al discurso. Esto parece dotarla de un sello de calidad que la diferencia de otras imágenes de tradición nortina, así como de sus propias réplicas. Aunque se han identificado ciertas características que podrían responder al trabajo quiteño, no es posible confirmar dicho origen, lo que, por otra parte, se torna irrelevante respecto de las asignaciones de valor que la comunidad devota hace de su imagen, ya que la idea de que es quiteña precede al objeto propiamente tal.

Como imagen milagrosa, es tratada con el cuidado de un niño y sus dones sagrados se consignan desde la antigüedad hasta hoy. Si del Niño Dios se esperan sanaciones, ayudas y guías; de la comunidad feligresa y las personas que peregrinan a sus festejos se espera que paguen sus mandas. Por este motivo, la restauración de la imagen se convierte en un conducto necesario para que se mantenga en buen estado, garantizando que su sistema de valores y la circulación de bienes en torno ella se perpetúen en el tiempo.

Interrogar la imagen desde una perspectiva interdisciplinar facilitó la confluencia de las fuentes de información para obtener los resultados expuestos. Si bien los estudios y análisis asociados al proceso de intervención permitieron indagar en la historia material del objeto, corroborando la incidencia que estos valores tienen en su conservación, hay que considerar las limitaciones de las técnicas analíticas utilizadas, siendo necesario el uso de otras complementarias para ahondar en las aproximaciones realizadas.

Por último, cabe mencionar que el presente artículo considera sólo algunos de los valores asignados por la comunidad devota de Sotaquí a la imagen, sin menoscabo de aquellos que pudieran atribuirle otros agentes históricos o contemporáneos relacionados con ella, cuyo análisis podría corresponder a un ejercicio futuro.

Agradecimientos

Las autoras agradecen el financiamiento de la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo de Chile a través del Proyecto Fondecyt Regular 2020 N°1200553 "Esculturas de madera del niño Jesús en Chile, siglo XVIII-XXI. Investigación y análisis de la objetualidad de un artefacto religioso desde los llamados estudios de la cultura material, así como el presupuesto regular 2021-2023 del CNCR.

Referencias

BOZAL, V. (1987). *Mímesis: las imágenes y las cosas*. Madrid: Visor.

CARRASSÓN, A. (2006). "Preparaciones, dorado y policromía de los retablos en madera". En *Los retablos: Técnicas, materiales y procedimientos*, Valencia: Grupo Español International Institute for Conservation, 1-18.

CAZZANIGA, B. Y TERÁN, C. (1983). *Técnicas de la imaginería en el Arte Hispanoamericano*. Tucumán: Ediciones del Gabinete. Secretaría de Post-grado. Universidad Nacional.

CHIDESTER, D. (2018). *Religion: Material Dynamics*. Oakland: University of California Press.

CONSEJO DE MONUMENTOS NACIONALES. (2006). *Declárese Monumento Nacional en la categoría de Monumento Histórico la Iglesia del Niño Dios de Sotaquí, ubicada en la comuna de Ovalle*, Provincia del Limarí, IV Región de Coquimbo. Chile.

CONTRERAS, R. Y GONZÁLEZ, D. (2011). *Informe final de estudio. Fiestas Religiosas Tradicionales de la Región de Coquimbo. Siglos XVI al XXI*. Chile: Etnomedia Ltda.

Crónica de la parroquia de Sotaquí. (1886). Archivo Parroquial. Sotaquí: Parroquia Santuario Niño Dios de Sotaquí.

CSIKSENTMIHALYI, M. Y ROCHBERG-HALTON, E. (1981). *The meaning of things. Domestic symbols and the self.* Cambrigde: Cambridge University Press.

Diario El Día (2024). "Exigen mayores medidas: Comercio informal empañó los 150 años del Niño Dios de Sotaquí", 8 enero.

Diario El Regional. (1945). "Peregrinos a Sotaquí", 6 de enero.

Diario La Provincia (1938). "La fiesta de Sotaquí", 6 enero.

Diario La Provincia (1950a). "La fiesta religiosa del Niño Dios de Sotaquí", 6 enero.

Diario La Provincia (1950b). "Miles de romeros de todos los pueblos arribarán hoy a Sotaquí", 7 enero.

Diario La Provincia (1952). "La fiesta del Niño Dios de Sotaquí", 6 enero.

Diario La Provincia (1960). "La fiesta de la borrachera de Sotaquí", 9 enero.

EASTAUGH, N., WALSH, V. Y CHAPLIN, T. (2008). *Pigment Compendium: A Dictionary and Optical Microscopy of Historical Pigments*. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann.

FELLER, R.L. (1986). *Artists' Pigments: A Handbook of their history and characteristics.* Washington DC: National Gallery of Arts.

FREEDBERG, D. (2009). *El poder de las imágenes*. Madrid: Ediciones Cátedra.

Focus Group Comunidad de Sotaquí (2022). Santiago de Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile [Documento no publicado]

GALLEGOS DE DONOSO, M. (1994). *El desarrollo de la Escultura en la Escuela Quiteña*. Washington DC: Centro Cultural del BID.

GONZÁLEZ, M.J. (2020). *Conservación y restauración de encarnaciones polícromas*. Madrid: Editorial Síntesis.

KENNEDY, A. (2002). "Arte y artistas quiteños de exportación". En A*rte Quiteño más allá de Quito. Memorias del Seminario Internacion*al, Quito: FONSAL, 25-43.

LEIVA, K. Y AMAYA, M.I. (2023). *Informe de resultados de análisis UPCE-002*. Santiago de Chile: Centro Nacional de Conservación y Restauración [Documento no publicado].

LIXINXKI, L. (2022). "Against authenticity", *International Journal of Heritage Studies*, 28: 11-12. Routledge Journals.

MANIURA, R. Y SHEPHERD, R. (eds.). (2006). *Presence. The inherence of the prototype within images and other objects.* Aldershot: Ashgate Publishing.

MAUSS, M. (2009). *Ensayo sobre el don: Forma y función del intercambio en las sociedades arcaicas*. Buenos Aires: Katz Editores.

MUNCK, B. Y DRIES, L. (2015). "Locating and dislocating value: a pragmatic approach to early modern and nineteenth-century economic practices". En *Concepts of value in European Material Culture*, 1500-1900. Londres, Nueva York: Routledge, 1-29.

MUÑOZ, S. (2004). T*eoría contemporánea de la restauración*. Madrid: Editorial Síntesis.

NEILSON, C. (2014). "Carving life: the meaning of wood in early modern European sculpture". En *The matter of art. Materials, practices and cultural logics, c. 1250-1750,* Anderson, C., Dunlop, A., y Smith, P. H. (eds.). Manchester: Manchester University Press, 223-239.

ORTIZ, A. (2007). "El tráfico de arte quiteño más allá de Quito". En *Arte Quiteño más allá de Quito. Memorias del Seminario Internacional*, Quito: FONSAL, 13-23.

ORTIZ, A. (2016). *Historia del Santuario y del Niño Dios de Sotaquí.* Chile: Fondo de la Cultura Tradicional Gobierno Regional de Coquimbo.

PALMER, G. (1987). *Sculpture in the Kingdom of Quito*. Albuquerque: University of New Mexico Press.

PARRILLA, M.A. (2009). *El Arte de los pigmentos. Análisis Histórico-artístico de su evolución a partir de los tratados españoles de Francisco Pacheco y Antonio Palomino.* Valencia: Servei de Publicacions Universitat de Valencia.

PEÑA, S. (1996). *El Niño Dios de Sotaquí. Historia de una Tradición Religiosa de el Valle del Limarí.* Chile: Editorial Caburga.

ROVINOVITCH, R. (1972). "Una ruta de tradición y color para enero", *Revista En Viaje*, 58. Chile: Empresa de Ferrocarriles del Estado.

RUIZ DE ARCAUTE, E. (2009). "Aportaciones a la teoría de la restauración". En *IV Congreso del Ge-IIC. La restauración en el siglo XXI: función, estética e imagen*, Cáceres: Grupo Español International Institute for Conservation, 69-78.

SALAZAR, N. (2023). *Memoria de intervención. Conservación-restauración. Escultura / Niño Dios de Sotaquí / Desconocido /*

Siglo XIX. Santiago de Chile: Centro Nacional de Conservación y Restauración [Documento no publicado].

SÁNCHEZ, J.M. Y QUIÑONES, M.D. (2009). "Materiales pictóricos enviados a América en el siglo XVI", *Anales del Instituto de Investigaciones Estéticas,* 95: 45-67. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.

SIRACUSANO, G. (2005). *El poder de los colores. De lo material a lo simbólico en las prácticas culturales andinas (siglos XVI-XVIII).* Buenos Aires: Fondo de Cultura Económica de Argentina.

URIBE, J. (1974). *La Virgen de Andacollo y el Niño Dios de Sotaquí.* Valparaíso: Ediciones Universitarias de Valparaíso.

WEST-FITZHUGH, E. (1997). *Artists' Pigments: A Handbook of their history and characteristics* vol.3. Washington DC: National Gallery of Arts.

YONAN, M. (2011). "Toward a Fusion of Art History and Material Culture Studies", *West 86th*, 18(2): 232-248. Chicago: The University of Chicago Press.

Autor/es



Olaya Sanfuentes Echeverría
osanfuen@uc.cl
Instituto de Historia, Facultad de Historia, Geografía y Ciencia Política, Pontificia Universidad Católica de Chile (PUC)
https://orcid.org/0000-0002-6951-1285

Profesora titular del Instituto de Historia de la Pontificia Universidad Católica de Chile (PUC), donde enseña e investiga temas relacionados con cultura material y cultura visual latinoamericana, así como otros tópicos como patrimonio cultural e historia pública. Es Licenciada en Historia por la Pontificia Universidad Católica de Chile (PUC), obtuvo un Master of Arts en Georgetown University (GU) y el título de Doctora en Historia del Arte en la Universidad Autónoma de Barcelona (UAB). Ha obtenido fondos estatales para estudiar la iconografía y ritualidades asociadas a la figura del Apóstol Santiago, así como el estudio de esculturas del Niño Jesús desde los llamados estudios de la cultura material. Ha escrito numerosos artículos, capítulos de libros y libros producto de estos y otros proyectos. Además, ha participado en varios proyectos museográficos en Chile, destacando su rol como curadora.



Carmen Royo Fraguas
carmenroyofraguas@gmail.com
Conservadora-restauradora e investigadora independiente

Conservadora-restauradora especializada en el trabajo con escultura y bienes tridimensionales. Obtuvo su titulación en la Escuela Superior de Conservación y Restauración de Bienes Culturales de Aragón (ESCYRA) y un Máster en Estado de Conservación del Patrimonio Histórico en la Universidad Pablo de Olavide (UPO) de Sevilla. Hasta 2024, se desarrolló como profesional en la Unidad de Patrimonio Construido y Escultórico del Centro Nacional de Conservación y Restauración (CNCR) de Chile, Servicio Nacional del Patrimonio Cultural, Ministerio de las Culturas, las Artes y el Patrimonio; lugar donde también desarrolló su labor investigadora, participando en proyectos con financiamiento público y estatal centrados en el estudio de los tránsitos materiales de esculturas en contextos de culto, uso o espacios públicos. Actualmente, trabaja como profesional independiente entre España y Latinoamérica.

Artículo enviado 28/08/2025
Artículo aceptado el 22/02/2026

CC BY NC ND

https://doi.org/10.37558/gec.v29i1.1429



Estado de conservación del *Large Temple* de Sikait, Egipto. El gran templo de talco de Wadi El-Gemal

Estefanía Martín García, Luis Jordá Bordehore, Adriana Molina Pérez, Delia Eguiluz Maestro, Joan Oller Guzmán

Resumen: Se presenta el estudio del el *Large Temple*. (s. I a.n.e – s. I n.e.), uno de los templos más singulares del yacimiento de Sikait (desierto oriental de Egipto). La concurrencia de múltiples grietas motivó este análisis no destructivo, cuyo objetivo principal fue la inspección, seguimiento y prediagnosis global de su estado de conservación. Debido a la naturaleza excavada del templo, se implementó una metodología híbrida que integra la ingeniería de minas y la arquitectura, combinando los estándares de la mecánica de rocas con el diagnóstico patológico arquitectónico (normas UNE 41805 IN). En cuanto a las técnicas utilizadas: para la documentación geométrica se empleó fotogrametría SfM y levantamiento tradicional; para la caracterización del macizo, estación geomecánica y esclerómetro; y para la inspección técnicas como la cartografía de lesiones, endoscopia, ensayos Lutton, monitorización termohigrométrica y control de fisuras (regletas y testigos de yeso). La diferenciación entre juntas de origen geológico (bandas o vetas blandas) y fracturas o grietas mecánicas (inducidas por las tensiones) permitió constatar la precariedad estructural del monumento. Los cálculos analíticos demuestran que el templo ya presentaba unas condiciones de inestabilidad intrínseca en el momento de su construcción. El posterior deterioro y disgregación de estas vetas, por fatiga y/o solicitaciones externas — como el posible derrumbe del farallón rocoso superior—, transformó estas discontinuidades geológicas en grietas críticas. Las conclusiones confirman la correlación entre las bajas resistencias esclerométricas entre bandas y el avanzado estado patológico del conjunto, identificando la columna y pared sur como los focos más vulnerables. Se determina que el templo presenta una inestabilidad de carácter endémico (diseño de mínimos) e intrínseco (geológico) que justificaría su estado inacabado. El estudio pluridisciplinar que aquí se presenta, representa la primera aproximación científica al proceso patológico del hemispeos más oriental del Alto Egipto.

Palabras clave: arquitectura excavada, arquitectura Antiguo Egipto, métodos no destructivos, Mecánica de Rocas, Wadi Sikait, conservación y restauración preventiva

State of conservation of the Large Temple of Sikait, Egypt. The great talc temple of Wadi El-Gemal

Abstract: This article presents a study of the Large Temple (1st century BC - 1st century AD), the most unique temples of the site of Sikait (Eastern Desert of Egypt). The presence of multiples fractures and cracks prompted a non-destructive analysis aimed at the inspections, monitoring, and preliminary diagnosis of its conservations state. Due to the excavated nature of the temple, a hybrid methodology combining mining engineering and architectural pathology was implemented. Geometric documentation was conducted through SfM photogrammetry and traditional surveying, while rock mass characterization included geomechanical station analysis and Schmidt hammer testing. Additional inspection techniques comprised damage mapping, endoscopy, Lutton tests, thermos-hygrometric monitoring, and crack monitoring. The differentiation between geological joints and stress-induced mechanical fractures revealed the structural precariousness of the monument. Analytical calculations suggest that the temple already presented intrinsic instability at the time of its construction. The deterioration of these geological discontinuities, possibly aggravated by the collapse of the upper rocky cliff, later transformed them into critical cracks. The conclusions confirm the correlation between low sclerometric strength in the bands and the advanced pathological condition of the complex, identifying the column and the south wall as the most vulnerable areas. The temple's intrinsic geological instability and minimal structural design may explain its unfinished state. This multidisciplinary study provides the first scientific assessment of the pathological processes affecting the easternmost hemispeos of Upper Egypt.

Keywords: excaved architecture, Ancient Egyptian architecture, non-destructive testing methods, Rock Mechanics, Wadi Sikait, preventive conservation and restoration

Estado de conservação do Large Temple de Sikait, Egito. O grande templo de talco de Wadi El-Gemal

Resumo: Apresenta-se o estudo e o diagnóstico preliminar de um dos templos mais singulares do sítio de Sikait (deserto Arábico do Egito), o Large Temple. Este foi construído entre o final do séc. I a.C. e o início do séc. I d.C., encontrando-se escavado na vertente oriental do wadi do assentamento de Sikait. Desde o início do século XXI, os critérios da conservação curativa regem as intervenções de consolidação do templo. No entanto, a presença de múltiplas fraturas levou ao início de uma análise não destrutiva e de caráter pluridisciplinar, exposta no presente artigo. Como resultado do trabalho, foi possível distinguir as fraturas de origem "geológica" das fraturas mecânicas induzidas por tensões. Constata-se, através dos cálculos analíticos e empíricos realizados, que o templo apresentava condições precárias de estabilidade no momento da sua construção, com numerosas juntas ou descontinuidades geológicas a atravessar a escavação. Estas fraturas naturais (geológicas) voltaram posteriormente a ativar-se devido à ação de solicitações exteriores, provavelmente um grande desabamento do farilhão rochoso superior, em conjunto com a própria degradação do material. A estabilidade atual da cobertura foi avaliada combinando diversas metodologias.

Palavras-chave: arquitetura escavada, arquitetura do Antigo Egito, métodos não destrutivos, Mecânica das Rochas, Wadi Sikait, conservação e restauro preventiva

Introducción

—*Antecedentes y objetivos de la investigación*

Las campañas arqueológicas y las intervenciones de conservación y restauración, que desde el año 2018 se suceden en el yacimiento de *Sikait*, situado en el parque nacional *Wadi El-Gemal*, se engloban dentro del *Sikait Project* (Oller et al. 2019). Este proyecto cuenta con un equipo pluridisciplinar que aborda la investigación del asentamiento desde múltiples enfoques, como el territorial, geológico, gemológico, socio-económico, arquitectónico y arqueológico, entre otros.

El objetivo principal de esta investigación es establecer las bases de las prospecciones diagnósticas del singular *Large Temple* mediante una metodología híbrida que combina la ingeniería de minas y la arquitectura. El fin último es definir los criterios para una futura intervención de restauración. Como objetivos parciales se plantean la documentación y caracterización técnica del templo, la evaluación de su estabilidad estructural y la identificación y control de sus puntos críticos. De esta forma, se aportan datos inéditos sobre la estabilidad estructural del hemispeos, ofreciendo una metodología extrapolable al estudio de otros templos excavados del Alto Egipto.

En resumen, este trabajo propone un protocolo de diagnóstico estructural aplicado a templos excavados en roca, combinando herramientas de análisis arquitectónico y principios procedentes de la ingeniería de minas.

• Restauración y conservación curativa

Las primeras intervenciones de conservación conocidas en el templo se llevaron a cabo a raíz de las excavaciones de principios del s. XXI por el equipo dirigido por S. E. Sidebotham (*University of Delaware*). Estas consistieron en el restablecimiento de lagunas murarias y el recalce de estructuras mediante el relleno de las ausencias materiales con ripio y piedra en seco. Del mismo modo, en 2008 se sellaron las grietas del fuste sur con mortero, y con mampostería en seco se realizó un encamisado hueco donde se ubicaba la columna norte.

A partir de 2016 nace el *Sikait Project* en el área de H*istoria Antigua del Departament de Ciències de l'Antiguitat i l'Edat Mitjana de la Universitat Autònoma de Barcelona* en colaboración con el *Polish Centre of Mediterranean Archaeology* (Sikait Project 2024), lo que permitirá el estudio y desarrollo continuado, desde 2018, de actuaciones de mantenimiento bajo los mismos criterios adoptados en intervenciones anteriores. Se prioriza el uso de técnicas constructivas preexistentes mediante el empleo de materiales autóctonos, sostenibles y compatibles con la obra histórica. Así, tras las excavaciones del templo en 2020, se iniciaron las intervenciones en las estructuras exteriores entre 2022 y 2023.

De forma sistemática se han llevado a cabo consolidaciones anuales tanto de las estructuras excavadas, para garantizar su protección; como de las exentas para evitar daños a corto y medio plazo (conservación curativa). Además, se han restaurado edificaciones que manifestaban un cuadro patológico desfavorable con la finalidad de recuperar la legibilidad del conjunto y preservar las estructuras edilicias del yacimiento, garantizando la seguridad de uso.

Además, se debe tener en cuenta que los tiempos de actuación se reducen a unas pocas semanas cada año y la logística necesaria para estos trabajos es compleja al encontrarse situados en una zona desértica remota, alejada de núcleos poblacionales con recursos materiales y medios auxiliares para la restauración. Por todo ello, las intervenciones efectuadas son las mínimas e imprescindibles, y aquellas que requieren menor cantidad de maquinaria.

Para comprender la relevancia del templo dentro del asentamiento, es necesario contextualizar el sitio de *Sikait* y profundizar en la arquitectura del hemispeos. Por este motivo, el artículo se estructura de la siguiente forma: en primer lugar se presenta el estado de conservación del templo junto con su contexto histórico y arquitectónico;

posteriormente se expone la metodología de análisis y el conjunto de ensayos y prospecciones realizados; a continuación, se presentan los resultados del diagnóstico y la identificación de los puntos críticos; finalmente se discuten las implicaciones de estos resultados y las futuras líneas de investigación y conservación.

— Contexto histórico y geográfico

Durante el Imperio Romano el sitio de *Sikait* o *Senskis* se situaba en la región conocida como "*Smaragdus*" tratándose de un asentamiento dedicado a la minería de las esmeraldas (Oller *et al.* 2023). El material arqueológico hallado demuestra que las actividades no se limitaban únicamente a la extracción, sino que posiblemente se tratase de un complejo artesanal de clasificación y procesado de minerales. Su localización, en las laderas de un valle seco o "*wadi*", es estratégica respecto a la que sería una próspera ruta comercial de caravanas, que cruzaría desde el interior del territorio egipcio hacia la zona portuaria del Mar Rojo, donde domina el sitio de Berenike.

Su fundación data de entre el s. I a.n.e. y el siglo I n.e., pero el momento de mayor crecimiento urbanístico se fecha a partir del s. IV y s. VI n.e., con la consolidación del entramado urbano adaptado a la orografía mediante terrazas, rampas y escalonamientos. Hasta el momento se han identificado más de ciento cincuenta edificios (Oller *et al.* 2024; 2023) de carácter secular y cuatro templos que presiden el núcleo urbano en su desarrollo meridional. Siguiendo un eje ascendente desde el mar Rojo hacia el Nilo, se localizan en la ladera oriental el *Small Temple*, el *Mountain Shrine* y el *Large Temple*; mientras que en un promontorio del meandro occidental se halla el *Southern Temple*, datado de época altoimperial.

Tras el posible declive de las rutas comerciales y el paulatino abandono de las minas el asentamiento de *Sikait* fue abandonado según las evidencias arqueológicas (Oller *et al.* 2021).

—Arquitectura del Large Temple

El *Large Temple* es un edificio de tipo hemispeos que se excavó y labró entre finales del s. I a.n.e. e inicios del s. I n.e. en la ladera oriental del *Wadi Sikait*, junto a dos capillas adyacentes y varios nichos diseminados alrededor de un afloramiento de roca blanda de talco esquisto. Para acceder al templo desde el *wadi* se disponía de un sistema de escalinatas y terrazas pétreas que salvaban el desnivel.

El templo asemeja en su primera crujía con el pronaos de un dístilo *in antis*. Su planta es ligeramente rectangular y tripartita, de unos 5,40 m de ancho por 9,50 m de largo, y alcanza una superficie interior aproximada de 49,50 m^2. Su altura libre disminuye de los 3,50 m del acceso a los 2,50 m en el extremo más profundo. El sistema estructural podría considerarse una composición trilítica basada en columnas y arquitrabes confinados en una envolvente muraria continua, pero al tratarse de una construcción totalmente horadada en la roca hallamos sus paralelos en los apuntalamientos naturales al propio proceso de excavación de cuevas, minas y otras galerías subterráneas como hipogeos. Su doble condición monomaterial y monolítica, la equipara a una estructura hiperestática con momentos de empotramiento perfecto en sus hipotéticas uniones.

El templo se divide en tres naves formadas por paredes laterales labradas aplomadas y macizos rocosos excavados a modo de columnas y pilares. Cabe destacar que en sus paramentos presenta numerosas hornacinas y concavidades, inscripciones e iconografía relacionada con la toponimia del lugar. Las naves tienen luces o vanos desiguales; la norte y la central superan los 2,00 m de luz (distancia entre ejes) y; la nave sur cubre aproximadamente 1,50 m. Las naves se dividen transversalmente en cuatro crujías: la primera parece haber perdido el par de columnas entre las antas y presenta un voladizo de unos 3,20 m, lo que genera una condición estructural crítica cuyo comportamiento depende de las características del macizo rocoso. La segunda crujía la delimitan dos columnas de sección circular y dos pilares al interior, que salvan una luz de 2,30 m; la siguiente crujía inicia la pérdida de paralelismo y cubre del orden de 1,80 m; y la última se corresponde con la pared de cierre de la cavidad, formalizada con dos capillas con altares y una tercera capilla inacabada (no se labró el altar sur), que van de los 2,20 m a los 2,70 m como consecuencia de dicha irregularidad. Estos espacios también están divididos en tres niveles, que van desde los 3,40 m a los 2,60 m de altura libre y están vinculados entre sí por peldaños. La fachada del templo está labrada en la misma roca y se caracteriza por tener dos pilastras semicirculares que flanquean la oquedad del acceso (de unos 4,40 m de ancho por 3,80 m de altura hasta el capitel) a modo de cierre de las antas. En el interior, las dos columnas mencionadas antes, presentan un fuste liso de sección circular (ni poligonal ni acanalado) cuyo diámetro medio es 1/4 de su altura. Las proporciones generales (dórico primitivo), más que ptolemaicas, remiten a las egipcias del 3er y 4º orden (Gardner 1853: 293-393; Prisse d'Avennes 1868-1877; Lepsius 1849) debido a la pronunciada éntasis, aunque sin plinto. Columnas y pilastras están esculpidas de una sola pieza y disponen de capiteles sin ornato, próximos al orden toscano. El cielo o techo del templo mantiene la horizontalidad del plano hasta el extremo más profundo de la cavidad. En el exterior, la fachada muestra unos mechinales en la parte superior que apuntan a la existencia de un entablamento y/o frontón de mampostería según el tipo compositivo de los hemispeos o speos. Son ejemplos plausibles los egipcios de Derr o Artemidos (*wadi Bat el-Baqara*) y *el-Kanais* (*wadi Abbad*), u otros nabateo-romanos clásicos [Figura 1].

En el caso de las arquitecturas excavadas en roca, el comportamiento estructural del edificio no puede

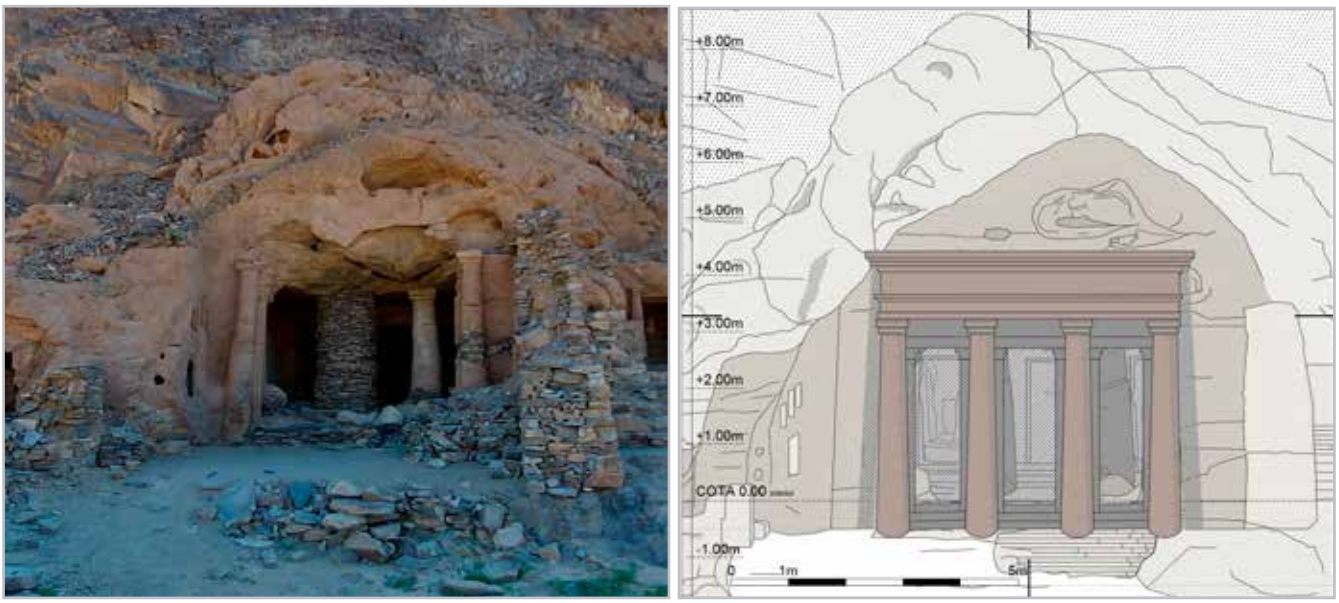


Figura 1.- Comparativa del estado actual e hipótesis reconstructiva de la fachada basada en el templo de *Dushara* situado en el *Wadi Musa*, cerca de *Little Petra* (*Siq al-Barid*) debido a sus proporciones similares (aunque no de sus dimensiones). Izquierda: fachada actual del templo, con las pilastras laterales y la pérdida del par de columnas centrales entre las antas; al fondo se distingue la columna sur recalzada y la columna de mampostería que sustituye a la columna norte tras su desplome. Derecha: interpretación gráfica del frontispicio completo.

analizarse de forma independiente del macizo geológico que lo contiene. La estabilidad del templo depende, por tanto, de la interacción entre la geometría excavada y los sistemas de discontinuidades preexistentes del afloramiento rocoso, que condicionan el comportamiento estructural (Sani *et al.* 2012).

Análisis geomécanico y arquitectónico con métodos no destructivos de reconocimiento y prospección *in situ*

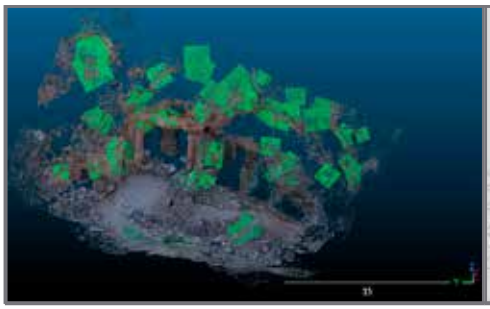
—*Aproximaciones metodológicas y acotación del sitio*

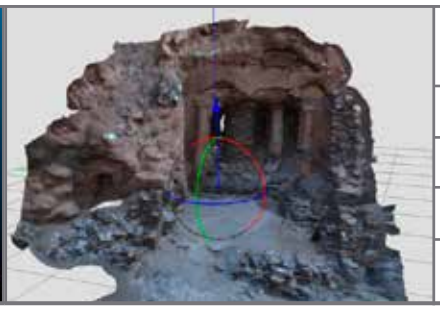
En enero de 2003, el Parque Nacional *Wadi El Gemal* fue declarado Área Protegida según la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN) y en virtud de la Ley 102/1983 de los Protectorados Naturales. Dado que el sitio arqueológico de *Sikait* se ubica en dicho parque y posee un gran valor patrimonial, se optó por una toma de datos no destructiva basada en observaciones y mediciones *in situ*, sin extracción de muestras.

La escasez de recursos, condicionada por el lugar y el formato de las campañas, condujo a un acercamiento tradicional mediante metodologías estandarizadas que hibridan la ingeniería de minas y el estudio de lesiones arquitectónicas. De la primera se aplicó el estándar de la mecánica de rocas y el análisis de estabilidad, cuya fase fundamental es la estación geomecánica — basada en la caracterización de la resistencia de la roca (UNE 22950), orientación de estratos, rugosidad y grado de meteorización— seguida del análisis de esfuerzos. De la segunda, se aplicó el método basado en el proceso de diagnóstico patológico regulado por las normas UNE 41805 IN (Diagnóstico de edificios) y el Método SCCM de restauración monumental (Gonzàlez 1999). Ambos enfoques coinciden en una estructura de conocimiento previo y toma de datos (caracterización y cartografía de daños), otra fase analítica y de diagnóstico (ensayos y reflexión) y finalmente el dictamen y propuesta de restauración. Esta metodología dual ha demostrado ser plenamente compatible y contrastable.

Para la documentación base, aparte del levantamiento ortofotográfico inicial complementado con fotografías con luz rasante y planimetrías vectoriales[1], se generó una nube de puntos mediante escaneado con sensor LiDAR de *smartphone* (sistema iOS) y fotogrametría *Structure from Motion* (SfM), referenciada localmente respecto al Norte [Figura 2]. Estos modelos tridimensionales permiten revisitar virtualmente el templo y ofrecen mayor definición de las irregularidades y deformaciones, así como inspeccionar sistemáticamente (mediante yuxtaposición de datos anuales) la evolución de los daños.

Tras la toma de datos previa se emplearon técnicas de inspección —como la endoscopia, esclerometría y ensayos *Lutton*— que completaron el diagnóstico patológico basado en la cartografía de lesiones con mapeo tradicional. Finalmente, la estabilidad se evaluó mediante la monitorización con testigos de yeso, regletas de control y registros termohigrométricos. Este flujo de trabajo, con margen de mejora, permitirá alcanzar una diagnosis más madura en futuras campañas.





	Eje X	Eje Y (Norte M)	Eje Z (vertical)
Punto 1	0	0,0848 m	0
Punto 2	-0,0848 m	0	0
Punto 3	0	- 0,0848 m	0
Punto 4	0,0848	0	0

Figura 2.- Coordenadas de los puntos de referencia para escalado y orientación mediante SfM y medida de discontinuidades en nube de puntos en modelo tridimensional (programa Cloud Compare).

—*Caracterización geológica y petrográfica*

A nivel geotectónico *Sikait* está situado en el extremo sud-este del desierto Oriental egipcio, en una región de *wadis* delimitada por el Nilo a poniente (a la altura de Luxor) y por el Mar Rojo a levante, en la que se podría considerar una zona con proliferación de inundaciones y sismos por la proximidad entre las placas arábiga y africana. Geológicamente, prácticamente toda la provincia o gobernación del Mar Rojo (Hurgada), pertenece al Palezoico y proliferan rocas plutónicas, efusivas o ígneas volcánicas y metamórficas (metasedimentarias) (Badawy *et al.* 2017).

Según la información geológica consultada (Harrell 2004; Ibrahim *et al.* 2010; Abd El-Wahed *et al.* 2019) en la zona del *Wadi Gimal* o *Wadi Sikait* aflora el granito (feldespatos, micas y cuarzos), predominando una mezcla de esquistos con talco, biotita/flogopita, actinolita, turmalina, clorita y esquistos de cuarzo-moscovita (Harrell 2006).

La caracterización mineralógica de los fragmentos dispersos de las columnas del templo, realizada de forma organoléptica o macroscópica con parámetros del Dpto. Cristalografía y Mineralogía (UCM), identifica el material como un filosilicato (clase 9.EC.05 de la clasificación Strunz), cuyas propiedades físicas sugieren una composición de talco o similar. El mineral presenta un hábito laminar con planos cristalográficos definidos y una exfoliación de buena a imperfecta, lo que resulta en una fractura de tipo fibroso. Visualmente, destaca un aspecto moteado en tonos grises y beige (referenciados bajo la Tabla Munsell como 2.5YR 5/2 y 10YR 7/6-8/8, respectivamente), condicionado por la presencia de inclusiones de óxidos férricos. El talco, junto al carbón y el grafito, presenta el menor ángulo de fricción y, por tanto, una muy baja resistencia al corte de las diaclasas. Al encabezar la escala de Mohs (dureza 1), es uno de los minerales más blandos que existen, siendo rayado incluso por la uña.

El proceso de excavación o sustracción del material para formar la cavidad del templo habría seguido la metodología aplicada en la cantería tradicional, donde se extraen bloques de manera escalonada mediante el uso de cinceles, cuñas y palancas (Harrell y Storemyr 2013). Así pues, el templo fue excavado a favor de un afloramiento de talcoesquistos rodeados de un macizo rocoso de areniscas fracturadas, una situación *a priori* nada recomendable para su uso constructivo debido al tipo de rotura laminar del esquisto (Harrell 2016). Por lo que se trata de un material fácilmente excavable en relación al entorno, pero aparentemente no durable en el tiempo.

• Lectura de paramentos y orientación de los niveles de foliación

La lectura de paramentos permitió identificar diferentes vetas y bandas o niveles de foliación del material. Las paredes, techo y columnas del templo muestran una alternancia de talcoesquistos más verdosos bandeados y otros más rojizos. La diferenciación cromática evidenció la desigual consistencia, rugosidad y porosidad entre las bandas de esquisto de talco verde (laminado) con respecto a las vetas de talco blanco pulverulento, de tacto jabonoso-graso y brillo de carácter nacarado.

En el paramento norte del templo la inclinación de la foliación sigue un ángulo de aproximadamente 20º, partiendo del capitel de la pilastra para morir en los peldaños de la segunda crujía. El paramento sur presenta bandas y vetas con una inclinación de 10º que ascienden desde la basa de la pilastra hasta la mitad del pilar de la segunda crujía. La asimetría de las bandas de los paramentos pone de manifiesto que el templo se excavó en la singularidad o anomalía geológica de un cambio de inclinación (buzamiento) de la foliación del talcoesquisto.

Durante el reconocimiento de los niveles de foliación (bandas, vetas o juntas geológicas) se detectó que toda la oquedad está surcada de varias familias de discontinuidades: 1) juntas geológicas preexistentes (foliación y vetas talcosas débiles), las cuales son previas a la excavación del templo (Martínez *et al.* 2024) y que este puso de manifiesto, 2) fracturas mecánicas puras (grietas y fisuras) inducidas por la excavación o por tensiones externas y 3) fracturas estructurales evolutivas, surgidas de la degradación de las vetas geológicas más blandas, por fatiga o solicitaciones externas — como el posible derrumbe del farallón rocoso superior—. Desde el punto de vista geomecánico, estas juntas potencialmente activas son

grietas críticas puesto que el talco reduce la cohesión y el rozamiento interno, actuando como un lubricante natural en los planos de fractura.

Para el análisis de dichas discontinuidades se realizaron dos estaciones geomecánicas en el interior del templo y en el exterior (esta última mediante técnicas fotogramétricas). Una estación geomecánica es un conjunto de mediciones estructurales del macizo, anotaciones de las propiedades de las fracturas (rugosidad, relleno, orientación) y propiedades mecánicas de la matriz rocosa (mediante esclerómetro) registradas en unas plantillas normalizadas. Tal y como señalan Benrabah y equipo Benrabah *et al.* (2024), mediante técnicas remotas y medidas manuales con brújula es factible establecer la fracturación "natural" del terreno e inferir qué daños son de origen geológico y cuáles se deben a la construcción o a solicitaciones externas.

En la Figura 3 se muestran las medidas de fracturación natural del macizo rocoso encajante y en la Tabla 1 se recoge la orientación de dichas fracturas. Hay una notable diferencia entre la fracturación medida en el interior excavado del *Large Temple* y el afloramiento del entorno. Esta variación normalmente no debería ser por la existencia de fracturas "naturales" geológicas diferentes entre fuera y dentro puesto que el templo se ha excavado precisamente en ese mismo afloramiento. De hecho, se ha comprobado que la foliación de los esquistos es muy variable en el exterior debido a su elevadísima ondulación que provoca importantes cambios en la orografía.

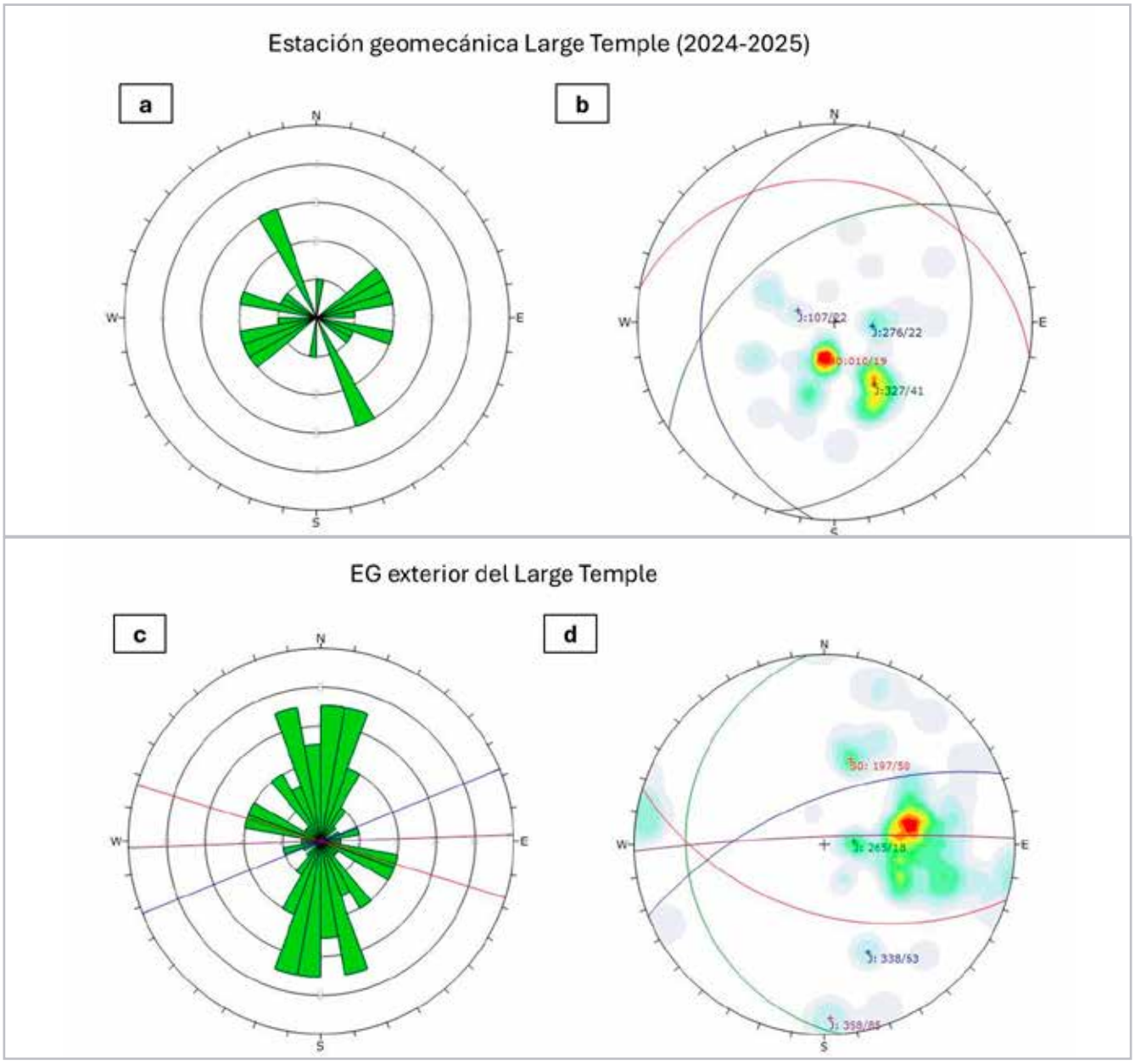


Figura 3.- Diagramas de fracturación. Arriba Estación Geomecánica del interior del *Large Temple* (izquierda roseta de rumbos de fracturas, derecha polos y planos). Abajo mediciones en el entorno del templo excavado a partir de la fotogrametría y medidas de brújula complementarias.

Esta diferenciación suele deberse a las condiciones térmicas (Eppes *et al.* 2010), a la descompresión de zonas de borde (Naime y García 2023) y finalmente, por el colapso o acomodación del macizo (Zhang *et al.* 2021). No obstante, parte de esta dispersión podría estar también condicionada por el propio proceso de toma de datos y por el estado de degradación del macizo exterior, donde los cascotes procedentes de colapsos superiores pueden ocultar algunas discontinuidades visibles en el interior del templo.

	Estación geomecánica interior templo	Fotogrametría macizo circundante
Medidas fracturación	S0: 010/19	S0:197/50
Dirección de buzamiento y buzamiento (DipDir / Dip)	J: 276/22	J:265/18
	J3: 107/22	J:338/63
	J4: 327/41	J:358/85

Tabla 1.- Orientación de las principales familias de fracturas.

- Control higrotérmico y ensayo para determinar las propiedades hídricas de la roca

Pese a que predomina un clima desértico hiperárido (BWh según la clasificación Köppen-Geiger), dominado por veranos calurosos e inviernos suaves, se han registrado catástrofes atmosféricas provocadas por lluvias intensas (Abdel-Fattah *et al.* 2015) e inundaciones recientes del *wadi* en 2023 y 2024. La temperatura media mensual varía entre 24 ºC y 38 °C durante el verano y 12 ºC y 26 °C durante el invierno, con humedades relativas (HR) entre el 28 % en verano y el 57 % en invierno.

Debido a estos saltos térmicos, el año 2020 se tomaron datos higrotérmicos mediante dos sensores digitales de temperatura y humedad relativa ThermoPro® TP50[2]. Se posicionaron uno en una zona asoleada del exterior del templo (anta norte), y el otro en la capilla sur. Mientras que en el exterior se dieron oscilaciones térmicas extremas de entre 42,9 ºC de máxima y 9,2 ºC de mínima, en el interior las oscilaciones fueron menos contrastadas, con una temperatura máxima de 25,4 ºC y una mínima de 16,5 ºC. La diferencia de temperatura media interior (21 ºC) es un 14% inferior a la exterior (24,6 ºC), lo que indica que el templo tiene inercia térmica y amortigua los efectos de la radiación solar (dilataciones y contracciones). No obstante, mientras que la HR media exterior es baja (29%), en el interior es significativamente superior (42,5%) alcanzando máximas del 58,4%. Esto implica que, en el momento más seco del día, el interior del templo retiene más del doble de humedad que el exterior. Esta higroscopicidad podría generar estrés hídrico en una roca laminar como el talcoesquisto, dificultando la evaporación de la humedad absorbida.

Con esta premisa se buscó cuantificar y determinar las diferencias de durabilidad y alterabilidad de los materiales del templo (terrenos más o menos "talcosos" y arcillosos) frente a los agentes externos. Se llevó a cabo un ensayo de inmersión en agua tipo "*Lutton*" (Lutton 1977) con fragmentos de material de recuperación de desprendimientos próximos al templo. Los resultados del ensayo demostraron la resistencia al agua líquida de los fragmentos analizados, ya que ningún material se desmoronó pasadas las 24 horas de inmersión, permitiendo constatar la alta resistencia del talcoesquisto fuera de la matriz rocosa (carácter hidrófobo). Este ensayo para caracterizar el desmoronamiento de materiales pizarrosos con zonas alteradas está ampliamente descrito (Santi 1998, Wong & Abdul 2018) y en la Figura 4 se recoge la tabla de referencia. Debido a las limitaciones del campamento, en pleno desierto, no fue posible aplicar otros ensayos de inmersión y absorción más complejos

Esquema del ensayo:

Sumergir la muestra en agua **durante 24 h** y comparar el "aspecto" resultante con las siguientes figuras:

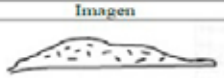
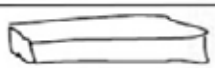
Ij	Imagen	descripción
1		Barro, se degrada a una consistencia parecida al barro
2		Copos. Las muestras se redfucen a copos, la forma original de la muestra ya no se aprecia
3		Astillas, fragmentos de roca. Se desprendenm astillas de los lados de la muestra. La muestra también puede fracturarse. La forma original de la muestra apenas perceptible
4		Fractura a través de la roca creando una apariencia grosera
5		Lajas. La muestra se divide de lado a lado según algunas superficies planas
6		No hay cambios. No hay aspectos discernibles



Figura 4.- Tabla de clasificación de durabilidad para materiales pizarrosos y esquistosos (traducido de Santi, 1998) y fotografías del ensayo *Lutton en Sikait*. La resistencia de las muestras tras 24h confirma el carácter hidrófobo del material y desplaza el posible foco de alterabilidad a la humedad higroscópica (entre láminas).

y regulados por el marco europeo y americano (UNE-EN 13755:2008, UNE-EN 12370:2020, UNE-EN 19376, ASTM C97, ASTM D5313 y ASTM D4644).

- Ensayo para determinar las propiedades mecánicas de la roca

Dado el carácter no destructivo de los reconocimientos, se empleó el esclerómetro o martillo Schmidt de Tipo N (Jordá *et al.* 2016). A pesar de la baja dureza del material, su portabilidad permitió estimar la resistencia a compresión simple (uniaxial) de la matriz rocosa (ASTM D5873, UNE 22950-6 e ISRM Suggested Methods) y el factor de seguridad de pilares rocosos, parámetro clave en la puntuación y caracterización empírica de obras subterráneas.

Se seleccionaron puntos de prospección situados a diferentes distancias y niveles de foliación, evitando generar patrones de impacto identificables en los paramentos de talcoesquisto del templo. De igual forma, la aplicación en series de impactos con diferentes direcciones (perpendicular e inclinado) demostró su adecuación en una estructura laminada y meteorizada.

Los datos obtenidos [Tabla 2 y Figura 5] revelaron la heterogeneidad de la estructura: los puntos de ensayo de la pared derecha (7-10) presentaron una muy marcada anisotropía predominando valores inferiores a 5 MPa; la pared izquierda ofreció mayor resistencia (1-4); las pilastras dieron una resistencia mínima de 5 MPa (5 y 6); los trozos o fragmentos de la columna norte mostraron resistencias muy bajas en todos los puntos e inclinaciones del esclerómetro y; finalmente, la columna sur preservada registró una resistencia ínfima en el tercio superior y la máxima obtenida en el templo en su tercio inferior con 10 MPa. Sin embargo, un valor de 10 MPa sigue siendo considerado como una "Roca muy blanda" (Grado R1 según la ISRM).

— Estado de conservación y degradación

- Cuadro patológico y cartografía de las discontinuidades estructurales

El templo presenta procesos patológicos de origen intrínseco e inducidos. Los primeros están relacionados con la propia naturaleza foliada del macizo rocoso y

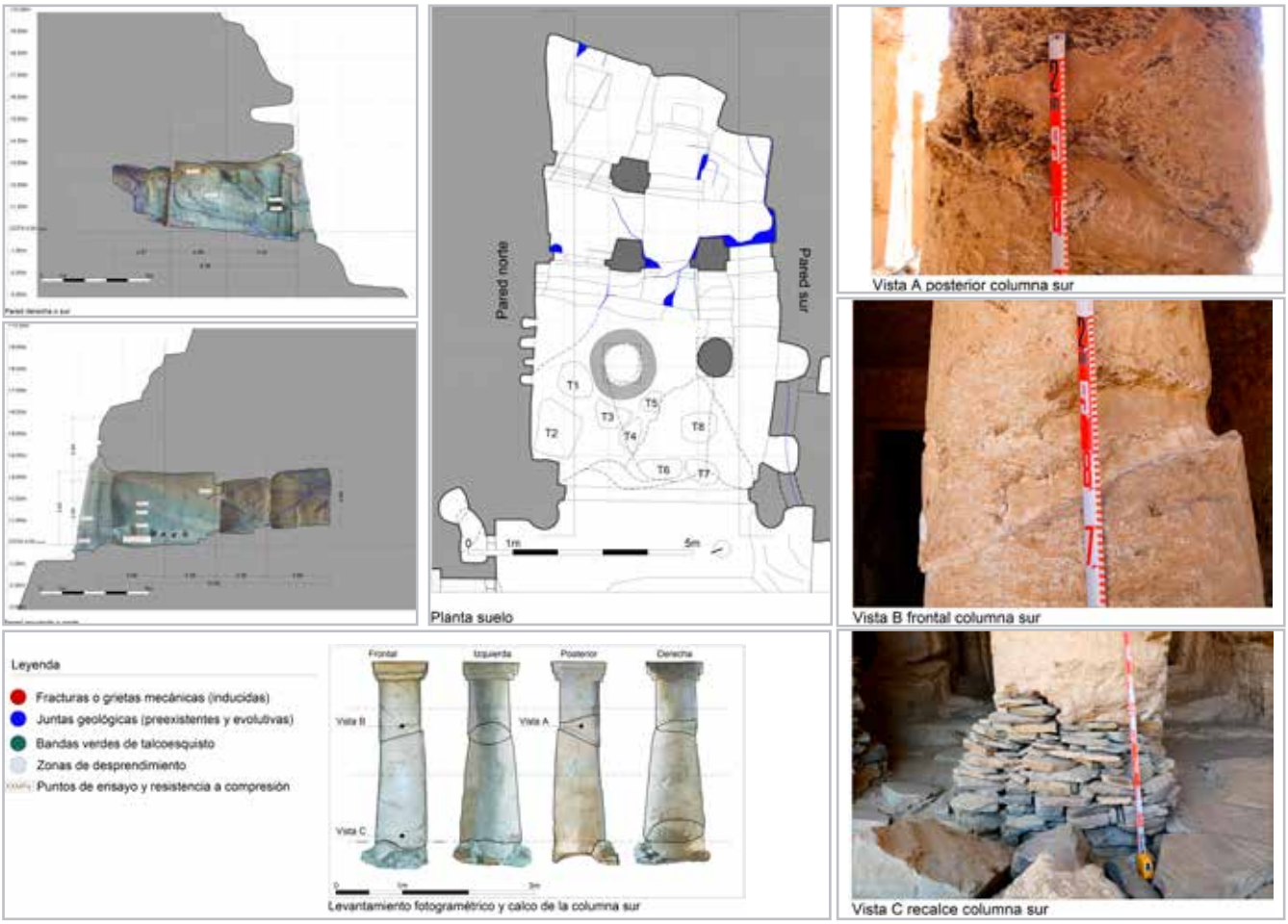


Figura 5.- Izquierda: Secciones con la caracterización de niveles de foliación y vetas de talco pulverulento. En los paramentos se puede distinguir la localización de los puntos de ensayo y el resultado obtenido en MPa. Derecha: Planta del suelo con el mapeado de discontinuidades e indicación de los puntos de prospección en los fragmentos dispersos del fuste de la columna norte (desaparecida). Con líneas a trazos se proyectan las grietas del techo. Abajo, levantamiento fotogramétrico de la columna sur.

Ubicación medidas en el Large Temple	Inclinación del esclerómetro	Promedio de rebotes del esclerómetro	Resistencia a compresión de la matriz rocosa (MPa)
Pared izquierda (pared norte) templo veta verdosa inferior (1)	horizontal	18	8
Pared izquierda (pared norte) templo veta verdosa superior (2)	horizontal	15	5
Pared izquierda (pared norte) templo zona intermedia anaranjada porosa (3)	horizontal	15	5
Pared izquierda (pared norte) templo esquina superior anaranjada (4)	horizontal	17	7
Columna-pilastra adosada izquierda (anta norte) parte inferior (5)	horizontal	15	5
Columna-pilastra adosada izquierda (anta norte) parte superior (6)	horizontal	15	5
Pared derecha (pared sur) superior (7)	horizontal	14	< 5
Pared derecha (pared sur) inferior (8)	horizontal	12	< 5
Hornacina en pared derecha (pared sur) (9)	Vertical hacia abajo	13	8
Pared derecha (pared sur) inferior cerca columna (10)	horizontal	12	< 5
Trozo de columna norte nº 1	Vertical hacia abajo	12	<5
Trozo de columna norte nº 2	Horizontal	13	<5
Trozo de columna norte nº 3	Horizontal	10	<5
Trozo de techo nº 4	Vertical hacia abajo	10	<5
Trozo de techo nº 5	Vertical hacia abajo	10	<5
Trozo de columna norte nº 6	Vertical hacia abajo	13	<5
Trozo de columna norte nº 7	Inclinado hacia abajo	13	<5
Trozo de columna norte nº 8	Vertical hacia abajo	12	<5
Fuste columna sur parte baja	Horizontal	20	10
Fuste columna sur parte superior	Horizontal	14	<5

Tabla 2.- Resultados de las medidas de esclerómetro y correlación con la resistencia a compresión simple de la roca. El número entre paréntesis corresponde al punto de inspección y se encuentran localizados en las planimetrías de la Figura 5.

con el buzamiento de sus niveles, agravados por la presencia de vetas talcosas; los segundos se deben al proceso de excavación del templo y a la posterior redistribución tensional o acomodación del macizo. Durante este proceso pudo producirse la reactivación de las juntas geológicas preexistentes descritas en el apartado anterior.

Estos sistemas de discontinuidades pueden aparecer hoy parcialmente enmascarados por desprendimientos externos, procesos de erosión exógena —tanto ambiental como antrópica (grafitis y rayaduras vandálicas)—, así como por marcas o hendiduras asociadas a la construcción.

La alteración epidérmica o anomalía mayoritaria (Laborde 2013; Vergès-Belmin 2010; Lisci 2021) corresponde a la pérdida material en forma de erosión y como desprendimiento. La primera, aparte de diferencial, aparece en forma de abrasión [Figura 6, derecha] debido al desgaste homogéneo por fricción o rozamiento de la arena transportada por el viento (tormentas desérticas). La segunda se manifiesta en forma de exfoliación, descamación perimetral y fragmentación en esquirlas, que pueden estar asociadas tanto a un trauma mecánico como a la higroscopicidad de la foliación. Asimismo, de forma minoritaria, se observan alteraciones por depósitos de material debidos a colonizaciones biológicas como son los nidos de avispa alfarera y otros sedimentos de insectos y reptiles [Figura 9].

En cuanto a las lesiones de origen mecánico, se interpretan de forma conjunta las discontinuidades inducidas y las evolutivas. Estas discontinuidades, previamente descritas, presentan un desarrollo desigual y coexisten con las vetas de esquisto de talco y las bandas foliadas. Algunas se manifiestan de forma tridimensional por las paredes, suelo y cielo de la cavidad. Las pérdidas mayoritarias se hallan en torno a la embocadura o umbral del templo, con el desprendimiento parcial del techo [Figura 6, izquierda] y total de la columna norte, y en la pérdida del último pilar de la nave sur y el final de la cavidad agrietada [Figura 7].

La columna sur presenta un recalce de piedra en seco como consecuencia de una fractura y pérdida de material en la parte inferior frontal. En el tercio superior del fuste manifiesta una grieta a 45 º con desplazamiento lateral (desencaje). Este tipo de grieta suele responder al movimiento horizontal de un extremo respecto a la reacción del otro. En el caso que nos ocupa el tercio superior se ha desplazado siguiendo la dirección de solicitación. Aparece también una discontinuidad horizontal, vinculada a la grieta diagonal, que podría



Figura 6.- Izquierda: ámbito del desprendimiento del techo del frontispicio (que trabaja como voladizo). Derecha: Proceso de abrasión (erosión eólica) en las zonas más expuestas de la fachada y en los elementos salientes, donde el impacto de las partículas trasportadas por el viento es más virulento.

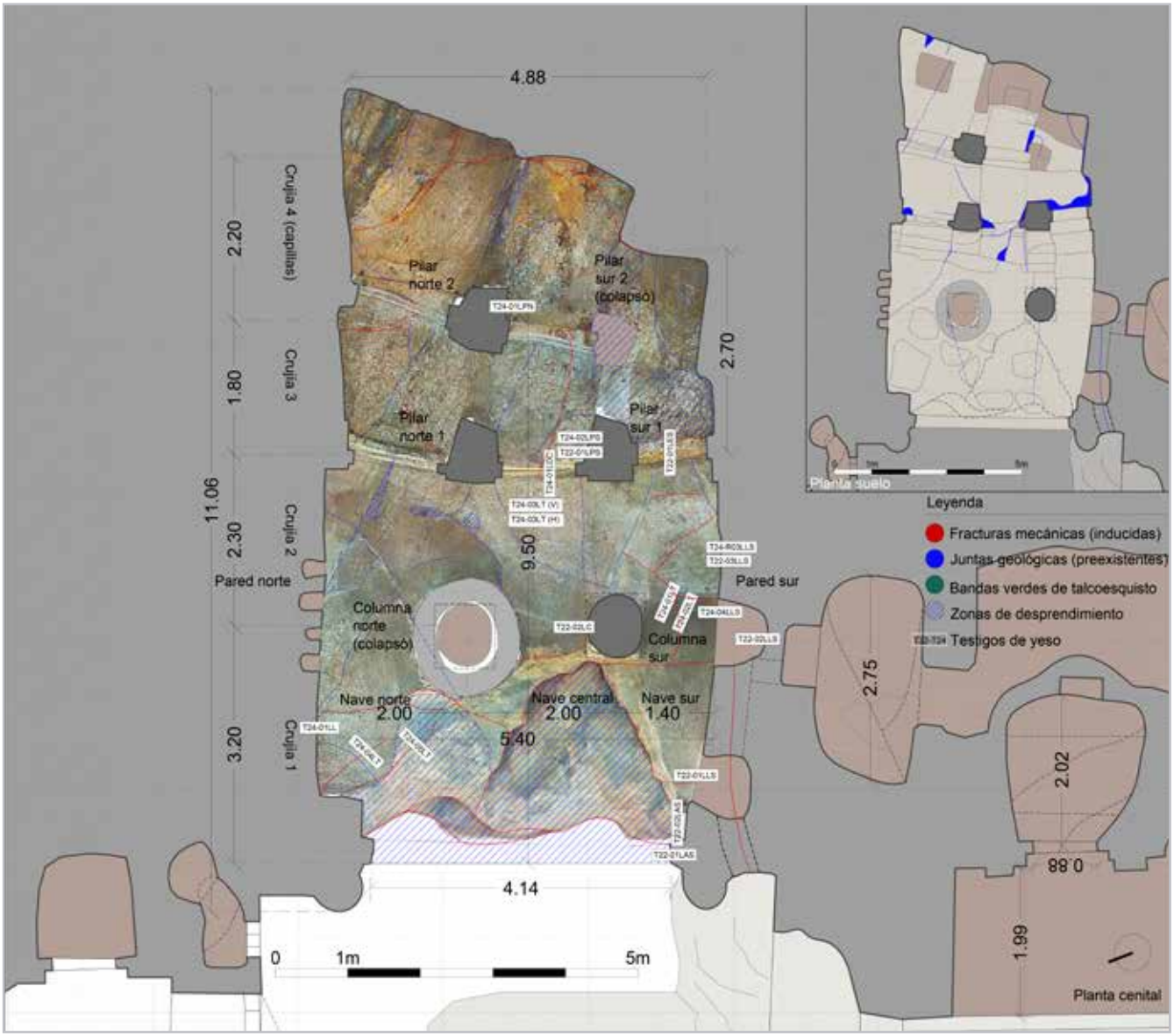


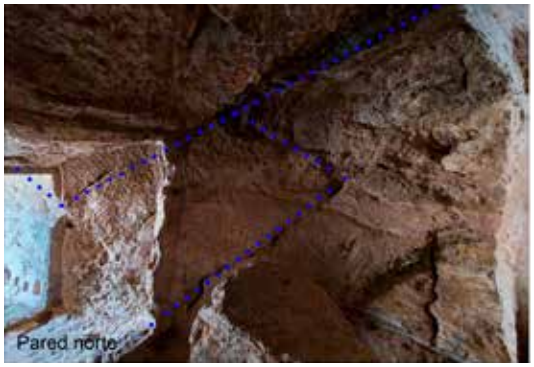
Figura 7.- Resumen cartográfico de los daños en la planta cenital o de techo. La trama de líneas azules a 45º indica las zonas de desprendimientos o de lagunas matéricas. Se destaca el desprendimiento parcial del voladizo asociado a la pérdida de columnas del frontispicio y el desprendimiento foliado del techo de las crujías 3 y 4 de la nave sur. En la parte superior derecha se ven las discontinuidades de la planta suelo.

Pared norte

Veta tridimensional por techo crujía 2 y 3 (preexistente)



Intersección de juntas en la crujía 4 (evolutiva)



Pared sur

Fracturas en techo y juntas en las crujías 1 y 2 (evolutiva)



Discontinuidad por el suelo, en las crujías 3 y 4 (evolutiva)



Pilares sur (1 y 2 desaparecido)

Fractura en cuña, vista desde la crujía 3, cara norte



Fractura en cuña, vista desde la crujía 2, cara este



Pilares norte (1)

Fractura en cuña, crujía 3, cara norte



Fractura en cuña, crujía 3, cara sur



Figura 8.- Discontinuidades y fracturas detectadas en el templo, marcadas con líneas azules. Imágenes de las paredes norte y sur, y de los pilares sur y norte, evidenciando lesiones mecánicas inducidas e intrínsecas, relacionadas con la reactivación de juntas geológicas y redistribución tensional del macizo.

deberse al aplastamiento de una veta. El capitel presenta una grieta tridimensional en la parte frontal y podría estar desconectado del macizo superior.
Se han detectado unos 8 fragmentos, parcialmente angulares, del colapso de la columna norte y ninguno del pilar sur de la última crujía.

En cuanto a las grietas del pilar sur de la segunda crujía, estas se manifiestan a mitad del fuste coincidiendo con la intersección de varias juntas geológicas preexistentes y definen una geometría en cuña, con vértice en el interior. Una discontinuidad tridimensional (diaclasa) que recorre parte de la pared sur y el suelo de la tercera crujía separa el pilar en su base y se ramifica tenuemente hacia el pilar norte. Este último presenta la cuña a la inversa, con el vértice al exterior.

En la pared norte las fracturas geológicas y mecánicas siguen un recorrido diagonal inverso al de las bandas de talcosquisto. Tienen mayor presencia y amplitud en las dos últimas crujías, donde se entrecruzan. La pared sur presenta discontinuidades con la misma inclinación a la norte, pero se extienden a lo largo de toda la nave y tienen un ancho y profundidad superiores [Figura 8]. Su desarrollo provoca la conexión de las hornacinas y la sección del anta sur. El anta sur dispone de un refuerzo asociado a dicha discontinuidad horizontal que, en la fachada oeste encuentra dos réplicas equidistantes en altura.

El techo presenta el gran desprendimiento a sur (voladizo) y uno leve a norte. Está surcado de grietas en todas direcciones.

Al tratarse de una excavación, la interpretación de las lesiones se aborda desde la óptica de fallos del terreno o de la cimentación. Las primeras podrían deberse a asentamientos (grietas diagonales) y corrimientos o deslizamientos (grietas verticales); las segundas, a quebrantos y arrufos (deformaciones convexas) de la base de apoyo. Sin embargo, la fuerte anisotropía del material desvirtúa cualquier esquema de isostáticas (tensiones principales) y su correlación con la solicitación generadora de la lesión. De igual modo, la degradación matérica por efectos intrínsecos (disminución de resistencia por agotamiento o fatiga del material) o exogénicos (embates) favorecería la apertura o el juego de discontinuidades u oquedades entre niveles de foliación o planos de las vetas. Este proceso de reactivación podría convertirlas en grietas mecánicas y favorecer el desarrollo de nuevas lesiones tensionales.

- Método para cuantificar el alcance de las discontinuidades

Se emplearon métodos cuantitativos de lectura discontinua como el pie de rey y de métodos cuantitativos simples como la regleta de fisuras permitieron tomar mediciones entre los labios de las fracturas más significativas. Los valores en los paramentos oscilan entre 2,5 y 6,5 mm, y se registró una separación máxima de 10 mm en la columna.

Las oquedades y discontinuidades más profundas se inspeccionaron con un endoscopio flexible de visión frontal con lente de 7 mm y de 2 m de longitud, conectado a smartphone con sistema Android para el registro de datos. En el interior de las perforaciones de la pared sur se registraron materiales tanto orgánicos como inorgánicos propios de un medio extremo como el desértico [Figura 9]. Se capturaron restos de fauna ovípara, fibras y cáscaras de semillas.

En el barrido de la grieta longitudinal superior del frontispicio del templo se estimó que su profundidad podría superar la distancia que cubre el capitel. En el interior se confirmó la descamación de los labios y cavidad, así como la aparición de grietas, fisuras y microfisuras. En ningún caso pudo observarse el fondo de la grieta, lo que indica que su profundidad podría superar los límites de la inspección y constituir un punto crítico para la estabilidad.

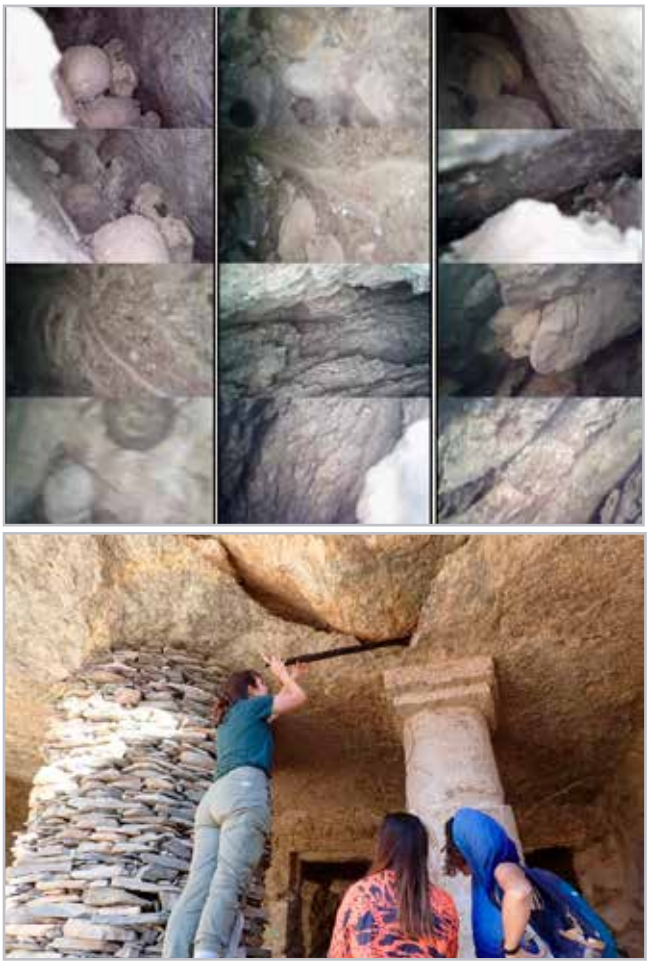


Figura 9.- Inspección endoscópica y capturas de los barridos. Izquierda y centro: capturas del barrido endoscópico en la pared sur donde se identificaron depósitos orgánicos (huevos y semillas) y capturas de la descamación interna de la discontinuidad del techo, respectivamente. Derecha: inspección de la discontinuidad del techo (donde se presume el desprendimiento parcial del mismo) mediante endoscopio flexible.

- Método cualitativo simple de control de la dinámica de las lesiones

En 2022 se procedió a la colocación de 9 testigos de yeso natural, de la empresa egipcia Gipsina (Osman Group), en el interior del templo para determinar la dinámica (activa o pasiva) del movimiento de las fracturas (geológicas y mecánicas indistintamente) en un lapso temporal de dos años. En 2024 se comprobó que 2 de ellos habían desaparecido (1LAS y 3LLS) y otros 2 (1LLS y 2LC) estaban ligeramente separados del soporte por la parte inferior [Figura 10]. De igual forma se inspeccionaron las consolidaciones realizadas con mortero de 2008 de la columna y pilastra sur [Figura 5] y se detectó la formación de una junta fría entre materiales (fisuraciones), signo de un posible movimiento. El mismo año se dispusieron 12 nuevos testigos de yeso con la finalidad de verificar, en la siguiente campaña, si los desprendimientos se deben a auténticos desplazamientos estructurales y no son debidos a las limitaciones de la técnica de testeado ni a las acciones antrópicas.

Resultados y discusión

— Estudio geométrico formal y análisis estructural mediante estimación de acciones

El presente análisis constituye un estudio y cálculo teórico de carácter arquitectónico, basado en la geometría y proporciones del templo, y en estimaciones de cargas estructurales derivadas de la tipología constructiva y del estado de conservación descrito anteriormente. Este enfoque permite predecir el comportamiento estructural del templo y proporciona un marco de referencia para comparar posteriormente los datos empíricos obtenidos mediante ensayos y el análisis de estabilidad geomecánico. No se aplican los Eurocódigos, dado que no están diseñados para arquitecturas excavadas en roca foliada. En su lugar, y pese a seguir las UNE, se adopta un cálculo teórico adaptado a la construcción histórica.

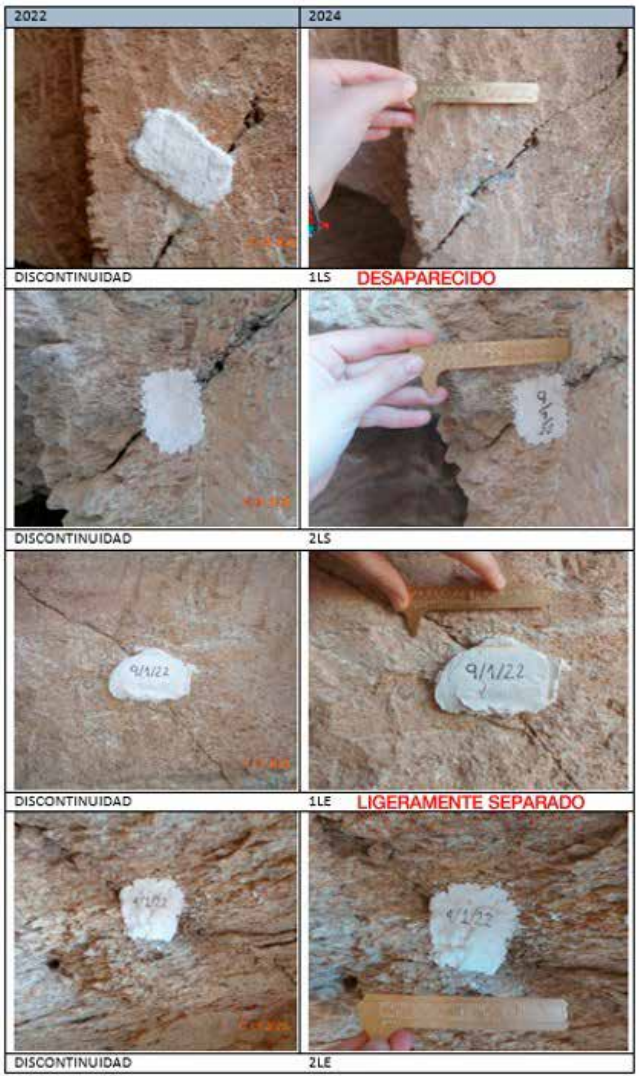




Figura 10.- Colocación y registro de los testigos de yeso. Izquierda: registro fotográfico de los 4 testigos de yeso alterados o desprendidos. La nomenclatura hace referencia a su situación (véase Figura 07), la primera L corresponde al nombre: AS Anta sur, LS Lateral sur y LC Large columna. Derecha: colocación de testigos en el anta sur. Pese a reconocer su baja fiabilidad debido por su higroscopicidad y su vulnerabilidad a los saltos térmicos, se estimó su empleo como primera aproximación para determinar la actividad del macizo.

El *Large Temple* presenta una euritmia arquitectónica simplista (Choisy 1900) y posee una estructura que difiere de otras construcciones excavadas e hipóstilas (Giedion 1981: 332-377). En el primer caso es habitual encontrar interiores abovedados y arcos torales cuyo comportamiento estructural favorece la distribución de las cargas, el contrarresto de los empujes y permite cubrir luces superiores. En el segundo caso predominan luces pequeñas, naves axiales equidistantes salvadas por dinteles o arquitrabes, que reducen la altura libre entre columnas robustas. El estudio empírico nos indica que el *Large Temple* se encuentra en un estadio intermedio ya que dispone de luces generosas (pero desiguales) para columnas esbeltas en relación al macizo encajante.

Si a ello le sumamos la pérdida del pilar sur de la última crujía y de la columna norte de la primera, se reduce el número de apoyos (asimétricos) y se descompensa el

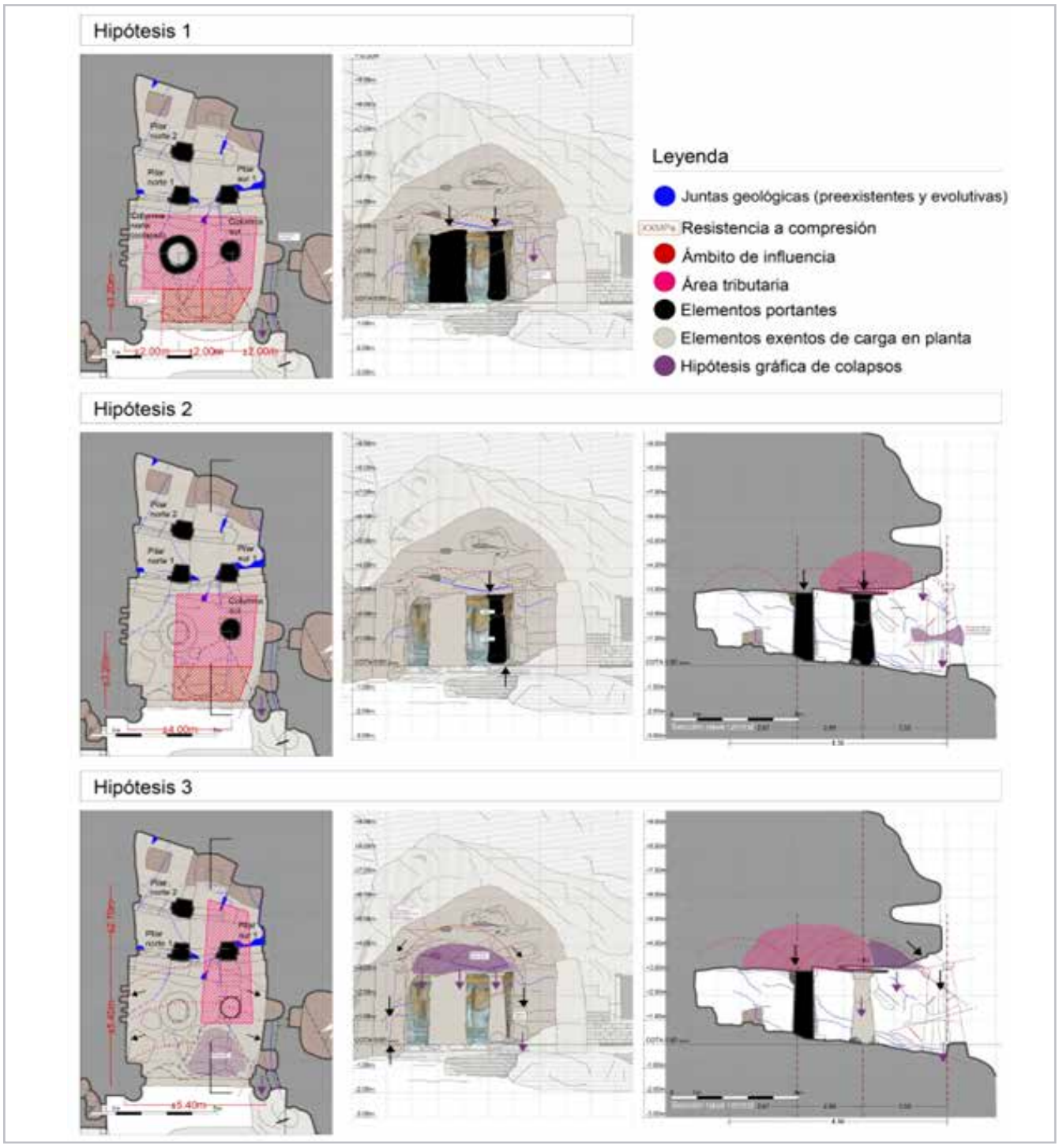


Figura 11.- Resumen de las tres hipótesis del estado de cargas. En la hipótesis 1 se considera que encamisado y pilar sur soportan cargas, pero el cálculo demuestra que el encamisado no llega a transmitir carga y por lo tanto no contribuye. En la hipótesis 2 se asume que en encamisado no funciona y solo actúa la columna sur, y en este caso la tensión calculada sí cumple. En la hipótesis 3 se considera que la columna sur no carga por estar hipotéticamente desvinculada del techo.

descenso de cargas. Cabe destacar que el anta de la pared sur no dispone de machón como la norte, reduciendo su ámbito de contribución a la estructura.

El análisis se centra en las dos primeras crujías dado que presenta un voladizo en el umbral, luces de mayor dimensión y la columna de sección circular que preserva muestra una grieta a cortante. Se realiza una comprobación de la capacidad portante por descenso de cargas (posterior al colapso de la columna norte) teniendo en cuenta tres hipótesis que van de la más favorable a la menos; Estado de cargas 1: Encamisado norte y columna sur están en carga; Estado de cargas 2: Solo la columna sur es portante; Estado de cargas 3: Encamisado y columna son autoportantes y el pilar sur asume la carga.

Pese a los datos obtenidos con el esclerómetro, cabe señalar su limitación al no registrar valores inferiores a 5 MPa [Tabla 2]. Por este motivo, y con objeto de analizar la situación más desfavorable, se procederá a definir la resistencia de cálculo mediante el CTE-DB-SE-C apoyado por la NBE-AE-88 y el CTE-DB-SE-AE y F apoyados por el P.I.E.T 70 (prescripciones del Instituto Eduardo Torroja).

En primer lugar, se asigna a las rocas presentes en el templo un equivalente constructivo convencional, tomando como referencia valores normalizados de resistencia a compresión según la clase de piedra [Tabla P.I.E.T. 70]. Así, las rocas metamórficas del lugar, como la cuarcita, el esquisto (esquisto de arenisca, grauvaca o piedra Bekhen), el esquisto cuarcítico, la pizarra y el calcesquisto, se corresponden respectivamente con las rocas sedimentarias areniscas, arcilla, arenisca arcillosa, *shale* y la carcilla calcárea (magra). Los datos de referencia (R normalizada) no consideran ni el origen monolítico de la estructura ni su evolución altamente estratificada [Tabla 3]. Por ello, se toma el valor de la sillería de arenisca cuarzosa labrada, 3,9 MPa, al que se aplica un coeficiente parcial se seguridad [Tabla 4.8 CTE-DB-SE-F] para una categoría de ejecución paupérrima γ_M=2,7 reduciéndose a 1,45 MPa.

Para determinar el estado de cargas, se estiman una serie de acciones variables que solicitan la estructura como sobrecargas de desprendimientos, empujes del terreno, acciones sísmicas, acciones del viento, acciones térmicas y reológicas multiplicadas por un coeficiente de seguridad de 1,5. Y de igual forma se tiene en cuenta las concargas o cargas permanentes mayoradas por 1,35 [Tabla 4.1 CTE-DB-SE-C]. En cuanto a la densidad del esquito se tom 2.700 kg/m3 según Antonucci, A. *et al.* (2007).

Para la hipótesis 1 se obtienen tensiones de 1,55 y 0,88 MPa en encamisado (minorado un 30% por vacío o discontinuidad en su interior) y columna sur respectivamente; para la hipótesis 2 la tensión en la columna sur es de 1,34 MPa y para la hipótesis 3, se obtiene una tensión de 1,94 MPa [Tabla 5].

Finalmente, los resultados se contrastan de forma orientativa con la presión admisible del terreno de cimentación- según un criterio de rocas- a efectos orientativos. A partir de la Tabla 8.1 de la AE-88 y la de Tabla D.25 del Anejo D del DB-SE-C, se obtiene que para un suelo de rocas estratificadas y esquistos la presión admisible se sitúa entre 1,9 MPa y 3 MPa. Las tensiones calculadas para las tres hipótesis se encuentran dentro de este rango, por lo que puede descartarse el asentamiento del terreno como mecanismo dominante. No obstante, en la hipótesis 1 el encamisado alcanza 2,06 MPa y en la hipótesis 3 el pilar sur llega a los 1,94 MPa, valores muy próximos al límite inferior, lo que confirma el precario equilibrio del conjunto frente a cualquier solicitación externa.

De los resultados [Tabla 5] se deduce que la hipótesis 1 es coherente con la hipótesis 2, que igualmente muestra una resistencia próxima al límite de cálculo. A partir de estas observaciones se plantea una cuarta hipótesis de estado de cargas relacionada con la posible discontinuidad horizontal que separa el macizo superior de la laja inferior del techo y que parece discurrir sobre

Clase de piedra	R. piedra (kp/cm²)	Sillería			Mampostería		
		A hueso, asientos labrados (kp/cm²)	Sillares h≥30cm, mortero M-80 (kp/cm²)	Sillares h<30cm, mortero M-40 (kp/cm²)	Escuadrada y mortero tipo mínimo M-40 (kp/cm²)	Escuadrada con mortero tipo mínimo M-5 (kp/cm²)	En seco (kp/cm²)
Granito Sienita Basalto	≥1.000	80	60	40	25	10	7
Arenisca cuarzo Caliza dura Mármol	≥300	40	30	20	12	8	6
Arenisca caliza Caliza blanda	≥100	20	15	10	8	6	5

Tabla 3.- Resistencia a compresión de cálculo según la clase de fábrica del P.I.E.T 70.

Hipótesis 1	**CP kg/m²**	**coef**	**CV kg/m²**	**coef**	**Σ cargas kg/m²**	**Luz min (m)**	**Total kg/m**
Macizo superior	10449	1,35	10449	1,5	29779,65	2,28	67898
Hipótesis 1 pesos	**H (m)**	**e1 (m)**	**e2 (m)**	**δ (kg/m3)**	**coef**	**Peso kg/m**	
Encamisado y Columna	3	0,80	0,90	2700	1,35	7873,2	
Resultados Hipótesis 1							
Tensión del encamisado		Σ cargas kg/m	Base (cm²)	Total kg/cm²	Total MPa	NO CUMPLE	
		75771	3600	21,05	2,06		
Tensión de la columna		Σ cargas kg/m	Base (cm²)	Total kg/cm²	Total MPa	CUMPLE	
		64455	7200,00	8,95	0,88		

Hipótesis 2	**CP kg/m²**	**coef**	**CV kg/m²**	**coef**	**Σ cargas kg/m²**	**Luz min (m)**	**Total kg/m**
Macizo superior	10449	1,35	10449	1,5	29779,65	3,03	90232
Hipótesis 2 peso	H (m)	e1 (m)	e2 (m)	δ (kg/m3)	coef	Peso kg/m	
Columna sur	3	0,80	0,90	2700	1,35	7873,2	
Resultados Hipótesis 2							
Tensión de la columna		Σ cargas kg/m	Base (cm²)	Total kg/cm²	Total MPa	CUMPLE	
		98106	7200,00	13,63	1,34		

Hipótesis 3	**CP kg/m²**	**coef**	**CV kg/m²**	**coef**	**Σ cargas kg/m²**	**Luz min (m)**	**Total kg/m**
Macizo superior	14067,0	1,35	14067	1,5	40090,95	1,99	79781
Hipótesis 3 peso	**H (m)**	**e1 (m)**	**e2 (m)**	**δ (kg/m3)**	**coef**	**Peso kg/m**	
Pilar sur	2,3	0,70	0,60	2700	1,35	3536,379	
Resultados Hipótesis 3							
Tensión del pilar		Σ cargas kg/m	Base (cm²)	Total kg/cm²	Total Mpa	NO CUMPLE	
		83317	4200,00	19,84	1,94		

Tabla 4.- Descenso de cargas. Tensiones calculadas para las tres hipótesis consideradas, incluyendo cargas permanentes y variables con sus coeficientes parciales. Las tensiones se muestran en kg/cm² y MPa, y la verificación indica si superan la presión admisible del macizo rocoso. Los resultados reflejan un equilibrio precario del encamisado y del pilar.

el capitel sur [Figura 11]. En tal caso, encamisado y pilar sur estarían asumiendo las cargas de una columna sur parcialmente desvinculada del techo, lo que podría explicar el desprendimiento observado en ese sector, al no poder absorber dichas solicitaciones. Este precario equilibro deberá contrastarse en futuras campañas, ampliando el alcance de los registros actuales. Para ello se propone comprobar la contribución del pilar sur mediante esclerómetro, analizar la separación de la columna sur (laja inferior) mediante endoscopio con mayor rango de penetración, y verificar el retacado en todo el perímetro e interior del encamisado, mediante cala y endoscopio.

Con los valores de resistencia y coeficientes de seguridad establecidos, se analiza a continuación la estabilidad de

Hipótesis	**Elemento analizado**	**Luz (m)**	**Carga total (kg/m)**	**Tensión (MPa)**	**Verificación**
H1	Encamisado	2,28	75,77	2,06	No cumple
	Columna sur	2,28	64,46	0,88	Cumple
H2	Columna sur	3,03	98,11	1,34	Cumple
H3	Pilar sur	1,99	83,32	1,94	No cumple

Tabla 5.- Resumen de los resultados obtenidos para las tres hipótesis principales.

las columnas mediante métodos empíricos de macizos rocosos, adaptando criterios de túneles y minas al contexto del templo.

— Análisis de estabilidad de obras subterráneas mediante métodos empíricos

La estabilidad de los espacios subterráneos puede evaluarse inicialmente mediante las denominadas clasificaciones geomecánicas de macizos rocosos. Los índices geomecánicos RMR y Q provienen de la metodología de análisis de estabilidad de obras subterráneas, principalmente túneles y minas. Definen el vano máximo y necesidades de sostenimiento en función de la calidad de la roca, índices que dependen de una serie de propiedades consensuadas desde os años 1970 como rugosidad de las juntas, espaciado, resistencia de la matriz etc.

El índice Q (Barton *et al.* 1974) y la clasificación del macizo rocoso RMR (Bieniawski 1973) son los más utilizados. El índice Q, desarrollado en el Instituto Geotécnico Noruego en 1974, asigna una puntuación a cada dominio del macizo rocoso y aumenta su valor con la calidad del macizo rocoso. El índice Q se puede obtener de la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{RQD}{Jn} \times \frac{Jr}{Ja} \; x \frac{Jw}{SRF}$$

Dada la singularidad del templo, se va a proceder a estudiar la estabilidad de las columnas mediante un símil con metodologías empíricas de cámaras y pilares de mina, en concreto la metodología propuesta por Lunder y Pakalnis (1997) y aplicada entre otros por Muñoz (2009). Se trata de un gráfico empírico que relaciona el grado de estabilidad de pilares y su factor de seguridad con la ratio tensión/resistencia y esbeltez del pilar (altura / ancho).

Para el cálculo de la tensión que reciben los pilares se aplica la formula del área atribuida para pilares aislados:

$$\sigma p = \gamma * z * \left(1 + \frac{Wo}{Wp}\right)^2$$

Donde, el peso específico es γ, z es la profundidad y Wo es el vano de la cámara entre pilares y Wp es el ancho del pilar (diámetro).

A diferencia del estudio arquitectónico-estructural, se tomarán las medidas más favorables de resistencia a compresión del templo [Tabla 2] con una máxima de 8 MPa en las paredes, 10 MPa en la columna erguida, e inferior a 5 MPa en los fragmentos de la columna caída. De forma resumida, el vano (en inglés span) entre columnas varía entre 1,05 y 2,54 m con un máximo en el umbral o portal de 3 m.

Con estos datos se cumplimenta el conjunto de parámetros del RMR y se obtiene una puntuación de 57 que equivale a una clase III, es decir, una roca tipificada como media y que requiere de refuerzo (estructura vertical) al no soportar la ejecución de vanos amplios.

Parámetro		Valor	Puntuación
Resistencia a compresión uniaxial		5 – 8 MPa	2
Rock Quality Designation RQD%		90%	17
Espaciado de juntas (promedio)		50 cm	10
Condición de juntas	Continuidad	Mas de 20 m	0
	Apertura	<0,1 mm	5
	Rugosidad	Ondulada suave	1
	Meteorización	II	5
	Relleno	Talco (blando) < 5 mm	2
Presencia agua en juntas		Seco	15
RMR básico 89			57
			Clase III

Tabla 6.- Determinación del *Rock Mass Rating del Large Temple*.

A continuación, se procede al análisis empírico de la estabilidad del templo excavado, según el índice Q.

Parámetro	Valor	Puntuación
Rock Quality Designation	90%	90
Join number Jn	3 joints sets + random (x entrance factor)	12x2
Joint roughness Jr	Ondulated and lisa	2
Joint alteration Ja	Filled with soft material (talc)	4
Water reduction factor in joints Jw	dry	1
Stress Reduction Factor SRF	Shallow excavation, low tension and some parts where span wider that depth	2,5 - 5

Tabla 7.- Determinación del índice de calidad de roca Q.

$$Q = \frac{RQD}{Jn} \times \frac{Jr}{Ja} \; x \frac{Jw}{SRF} = \frac{90}{2} \; x \frac{2}{4} \; x \frac{1}{2,5(5)} = 0,75 \; (min.\; 0,375 \; at entrance)$$

El vano entre columnas o ancho de excavación se aumenta o escala mediante un factor o coeficiente de seguridad llamado ESR, que en este caso asumimos un valor de 0,8 para espacios de acceso público.

Se han tomado las hipótesis descritas en el apartado anterior [Figura 11] y se han analizado según el índice Q.

Para la hipótesis 1 se han medido anchos variables entre columnas de 1-1,9 metros y en el voladizo de 2,56 m. Estos vanos se dividen por el ESR resultando: Máximo entre columnas *Span* /ESR = 1,9 / 0,8 = 2,4 m; Voladizo: 2,56/ESR = 3,3 m.

Para la hipótesis 2 se toma la distancia entre la columna sur y el paramento norte obteniendo 4,12 / ESR= 5,2 m.

Y finalmente, para la hipótesis 3, donde se considera que las columnas de la primera crujía no están trabajando, asumimos un vano máximo del templo de 5,9 m / ESR = 5,9/0,8= 7,4 m.

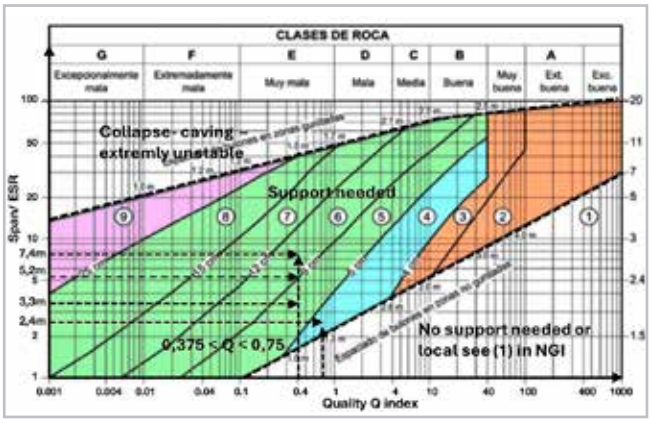


Figura 12.- Análisis empírico de estabilidad de los vanos del *Large Temple*. Fuente gráfico base: Laboratorio Oficial Madariaga, 2015.

La conclusión inmediata del grafico superior [Figura 12] es que ninguno de los vanos ajustados mediante ESR se encuentra en la zona 1, correspondiente a huecos estables sin sostenimiento. Por tanto, todos los vanos requieren la presencia de la estructura vertical que los sostiene y, en algunos casos, de un puntal intermedio, lo que descarta la estabilidad autónoma de las hipótesis consideradas. Asimismo, el análisis evidencia la necesidad de reforzar el voladizo o umbral, que constituye el punto más crítico del conjunto.

La Tabla 8 muestra los resultados de los cálculos previos para los parámetros de entrada en la Figura 13. En la Figura inferior en el eje de ordenadas se emplaza el cociente entre la tensión en el pilar, cuya fórmula de cálculo se ha descrito y los resultados de la columna sigma P y de la resistencia de la roca a compresión de la Tabla 9. En el eje de ordenadas se sitúa el cociente de esbeltez, es decir altura dividida por el ancho del pilar.

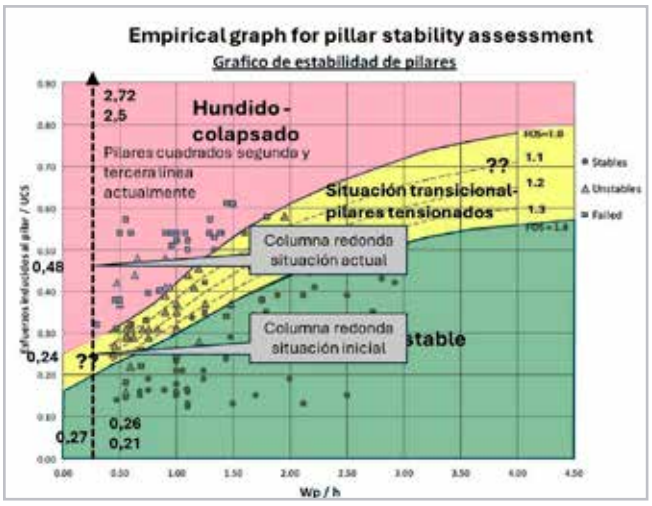


Figura 13.- Análisis empírico de los pilares y vanos del *Large Temple* según la metodología de Lunder y Pakalnis (1997) y Muñoz (2009).

La Figura 13 muestra el grado de estabilidad de los pilares relacionándolos con su altura/ancho y la carga sobre ellos que depende de la profundidad y vanos máximos. Se ha considerado la resistencia promedio de las columnas. En lo que respecta a la columna cizallada, su situación ya era precaria en el momento de su construcción, con un factor de seguridad rozando estrictamente la unidad, que implica equilibrio estricto. Datos que coindicen con los obtenidos en el descenso de cargas [Tabla 5].

— Discusión y prediagnosis

La comparativa entre el análisis geomecánico y arquitectónico ha permitido corroborar la correspondencia entre las resistencias obtenidas con esclerómetro y el estado patológico de los elementos arquitectónicos, siendo la pared sur la más dañada y vulnerable. Los fragmentos del colapso de la columna norte confirman que se trataba del elemento más débil del conjunto, y la diferencia de resistencias registrada en la columna sur, surcada de vetas, explicaría su predisposición al deslizamiento de la parte superior ante un acción externa o embate.

Elemento	Wo max (m)	Wp min (m)	Z (m)	H (m)	Wp/H	σp MPa	UCS (min) MPa	σp/UCS
Pilar exento última crujía	3,3 m	0,52 m	9 m	2 m	0,26	13,6	5	2,72
Pilares cuadrados segunda crujía	2,54	0,42	9 m	2 m	0,21	12,5	5	2,5
Columnas antes del fallo (inicial)	1,9	0,85	4 m	3,15 m	0,27	1,2	5	0,24
Columnas (actual)	3,10	0,85	4 m	3,15 m	0,27	2,4	5	0,48

Tabla 8.- Aplicación de los criterios de estabilidad de pilares.

La coexistencia de daños mecánicos y diaclasas de gran magnitud, junto al desprendimiento parcial del techo del templo, lleva a considerarlos manifestaciones consecutivas de una causa compartida y de carácter global en relación a la tipología arquitectónica y la roca foliada donde se halla. El estudio de las crujías muestra luces (vanos) y vuelos variables que podrían tener relación con el agotamiento de los niveles y/o con un predimensionado de mínimos optimista. En este sentido, podría hablarse de una causa endémica (arquitectónica) e intrínseca (geológica), que justificaría que el templo se encuentre inconcluso (altar de la capilla sur), tal y como ocurre en ciertos hipogeos de *Qubbet el-Hawa* (Martínez *et al.* 2024) o en la tumba tebana de *Senenmut* (TT353), donde la excavación fue interrumpida o alterada como respuesta a la calidad y discontinuidades del macizo (Soliman 2015).

Los resultados obtenidos se alinean con los protocolos de seguridad de la normativa vigente; sin embargo, se advierte que el carácter restrictivo de tales métodos requiere una lectura crítica cuando se aplican a estructuras históricas. Este análisis actúa, por tanto, como un puente necesario entre la exigencia reglamentaria y la singularidad de un templo ya debilitado por procesos patológicos.

Del estudio de juntas y lesiones [Figura 5 y 7] se determinan dos focos de aceleración de la degradación. El primero se localiza en el extremo interior de la cavidad inacabada (capilla sur), donde los pilares de las dos últimas crujías aparecen seccionados en cuñas por el cruce de fracturas. Puede que alguna de estas cuñas tarde cierto tiempo en desprenderse, "esperando" la degradación progresiva de la roca que alterase algún puente de roca entre juntas.

El segundo foco se localiza en el umbral, debido a la ausencia de las dos columnas de la fachada y a la gran luz que cubre el vano. Estas columnas podrían haber colapsado en primer lugar. A continuación, la acomodación del macizo habría provocado el fallo del anta sur (pared sur perforada), lo que precipitaría el desplazamiento del macizo superior (articulación en intradós de bóveda por fallo de estribo sur) y el consiguiente desplazamiento de las columnas interiores. Finalmente, debido a la descompresión de la zona de borde (sector en voladizo), se habría producido el desprendimiento del techo, entendido como precipitación del sector traccionado. La cronología de los eventos sugiere que el foco 2 se originó primero y desencadenó el posterior desprendimiento de la cuña del pilar sur. Dado que este se ubica en la capilla sur inacabada (cuyo altar no llegó a labrarse), indicaría que todo el proceso traumático probablemente se desarrolló durante la construcción en un lapso de tiempo relativamente breve. La ausencia de restos del pilar sur sugiere el intento de desescombrar y reutilizar el templo, hasta que finalmente se desplomó la columna interior norte, de la que sí se conservan fragmentos in situ que confirman el abandono definitivo.

Otra posibilidad es que ambos focos se originasen simultáneamente. Sin embargo, la dificultad de observación de los fragmentos y restos de la columna norte, junto con la dirección del corte observado en fotografías históricas (Oller 2021), nos condiciona a mantener los focos separados. De confirmarse el origen común en futuras campañas, significaría que el pilar sur de la última crujía se deslizó (a comprobar) por la discontinuidad tridimensional que discurre por el suelo y la pared sur de las últimas crujías (diaclasa), provocando la pérdida de parte del fuste por desprendimiento de una cuña, tanto en el pilar sur como en la columna circular norte. Al desaparecer este último apoyo, y siendo el vano de gran luz, la columna restante pudo sufrir un aumento de tensiones y desplazarse también a favor de juntas preexistentes. Esto desencadenaría el desprendimiento del techo al quedar sin apoyo norte.

En cualquier caso, la imposibilidad de registrar el fondo de las discontinuidades, sumada a la apertura métrica de las grietas, sugiere que el macizo ha superado su comportamiento monolítico original para articularse en un sistema de macrobloques independientes (Sani *et al.* 2012). Por lo tanto, el estado de conservación estructural presenta un grado elevado de precariedad como resultado de la acumulación histórica de daños, y los recursos mecánicos del templo están en el límite de su capacidad portante.

Conclusiones preliminares y líneas futuras

Las conclusiones preliminares de la discusión confirman una correlación directa entre las bajas resistencias obtenidas con el esclerómetro y el avanzado estado patológico del templo foliado, identificando la pared sur, la columna sur y el umbral como los elementos de mayor vulnerabilidad. Se determina que el templo presenta una inestabilidad de carácter endémico (arquitectónico, diseño de mínimos) e intrínseco (geológico), lo que justificaría su estado inacabado. No obstante, el templo permanece en pie gracias a la contribución de la segunda línea de pilares y al soporte del macizo rocoso.

La prediagnosis identifica dos focos críticos de degradación: un seccionamiento por cuñas en el interior de la cavidad y un fallo estructural en el umbral. La secuencia de colapso propuesta sugiere que el fallo del estribo sur provocó el desplazamiento del macizo superior y el posterior colapso de las columnas y el techo.

Actualmente siguen los estudios de verificación de las hipótesis sobre la funcionalidad estructural del templo y el desarrollo cronológico de las lesiones.

Entre las líneas futuras destacan la caracterización minero-petrográficos mediante ensayos de laboratorio, las propiedades higrotérmicas de la roca junto a la monitorización microclimática, el análisis estructural del estado actual mediante elementos finitos (FEA), la comparativa de la dinámica del movimiento mediante métodos cuantitativos de lectura discontinua (pie de rey) y la lectura simple de fisurómetros más precisos y de metacrilato (testigos bidimensionales de alta precisión) para cuantificar

la cinemática de las fracturas y el grado de afectación, completar el modelo tridimensional y realizar dos nuevas estaciones geomecánicas, entre otras.

Por último, destacar que todos los estudios e intervenciones mencionadas son posibles gracias a la formación de un equipo multidisciplinar compuesto por conservadoras-restauradoras, arquitectas, ingenieras de minas y arqueólogas. El trabajo sinérgico entre todas las disciplinas hace posible afrontar retos tan complejos como la estabilización y recuperación de este excepcional templo.

Notas

[1] EGUILUZ, D., MOLINA, A., BURGAYA, B. & MARTÍN, E. (2024). "Preserving the local, to become global. Six years of conservation interventions in Wadi Sikait". Conference poster. En Red Sea Conference XI, Barcelona: Universidad Autónoma de Barcelona.

[2] MOLINA, A. (2020). Estudio del Estado de Conservación del Large Temple de Sikait (Egipto). Proyecto Final de Máster, [Inédito]. Sevilla: Universidad Pablo de Olavide.

Referencias

ABD EL-WAHED, M., KAMH, S., ASHMAWY, M. & SHEBL, A. (2019). "Transpressive Structures in the Ghadir Shear Belt, Eastern Desert, Egypt: Evidence for Partitioning of Oblique Convergence in the Arabian-Nubian Shield during Gondwana Agglutination". En *Acta Geologica Sinica -English Edition*, 93, 6: 1614-1646.

ABDEL-FATTAH, M., KANTOUSH,S. & SUMI, T. (2015). "Integrated Management of Flash Flood in Wadi System of Egypt: Disaster Prevention and Water Harvesting". En *Annu. Disas. Prev. Res. Inst*., Kyoto Univ, 58, B: 485-496.

ANTONUCCI, A., ANTONUCCI, R. & MICOZZI, M. (2007). *La pratica del restauro degli edifici a struttura muraria*. Napoli: Sistemi editoriali.

BADAWY A., HEGAZI, M., GABER, H. & KORRAT, I. (2017). "Crustal structure of northern Egypt from joint inversion of receiver functions and surface wave dispersion velocities". En *Journal of Seismology,* 22: 697–719.

BARTON, N., LIEN, R. AND LUNDE, J. (1974). "Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support". En *Rock Mechanics*, 6: 189-236

BENRABAH A, SENENT DOMÍNGUEZ S, COLLADO GIRALDO H, CHAVES RODRÍGUEZ C, JORDA BORDEHORE L.(2024). "Stability Assessment of the Maltravieso Cave (Caceres, Spain) Through Engineering Rock Mass Classification, Empirical, Numerical and Remote Techniques". En *Remote Sensing*; 16(20): 3883. https://doi.org/10.3390/rs16203883

BIENIAWSKI, Z.T. (1973). "Engineering Classification of Jointed Rock Masses". En *Transaction of the South African Institution of Civil Engineers*, 15: 335-344.

EPPES, C. M., MCFADDEN, LD., WEGMANN, K., SCUDERI, L. (2010). "Cracks in desert pavement rocks: Further insights into mechanical weathering by directional insolation". En *Geomorphology*, 123 (1-2): 97-108. https://10.1016/j.geomorph.2010.07.003

GARDNER WILKINSON, J. (1853). *Los Egipcios su vida y costumbres* (vol II). Madrid.: Edimat Libros S.A.

GIEDION, S. (1981). *El presente eterno: Los comienzos de la arquitectura*. Madrid: Alianza Forma.

GONZÀLEZ, A. (1999). *La restauración objetiva (Método SCCM de restauración monumental), 1993-1998*. Barcelona: Ediciones de la Diputació de Barcelona.

HARRELL, J.A. (2004). "Archaeological geology of the world's first emerald mine". En *Geoscience Canada*, 31, 2: 69-76.

HARRELL, J.A. (2006). "Archaeological geology of Wadi Sikait". En *PalArch's Journal of Archaeology of Egypt/Egyptology,* 4, 1: 01-12.

HARRELL, J. A. & STOREMYR, P. (2013). "Limestone and sandstone quarrying in Ancient Egypt: tools, methods and analogues". En *Marmora – an Int. J.Archaeol. Hist. Archaeom. marbles stones*, 9: 19-43.

HARRELL, J. A. (2016). "Archaeological geology of Wadi Sikait". En *PalArch's J. Archaeol. Egypt/Egyptology*, 4: 1-12.

IBRAHIM, M. E., SALEH, G. M. & IBRAHIM, W. S. (2010). "Low grade metamorphosed sandstone-type uranium deposit, Wadi Sikait, South Eastern Desert, Egypt". En Journal of Geology and Mining Research, 2(6): 129-141.

JORDÁ BORDEHORE, L., ROBERTO TOMÁS J., MANUEL ARLANDI RODRÍGUEZ Y ANTONIO ABELLÁN FERNÁNDEZ (2016). *Manual de estaciones geomecánicas. Descripción de macizos rocosos en afloramientos*. Madrid: Entorno gráfico.

LABORATORIO OFICIAL MADARIAGA (COORD.) (2015). "Guía sobre control geotécnico en minería subterránea", Convenio de colaboración entre la Secretaría de Estado de Energía del Ministerio de Industria, Energía y Turismo y la Universidad Politécnica de Madrid. Laboratorio Oficial Madariaga (LOM). https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/energia/files-1/mineria/Seguridad/Guias/Gu%C3%ADas/Guia-control-geotecnico-mineria-subterranea.pdf [consulta: 31/1/2025].

LABORDE MARQUEZE, A. (COORD.) (2013). *Proyecto COREMANS: criterios de intervención en materiales pétreos*. Madrid: Ministerio de Educación, Cultura y Deporte.

LEPSIUS, K. R. (1849-1858). Denkmäler aus Äegypten und Äethiopien. Berlín: Nicolaische Buchhanlung. Berlín : Nicolaische.

LISCI C. & SITZIA, F. (2021). *Degrado, danni e difetti delle pietre naturali e dei laterizi.* Santarcangelo de Romagna: Maggioli Editore.

LUNDER, P.J. AND PAKALNIS, R. (1997). "Determination of the strength of hard rock mine pillars". En B*ulletin of the Canadian Institute of Mining and Metallurgy*, 68: 55–67.

LUTTON, R. J. (1977). *Design and Construction of Compacted Shale Embankments: Vol. 3. Slaking Indexes for Design. Report No. FHWA-RD-77-1*. Washington, D.C.: Federal Highway Administration (FHWA), Offices of Research and Development.

MARTÍNEZ HERMOSO, J. A., GARCÍA MELLADO, I., & SÁNCHEZ GÓMEZ, M. (2024). "Increase in the geotechnical heritage of rock cut-tomb builders between the Old and Middle Kingdom (Qubbet el-Hawa Necropolis, Aswan)". En *Boletín Geológico y Minero,* 135(1): 59–78. https://doi.org/10.21701/bolgeomin/135.1/004

MUÑOZ, E. (2009). "Levantamiento geotécnico y recomendaciones al diseño proyecto mina Rulita", en internet. https://www.academia.edu/34498193/INFORME_MINA_RULITA_Copy [consulta: 3/8/2024].

NAIME, W., GARCÍA, R. (2023). "The rock mass and the development of joints during the tunnel excavation". En *IOP Conf. Ser.: Earth Environmental Science, Rock and Fracture Mechanics in Rock Engineering and Mining* 1124: 012058. Helsinki, Finland. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1124/1/012058

OLLER GUZMÁN, J., FERNÁNDEZ ABELLA, D., TREVÍN PITA, V., ACHÓN CASAS, O. (2019). "La explotación de esmeraldas en el Egipto romano. Primeros resultados del Sikait Project". En *Trabajos de Egiptología*, 10: 283-303.

OLLER, J. (2021). "La «Pompeya del desierto». 200 años del redescubrimiento del Mons Smaragdus por Frédéric Cailliaud". En *Athenaeum*, 109/2: 555-596.

OLLER GUZMÁN, J., FERNÁNDEZ ABELLA, D., TREVÍN PITA, V., ACHÓN CASAS, O., GARCÍA-DILS, S. (2021). "New evidence regarding Emerald Production in Roman Egypt at Wadi Sikait (Eastern Desert)". En *Journal of Near Eastern Studies*, 80 (1): 123.

OLLER GUZMÁN, J. & GARCÍA-DILS DE LA VEGA, S. (2023). "De esmeraldas, legiones y nómadas: últimos resultados del Sikait Project". En *DOSSIER Rihao*, 24: 143-159.

OLLER GUZMÁN, J., GARCÍA-DILS DE LA VEGA, S., FERNÁNDEZ ABELLA, D., OZCOZ BENITO, P., OLEKSIAK, J., EGUILUZ MAESTRO, D., MOLINA PÉREZ, A., BURGAYA MARTÍNEZ, B., SAGRISTÀ MALLOL, L., SALVIA VIDAL, S., CARRASCO LÓPEZ, JM. (2024). "The 2023 Archaeological Season in the Emerald Mines of Wadi Sikait: Excavation in Sikait, Documentation of the Mining Regions, and Survey of the Wadi el Gemal National Park". En THETIS, 28: 17-303.

PRISSE D'AVENNES, E. (1868-1877). Histoire de l'art égyptien d'après les monuments depuis les temps les plus reculés jusqu'à la domination romaine, atlas. Paris: Gallica. https://doi.org/10.11588/diglit.3741

SANI, F., MORATTI, G., COLI, M., LAUREANO, P., ROVERO, L., TONIETTI, U., COLI, N. (2012). "Integrated geological-architectural pilot study of the Biet Gabriel-Rufael rock hewn church in Lalibela, northern Ethiopia". En *Italian Journal of Geosciences*, 131(2): 171-186. https://doi.org/10.3301/IJG.2011.26

SANTI, P.M. (1998). "Improving the Jar Slake, Slake Index, and Slake Durability Tests for Shales". En E*nvironmental & Engineering Geoscience*, IV(3): 385-396.

SIKAIT PROJECT (2024). "El Proyecto", en la página oficial. https://sikaitproject.wordpress.com/

SOLIMAN, R. (2015). "Courtiers with dual tombs". En *Egyptian Journal of Archaeological and Restoration Studies*, 5(2): 123-138.

VERGÈS-BELMIN, V. (ED.) (2010). Glosario ilustrado de formas de deterioro de la Piedra. Madrid: ICOMOS-ISCS. https://openarchive.icomos.org/id/eprint/2089/1/spanish_glossary.pdf

WONG JIA MANG & ABDUL GHANI MD RAFEK (2018). "Durability characterisation of weathered sedimentary rocks using slake durability index and jar slake test". En Bulletin of the Geological Society of Malaysia, 66: 81 – 88.

ZHANG, J-C., PEI, S., LI, H-R. (2021). "Insights into Unloading Relaxation Mechanism of Columnar Jointed Basalt at the Baihetan Left Dam Foundation". En *Advances in Materials Science and Engineering,* 3: 1-13. https://doi.org/10.1155/2021/9953768

Autor/es



Estefanía Martín García
estefania.martin@upc.edu
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona (ETSAB), Universidad Politécnica de Cataluña
https://orcid.org/0000-0002-4359-7164

Arquitecta licenciada por la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona (ETSAB-UPC) y doctoranda del programa de Tecnología de la Arquitectura, Edificación y Urbanismo. Máster en Estudios Avanzados de Arquitectura (MBArch), con doble especialidad en Teoría, Historia y Cultura y Rehabilitación y Restauración arquitectónica (ETSAB-UPC, 2018). Experto en Conservación, Restauración e Interpretación del Patrimonio por la Universidad de Alcalá de Henares (Udima-ETSAM, 2016). Especialista Universitario en Estructuras Históricas de fábricas y de madera por la Universidad de Extremadura (UEX, 2021). Posgrado en Rehabilitar des de la estructura por el Colegio Oficial de Arquitectos de Cataluña (COAC, 2021). Laboralmente, desde 2015 participa en proyectos de restauración arquitectónica en Cataluña. Profesional independiente con despacho propio desde 2019, ha redactado y dirigido múltiples proyectos que abarcan la recuperación y adecuación a la visita de yacimientos y fortificaciones de época ibérica, la conservación de monumentos de época romana, la restauración de castillos, murallas y torres medievales, así como el estudio e intervención en construcciones de cronología más reciente (s.XIX-XX). Profesora asociada del Departamento de Tecnología de la Arquitectura en la ETSAB-UPC desde 2016. Profesora invitada des de 2020 en la asignatura de Conservación de Bienes Culturales del Grado de Historia del Arte (Universidad de Barcelona). Profesora del Máster Rehabilitación en edificación del CATEB Building School desde 2025. Miembro de ICOMOS España (International Council of Monuments and Sites) desde 2020.



Luis Jordá Bordehore
l.jorda@upm.es
ETSI Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid
https://orcid.org/0000-0002-2332-5647

Luis Jordá es profesor de la Universidad Politécnica de Madrid desde 2019, cuando se incorporó tras trabajar en el Servicio Geológico Español. Imparte clases de túneles, geotecnia y mecánica de rocas. Luis Jordá (50 años) es doctor ingeniero de minas por la Universidad Politécnica de Madrid con un máster en Ecole Superieure du Petrole en Francia (2000) y una beca Erasmus de intercambio en Mons Bélgica (1998-1999). Ha trabajado como ingeniero geotécnico superior en perforación, diseño de túneles y minas subterráneas. Tiene experiencia universitaria impartiendo clases de riesgos geológicos, estabilidad de taludes e ingeniería de rocas en España y Sudamérica. De 2012 a 2016 ha estado viviendo en Perú, Bolivia y Ecuador, donde ha desarrollado e intenso networking en geoingeniería en universidades y empresas e instituciones privadas. Uno de sus principales temas de investigación y trabajo es la localización mediante técnicas geofísicas y evaluación de estabilidad de cuevas volcánicas y kársticas, así como cavidades subterráneas artificiales. Ha diseñado y supervisado el refuerzo de bodegas de vino y aceite del siglo XVIII y de minas de yeso romanas. Ha analizado la evaluación de la estabilidad de muchas explotaciones mineras poco profundas y canteras bajo carreteras. También es un experto explorador de cuevas y ha participado en numerosas expediciones desde 1993.



Adriana Molina Pérez
adrianarestauradora@gmail.com
Conservadora–restauradora de Sikait Project
https://orcid.org/0009-0003-6901-7134

Técnico superior en conservación y restauración de bienes culturales, en la especialidad de arqueología, por la Escuela Superior de Conservación y Restauración de Bienes Culturales de Cataluña (ESCRBCC) (2010) y Licenciada en Historia por la facultad de Filosofía y Letras de la UAB (2008), ha formado parte de múltiples excavaciones arqueológicas, tanto en Cataluña, el Estado Español como en el extranjero. Cabe destacar su participación en proyectos como el de «Mines d'or antiques de Dacie» (Rumanía) con el CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) o en excavaciones del Departamento de Ciencias de la Antigüedad y la Edad media de la UAB como las excavaciones iberas y romanas de «El Castellot de Bolvir», «El Tossal de Baltarga» (La Cerdaña) o en excavaciones de época medieval del grupo OCORDE (Ocupació, organització i defensa del territori medieval). Por otro lado ha realizado trabajos de conservación y restauración para diferentes centros de investigación como el CSIC, el CNRS, o el Departamento de Ciencias de la Antigüedad y la Edad media de la UAB, juntamente a otras instituciones en el extranjero como el Museo Agli Eremitani de Padova. En la actualidad se ha integrado como conservadora – restauradora y responsable de registro en el Sikait Project.



Delia Eguiluz Maestro
delia.eguima@gmail.com
Conservadora–restauradora del CRIP (Barcelona)
https://orcid.org/0009-0006-4767-1161

Conservadora-restauradora de bienes arqueológicos y paleontológicos, título obtenido en la ESCRBBC en Barcelona, y licenciada en Historia del Arte por la Universidad de Salamanca. Ha realizado un curso de posgrado en Preparación, Conservación y Restauración de material fósil en el CRIP (Barcelona). En la actualidad dirige los trabajos de conservación-restauración de varios yacimientos arqueológicos tanto en España, en la Colonia Clunia Sulpicia (Burgos), el Castro de Doade (Pontevedra) y El Castellot de Bolvir (Girona); como a nivel internacional, en los yacimientos de Berenike y Sikait (Egipto). Además, es coordinadora técnica en el proyecto arqueológico de los yacimientos autrigones de «La Mesa» y «La Muela» en Belorado (Burgos).



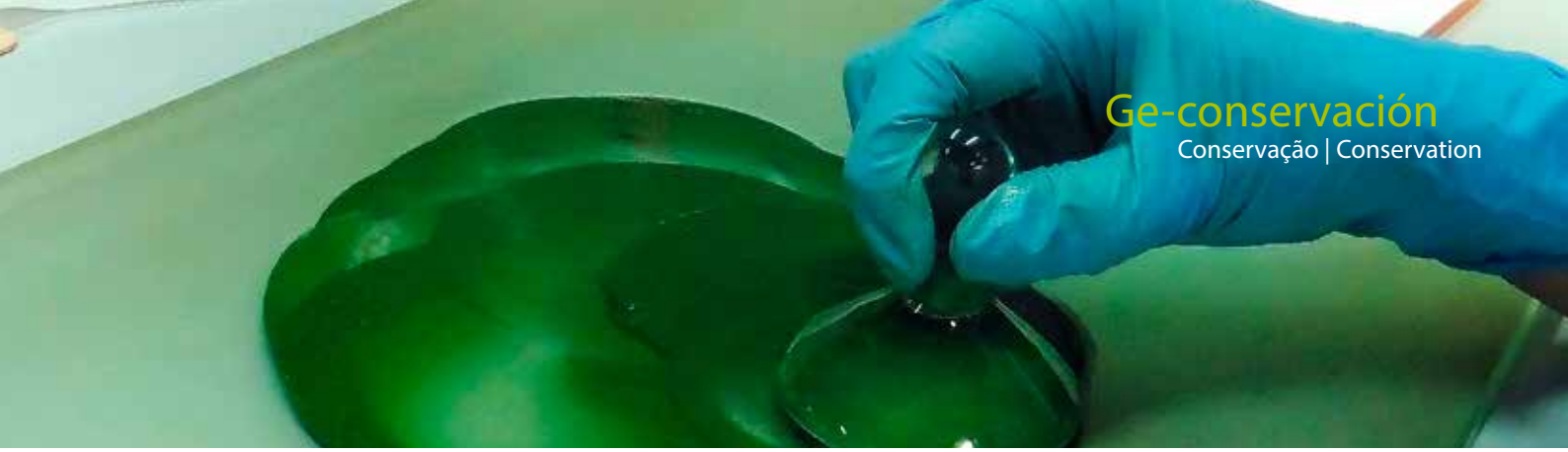
Joan Oller Guzmán
joan.oller@uab.cat
Universitat Autònoma de Barcelona
https://orcid.org/0000-0001-5002-4914

Joan Oller Guzmán (Barcelona, 1984) es Doctor en Historia Antigua por la Universitat Autònoma de Barcelona. Su estudio doctoral consistió en un análisis histórico-arqueológico del territorio y poblamiento de la región de la Layetania Interior (actual Barcelona) en época antigua. A partir de ello, sus líneas de investigación se han centrado en la arqueología del paisaje y los estudios del territorio en época romana. De este modo, participa como director de diversas intervenciones arqueológicas en el proyecto PATCA, en los Pirineos orientales. A la vez, desde el año 2013 dirige el proyecto de investigación PROTA en la comarca de Montes de Oca (Burgos). Finalmente, también desde el año 2013 participa como arqueólogo en el yacimiento greco-romano de Berenike y desde el año 2016 dirige el Sikait Project, proyecto de intervenciones arqueológicas en el Desierto Oriental egipcio. Actualmente es Profesor Agregado en el Departament de Ciències de l'Antiguitat i l'Edat Mitjana de la misma universidad.

Artículo enviado 09/07/2025
Artículo aceptado el 07/01/2026

CC BY NC ND

https://doi.org/10.37558/gec.v29i1.1413



Viabilidad de la elaboración propia de colores al barniz para reintegración cromática a través de la experimentación

Beatriz Doménech-García, Vicente Guerola-Blay, María Castell-Agustí, Antoni Colomina-Subiela

Resumen: El presente artículo investiga la viabilidad de la fabricación propia de pinturas no acuosas para la reintegración cromática. Esta práctica artesanal, realizada históricamente por artistas y cada vez más adoptada por restauradores, responde tanto a problemas de estabilidad, acabado y conservación de las pinturas comerciales especializadas, como a la necesidad de reducir costes en los procesos de restauración. Teniendo en cuenta las aparentes ventajas de los colores de elaboración manual, se ha llevado a cabo un estudio experimental mediante la elaboración y análisis de ensayos de laboratorio con diferentes combinaciones de pigmentos y barnices. A través de pruebas de envejecimiento acelerado, observación microscópica y análisis colorimétricos, se ha evaluado la cohesión, homogeneidad y estabilidad de las mezclas. Los resultados indican que la viabilidad de esta práctica depende en gran medida de la naturaleza de los materiales y de su correcta formulación, concluyendo que, bajo ciertas condiciones, podrían permitir su consideración para aplicaciones en contextos profesionales de restauración con la posibilidad de optimizar sus propiedades.

Palabras clave: reintegración al barniz, reintegración cromática, testado de pinturas, elaboración de pinturas, materiales alternativos

Feasibility of handmade varnish colours for chromatic reintegration through experimentation

Abstract: This article investigates the feasibility of self-manufacturing non-aqueous paints for chromatic reintegration. This artisanal practice, historically carried out by artists and increasingly adopted by restorers, responds both to problems of stability, finish and conservation of specialised commercial paints, and to the need to reduce costs in restoration processes. Taking into account the apparent advantages of handmade colours, an experimental study has been carried out through the elaboration and analysis of laboratory tests with different combinations of pigments and varnishes. Through accelerated ageing tests, microscopic observation and colorimetric analysis, the cohesion, homogeneity and stability of the mixtures have been evaluated. The results indicate that the viability of this practice depends largely on the nature of the materials and their correct formulation, concluding that, under certain conditions, they could be considered for applications in professional restoration contexts with the possibility of optimizing their properties.

Keywords: varnish reintegration, inpainting-retouching, testing of paints, paint manufacturing, alternative materials

Viabilidade da elaboração própria de cores ao verniz para reintegração cromática através da experimentação

Resumo: O presente artigo investiga a viabilidade da produção própria de tintas não aquosas para a reintegração cromática. Esta prática artesanal, historicamente realizada por artistas e cada vez mais adotada por conservadores-restauradores, surge tanto como resposta a problemas de estabilidade, acabamento e conservação das tintas comerciais especializadas, como à necessidade de reduzir custos nos processos de restauro. Tendo em conta as aparentes vantagens das cores de elaboração manual, foi realizado um estudo experimental através da preparação e análise de ensaios laboratoriais com diferentes combinações de pigmentos e vernizes. Por meio de testes de envelhecimento acelerado, observação microscópica e análises colorimétricas, avaliaram-se a coesão, homogeneidade e estabilidade das misturas. Os resultados indicam que a viabilidade desta prática depende em grande medida da natureza dos materiais e da sua correta formulação, concluindo que, sob determinadas condições, poderá ser considerada para aplicações em contextos profissionais de restauro, com possibilidade de otimizar as suas propriedades.

Palavras-chave: reintegração ao verniz, reintegração cromática, testagem de tintas, elaboração de tintas, materiais alternativos

Introducción

La elaboración de pinturas de forma manual ha sido una práctica común en el ámbito artístico debido a la falta de recursos mecanizados. Con el desarrollo de la actividad industrial entre mediados del siglo XIX y principios del XX, se empezaron a producir las primeras pinturas artísticas comerciales, encontrando ya a finales del siglo XX colores distribuidos específicamente para la reintegración cromática (Bailão 2015; Gamblin 2021).

Actualmente, el mercado ofrece una amplia variedad de pinturas comerciales de alta calidad para la reintegración no acuosa (Bailão y Cardeira, 2018), aunque su uso puede presentar inconvenientes para los restauradores. Si bien diversos estudios han demostrado la estabilidad de estas pinturas comerciales (Sánchez Ortiz *et al.* 2009), la experiencia práctica y otras investigaciones han puesto de manifiesto ciertas complicaciones derivadas de su uso en restauración. Entre ellas, destacan alteraciones cromáticas tras la aplicación del barniz final (De la Roja 2013) y problemas de integración en el acabado de los retoques. En este sentido, a menudo, tras la evaporación de los disolventes, las reintegraciones al barniz realizadas con pinturas comerciales no se ajustan adecuadamente a la superficie barnizada de la obra, presentando acabados inconsistentes (brillante, satinado o mate). Esta problemática está condicionada por los materiales que constituyen las propias pinturas de retoque y por los disolventes necesarios para su aplicación. En algunos casos, estos disolventes pueden diluir parcialmente la capa de barniz aplicada previamente sobre las reintegraciones acuosas, destinada a protegerlas y a regular su saturación antes de la aplicación de retoques no acuosos, lo que dificulta la correcta integración cromática de estos últimos. (Van den Burg y Seymour 2022).

Otro desafío importante es el almacenamiento y conservación que presentan estas pinturas comerciales, ya que las cantidades requeridas son pequeñas y los envases suelen almacenarse durante largos periodos. En pinturas comercializadas en formato húmedo, la lenta evaporación de los disolventes – incluso en envases especialmente diseñados para minimizarla – provoca el secado progresivo del producto. Aunque es posible regenerarlas, el endurecimiento del material dificulta su aplicación y obliga, en muchos casos, a recurrir a disolventes de mayor poder disolvente, lo que conlleva el desperdicio de materiales y recursos económicos.

Como alternativa para disponer de colores más económicos y adaptados a las necesidades específicas de ajuste cromático y control de la saturación, en las últimas décadas ha aumentado la popularidad de la elaboración propia de pinturas al barniz para reintegración pictórica mezclando pigmentos en polvo y barnices preparados con resinas, retomando así los métodos tradicionales. Este procedimiento queda reflejado no sólo en pequeños talleres de conservadores-restauradores particulares, sino que, en la actualidad, forma parte también de la práctica de instituciones de gran prestigio como el Museo Thyssen de Madrid (Restauración Thyssen 2021).

El creciente interés en esta técnica ha impulsado investigaciones basadas en los estudios pioneros de E. René de la Rie sobre la estabilidad de las resinas para barnices en conservación-restauración (De la Rie y McGlinchey 1990). Estos trabajos han servido como base para analizar barnices como aglutinantes de pigmentos en pinturas para retoques pictóricos. Cabe mencionar que, en materia de reintegración, los estudios de E. René de la Rie culminaron con el análisis del uso de barnices como aglutinantes para colores de reintegración, dando como resultado la creación de las pinturas comerciales conocidas como Gamblin® *Conservation Colors*, cuyo aglutinante es la resina Laropal® A-81 (Leonard *et al.* 2000).

A partir del siglo XXI, se han multiplicado los estudios sobre pinturas elaboradas artesanalmente, evaluando su envejecimiento, reversibilidad y estabilidad, así como su aplicabilidad práctica (Gosar-Hirci y Močnik-Ramovš 2016). Algunos autores justifican la fabricación propia de pinturas por el mayor control sobre la calidad de los materiales y las cantidades empleadas, la reducción de costes y la obtención de productos de calidad superior a los comerciales (Bestetti y Saccani 2015), aunque sin aportar datos que prueben este último punto más allá que el propio proceso de elaboración artesanal de los colores. Una de las investigaciones más recientes en relación a esta temática amplía los estudios realizados hasta el momento y toma en consideración, también, otros aspectos como la cantidad de pigmento que debe contener la mezcla de las pinturas para conseguir un acabado lo más similar posible al de la película pictórica original (Jacqmin y Soldano 2020).

Así, tanto estas investigaciones como el uso de colores al barniz elaborados por el propio restaurador han crecido en popularidad por ser, aparentemente, una alternativa óptima frente a las pinturas comerciales, resultando más versátiles y económicas. Pero, este tipo de pinturas de fabricación propia ¿son una alternativa real que ofrezca y asegure unos buenos resultados con unos mínimos estándares de calidad? ¿Están al alcance de cualquier restaurador para ser elaboradas correctamente y así poder ser aplicadas en obra real?

Objetivos

El presente estudio tiene como objetivo principal el análisis del comportamiento de los materiales constituyentes de las pinturas al barniz de fabricación manual destinadas a la reintegración cromática. Mediante un procedimiento experimental, se persigue conocer la estabilidad de estas pinturas y si, por tanto, son resistentes a la fotooxidación y el envejecimiento de los componentes que forman este tipo de colores, cualidades exigibles a los materiales

empleados en el ámbito de la conservación de bienes culturales.

Estos análisis se centran especialmente en evaluar cómo afecta el paso del tiempo a la estabilidad de las pinturas aglutinadas, considerando tanto el comportamiento de los pigmentos, como el de los aglutinantes y su interacción. De esta forma, se pretende conocer si es posible obtener colores de retoque al barniz que presenten propiedades óptimas para ser aplicados en obra real y que, a la vez, resulten asequibles para los talleres restauración.

Esta finalidad principal se alcanza a través de objetivos específicos:

Evaluar la capacidad aglutinante de los barnices preparados sin aditivos, testando la facultad de englobar correctamente las partículas de los pigmentos empleados dando lugar a películas homogéneas.

Analizar la estabilidad ante la exposición a la luz por medio de pruebas de envejecimiento artificial acelerado de los materiales que componen las pinturas de fabricación propia. Se ha realizado un estudio tanto a nivel morfológico, considerando los principales aspectos evaluados: uniformidad, integridad de la película formada y posibles cambios en la superficie o textura, como a nivel cromático.

Metodología

— Equipos y procedimientos utilizados

Los objetivos de esta fase experimental se alcanzan mediante una estrategia metodológica basada principalmente en la elaboración y análisis de probetas con pinturas de fabricación manual a partir de mezclas de barnices y pigmentos en polvo. Dicha experimentación se desarrolla en diversas fases:

1 Selección de los materiales y elaboración de las pinturas artesanales.

2 Realización de probetas, constituidas por un soporte inerte (azulejo de esmalte blanco) sobre el que se aplica una película de las diversas pinturas artesanales preparadas.

3 Exposición de las probetas a envejecimiento acelerado artificial para comprobar la estabilidad de las mezclas fabricadas manualmente. Para ello, las probetas preparadas se han sometido a envejecimiento acelerado artificial utilizando la cámara de envejecimiento por exposición a la radiación UV QUV-BASIC de Q-PANEL, ubicada en el Laboratorio de Estudios Físico-Químicos del Instituto de Restauración del Patrimonio de la Universitat Politècnica de València (IRP-UPV). Este equipo de ensayo acelera los procesos fotodegradativos a partir de la simulación de diferentes exposiciones, permitiendo evaluar la resistencia de los materiales. Así, en la presente fase experimental, los ensayos preparados han sido expuestos al espectro de radiación solar con lámparas UVA-340 nm. durante 1000 horas.

4 Observación de las probetas bajo microscopio digital Dino-Lite Premier modelo AM4113 T-TVW(R4), tanto envejecidas como sin envejecer, con el fin de poder trazar una relación comparativa entre ellas. Este análisis permitirá comprobar si se obtienen mezclas homogéneas o si sufren cambios morfológicos determinados por una excesiva degradación a medida que envejecen.

5 Mediciones colorimétricas de las piezas de ensayo, tanto envejecidas como sin envejecer, para evaluar los cambios cromáticos que pueden producirse por el proceso de envejecimiento de los materiales. La *Commission Internationale de l'Eclairage* (CIE) precisó varios espacios de color mediante los que comunicar y expresar objetivamente los colores de la materia, entre los que destaca el CIE L*a*b* (1976), resultando ampliamente utilizado por los investigadores (Konica Minolta 2020). El espacio de color L*a*b* (CIELAB), a través del uso de colorímetros o espectrofotómetros, permite evaluar objetivamente los colores con tres coordenadas: L* (luminosidad), a* (rojo/verde) y b* (amarillo/azul) (Bersezio et al. 2013). Así, las mediciones colorimétricas efectuadas para el presente estudio se han realizado con el espectrofotómetro Minolta mod. CM-2600d siguiendo la norma UNE-EN 15886:2011 (AENOR, 2011) y empleando el iluminante D65 con el observador a 10º. De esta forma, se ha registrado el valor del color y de sus variaciones, pudiendo representarse en un diagrama tridimensional con las coordenadas L*, a*, b*. Con el fin de reducir el rango de error, se han realizado tres mediciones por pieza en un total de 112 probetas. Los datos obtenidos han sido analizados con el *software* SpectraMagicTM NX Pro y se han comparado con los valores colorimétricos de las probetas originales sin envejecer. Tomando como referencia la norma UNE-EN 15886:2011, esta cuantificación del color se ha obtenido a través de la fórmula $\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})}$ en la que $\Delta L^* = L^*2 - L^*1$ (diferencia de luminosidad), $\Delta a^* = a^*2 - a^*1$ (diferencia rojo/verde) y $\Delta b^* = b^*2 - b^*1$ (diferencia amarillo/azul). Para calcular la diferencia total de color en las pinturas, se han promediado las mediciones realizadas en diferentes puntos de cada probeta, lo que permite reducir la variabilidad de los resultados y obtener una estimación más representativa del color de cada pintura. Además, se han comparado los promedios de los ensayos sin envejecer y envejecidos, calculado la variación de color en L*, a*, b*.

6 Análisis e interpretación de los resultados.

— Materiales y elaboración de probetas

Se ha planteado la realización de una batería de probetas en las que se investigue, tanto el proceso de elaboración manual de pinturas para la fase de reintegración no acuosa, como los materiales que las componen. Dicha experimentación se ha llevado a término en las instalaciones del Instituto de Restauración del Patrimonio de la Universitat Politècnica de València (IRP-UPV).

Para la realización de las probetas de ensayo, se necesita un soporte inerte y estable que no interfiera ni altere los resultados del estrato filmógeno aplicado (Motta, 2004). Por este motivo, se ha optado por la utilización de azulejos de esmalte blanco con micro-textura y acabado satinado. Respecto a las medidas de estos soportes, tomando como referencia la norma UNE-EN ISO 15110:2018 (AENOR, 2018), se ha optado por formatos de 10 x 10 cm (100 cm^2).

En relación a los pigmentos, se han seleccionado siete de la marca Kremer® que permiten obtener una amplia gama cromática mediante su mezcla. La elección de los pigmentos de esta marca se ha basado en los estándares de alta calidad que ofrecen para las disciplinas de conservación y restauración (Kremer Pigmente 2021a) [Tabla 1].

Color	Nombre comercial	Índice de color	Nº de referencia Kremer®	Tamaño medio de las partículas	Naturaleza del producto
	Blanco de Titanio	PW6 CI 77891	K46200	0,5 µm	sintético
	Negro marfil	PBK9 CI 77267	K47200	10 µm	natural
	Amarillo de Cadmio nº6	PY35 CI 77205	K21040	0,5 µm	sintético
	Rojo de Cadmio nº2	PR108 CI 77202 / 77196	K21130	0,5 µm	sintético
	Azul Ultramar Standard	PB29 CI 77007	K45010	0,85 µm	sintético
	Verde óxido de Cromo	PG17 CI 77288	K44200	0,3 µm	sintético
	Sombra natural	PBR8 CI 77727	K40610	30-40 µm	natural

Tabla 1.- Datos de los pigmentos utilizados para la elaboración de las probetas de ensayo para la fase experimental.

Para el desarrollo del presente apartado experimental, los barnices han servido como aglutinante para los pigmentos de las pinturas de elaboración propia, lo cual ha permitido la formación de películas filmógenas (Borgioli y Cremonesi 2014). Estas últimas presentan buena cohesión entre las partículas de los pigmentos y muestran una firme adherencia al soporte.

El volumen de los barnices ha sido medido en peso, utilizando una balanza de precisión. Se han seleccionado una serie de resinas, naturales – dammar y almáciga – y sintéticas – Regalrez® 1094 (Del Grosso *et al.* 2021), Laropal® A-81 y Paraloid® B-72 – ampliamente utilizadas en la disciplina de la conservación-restauración y que han sido adquiridas, junto con los disolventes para su disolución, a la empresa CTS® España [Tabla 2].

Del mismo modo, es necesario señalar que no se han añadido aditivos a los barnices elaborados, como estabilizantes de la luz o plastificantes, ya que la presente experimentación persigue analizar exclusivamente la compatibilidad de los materiales empleados, su grado de cohesión, así como su estabilidad ante el envejecimiento artificial acelerado.

Respecto a la cantidad de probetas preparadas, tomando como referencia las directrices especificadas en la norma UNE-EN ISO 16474-1:2014 (AENOR; 2014), se han elaborado un total de tres ensayos por cada material, resultando así tres para cada tipo de mezcla de barniz más pigmento. De esta forma, se reduce el rango de error en la obtención de resultados. Igualmente, se han preparado también modelos de probeta patrón como referente de cada tipo de los colores al barniz con el fin de realizar una comparativa posterior a la exposición a envejecimiento acelerado.

Previamente a la aplicación de las mezclas de barnices con pigmentos, se ha efectuado una limpieza y desengrasado de la superficie de los azulejos con etanol aplicado con una muñequilla de tela 100% poliéster. Este proceso ha permitido eliminar los restos de grasa, impurezas y polvo presentes en el área esmaltada de las piezas cerámicas, evitando así la contaminación de las películas filmógenas objeto de estudio.

La preparación de estas piezas de ensayo se ha iniciado con la moltura de los pigmentos en polvo en los respectivos barnices. Los pigmentos son pequeñas partículas que necesitan ser completamente humectadas por el aglutinante

Resina	Nombre	Tipología de resina	Características técnicas	Disolvente empleado	Proporción
	Dammar	Resina natural	Buena reversibilidad. Escasa sensibilidad a la humedad. Buena estabilidad a la luz. Se ablanda a los 120ºC. Transición vítrea a los 72ºC.	White Spirit D40	20%
	Almáciga	Resina natural	Buena transparencia y brillo. Se ablanda a los 80ºc y funde entre los 105ºC y los 120ºC. Transición vítrea a los 30-39ºC.	White Spirit D40	20%
	Regalrez® 1094	Resina sintética de hidrocarburo hidrogenado	Resistencia al envejecimiento. Buena reversibilidad. Se ablanda a los 97ºC. Transición vítrea a los 33ºC	Mostanol + White Spirit D40 (1:1)	20%
	Laropal® A-81	Resina sintética urea-aldehído	Resistencia al envejecimiento. Óptimo poder nivelante. Elevada brillantez. Se ablanda a los 80-95ºC. Transición vítrea a los 49ºC.	Mostanol + White Spirit D40 (1:1)	20%
	Paraloid® B-72	Resina sintética acrílica	Óptimas características de dureza, brillo y adhesión. Se ablanda a los 60-65ºC. Transición vítrea a los 40ºC.	Acetato de etilo	7%

Tabla 2.- Especificaciones técnicas de las resinas, disolventes y proporciones utilizadas para la elaboración de los barnices para las probetas de ensayo para la fase experimental. Fuente: Elaboración propia a partir de las especificaciones técnicas y fichas de seguridad de los fabricantes suministradas por CTS S.L.

para conseguir la correcta estabilidad de la pintura. Para ello, deben ser molidos cuidadosa y meticulosamente con el fin de formar una pasta homogénea y sin grumos (Kremer Pigmente 2021b). Secco-Suardo indicó en uno de sus escritos el procedimiento óptimo de moler los pigmentos. Para ello, especificó que la mejor manera de efectuar este proceso era a la forma antigua por medio de una mesa de pórfido o cristal y una moleta del mismo material (Secco-Suardo 2010).

Siguiendo estas indicaciones, la preparación de las pinturas se ha realizado en una placa de vidrio esmerilado y una moleta del mismo material, realizando movimientos circulares durante varios minutos para asegurar la fricción entre las herramientas empleadas, consiguiendo de este modo la correcta moltura y afinamiento de las partículas de los pigmentos, así como el englobe de las mismas con el medio, en este caso los barnices [Figura 1]. Tras este proceso, los colores al barniz elaborados se han aplicado sobre los azulejos con una brocha de cerdas suaves [Figura 2]. Cabe tener en consideración que los colores se aplican sobre superficies relativamente grandes en comparación a cómo se emplean en la reintegración de lagunas pictóricas, en las que, además, se utilizan pequeñas cantidades de pintura. Debido a ello, algunos de los problemas derivados de esta metodología de aplicación y uso, podrían no verse reflejados en las prácticas comunes de reintegración.

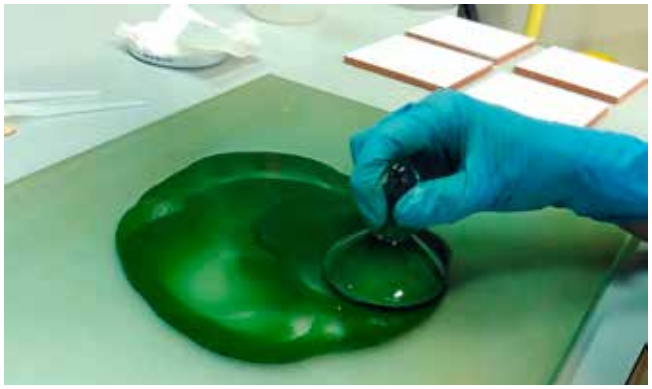


Figura 1.- Detalle del proceso de molturado y englobe del pigmento verde óxido de cromo con el barniz preparado con la resina sintética Regalrez® 1094.

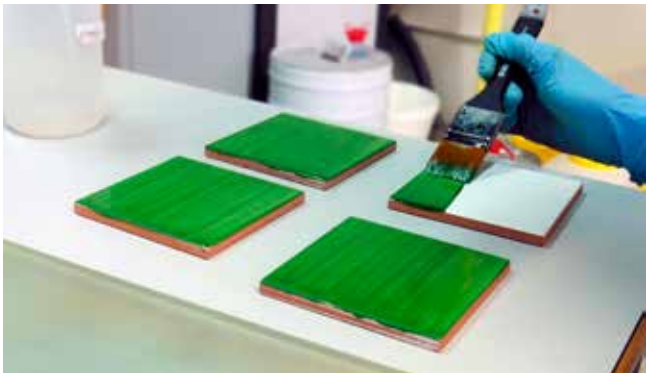


Figura 2.- Detalle del proceso de aplicación sobre los azulejos de la pintura elaborada con el pigmento verde óxido de cromo y el barniz de resina sintética Regalrez® 1094.

Cabe mencionar que, aunque autores como Pacheco (1990) y Nicolaus (1999) describen procesos de molienda de los pigmentos —ya sea una molienda previa en agua para determinados colores o la molienda definitiva en el aglutinante oleoso para todos ellos—, para esta experimentación se ha descartado cualquier manipulación previa de molienda con líquidos. Se ha optado por mantener los pigmentos en estado seco, tal como se reciben del proveedor, con el fin de asegurar que las proporciones y las propiedades reológicas de las mezclas sean estrictamente reproducibles y comparables entre ensayos, evitando variables introducidas por procesos de molienda manual.

En referencia a la proporción de pigmento y de barniz, Secco-Suardo especificó que se debía añadir tanto barniz como fluidez se desease que tuviese la pintura (Secco-Suardo 2010). No obstante, actualmente existen parámetros que ayudan a conocer las proporciones indicadas de cada componente para obtener películas de pintura coherentes y con unas buenas propiedades adherentes, como la *Pigment Volume Concentration* (PVC) y la *Critical* P*igment Volume Concentration* (CPVC).

La PVC describe el volumen del pigmento en una película pictórica, es decir, concreta qué cantidad del volumen de una capa de pintura está formada por pigmento en relación a la cantidad de aglutinante o medio que contiene. Se calcula a través de la fórmula PVC=(V pigmento)/((V pigmento+V aglutinante))*100 (PPG Paints, 2019).

La PVC está relacionada con el acabado mate o brillante de una pintura. Así, este parámetro especifica que un porcentaje más alto de PVC, es decir, mayor volumen de pigmento, dará lugar a una pintura de acabado más mate; mientras que, por el contrario, un porcentaje menor de PVC formará una pintura con un acabado más brillante (PPG Paints, 2019) [Tabla 3].

Tipo de acabado	Rango PVC
Brillante	0-15%
Semibrillante	15-25%
Satinado	30-40%
Eggshell	35-45%
Mate	40-80%

Tabla 3.- Rango de valores según el acabado de la pintura.

Es importante indicar que, a medida que el valor en porcentaje de la PVC aumenta, se incrementa la densidad y la cobertura de la pintura, sin embargo, empeoran las propiedades de durabilidad y resistencia, obteniendo así capas de pintura más frágiles (PPG Paints 2019).

Por su parte, la CPVC es la relación óptima entre el aglutinante y el pigmento, es decir, cuando éste último se encuentra en su máxima carga y los huecos generados entre sus partículas se presentan completamente rellenados de medio. Por lo general, el rango indicado de CPVC oscila entre el 30% y el 60%, pudiendo ajustarse según el acabado de la pintura que se precise (Carnazza *et al.* 2020).

Cabe mencionar también la absorción de aceite (*Oil Absorption Value*, OAV), que es un parámetro fundamental en la caracterización de pigmentos, pues mide la cantidad de aceite necesaria para formar una pasta homogénea. Depende de variables como el tamaño de la partícula, la superficie específica y la composición química, lo que explica la gran variabilidad entre pigmentos. Así, mientras el blanco de titanio (PW6) presenta valores bajos (15–20 g/100 g), el negro marfil (PBK9) puede alcanzar cifras muy superiores (70–80 g/100 g). Estas diferencias repercuten directamente en la concentración crítica de pigmento en volumen (CPVC) y en las propiedades ópticas y mecánicas de la pintura. En términos de acabado, los pigmentos con alta absorción tienden a producir superficies más mates, mientras que los de baja absorción favorecen acabados brillantes. Además, un OAV elevado incrementa la densidad de la mezcla y dificulta su extensión uniforme, por lo que resulta imprescindible ajustar la cantidad de aglutinante para evitar defectos como grietas, garantizar la cohesión entre pigmento y aglutinante, así como la durabilidad de la película pictórica (Glancy 2012; Sands 2016).

De esta forma, las mezclas para la elaboración manual de pinturas al barniz se han formulado ajustando la proporción de aglutinante para cada pigmento según su capacidad de absorción específica. En concreto, las cantidades exactas de pigmento y resina empleadas en esta experimentación se han calculado para alcanzar los valores de PVC detallados en la Tabla 4, asegurando así una saturación óptima y una consistencia trabajable en todos los casos. Si bien el OAV se determina tradicionalmente con aceite de linaza, se ha empleado en este estudio como un indicador de la demanda crítica de aglutinante de cada pigmento. Este valor de referencia ha permitido calcular las proporciones volumétricas necesarias para la preparación de las pinturas al barniz, garantizando que cada mezcla alcance una saturación y cohesión equivalentes, independientemente del índice de refracción o la viscosidad específica del barniz empleado.

Pigmento	PVC	Absorción de aceite
Blanco de Titanio PW6 CI 77891	40%	15-20g/100g
Negro marfil PBK9 CI 77267	45%	70-80 g/100g
Amarillo de Cadmio nº6 PY35 CI 77205	40%	21 g/100g
Rojo de Cadmio nº2 PR108 CI 77202 / 77196	40%	16-23 g/100g
Azul Ultramar Standard PB29 CI 77007	45%	38-43 g/100g
Verde óxido de Cromo PG17 CI 77288	40%	15-25 g/100g
Sombra natural PBR8 CI 77727	45%	35-50 g/100g

Tabla 4.- Valores de porcentaje de concentración de pigmento en volumen (PVC) y de absorción de aceite (OAV, referidos al aceite de linaza) de los pigmentos empleados, utilizados como referencia en la elaboración de las pinturas de este estudio (Sands 2016).

— Complicaciones surgidas durante la elaboración de las pinturas al barniz

Durante el proceso de moltura y englobe de los pigmentos con los barnices se han producido algunas contrariedades que precisan ser mencionadas:

- Aunque el uso de Regalrez® 1094 en solución de White Spirit D40 como medio para la elaboración de colores al barniz ha permitido crear películas de pintura, ha presentado mayores dificultades para englobar correctamente las partículas de pigmento, dando la impresión de quedarse en suspensión en el medio.

- Durante el proceso de englobe de los pigmentos en polvo con el barniz de Laropal® A-81, no se ha logrado una integración satisfactoria de los componentes, lo que ha resultado una mezcla que se extiende con dificultad sobre los azulejos, sin llegar a conformar películas pictóricas. Se han probado diferentes disolventes para la preparación del barniz – como *White Spirit* D40, isopropanol, acetona y etil lactato – pero todos han dado lugar a resultados negativos. Cabe señalar que existen formulaciones comerciales que emplean esta resina como aglutinante (por ejemplo, en preparados de Kremer® Pigmente o en colores Gamblin®), lo que sugiere que la dificultad observada en este estudio podría deberse a la ausencia de aditivos o a condiciones de preparación diferentes. No obstante, dado que en las pruebas realizadas se han obtenido resultados negativos en la preparación de pinturas con Laropal® A-81, se ha optado por descartar su uso en el presente trabajo. Por ello, más que una incompatibilidad entre materiales, los resultados aquí obtenidos deben entenderse como una limitación práctica en el marco de la experimentación realizada.

Resultados y discusión

Los barnices, con el tiempo, sufren un proceso de fotooxidación provocado por su constante contacto con el oxígeno del aire, siendo las radiaciones ultravioleta (UV) catalizadoras de dicha reacción. Esta exposición a los rayos UV acaba generando el cuarteamiento, oscurecimiento, resecado y la pérdida de transparencia y de solubilidad en los disolventes no polares, volviéndose así amarillentos (De la Rie 1994).

Los estudios centrados en el envejecimiento de las resinas que forman los barnices para conservación-restauración han sido desarrollados de forma extensa

en las últimas décadas (De la Rie y McGlinchey 1990). Igualmente, con la entrada del siglo XXI y la búsqueda de materiales alternativos para las fases de reintegración, se empezaron a desarrollar también investigaciones sobre el envejecimiento de pinturas elaboradas con resinas sintéticas (Bestetti y Saccani 2015).

En este contexto, y tras el proceso de envejecimiento acelerado artificial aplicado en esta investigación, las probetas de ensayo han sido sometidas a estudios de observación bajo microscopio y de cuantificación de las variaciones de color (ΔE*). Para ello, se han tomado como referencia las probetas patrón y se ha llevado a cabo un análisis comparativo entre las características observadas en estas probetas patrón y las que se observan en las mismas después del envejecimiento, examinando la cohesión, uniformidad y resistencia al envejecimiento de las películas pictóricas formadas y cuyos resultados se exponen en los siguientes apartados.

— *Observación bajo microscopio*

Se ha procedido a la inspección microscópica de las pinturas al barniz elaboradas manualmente, tanto en las muestras sin envejecer como en las envejecidas artificialmente. De manera preliminar, las observaciones revelan un patrón de comportamiento estrechamente vinculado a las propiedades físicas de los pigmentos, independientemente del aglutinante empleado. Como sugieren los datos de la Tabla 4, existe una correlación directa entre los altos valores de OAV y la falta de estabilidad mecánica en las películas, siendo el negro marfil y la sombra natural los que presentan mayores deficiencias de cohesión de forma sistemática en todos los medios ensayados. A continuación, se detallan los resultados específicos obtenidos para cada tipo de resina.

Los colores preparados con la resina natural almáciga como medio, han mostrado resultados positivos en términos de cohesión, especialmente con el empleo de los pigmentos blanco de titanio [Figura 3], amarillo de cadmio nº6 y rojo de cadmio nº2. Estas mezclas, tanto envejecidas artificialmente como sin envejecer, presentan películas uniformes y con un buen poder cubriente, aunque se aprecia que algunas partículas aisladas de pigmento no se muestran bien aglutinadas con el barniz. Por el contrario, los colores preparados con negro marfil y sombra natural han resultado películas heterogéneas y menos resistentes, perdiendo opacidad y cohesión tras su envejecimiento. Este comportamiento se relaciona directamente con los elevados valores de OAV y las consiguientes variaciones en la PVC de estos pigmentos [Tabla 4], ya que, al presentar una mayor demanda de aglutinante, estas mezclas tienden a una mayor porosidad, lo que facilita la degradación de la película pictórica. Esta pérdida de opacidad se constató a través de la mayor visibilidad del soporte cerámico bajo la capa pictórica, en comparación con el estado inicial, así como una reducción del poder cubriente indicativa de un debilitamiento estructural.

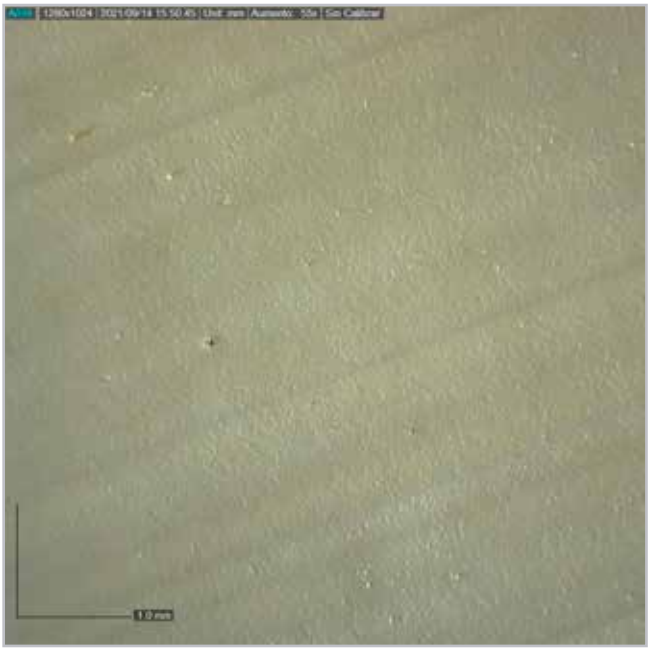


Figura 3.- Detalle bajo microscopio con un aumento de 55.0x de la probeta de pintura elaborada con pigmento blanco de titanio y barniz de almáciga.

Por su parte, los ensayos realizados con pinturas al barniz dammar han presentado mayores dificultades de integración de las partículas de pigmento, resultando en texturas más irregulares a nivel microscópico. Aunque visualmente pueden parecer cohesionadas, la exposición al envejecimiento artificial acelerado ha generado en algunos casos una consistencia pulverulenta. Este fenómeno es especialmente evidente en el negro marfil [Figura 4] y la sombra natural, los cuales poseen los índices de absorción más elevados del estudio. Dicha relación entre el OAV y la falta de cohesión, contrastable en los datos presentados anteriormente, compromete la formación de una película continua de resina y deriva en la desintegración física observada. Por el contrario, el rojo cadmio nº2, con un requerimiento de aglutinante sensiblemente menor, ha mostrado las mejores cualidades, incluyendo una óptima cohesión morfológica y estabilidad tras el envejecimiento.

Las pinturas elaboradas con el barniz sintético Regalrez® 1094 han dado lugar a películas pictóricas coherentes y uniformes, aunque con una textura ligeramente granulada bajo el microscopio. Los mejores resultados se han obtenido con el blanco de titanio, amarillo de cadmio nº6, rojo de cadmio nº2 y verde óxido de cromo. Por el contrario, en consonancia con los resultados obtenidos para las resinas naturales, el negro marfil y la sombra natural [Figura 5] han vuelto a presentar problemas de cohesión. Este hecho refuerza la tesis de que la elevada absorción de estos pigmentos (OAV) es el factor determinante en la fragilidad de la película, por encima del tipo de aglutinante empleado. Además, en el caso de la sombra natural, la presencia de óxidos de manganeso – conocidos por su acción catalizadora (Fuster-López *et al.* 2016) – podría estar alterando la estabilidad de la mezcla, contribuyendo a la heterogeneidad observada.



Figura 4.- Detalle bajo microscopio con un aumento de 55.0x de la probeta de pintura elaborada con pigmento negro marfil y barniz dammar antes (izquierda) y después (derecha) de ser expuesta a envejecimiento artificial acelerado.

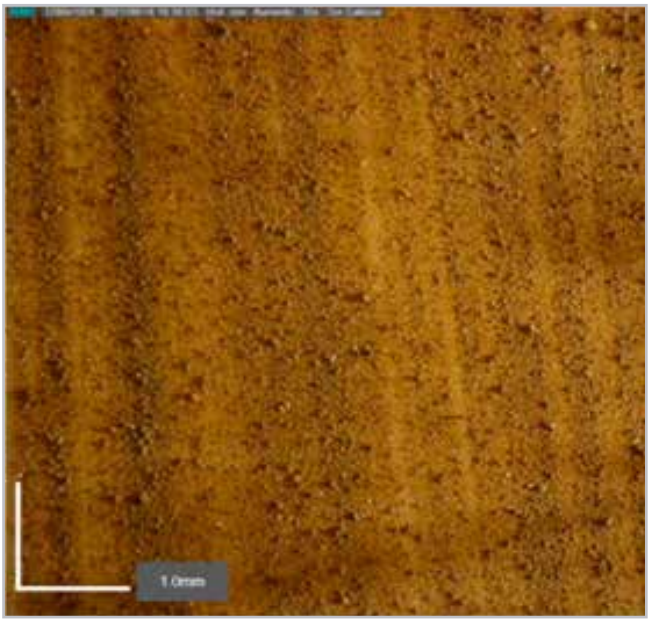


Figura 5.- Detalle bajo microscopio con un aumento de 55.0x de la probeta de pintura elaborada con pigmento sombra natural y barniz Regalrez® 1094.

Finalmente, las películas filmógenas elaboradas con Paraloid® B-72 han mostrado, a simple vista, resultados óptimos en términos de cohesión; sin embargo, bajo el microscopio se identifican partículas de pigmento que no se han aglutinado correctamente. El amarillo de cadmio nº 6, el rojo de cadmio nº2 y el verde óxido de cromo [Figura 6] han presentado una correcta estabilidad estructural y una buena distribución en el medio, mientras que los pigmentos negro marfil y sombra natural han vuelto a presentar problemas, mostrando un gran número de partículas sin englobar, así como signos de pérdida de opacidad constatados a través de la mayor visibilidad del soporte cerámico bajo la capa pictórica, en comparación con el estado inicial.



Figura 6.- Detalle bajo microscopio con un aumento de 55.0x de la probeta de pintura elaborada con pigmento verde óxido de cromo y barniz Paraloid® B-72 antes (arriba) y después (abajo) de ser expuesta a envejecimiento artificial acelerado.

En general, las diferencias observadas entre los pigmentos pueden relacionarse con su superficie específica y su interacción con el aglutinante. Como se ha evidenciado, pigmentos como el negro marfil o la sombra natural presentan una elevada demanda de medio debido a su naturaleza: el primero por su microestructura porosa (Mayer 1993) y el segundo por su contenido en arcillas de estructura laminar que incrementan la superficie a saturar (Sands 2016). Esta gran superficie específica genera una alta demanda de aglutinante (elevado OAV) que, de no ser satisfecha, compromete la formación de una película continua y deriva en la falta de cohesión observada. Por el contrario, pigmentos con una superficie específica más controlada, como los de cadmio o el blanco de titanio, permiten una saturación más eficiente con menores proporciones de resina, resultando en películas más estables y homogéneas. Estos factores son determinantes no solo en la morfología inicial de la pintura, sino también en su capacidad para resistir los procesos de degradación durante el envejecimiento.

—*Cuantificación de la diferencia total de color (ΔE*)*

Tras la exposición a envejecimiento artificial acelerado de las probetas, algunas muestran leves variaciones de color comparadas con las de referencia. No obstante, la percepción del color es un proceso neurofisiológico subjetivo y depende de factores individuales y externos (Zelanski y Fisher 2001), por lo que no es posible determinar con precisión a simple vista si las pinturas elaboradas manualmente han sufrido modificaciones de color.

Tomando como referencia otras publicaciones sobre colorimetría aplicada al estudio de la estabilidad de pinturas comerciales tras la exposición a envejecimiento acelerado artificial (Choi y Kang 2022), el presente texto evalúa la estabilidad del color en las probetas ensayadas. Cabe señalar que dicha estabilidad depende fundamentalmente de la naturaleza química de los pigmentos y de las propiedades intrínsecas de las resinas seleccionadas, más allá del proceso de elaboración manual. Por tanto, este análisis permite validar la viabilidad técnica de estas mezclas, formuladas con materiales de conservación comúnmente usados en los talleres de restauración, frente a las exigencias de estabilidad cromática a largo plazo [Figura 7].

Teniendo en consideración los umbrales de tolerancia según los valores alcanzados en ΔE* en los que en el valor 0-1 el observador no aprecia variación de color y >5 el espectador diferencia dos colores distintos (Mokrzycki y Tatol, 2012), se determina que los peores resultados se han obtenido en las pinturas al barniz con resina de almáciga, mostrando el rojo de cadmio nº2 (ΔE*= 9,28), el azul ultramar standard (ΔE*= 9,22) y el sombra natural (ΔE*= 13,44) diferencias notables perceptibles por el observador (>5 ΔE*). Sólo el verde óxido de cromo no ha presentado diferencias apreciables (ΔE*= 1,00), mientras que el resto de colores, aunque en menor medida, también han mostrado variaciones perceptibles para el público general.

Las pinturas preparadas con resina dammar han presentado resultados heterogéneos [Tabla 5]. Mientras que el amarillo de cadmio nº 6, el rojo de cadmio nº 2 y el verde óxido de cromo muestran una estabilidad cromática óptima (ΔE*<3), el negro marfil (ΔE*= 19,42), el azul ultramar (ΔE*= 11,45) y

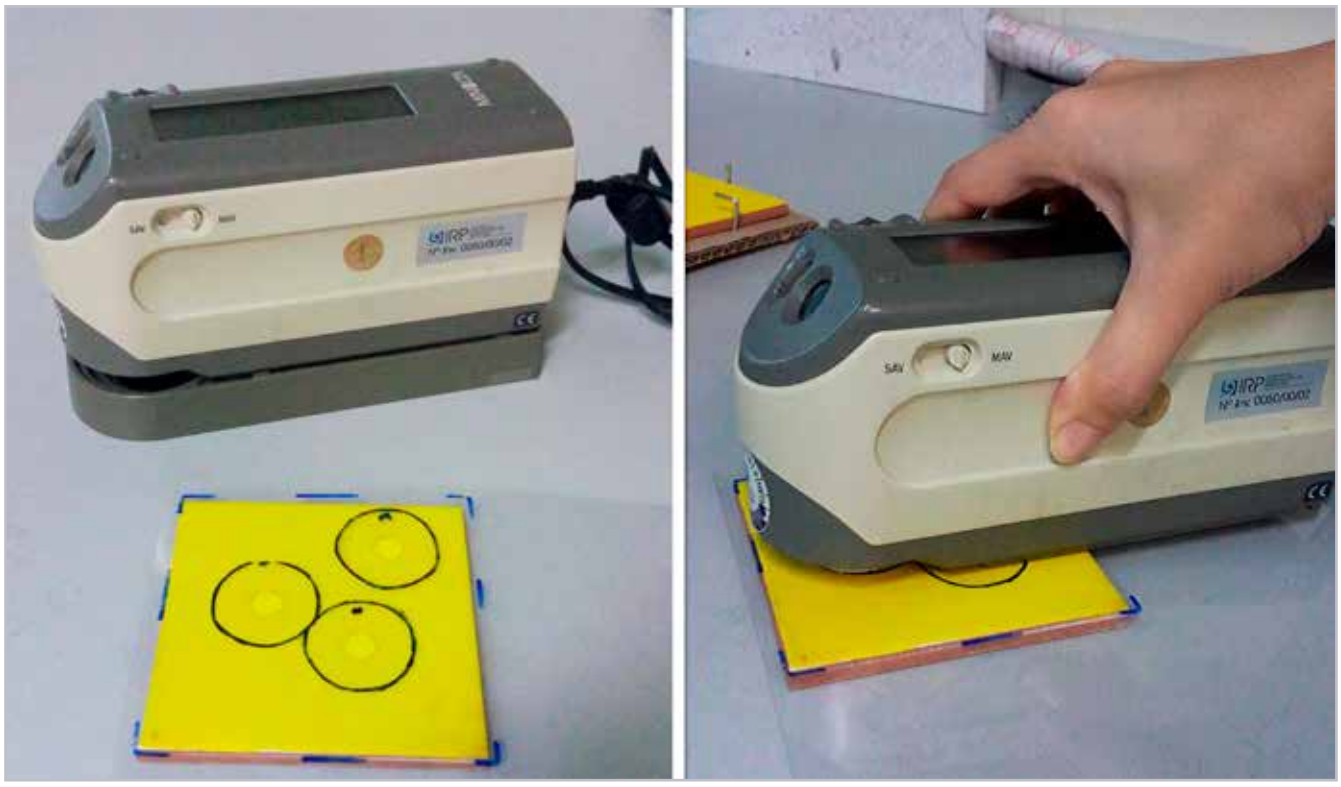


Figura 7.- Proceso de toma de mediciones colorimétricas con el espectrofotómetro Minolta mod. CM-2600d, utilizando un acetato intermedio agujereado para facilitar el marcaje de las zonas registradas

		Antes de envejecimiento artificial acelerado			Después de envejecimiento artificial acelerado			ΔE*
		L* (D65)	a* (D65)	b* (D65)	L* (D65)	a* (D65)	b* (D65)	
Almáciga	Blanco de Titanio	90,47	-0,82	2,65	91,23	-1,27	5,19	2,70
	Negro marfil	0,9	0	0	0,61	1,78	0,89	2,06
	Amarillo de Cadmio nº6	79,64	10,78	127,36	78,23	12,28	126,18	2,40
	Rojo de Cadmio nº2	31,99	57,17	40,44	30,14	60,00	49,08	9,28
	Azul Ultramar Standard	33,48	15,92	-68,08	29,44	23,77	-70,63	9,22
	Verde óxido de Cromo	34,92	-20,53	22,29	35,54	-21,02	22,98	1,00
	Sombra natural	28,41	18,47	44,06	41,55	15,66	43,95	13,44

		Antes de envejecimiento artificial acelerado			Después de envejecimiento artificial acelerado			ΔE*
		L* (D65)	a* (D65)	b* (D65)	L* (D65)	a* (D65)	b* (D65)	
Dammar	Blanco de Titanio	94,75	-0,72	1,27	93,63	-1,11	3,59	2,61
	Negro marfil	4,87	4,57	7,72	23,40	3,85	13,48	19,42
	Amarillo de Cadmio nº6	80,92	10,83	129,59	80,99	10,51	129,21	0,50
	Rojo de Cadmio nº2	31,14	60,40	51,62	31,01	60,27	51,67	0,20
	Azul Ultramar Standard	27,82	34,92	-76,62	32,19	24,75	-73,68	11,45
	Verde óxido de Cromo	40,78	-20,84	26,51	41,36	-20,96	26,14	0,70
	Sombra natural	34,99	15,66	48,49	43,57	14,73	45,43	9,17

		Antes de envejecimiento artificial acelerado			Después de envejecimiento artificial acelerado			ΔE*
		L* (D65)	a* (D65)	b* (D65)	L* (D65)	a* (D65)	b* (D65)	
Regalrez® 1094	Blanco de Titanio	89,00	-0,40	3,02	89,94	-0,32	3,05	0,94
	Negro marfil	0,09	0	0	2,18	0,79	1,29	2,65
	Amarillo de Cadmio nº6	83,65	5,49	64,49	82,22	5,07	67,94	3,76
	Rojo de Cadmio nº2	33,91	57,26	40,34	33,92	56,56	41,42	1,29
	Azul Ultramar Standard	46,13	7,63	-57,69	46,81	5,51	-55,55	3,08
	Verde óxido de Cromo	40,56	-22,87	29,94	40,86	-21,97	29,24	1,19
	Sombra natural	44,84	13,47	35,58	45,55	13,39	36,39	1,08

		Antes de envejecimiento artificial acelerado			Después de envejecimiento artificial acelerado			ΔE*
		L* (D65)	a* (D65)	b* (D65)	L* (D65)	a* (D65)	b* (D65)	
Paraloid® B-72	Blanco de Titanio	93,28	-0,65	1,35	93,20	-0,60	1,26	0,13
	Negro marfil	0,09	0,01	0	1,25	1,26	1,57	2,37
	Amarillo de Cadmio nº6	81,64	7,79	121,90	81,25	10,04	128,17	6,68
	Rojo de Cadmio nº2	31,00	58,48	48,25	32,92	57,89	44,61	5,18
	Azul Ultramar Standard	29,59	30,66	-75,76	35,32	21,25	-69,95	12,46
	Verde óxido de Cromo	41,81	-20,24	23,44	42,14	-20,02	23,15	0,49
	Sombra natural	22,10	19,14	37,64	25,45	17,25	40,84	5,05

Tabla 5.- Valores promedios obtenidos de las mediciones colorimétricas realizadas en las piezas de ensayo de colores al barniz y de la diferencia de color tras su exposición a envejecimiento artificial acelerado.

la sombra natural (ΔE*= 9,17) presentan diferencias notables de ΔE*. Estas discrepancias podrían explicarse por la elevada superficie específica y los altos valores de OAV de estos últimos. Al requerir mayor cantidad de aglutinante, se produce una saturación insuficiente del pigmento que altera la textura y la opacidad de la película, afectando así a la medición del color y permitiendo, en ciertos casos, la visualización del soporte cerámico. Este fenómeno se ha visto acentuado en el negro marfil y la sombra natural, donde la impronta de la brocha resulta más evidente debido a la mayor viscosidad y menor

capacidad de nivelación de estas mezclas saturadas. Debe considerarse que la aplicación manual favorece la aparición de estas texturas superficiales que rompen la planimetría de la capa pictórica. Esta falta de uniformidad influye en la reflexión de la luz y, por consiguiente, puede condicionar los valores de ΔE* obtenidos. Es por ello que, aunque la aplicación manual permite evaluar el comportamiento del material en condiciones reales de taller, se estima necesario para futuros estudios el empleo de aplicadores de película de espesor constante (tipo Baker o similares), garantizando así una superficie homogénea que optimice la precisión de la lectura colorimétrica.

En referencia a la resina Regalrez® 1094, se han obtenido los mejores resultados de estabilidad general. La mayoría de los colores presentan ligeras variaciones imperceptibles (ΔE*<3), a excepción del amarillo de cadmio nº6 y el azul ultramar, que muestran modificaciones perceptibles pero moderadas en comparación con las resinas naturales.

Finalmente, las pinturas elaboradas con Paraloid® B-72 demuestran una excelente estabilidad fotoquímica. Los valores obtenidos en el blanco de titanio (ΔE*<=0,13) y el verde óxido de cromo (ΔE*=0,49) reflejan cambios insignificantes en la luminosidad (L*), lo cual es coherente con la naturaleza de este polímero acrílico saturado que, a diferencia de los aglutinantes naturales, no experimenta procesos de oxidación o amarilleamiento significativos tras el envejecimiento. No obstante, se han registrado alteraciones notables en el azul ultramar standard ΔE*=12,32) y, en menor medida, en el amarillo nº6 y rojo de cadmio nº2, lo que sugiere que la estabilidad del conjunto depende no solo de la resina, sino de la interacción específica pigmento-aglutinante.

Conclusiones

El presente estudio ha demostrado que la elaboración manual de pinturas al barniz constituye un proceso laborioso, costoso y que exige gran meticulosidad. Los ensayos microscópicos han evidenciado la dificultad de obtener películas pictóricas completamente cohesionadas y homogéneas, incluso cuando se emplean procedimientos propios de taller de restauración.

Las pruebas de envejecimiento acelerado han mostrado la fragilidad de muchas de las películas obtenidas, con tendencia a la pérdida de cohesión, pulverulencia y variaciones cromáticas. Estas alteraciones se han manifestado con mayor intensidad en las resinas naturales (Almáciga y Dammar), especialmente en los colores preparados con negro marfil – que en el caso del Dammar ha mostrado una inestabilidad extrema (ΔE*=19,42) – y sombra natural. Por el contrario, pigmentos como el verde óxido de cromo han mostrado una mayor estabilidad general. En términos de comportamiento de los aglutinantes, la resina Regalrez® 1094 ha ofrecido el mejor comportamiento global, mientras que el Paraloid® B-72 ha destacado por su excelente estabilidad fotoquímica, manteniendo valores de ΔE* insignificantes en pigmentos como el blanco de titanio (0,13) y el verde óxido (0,49).

Los resultados confirman que la elección de pigmentos y resinas es crucial, al igual que la influencia de numerosos parámetros técnicos en la viabilidad de la mezcla: tamaño de partícula, tendencia a formar agregados, absorción de aceite o resina y proporción aglutinante/pigmento (Pigment Volume Concentration, PVC; Critical Pigment Volume Concentration, CPVC; y Oil Absorption Value, OAV). Se ha constatado que un alto OAV en pigmentos como el negro marfil o el azul ultramar dificulta la saturación óptima, afectando a la textura y a la medición colorimétrica final. Todos estos factores, que pueden pasarse por alto en la práctica de un taller, determinan la cohesión, la cobertura y la resistencia al envejecimiento de las películas.

El estudio constata así que la elaboración propia de pinturas al barniz en el taller de restauración, lejos de ser un procedimiento rutinario, exige un control riguroso de numerosos factores técnicos que condicionan decisivamente la calidad final de las películas. Cuando no se controlan adecuadamente, el resultado son pinturas que no alcanzan estándares mínimos de calidad para su aplicación en obra real. En este sentido, las formulaciones con Regalrez® 1094 y Paraloid® B-72 presentan cualidades que podrían justificar su consideración en aplicaciones de conservación, siempre como punto de partida para investigaciones futuras y con la posibilidad de incorporar aditivos que optimicen sus propiedades.

Referencias

AENOR (2011). UNE-EN 15886: *Conservación del patrimonio cultural. Métodos de ensayo. Medición del color de las superficies*. Madrid: Asociación Española de Normalización y Certificación.

AENOR (2018). UNE-EN ISO 15110: *Pinturas y barnices. Envejecimiento artificial mediante exposición a radiación de xenón filtrada, humectación y desecación*. Madrid: Asociación Española de Normalización y Certificación.

AENOR (2014). UNE-EN ISO 16474-1: *Pinturas y barnices. Métodos de exposición a fuentes de luz de laboratorio. Parte 1: Directrices generales*. Madrid: Asociación Española de Normalización y Certificación.

BAILÃO, A. (2015). *Critérios de intervenção e estratégias para a avaliação da qualidade da reintegração cromática em pintura.* Tesis doctoral. Universidad Católica Portuguesa.

BAILÃO, A. & CARDEIRA, L. (2018). 'Mixing and matching. A survey of retouching materials', *RECH4 4th International Meeting on Retouching of Cultural Heritage*, Split, Croatia. Proceedings. Split, 248-255.

BERSEZIO, C. et al. (2013). "Instrumentación para el registro del color en odontología". *Revista Dental de Chile*, 104(3): 8-13.

BESTETTI, R. y SACCANI, I. (2015). "Materials and methods for the self-production of retouching colors", *RECH2 2nd International Meeting on Retouching of Cultural Heritage,* Porto, Portugal, 24-25 October 2014. Proceedings. Porto, 26-38.

BORGIOLI, L. y CREMONESI, P. (2014). *Las resinas sintéticas usadas para el tratamiento de obras policromas.* Madrid: Il Prato.

CARNAZZA, P. et al. (2020). "Retouching matt contemporary paint layers: a new approach using natural polymers". *Ge-Conservación*, 18: 84-393. https://doi.org/10.37558/gec.v18i1.842.

CHOI, H. J. y KANG D. I. (2022). A study on the retouching materials for oil paintings: using restoration colors. *Journal of Conservation Science*, 38(6):558-575. https://doi.org/10.12654/JCS.2022.38.6.01

CTS S.L. (s.f.). *Fichas técnicas y de seguridad: Resinas naturales y sintéticas.* Recuperado de: https://www.ctseurope.com [Consulta: 24/04/2021].

DE LA RIE, E. R. (1994). A*plicaciones de barnices en las pinturas.* Curso Museo de Bellas Artes San Pío V de Valencia, mayo 1994. Valencia.

DE LA RIE, E. R. y MCGLINCHEY, C. M. (1990). New synthetic resins for picture varnishes. *Studies in Conservation*, 35(S1): 168-173. https://doi.org/10.1179/sic.1990.35.s1.036.

DE LA ROJA DE LA ROJA, J.M. et al. (2013). "Efectos del barniz sobre el color de las reintegraciones cromáticas", *X Congreso Nacional del Color:* Libro de Actas, Valencia, 26-27-28 junio 2013. Valencia: Universitat Politècnica de València, 300-306.

DEL GROSSO, C. A., et al. (2021). The photostability and peel strength of ethylene butyl acrylate copolymer blends for use in conservation of cultural heritage. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 36(1): 75–97. https://doi.org/10.1080/01694243.2021.1912951

FUSTER-LÓPEZ, L., et al. (2016). Study of the chemical composition and the mechanical behaviour of 20th century commercial artists' oil paints containing manganese-based pigments. *Microchemical Journal*, 124(1): 962–973. https://doi.org/10.1016/j.microc.2015.08.023

GAMBLIN (2021). Conservation Color for the 21st Century. https://conservationcolors.com/conservation-colors-21st-century/ [Consulta: 13/03/2021].

GLANCY, C.W. (2012). "Oil absortiong of pigments". En *Paint and Coating Testing Manual 15th Edition of the Gardner-Sward Handbook*. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.

GOSAR-HIRCI, B. y MOČNIK-RAMOVŠ, L. (2016). "Use of retouching colours based on resin binders – From theory into practice", *RECH3 3rd International Meeting on Retouching of Cultural Heritage*, Porto, Portugal, 23-24 October 2015. Postprints. Porto, 45-52.

JACQMIN, C. y SOLDANO, A. (2020). "Reintegración de pinturas e emulsión acrílicas sin barnizar un estudio comparativo". *Ge-Conservación*, 18: 221-227. https://doi.org/10.37558/gec.v18i1.849.

KONICA MINOLTA (2020). *Entendiendo el Espacio de Color CIE LAB**. https://sensing.konicaminolta.us/mx/blog/entendiendo-el-espacio-de-color-cie-lab/ [consulta: 23/07/2020].

KREMER PIGMENTE (2021a). Página principal Kremer pigmente. [en línea] [consulta: 26 de septiembre de 2021]. Disponible en: https://www.kremer-pigmente.com/es/.

KREMER PIGMENTE, (2021b). Receta: Oil Paint. [en línea] [consulta: 26 de septiembre de 2021]. Disponible en: https://www.kremer-pigmente.com/es/informaci%C3%B3n/recetas/oil-paint/.

LEONARD, M. et al. (2000). "Development of a new material for retouching". *Studies in Conservation*, 45(S1): 111-113. https://doi.org/10.1179/sic.2000.45.Supplement-1.111.

MAYER, R. (1993). *Materiales y técnicas del arte*. Madrid: Alianza Editorial.

MOKRZYCKI, W.S. y TATOL, M. (2012). "Colour difference ΔE - A survey". *Machine Graphics and Vision*, 20(4): 383-411.

MOTTA, E. (2004). *La utilización del sistema colorimétrico Cielab en la evaluación de los barnices y sistemas de barnizado empleados en la restauración de pinturas: con referencia adicional al brillo solubilidad y apariencia.* Tesis doctoral. Universitat Politècnica de València.

MUSEO NACIONAL THYSSEN-BORNEMISZA MADRID (2021). [Restauración Thyssen]. Twitter. https://twitter.com/RestauraThyssen/status/1367461709787627524 [consulta: 04/03/2021].

NICOLAUS, K. (1999). *Manual de restauración de cuadros*. Köln: Konemann, 272–284.

PACHECO, F. (1990). *Arte de la pintura*. Madrid: Ediciones Cátedra, 448 y 483.

PPG PAINTS (2019). *¿Qué es la concentración de pigmento en volumen?* https://es.ppgpaints.com/pro/pro-painting-tips/pigment-volume-concentration# [consulta: 13/02/2019].

SÁNCHEZ ORTIZ, A. et al. (2009). "Investigación sobre la estabilidad química y óptica de materiales contemporáneos para reintegración cromática", *La restauración en el siglo XXI: función estética e imagen. IV Congreso del GEIIC*. Cáceres, 25-26-27 noviembre 2009, 195-205.

SANDS, S. (2016). 'Volume, Weight, and Pigment to Oil Ratios', *Just Paint*. Disponible en: https://justpaint.org/volume-weight-and-pigment-to-oil-ratios/ [consulta: 28/05/2025].

SECCO-SUARDO, G. (2010). *Il restauratore dei dipinti*. 4ª ed. Milano: Ulrico Hoepli Editore.

VAN DEN BURG, J.M. y SEYMOUR, K. (2022). *Varnishing and inpainting/retouching*. Amersfoort: Cultural Heritage Agency of the Netherlands, 29–38 y 54–62.

ZELANSKI, P. y FISHER, M.P. (2001). *Color*. Madrid: Ediciones Akal.

Autor/es



Beatriz Doménech-García
beadomga@upv.es
Universitat Politècnica de València (UPV)
https://orcid.org/0000-0001-8783-0936

Doctora en Conservación y Restauración de Bienes Culturales por la Universitat Politècnica de València (UPV), actualmente ejerce como conservadora en el Área de Fondo de Arte de la misma universidad (UPV). En los últimos años ha participado activamente en un gran número de proyectos de conservación y restauración en colaboración con el Instituto de Restauración del Patrimonio (IRP) de la UPV, así como en congresos y seminarios de ámbito nacional e internacional. Sus investigaciones se centran en la reintegración cromática en pintura de caballete y en la conservación y divulgación del patrimonio tecnológico.



Vicente Guerola-Blay
vguerola@crbc.upv.es
Universitat Politècnica de València (UPV)
https://orcid.org/0000-0001-5223-7737

Licenciado en Bellas Artes por la Facultad de Bellas Artes de San Carlos de Valencia y doctor por la Universidad Politécnica de Valencia donde actualmente ejerce su labor docente como profesor titular en el Departamento de Conservación y Restauración de Bienes Culturales. Ha publicado diversas monografías en materia de restauración de pintura destacando su especial dedicación en materia de retoque y criterios de reintegración pictórica. En esta misma materia ha participado en diferentes foros, congresos y jornadas aportando a través de artículos y ponencias diversas casuísticas y procesos de intervención en el patrimonio histórico-artístico. Desde hace unos años participa a través de diferentes proyectos de investigación en el estudio de la Tomografía Axial Computerizada aplicada al análisis de obras de arte, con una destacada aportación de publicaciones en esta materia.



María Castell-Agustí
mcastell@crbc.upv.es
Universitat Politècnica de València (UPV)
https://orcid.org/0000-0002-2561-2666

Licenciada en Bellas Artes por la Facultad de Bellas Artes de San Carlos de Valencia y doctora por la Universitat Politècnica de València, donde actualmente ejerce su labor docente como profesora Titular en el Departamento de Conservación y Restauración de Bienes Culturales y como miembro investigador en el Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio (IRP). Desarrolla diferentes líneas de investigación enfocadas principalmente al estudio técnico y conservativo de la pintura sobre soporte textil, profundizando en el análisis de materiales adhesivos y fibras textiles en los tratamientos de entelados, así como al estudio de sistemas de tensado y estabilización de pintura sobre lienzo. Ha participado también activamente en diferentes congresos, jornadas y foros tanto nacionales como internacionales de especial relevancia en el campo de la conservación y restauración de pintura de caballete, aportando nuevas tecnologías y métodos de intervención que se han publicado en diferentes monografías, artículos y ponencias de carácter científico.



Antoni Colomina-Subiela
ancosu@upv.es
Universitat Politècnica de València (UPV)
https://orcid.org/0000-0003-3447-3730

Profesor del Departamento de Conservación y Restauración de Bienes Culturales; investigador del Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio; y director del Área de Fondo de Arte y Patrimonio de la Universitat Politècnica de València. Sus líneas de acción e investigación se centran en los procesos de limpieza de superficies pictóricas; las industrias creativas al servicio de la fiesta y sus valores específicos como patrimonio inmaterial; y la intervención curativa y restauración de la escultura en soporte orgánico y el arte contemporáneo.

Artículo enviado 05/08/2024
Artículo aceptado el 06/04/2026

https://doi.org/10.37558/gec.v29i1.1329



La aportación de la investigación científica en el estudio de la policromía del gótico valenciano en el sepulcro de Boil del Convento de Santo Domingo

Livio Ferrazza, David Juanes Barber

Resumen: Los estudios científicos de obras del gótico valenciano presentan una gran relevancia para ampliar la investigación historiográfica y técnica, ya que aún existen dificultades para atribuir obras y diferenciar los talleres que trabajaron en Valencia. Los análisis de caracterización de materiales son muy útiles para aclarar cuestiones de autoría, ya que revelan información clara sobre el proceso de ejecución y permiten un estudio comparativo de obras con características estilísticas y técnicas similares. En el presente trabajo se expone el estudio realizado sobre la policromía en piedra del sepulcro de Boil del Convento de Santo Domingo de Valencia. Mediante microscopía óptica (MO), microscopía electrónica de barrido acoplada a un sistema de microanálisis (SEM-EDX), microscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y cromatografía-espectrometría de masas (GC/MS), ha sido posible estudiar la secuencia estratigráfica de la policromía y determinar los mecanismos de alteración que afectan a los materiales pictóricos.

Palabras clave: piedra policromada, arte gótico valenciano, SEM-EDX, FTIR-ATR, GC/MS, cloruro de plomo

The contribution of scientific analyses to the study of the polychromy of the Valencian gothic Boil family tomb in the Convent of Santo Domingo

Abstract: Scientific studies of works belonging to the Valencian Gothic present an important relevance in order to broaden historiographical and technical research, since there are still difficulties in attributing works and differentiating between the workshops that worked in Valencia. Material characterization analyses are very useful to clarify authorship issues, since they reveal clear information about the execution process and allow for a comparative study of works with similar stylistic characteristics and techniques. In the present work the study carried out on the polychromy in stone of the tomb of Boil of the Convent of Santo Domingo in Valencia is exposed. Using optical microscopy (OM), scanning electron microscopy coupled to a microanalysis system (SEM-EDX), Fourier transform infrared (FTIR) and chromatography-mass spectrometry (GC/MS), it has been possible to study the stratigraphic sequence of polychromy and determine the mechanisms of alteration affect the pictorial materials.

Keywords: stone polychromy, valencian gothic art, SEM-EDX, FTIR-ATR, GC/MS, lead chloride

O contributo dos estudos científicos para o estudo da policromia do gótico valenciano no sepulcro de Boil do Convento de Santo Domingo

Resumo: Os estudos científicos de obras do gótico valenciano apresentam grande relevância para aprofundar a investigação historiográfica e técnica, uma vez que ainda existem dificuldades na atribuição de obras e na distinção dos ateliers que trabalharam em Valência. As análises de caracterização de materiais são muito úteis para esclarecer questões de autoria, pois fornecem informação clara sobre o processo de execução e permitem um estudo comparativo de obras com características estilísticas e técnicas semelhantes. No presente trabalho, expõe-se o estudo realizado sobre a policromia em pedra do sepulcro de Boil do Convento de Santo Domingo de Valência. Através de microscopia ótica (MO), microscopia eletrónica de varrimento acoplada a um sistema de microanálise (SEM-EDX), espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e cromatografia acoplada à espectrometria de massas (GC/MS), foi possível estudar a sequência estratigráfica da policromia e determinar os mecanismos de alteração que afetam os materiais pictóricos.

Palavras-chave: pedra policromada, arte gótica valenciana, SEM-EDX, FTIR-ATR, GC/MS, cloreto de chumbo

Introducción

Entre los elementos que conforman el conjunto del Real Convento de Santo Domingo de Valencia, lo más notable de su claustro gótico es la Sala Capitular, construida en estilo gótico entre 1310-1320 y costeada por el caballero don Pedro Boil (Benito Goerlich 1989, Aparici Navarro 2009). En ella se reunía la antigua comunidad religiosa para la toma de decisiones o actos de especial relevancia como la toma de hábitos. Esta sala alberga el sepulcro doble de los Boil de mediados del siglo XV [Figura 1], al lado del evangelio, adosado al fondo. Este monumento funerario está dividido en dos urnas, cada cual, con su friso historiado, bajo un arco ojival (Zaragozá Catalán 1995). Su dimensión es de 4,18 m de alto por 1,65 m de ancho y fue esculpido a expensas de Berenguer Vives Boil, señor de Bétera.

El sepulcro consta de urna cineraria, estatua inferior, friso inferior, estatua y friso superiores; todo enmarcado por dos columnas cuadradas, prolongadas en aguja, que sostienen una arquivolta exornada con hojas y semicírculos trilobulados. La estatua yacente superior corresponde a don Ramón Boil III, señor de Bétera y virrey de Nápoles en el reinado de Alfonso V el Magnánimo, mientras que la estatua inferior pertenece a don Ramón Boil II, señor de Bétera (Español 2007).

El friso historiado inferior representa diecisiete figuras humanas en las que se hacen patentes las actitudes y gestos de dolor reflejados con gran maestría y arte por parte del escultor desconocido [detalle de la Figura 2]; en el superior, en el que igualmente se representa una ceremonia fúnebre de carácter religioso, destaca la presencia de un prelado que está bendiciendo los restos mortales y, de nuevo, vemos afirmarse el buen hacer artístico del escultor en el tallado admirable de las figuras, en la expresión de los rostros, en el plegado de los paños y en la gracia de los ademanes.

Esta sala fue restaurada primeramente en 1717, pero cuando surgió la necesidad de trasladar el sepulcro en 1865, se disputó entre el Museo Arqueológico Nacional de Madrid y la Comisión de Monumentos de Valencia, llegando a la solución de dividirlo en dos partes y dar la mitad a cada una de las instituciones (Caruana Reig 1920). Solo en el año 1952 volvieron a integrarse ambas urnas en su estado primitivo, gracias a la labor de restauración emprendida por el capitán general Gustavo Urrutia González (Zaragozá Catalán 2000, Gascó Pelegrí 1975, Catalá Gorges 1983). El sepulcro sería restaurado por el pintor y escultor valenciano Carmelo Pastor Pla (Valencia 1924 - Aquisgrán 1966).

Tras años de deterioro causado principalmente por el paso del tiempo, por los cambios bruscos de los parámetros termo-higrométricos, por la cristalización de sales solubles y por los depósitos de la suciedad procedente del medio ambiente, el sepulcro actualmente ha perdido su antiguo



Figura 1.- Sepulcro doble de los Boil de mediados del siglo XV. Fuente: IVCR+i.



Figura 2.- Detalle del friso historiado inferior. Fuente: IVCR+i.

esplendor. Testigos de esta antigua magnificencia son los restos, que aún se conservan, de una policromía rica y cuidada, con abundante presencia de oro en ropajes, barbas o alas [véanse los detalles de la Figura 3].

Con el intento de aclarecer aspectos relacionados con la evolución técnico-artística de la policromía gótica valenciana de los siglos XV-XVI, se ha planificado una



Figura 3.- Detalle de los elementos escultóricos del sepulcro de Boil. Fuente: IVCR+i.

campaña de estudios científicos mediante extracción de muestras de las capas pictóricas en el sepulcro. Los resultados tendrán la finalidad de relacionar el *modus operandi* presente en diferentes grupos escultóricos en piedra policromada que se conservan en la Comunidad Valenciana del periodo gótico. En esta época es cuando se puede observar cómo la policromía sobre piedra, especialmente de relieve, en la estatuaria ubicada en interiores de iglesias, monasterios, etc., se va perfeccionando y desarrolla toda una gama de posibilidades en técnicas y riquezas de acabados, equiparable a la técnica practicada sobre madera. A este nivel de calidad contribuirá el hecho de que el material lapídeo, correctamente tallado y preparado, ofrece un excelente material de base sobre el que poder ejecutar una cuidada labor de policromado (Barranquero *et al.* 1996, Navarro Gascón *et al.* 1996).

Asimismo, estos estudios son necesarios para determinar las intervenciones realizadas sobre el sepulcro, a través de la caracterización tanto de los materiales históricos, así como de los añadidos en repintes o mediante intervenciones de conservación, y dilucidar los mecanismos de alteración y degradación que afectan a la conservación de las superficies pictóricas.

Generalmente, las policromías de estos monumentos resultan gravemente alteradas u ocultas por diferentes mecanismos tanto naturales como antrópicos, que dificultan a los historiadores del arte el estudio histórico y estilístico de la pintura medieval, de sus colores y significado, el uso de elementos de decoración, etc. Además, una de las características del periodo del gótico internacional es la movilidad de los artistas, los viajes de aprendizaje, las búsquedas de nuevos y lucrativos clientes, que ha hecho especialmente complejo el análisis de este movimiento y sus producciones, por lo cual es importante seguir estas investigaciones que, convenientemente interpretadas, permiten identificar el conjunto de técnicas y procedimientos empleados por parte de los policromadores, que podrían posibilitar la datación de las policromías y establecer las relaciones e incluso, en determinados casos, una aproximación a la autoría de las mismas (Zaragozá Catalán 2010, García Marsilla 1998).

Metodología

Con la necesidad de aportar informaciones sobre la correcta interpretación de los estratos pictóricos originales y añadidos y sobre los mecanismos de alteración y degradación de los materiales constitutivos ha hecho necesaria la extracción de un número seleccionado de fragmentos del soporte pétreo y de un más amplio número de micro-muestras de las capas de policromía.

La metodología seguida es la preparación de las muestras de pintura en sección estratigráfica mediante probetas de metacrilato. A través de la observación microscópica y el microanálisis de pigmentos, se ha determinado la secuencia de las capas pictóricas, la mezcla de pigmentos, su disposición y distribución, como aspectos característicos de la técnica pictórica. Asimismo, el estudio superficial o estratigráfico de las muestras ha sido necesario para determinar los mecanismos de alteración y degradación de los materiales constituyentes, así como para caracterizar pátinas, concreciones salinas o antiguos materiales de intervención.

Las muestras, previamente a su preparación, se observaron con el microscopio digital Leica modelo DVM6A con el que se realizaron microfotografías. Mediante este estudio se realizó un examen general de la muestra y se realizó la selección de fragmentos representativos para su posterior estudio estratigráfico, espectroscópico o cromatográfico. Sobre las muestras preparadas en sección estratigráfica, se realizaron observaciones y microfotografías mediante microscopio óptico Nikon modelo ECLIPSE 80i con cámara Nikon DS-Fi1, provisto de luz reflejada y polarizada e iluminación UV, con aumentos de 50X a 500X. A continuación, se observaron al microscopio electrónico de barrido Hitachi Ltd, (VP-SEM), modelo S–3400N. Se capturaron imágenes en modalidad electrones retrodispersados (BSE) a distintos aumentos, desde 50x hasta 1000x aproximadamente, realizando

un detallado estudio sobre el tamaño y morfología de los granos de pigmentos, espesores de los estratos pictóricos, distribución y localización de los pigmentos en las distintas capas constituyentes.

Para la identificación de los pigmentos, cargas minerales inertes, láminas metálicas y materiales de alteración, se utilizó la técnica de microscopía electrónica de barrido – microanálisis por dispersión de energías de rayos X (SEM-EDX), empleando un equipo de Bruker Corporation XFlash® con un voltaje de aceleración 20 kV.

Las muestras también se analizaron utilizando la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) en modo reflectancia total atenuada (ATR), en el intervalo 4000-400 cm-1 con una resolución de 4 cm^{-1}, para la identificación de los componentes orgánicos e inorgánicos, empleando un espectrómetro Bruker-Tensor II con el accesorio ATR de cristal de diamante acoplado a la bancada del equipo. La identificación de los aglutinantes se ha realizado mediante análisis de Gas Cromatografía acoplada a Espectrometría de Masas (GC/MS).

Resultados y Discusión

— *Soporte pétreo*

Las estratigrafías han permitido observar y analizar el soporte pétreo mediante SEM-EDX. En general se observa un soporte con un cierto grado de heterogeneidad granular. Los microanálisis EDX [Figura 4] detectan como elementos químicos principales el calcio y magnesio relacionados a la dolomita, mineral compuesto de carbonato de calcio y magnesio ($CaMg(CO_3)_2$). Se observa la presencia esporádica de grandes cristales constituidos únicamente por calcio (calcita). Destaca la presencia de localizadas cristalizaciones de sulfato de calcio ($CaSO_4$), gracias a la presencia de altas cantidades de azufre asociado al calcio. En general, la piedra se presenta con un alto grado de porosidad que provoca una separación granular.

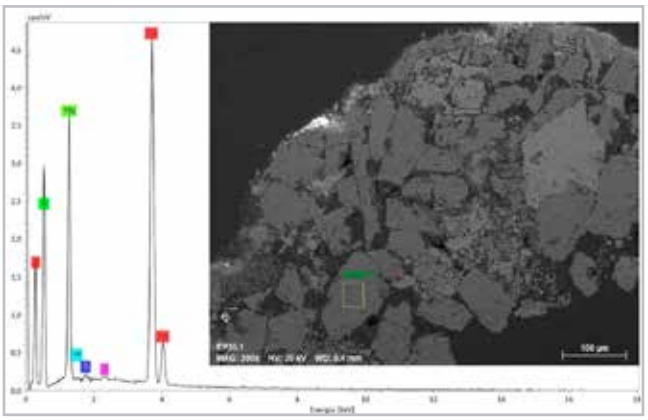


Figura 4.- Imagen SEM en modalidad electrones retrodispersados BSE de la sección estratigráfica y microanálisis EDX de un grano de dolomita. Fuente: IVCR+i.

Estratos pictóricos

Los materiales pictóricos necesarios para lograr los matices de colores son obtenidos mediante pigmentos tradicionalmente en uso en la pintura gótica valenciana entre los siglos XV-XVI. Las secciones transversales de las muestras de pintura han puesto de manifiesto una estructuración interna algo sencilla, generalmente configurada por la superposición de una o dos capas pictóricas aplicadas sobre una imprimación blanca a base de blanco de plomo [imagen de microscopía óptica de la Figura 5 y microanálisis EDX de la Figura 7], a diferencia de la pintura azul, donde la capa pictórica a base de azurita se aplicó sobre una imprimación de tonalidad grisácea elaborada con blanco de plomo con negro carbón vegetal [véase la imagen de la sección estratigráfica de la Figura 6], necesaria como base preparatoria de la policromía.

El uso de preparaciones oscuras bajo la capa pictórica de azurita era una técnica común por razones tanto estéticas como prácticas, en cuanto permite que el pigmento presente su máxima profundidad óptica, densidad y saturación cromática. La azurita presenta una dependencia crítica entre su color y su granulometría. A diferencia de otros pigmentos minerales, su intensidad cromática está intrínsecamente ligada al tamaño de su partícula. Cuando el cristal de azurita es sometido a una molienda excesiva, el aumento de la superficie específica y la fractura de los planos cristalinos provocan un fenómeno de dispersión de luz blanca (scattering) predominante, provocando la pérdida de la saturación, derivando en un tono azul pálido y acromático (Cardell *et al.* 2017). Por ello, su aplicación requiere partículas gruesas que conserven la integridad de la red cristalina para mantener una eficiente absorción selectiva de la luz. Asimismo, la eficacia visual se optimiza mediante la aplicación de fondos cromáticamente absorbentes de tonalidades grises o negras (Gettens *et al.* 1993, Doerner 1998).

Los colores empleados en las policromías se encuentran englobados dentro de la paleta medieval característica, limitada por una gama de pigmentos tales como el blanco de plomo, pigmentos ocres a base de óxido-hidróxido de hierro, minio, bermellón y azurita. En cuanto a la técnica pictórica, es posible que se trate de una pintura al óleo o técnica mixta, ya que los análisis GC-MS detectan ácidos grasos relacionados con la presencia de un aceite secante, tipo linaza, utilizado como aglutinante.

En la muestra de dorado, extraída del ala de una figura del ángel, se ha podido observar la técnica de dorado al mordiente [Figura 8], donde la fina lámina de pan de oro se asienta sobre una preparación anaranjada oleosa

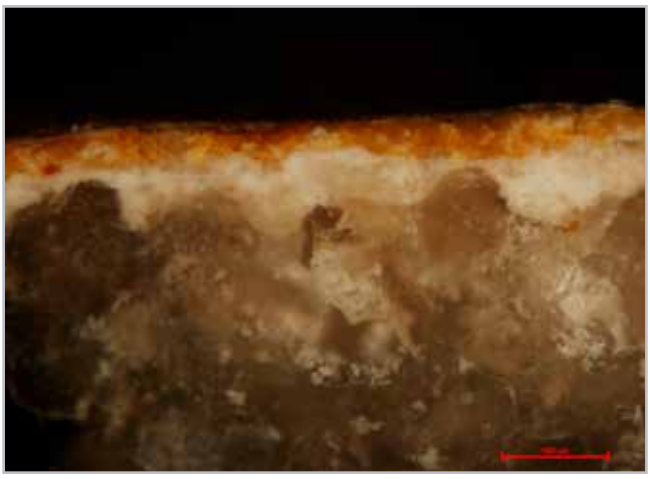


Figura 5.- Imagen de la sección estratigráfica de una muestra de policromía ocre. Microscopía óptica con fuente de luz visible, 200X. Fuente: IVCR+i.

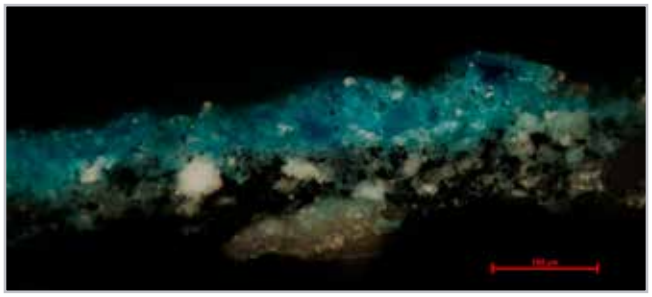


Figura 6.- Imagen de la sección estratigráfica de una muestra de policromía azul. Microscopía óptica con fuente de luz visible, 200X. Fuente: IVCR+i.

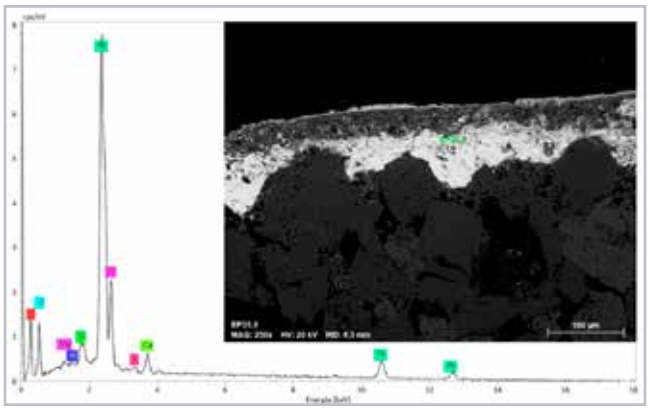


Figura 7.- Imagen SEM en modalidad electrones retrodispersados BSE de la sección estratigráfica y microanálisis EDX de la policromía blanca. Fuente: IVCR+i.

a base de minio y pigmentos ocres (González Alonso 1997). Esta técnica tiene la ventaja de poder ser aplicada en cualquier superficie, como madera, metal o piedra, usando panes de oro de diferentes grosores y calidades, y ofreciendo la posibilidad de poder dorar en exteriores. A nivel estético, el dorado al mordiente tiene un tono más cálido y amarillo y ofrece un juego de irisaciones dependiendo de la incidencia de la luz. En esta técnica, la superficie metálica de la lámina de oro no permite el bruñido, por lo cual no es posible lograr un dorado con aspecto brillante como se obtiene mediante la técnica del dorado al agua (Calvo Manuel 2003, Bruquetas Galán 2002).

La presencia de aceite secante se ha determinado mediante análisis por GC-MS a través de la identificación de los ácidos grasos característicos (cromatograma de la Figura 9).

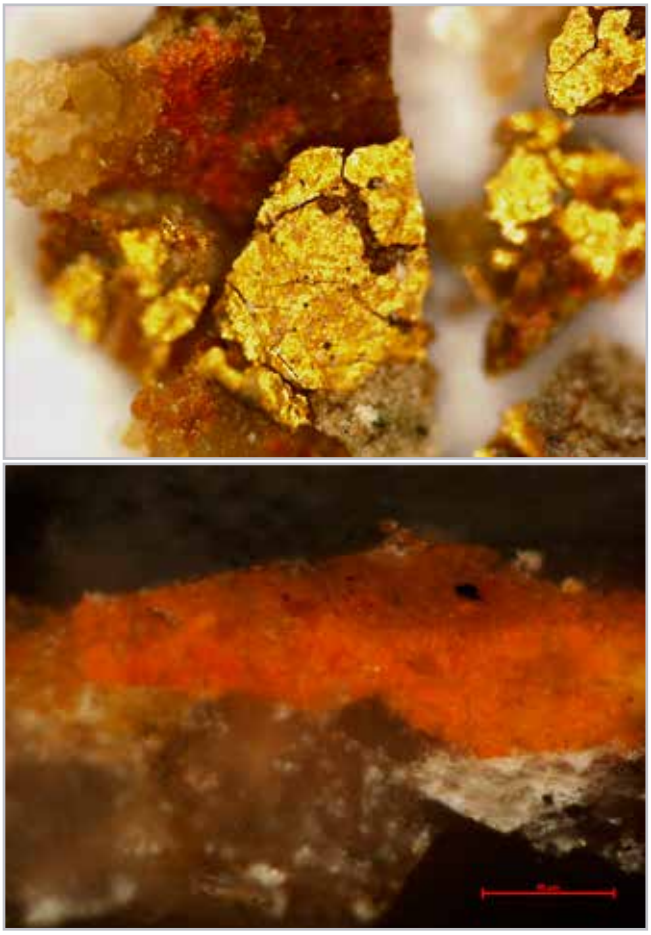


Figura 8.- Imagen de microscopía digital de los fragmentos que componen la muestra de dorado. Imagen de la sección estratigráfica de la muestra de dorado obtenida mediante microscopía óptica con fuente de luz visible, 500X. Fuente: IVCR+i.

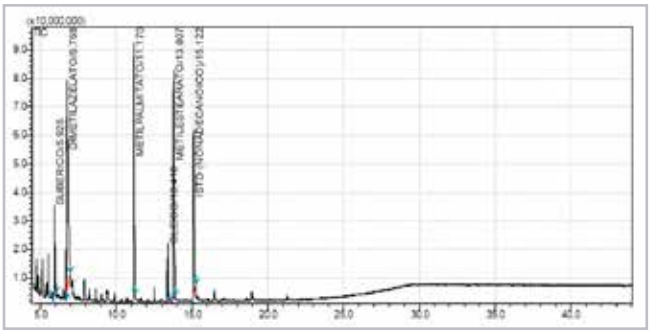


Figura 9.- Cromatograma GC/MS de la muestra de dorado. Fuente: IPCE.

Estratos superficiales

Las pátinas superficiales alteran el cromatismo original de las policromías, presentando generalmente tonalidades grisáceas u oscuras tal y como se aprecia en las imágenes de la Figura 10 relacionadas con observaciones mediante microscopia estereoscópica de las muestras extraídas del sepulcro. Los análisis EDX detectan la presencia de los elementos químicos del calcio, azufre, silicio, aluminio, etc., relacionados con compuestos como el sulfato de calcio con depósitos, en menores concentraciones, de compuestos silicatados (espectros EDX de las Figuras 11 y 12). De manera localizada se detectan cristalizaciones de sales a base de sulfato de potasio o estratos grisáceos constituidos por compuestos de plomo enriquecidos en cloro. De la misma forma, los análisis FTIR-ATR [espectro de la Figura 13], detectan los compuestos mineralógicos del sulfato de calcio con los picos de absorción a 1107, 669 y 596 cm^{-1}, la presencia de los oxalatos de calcio con el pico característico a 1321 cm^{-1} y, en menores cantidades, el carbonato de calcio y los compuestos del silicio.

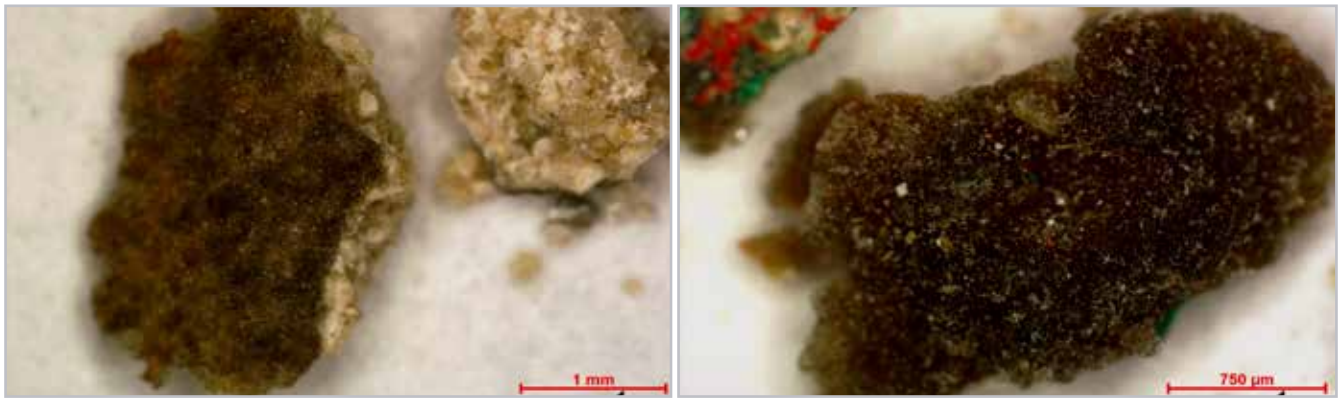


Figura 10.- Fragmentos que componen la muestra EP35.12. Imágenes de microscopía digital. Fuente: IVCR+i.

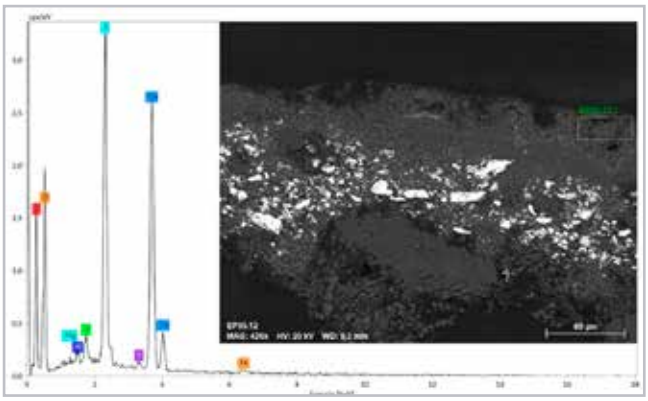


Figura 11.- Imagen SEM en modalidad electrones retrodispersados BSE de la sección estratigráfica y microanálisis EDX de un área de la capa superficial. Fuente: IVCR+i.

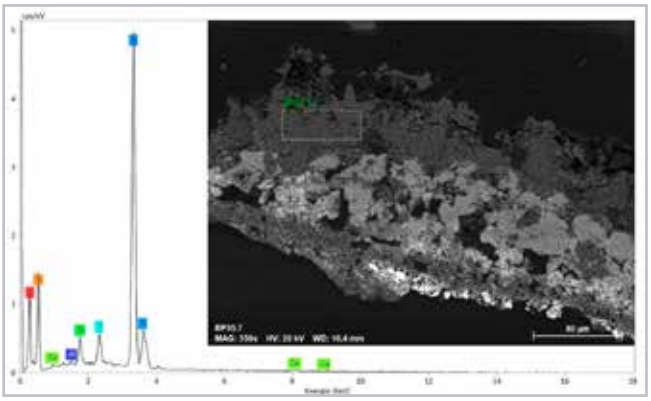


Figura 12.- Imagen SEM en modalidad electrones retrodispersados BSE de la sección estratigráfica y microanálisis EDX de un área de la primera capa de preparación. Fuente: IVCR+i.

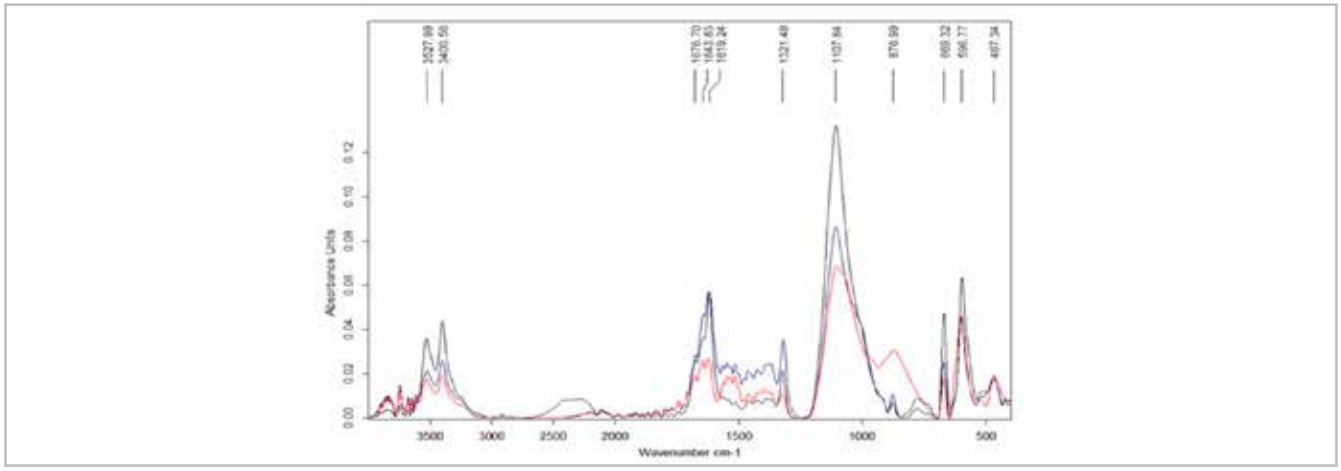


Figura 13. -Espectros FTIR-ATR de los depósitos presentes en superficie. Fuente: IVCR+i.

Estado de conservación

El estado de conservación del sepulcro se puede considerar bastante preocupante, tanto en relación con el soporte pétreo por sus características de porosidad, como en relación con las capas pictóricas. De una manera esquemática se pueden clasificar las alteraciones como un deterioro ligado a las variaciones de las condiciones ambientales, una alteración cromática de las superficies policromadas por depósitos de suciedad procedente del medio ambiente, así como por cristalizaciones de sales, un deterioro ligado a intervenciones de estabilización realizadas en el pasado y, por último, una alteración relacionada con la formación de compuestos enriquecidos en cloro. La alteración de pigmentos se manifiesta sobre todo en las capas de policromía originalmente azules, realizadas con azurita pero que actualmente presentan un tono verdoso. Tal y como se observa en varias muestras [Figura 14], con diferentes grados de alteración del pigmento, se observa en las microfotografías estratigráficas de la Figura 15, que en la capa azul verdosa se detectan granos azules de azurita y granos verdes de un compuesto de cloro y cobre que podría estar relacionado con una alteración de la azurita, con la consiguiente formación de un posible cloruro de cobre verde [espectro del microanálisis EDX de la Figura 16]. Como es sabido, la azurita es un mineral natural formado por carbonato básico de cobre que, como pigmento azul, ha sido empleado en las técnicas artísticas, sobre todo entre los siglos XV-XVII. Es un pigmento bastante estable en condiciones normales, pero con el paso del tiempo y en condiciones adversas (calor, humedad, aportación de sales, etc.) puede adquirir tonos verdosos o, incluso, ennegrecerse (Boularand 2010).

La presencia de compuestos de nueva formación a base de plomo y cloro están relacionados, sobre todo, con la

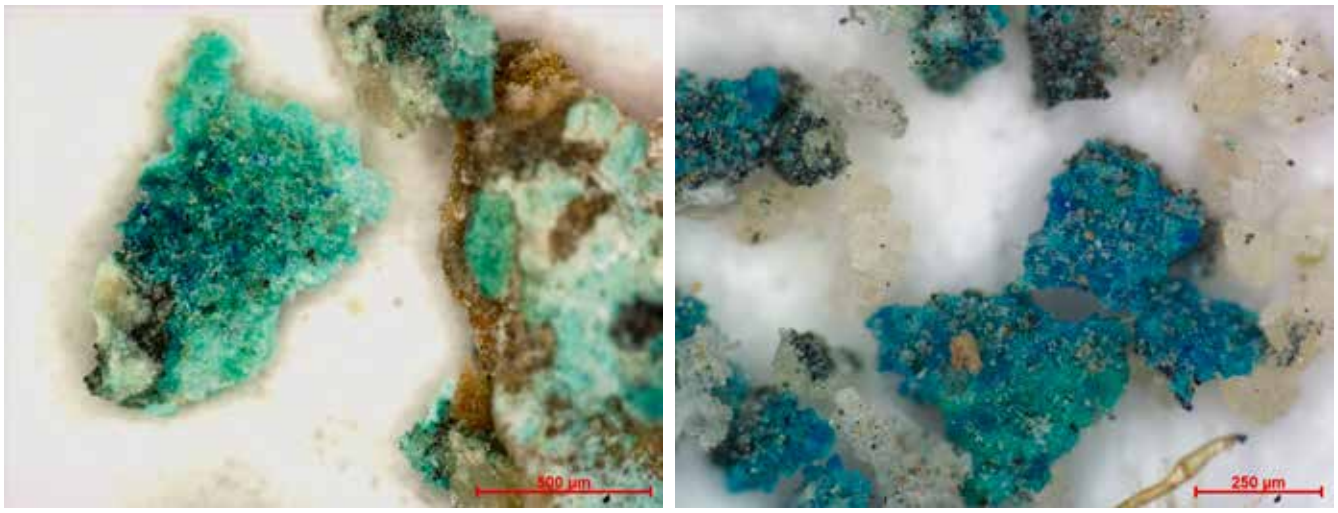


Figura 14.- Fragmentos de muestras con diferentes grados de alteración de la policromía azul. Imágenes de microscopía digital. Fuente: IVCR+i.

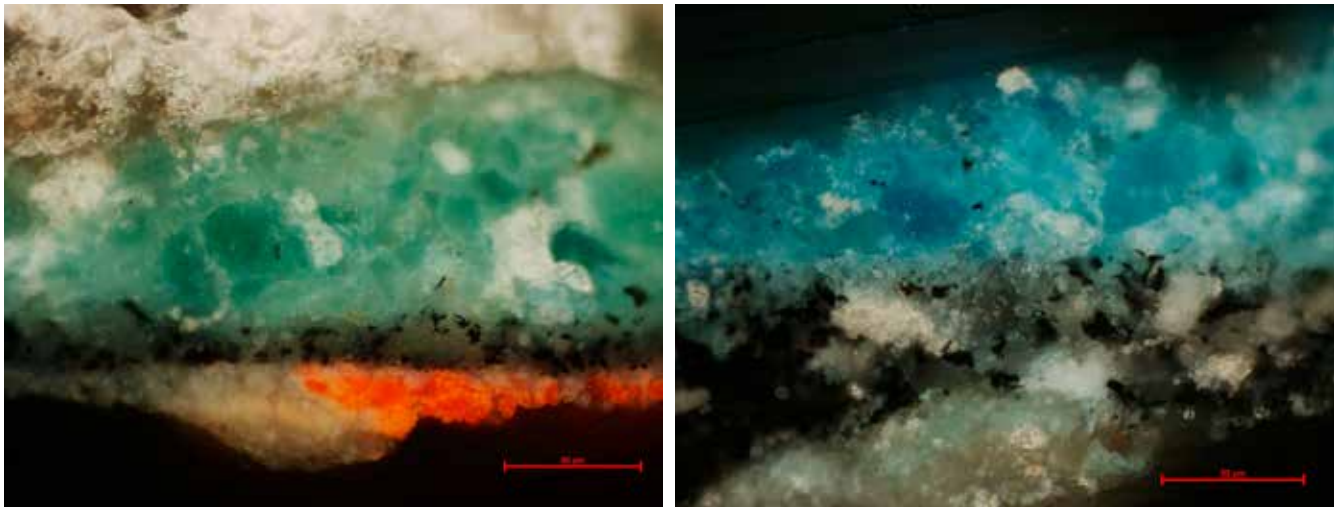


Figura 15.- Imagen de la sección estratigráfica de la muestra EP35.7. Microscopía óptica con fuente de luz visible, 500X. Fuente: IVCR+i.

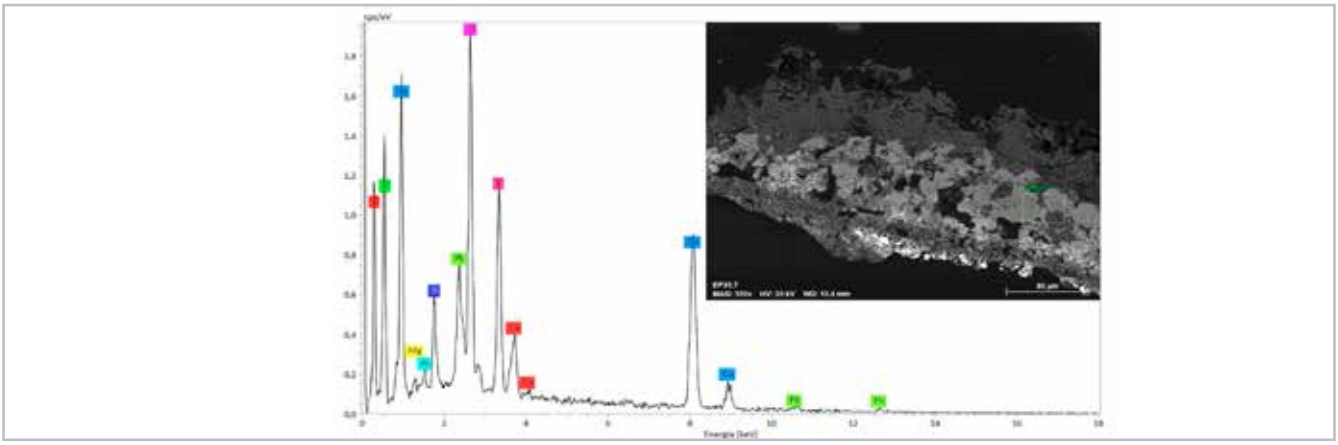


Figura 16.- Imagen SEM en modalidad electrones retrodispersados BSE de la sección estratigráfica y microanálisis EDX de un área de la primera capa de preparación. Fuente: IVCR+i.

policromía de las encarnaciones [imágenes de las figuras 17 y 18], donde resultan ser abundantes y posiblemente problemáticos a fines de conservación, además de producir superficies alteradas cromáticamente ya que presentan tonalidades grisáceas. Las observaciones y análisis efectuados indican a compuestos de alteración enriquecidos en cloro y plomo con distintas características texturales y composicionales [microanálisis EDX de la Figura 19]. La presencia de este tipo de compuestos ha sido ya puesto de manifiesto por anteriores estudios, son ejemplos la policromía de la Portada de Los Apóstoles del siglo XV de la Basílica Arciprestal de Santa María La Mayor de Morella (Castellón) o en el Pórtico de la Gloria, obra del siglo XII, de la Catedral de Santiago de Compostela (Ferrazza *et al.* 2019, García Rodríguez *et al.* 2021).

En las capas de policromía, se identifica una transformación de los compuestos originales a base de blanco de plomo en cloruros de plomo, progresando dicha transformación tanto desde la superficie externa como desde la superficie interna de las capas. Las zonas más degradadas se caracterizan por una mayor porosidad, microfisuración y descohesión. Estudios similares realizados en otras obras, han identificado fosgenita ($Pb_2Cl_2CO_3$), laurionita (PbCl(OH)), paralaurionita (PbCl(OH)) y cotunita ($PbCl_2$) (Pérez García *et al.* 2017). Es evidente que el plomo de estos agregados clorados estaría relacionado con los compuestos originales de plomo (blanco de plomo), sin embargo, la presencia de cloro parece indicar una entrada generalizada de este elemento químico de origen incierto, posiblemente por la aplicación de productos clorados en intervenciones de lavado (jabones o lejías) o de eliminación del biodeterioro mediante productos como el cloruro de benzalconio o biocidas organoclorados.

En cuanto a la presencia de los oxalatos de calcio detectados mediante FTIR-ATR, su origen puede ser relacionado a posibles mecanismos de degradación oxidativa de materiales orgánicos, tales como aceites secantes, ceras, gomas, etc., aplicados en el pasado en determinados tratamientos con fines estéticos o protectores (Rampazzi 2019).



Figura 17.- Punto de extracción de la muestra de carnación y fragmentos que componen la muestra. Imagen de microscopía digital. Fuente: IVCR+i.

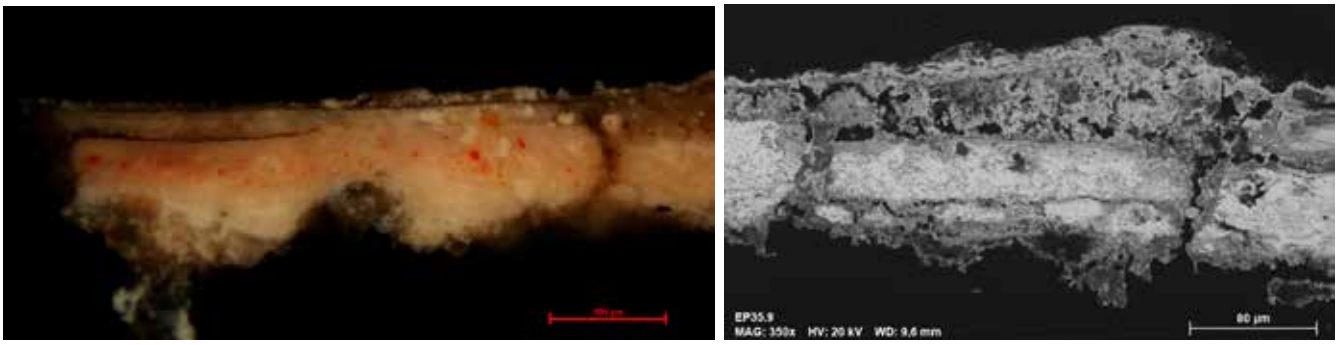


Figura 18.- Imagen de la sección estratigráfica de la muestra de encarnación obtenida con microscopía óptica con fuente de luz visible, 200X y con microscopía electrónica de barrido (SEM) en modalidad electrones retrodispersados (BSE). Fuente: IVCR+i.

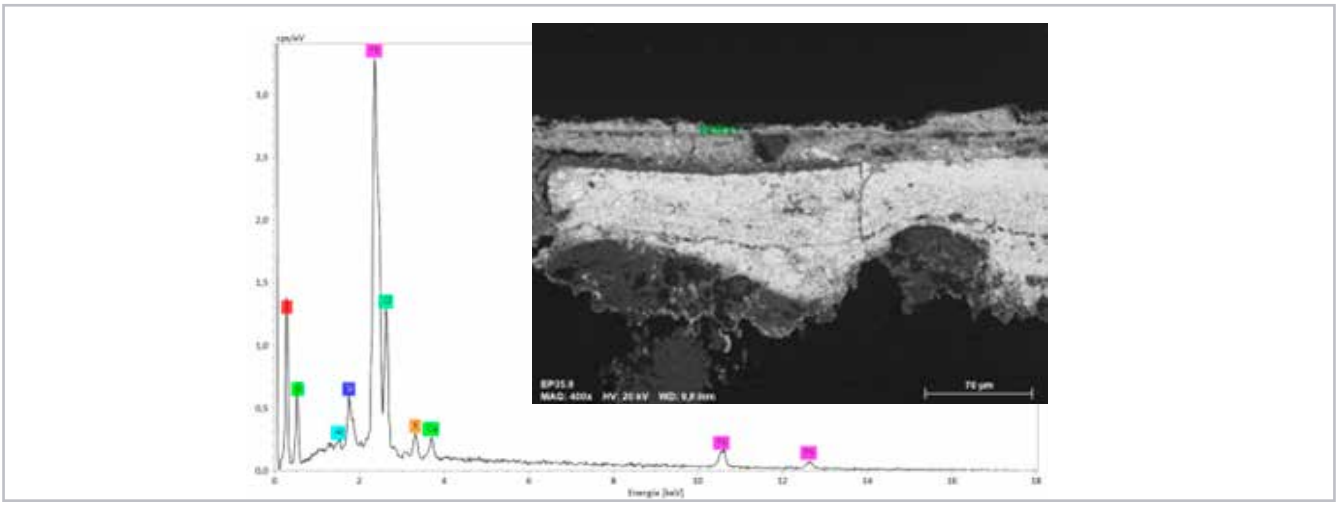


Figura 19.- Imagen SEM en modalidad electrones retrodispersados BSE de la sección estratigráfica y microanálisis EDX de un área de la capa superficial. Fuente: IVCR+i.

Conclusiones

El estudio pormenorizado de los restos de policromía presentes en el sepulcro doble de los Boil ha proporcionado una valiosa información sobre la secuencia de estratos que componen la policromía original y dilucidar la naturaleza y composición de los pigmentos, de las cargas inertes, de las láminas metálicas, así como del aglutinante presente en las policromías. Esta información habrá de ser complementada y contrastada con el conjunto de aportaciones proporcionadas por los historiadores del arte. Igualmente, la investigación realizada sobre el monumento ha sido determinante para esclarecer aspectos relacionados con los mecanismos de alteración y degradación que están afectando la conservación de los materiales pictóricos. En este sentido, el trabajo realizado, conjuntamente con otros agentes involucrados en la salvaguarda del patrimonio, va a ser relevante en la toma de decisiones para las actuaciones futuras de las intervenciones de conservación y restauración de las policromías sobre piedra.

Otro fin de este trabajo de investigación ha sido también el de contribuir, en la medida de nuestras posibilidades, a una mejor comprensión de los aspectos técnicos y artísticos que caracterizan la policromía sobre piedra durante el periodo del gótico valenciano, así como a la recuperación histórica y estética de estas obras, tomando conciencia sobre la importancia del color en esta tipología de obras. Asimismo, los resultados son necesarios para ampliar el conocimiento sobre la estructura de los compuestos de nueva formación enriquecidos con cloro a partir de los pigmentos de plomo empleados. En este sentido, resulta importante seguir la caracterización de la mineralogía de estos compuestos presentes en numerosas obras en piedra policromada estudiadas, valorar la estabilidad y el comportamiento físico-químico de los mismos a largo plazo, con la perspectiva de mejorar los tratamientos de estabilización durante la fase de conservación y restauración.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Ministerio de Ciencia e Innovación su apoyo mediante el Programa Estatal de Promoción del Talento y su Empleabilidad en I+D+I (PTA2019-002526-C) y a la Capitanía General de Valencia su gran apoyo y colaboración. Agradecemos también la colaboración de Consuelo Imaz Villar del Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE) por la aportación analítica proporcionada en este estudio.

Referencias

APARICI NAVARRO, M. (2009). "Guía del Convento de Santo Domingo. Antigua Capitanía General y sede actual del Cuartel General de la Fuerza de Maniobra". Folleto. Valencia, Fundación Cultural Bancaja.

BOULARAND, S. (2010). "Degradation of azurite in mural paintings: distribution of copper carbonate, chlorides and oxalates by SRFTIR". Applied Physics A, 99, 363–375.

BENITO GOERLICH, D. (1989). "Exconvento de Santo Domingo". Valencia y Murcia, vol. 4, serie La España Gótica. Encuentro ediciones, Madrid, 312-318.

BRUQUETAS GALÁN, R. (2002). "Técnicas y materiales de la pintura española en los siglos de oro". Fundación de Apoyo a la Historia del Arte Hispánico, Madrid.

CALVO MANUEL, A.M. (2003). "Conservación y restauración. Materiales, técnicas y procedimientos. De la A a la Z". Ediciones del Serbal, S.A.

CARDELL, C., HERRERA, A., GUERRA, I., RODRÍGUEZ SIMON, L. Y ELERT, K. (2017). "Pigment-size effect on the physico-chemical behavior of azurite-tempera dosimeters upon natural and accelerated photo aging", Dyes and Pigments, 141, 53-65.

CARUANA REIG, J. (1920). "El doble sepulcro de los Boil que se conserva en el Museo Arqueológico Nacional y en el Provincial de Valencia, no es de los señores de Manises", Centro de Cultura Valenciana, Valencia.

CATALÁ GORGES, M. A. (1983). "Real Convento de santo Domingo Capitanía General". Catálogo Monumental de Valencia, 200–206.
DOERNER, M. (1998). "Los materiales de pintura y su empleo en el arte", Editorial Reverté.

ESPAÑOL, F. (2007). "El Córrer les armes. Un aparte caballeresco en las exequias medievales hispanas". Anuario de Estudios Medievales, 37, 867-905.

FERRAZZA, L., PASTOR VALLS, M.T., CONTRERAS ZAMORANO, G.M., JUANES BARBER, D., RADVAN, R., CHELMUS, A., RATOIU, L., GHERVASE, L., CORTEA, M.I. Y ORTIZ, M.P. (2019). "Multidisciplinary Approach Applied to the Diagnosis of the Facade of the Arciprestal Church of Santa María de Morella (Castellón, Spain)", Scanning, vol. 2019, Article ID 2852804. https://doi.org/10.1155/2019/2852804

GARCÍA MARSILLA, J.V. (1998). "La tumba de un banquero. El sepulcro de Arnau de Valeriola en el Museo de Bellas Artes de Valencia", El Mediterráneo y el Arte Español.

GARCÍA RODRÍGUEZ, M.A., PÉREZ GARCÍA, P., FERRAZZA, L., PASTOR VALLS, M.T., ÍMAZ VILLAR, C. Y YANGUAS, N. (2021). "Estudios analíticos en el Pórtico de la Gloria. Metodología científica aplicada al seguimiento de los tratamientos de restauración", en La restauración del Pórtico de la Gloria, Catedral de Santiago de Compostela. Documentación, estudios y conservación, Ministerio de Cultura y Deporte, 311-334.

GASCÓ PELEGRÍ, V. (1975). "El real monasterio de Santo Domingo. Valencia: Capitanía General", Ministerio de Educación y Ciencia, t. II: 381.

GETTENS, R. J., Y WEST FITZHUGH, E. (1993). "Azurite and Blue Verditer", en A. Roy (Ed.), Artists' Pigments: A Handbook of Their History and Characteristics, Vol. 2, Oxford University Press, 22-35.

GILART BARRANQUERO, N. Y BALAUST CLAVEROL, L. (1996). "Retablo gótico de piedra policromada de Albesa (Lleida)", Actas XI Congreso de Conservación y Restauración de Bienes Culturales, Diputación Provincial, Castellón de la Plana, 965-970.

GONZÁLEZ-ALONSO MARTÍNEZ, E. (1997). "Tratado del dorado, plateado y su policromía", Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia.

NAVARRO GASCÓN, J.V., GÓMEZ GONZÁLEZ, M.L. Y GAYO GARCÍA, M.D. (1996). "Estudio de la policromía y pátinas de los relieves del claustro del Monasterio de Santo Domingo de Silos (Burgos)", Actas XI Congreso de Conservación y Restauración de Bienes Culturales, Diputación Provincial, Castellón de la Plana, 589-602.

PÉREZ GARCÍA, P., M.ª GARCÍA RODRÍGUEZ, M.A. Y FERRAZZA, L. (2017). "Aportación de los estudios científicos a la restauración del Pórtico de la Gloria de la Catedral de Santiago de Compostela. Análisis de las alteraciones", en La Ciencia y el arte VI: Ciencias experimentales y conservación del patrimonio, Ministerio de Cultura, 134-151

RAMPAZZI, L. (2019). "Calcium oxalate films on works of art: A review". Journal of Cultural Heritage, Volume 40, 195-214.

ZARAGOZÁ CATALÁN, A. (2010). "El control de la forma en la arquitectura medieval valenciana: dibujo y oficios artísticos durante los siglos XIII y XIV", Historia de la Ciudad IV, Taberner Pastor F. (coord.), Col·legi Territorial d'Arquitectes de València.

ZARAGOZÁ CATALÁN, A. (2000). "Modos de construir en la Valencia Medieval, Bóvedas", Historia de la Ciudad I, Valencia, 76–88.

ZARAGOZÁ CATALÁN, A. (1995). "Antiguo convento de Santo Domingo (Valencia)", en Arquitectura Religiosa, Valencia, ISBN 84-482-1071-0, 114-129.

Autor/es



Livio Ferrazza
livio.ferrazza@ivcri.gva.es
Químico - Conservador científico del Institut Valencià de Conservació, Restauració i Investigació (IVCR+i)
https://orcid.org/0000-0002-4357-2979

Doctor en Química y Diplomado en Ciencias para la conservación de bienes culturales por la Universidad "La Sapienza" de Roma. Desde 2007 trabaja en el Laboratorio de Materiales del Instituto Valenciano de Conservación, Restauración e Investigación (IVCR+i), prestando apoyo en los análisis de muestras de bienes culturales tales como pintura de caballete, pintura sobre tabla, pintura mural, piedra, textil, papel y metal. Ha participado en numerosas líneas de investigación con una destacada trayectoria en la evaluación tratamientos de estabilización y de limpieza de superficies policromadas, soporte pétreo y pinturas murales. Desde

2009 colabora con esta institución en los estudios analíticos y evaluación de los tratamientos de restauración en las pinturas murales de la Casa de Ariadna en Pompeya, en la Portada de Los Apóstoles de la Basílica Arciprestal de Morella (Castellón) o en la caracterización de materiales y evaluación de los tratamientos de limpieza en la pintura gótica valenciana como en el caso de la predela del Centenar de la Ploma del Victoria and Albert Museum de Londres. En 2014 recibe la beca Fundación Andrew W. Mellon colaborando con el Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE) de Madrid en la evaluación de la eficacia y del riesgo asociado a los diferentes sistemas de estabilización y de limpieza de la policromía sobre piedra en el Pórtico de la Gloria de la Catedral de Santiago de Compostela. Ha colaborado en la línea de investigación del proyecto PNIC2015-05: Protocolo de evaluación del riesgo para la intervención en conjuntos escultóricos de piedra policromada, a través del cual se ha desarrollado un protocolo para la evaluación del riesgo y la eficacia en los diferentes tratamientos a emplear (limpieza, desbiotización, fijación, consolidación).

Artículo enviado 21/11/2025
Artículo aceptado el 27/03/2026

https://doi.org/10.37558/gec.v29i1.1469



David Juanes Barber
david.juanes@ivcri.gva.es
Físico - Conservador científico del Institut Valencià de Conservació, Restauració i Investigació (IVCR+i)
https://orcid.org/0000-0002-5673-5853

Su carrera en el área de investigación en conservación del patrimonio cultural se inició en 1998 en la Universidad de Valencia, donde participó en el desarrollo de equipos portátiles de fluorescencia de rayos X para el análisis no invasivos de obras de arte. De 2003 a 2007 se incorporó como autónomo al Instituto del Patrimonio Histórico Español, donde se formó en las diferentes técnicas y metodologías para el estudio y diagnóstico del estado de conservación de las obras de arte, y colaboró en la puesta en marcha de una metodología de el análisis de los objetos del patrimonio histórico-artístico que optimiza el uso de técnicas con y sin muestreo. En 2007 se incorporó al Institut Valencià de Conservació, Restauració i Investigació (IVCR+i) de la Generalitat Generalitat, donde actualmente presta apoyo técnico y científico a los distintos departamentos de conservación y restauración. Ha participado en proyectos de I+D relacionados con la conservación y restauración del patrimonio histórico. Es autor de publicaciones científicas enfocadas en tecnologías aplicadas al estudio y conservación del patrimonio histórico principalmente a través del uso de técnicas no invasivas. Actualmente trabaja en la aplicación de tecnologías 3D en la conservación y restauración del Patrimonio Cultural, ejemplos recientes de esta línea son el estudio de la Fachada de los Apóstoles en Morella, la aplicación de la tomografía computarizada para el estudio de la escultura en madera y la tecnología GIS como herramienta para la gestión de resultados científicos y procesos de conservación en obras de arte.



Gestión de información para la conservación del patrimonio biocultural de Chichén Itzá, Yucatán, México

Helga Geovannini Acuña, Claudia Angélica Ocampo Flores, Alberto Emilio Ramírez Balam, Claudia García Solís

Resumen: Se presenta el diseño e implementación de un sistema de gestión de información para intervenciones de conservación en Chichén Itzá, concebido desde un enfoque biocultural y organizado mediante clasificación espacial, nomenclatura jerárquica y gestión documental. La propuesta articula una jerarquía multiescalar que parte del sitio hasta el elemento arquitectónico y la traduce en un árbol de carpetas, un esquema de codificación de 14 campos y un Entorno Común de Datos compatible con ISO 19650 y orientado por principios FAIR. Metodológicamente, el sistema se estructuró a partir de seis componentes operativos, pruebas piloto internas y un sondeo exploratorio a especialistas. Los resultados muestran una mejora en la trazabilidad edificio–espacio–elemento, una reducción de ambigüedades en la identificación de archivos y una recuperación más consistente de documentación técnica. En contextos con recursos limitados, el sistema ofrece una infraestructura mínima, replicable y escalable para ordenar, conservar y reutilizar información patrimonial.

Palabras clave: BIM, Entorno Común de Datos, HBIM, ISO 19650, jerarquía multiescalar, metadatos estandarizados, patrimonio biocultural, principios FAIR

Information management for the conservation of the biocultural heritage at Chichén Itzá, Yucatán, Mexico

Abstract: This article presents the design and implementation of an information management system for conservation interventions at Chichén Itzá, conceived from a biocultural perspective and organized through spatial classification, hierarchical nomenclature, and document management. The proposal articulates a multiscalar hierarchy ranging from the site to the architectural element and translates it into a folder tree, a 14-field coding scheme, and a Common Data Environment compatible with ISO 19650 and guided by FAIR principles. Methodologically, the system was structured around six operational components, internal pilot tests, and an exploratory survey of specialists. The results show improved building–space–element traceability, reduced ambiguity in file identification, and more consistent retrieval of technical documentation. In resource-limited contexts, the system provides a minimal, replicable, and scalable infrastructure for organizing, preserving, and reusing heritage information.

Keywords: BIM, biocultural heritage, Common Data Environment, FAIR principles, HBIM, ISO 19650, multiscalar hierarchy, standardized metadata

Gestão da informação para a conservação do património biocultural de Chichén Itzá, Yucatán, México

Resumo: Apresenta-se o desenho e a implementação de um sistema de gestão de informação para intervenções de conservação em Chichén Itzá, concebido a partir de uma abordagem biocultural e organizado através de classificação espacial, nomenclatura hierárquica e gestão documental. A proposta articula uma hierarquia multiescalar que parte do sítio até ao elemento arquitetónico e traduz-se numa estrutura em árvore de pastas, num esquema de codificação com 14 campos e num Ambiente Comum de Dados compatível com a ISO 19650 e orientado por princípios FAIR. Metodologicamente, o sistema foi estruturado com base em seis componentes operacionais, testes piloto internos e um inquérito exploratório a especialistas. Os resultados evidenciam uma melhoria na rastreabilidade edifício–espaço–elemento, uma redução de ambiguidades na identificação de ficheiros e uma recuperação mais consistente da documentação técnica. Em contextos com recursos limitados, o sistema oferece uma infraestrutura mínima, replicável e escalável para organizar, conservar e reutilizar informação patrimonial.

Palavras-chave: BIM, Ambiente Comum de Dados, HBIM, ISO 19650, hierarquia multiescalar, metadados normalizados, património biocultural, princípios FAIR

Introducción

La gestión del patrimonio biocultural, entendido como la trama co-evolutiva entre diversidad biológica y expresiones culturales en territorios específicos (Palacio y Goli 2025; Maffi 2018), afronta desafíos crecientes derivados del volumen y la complejidad de la información generada por los proyectos de conservación (Korro *et al.* 2021; Vurpillot *et al.* 2019). En estos proyectos convergen registros heterogéneos —arqueológicos, topográficos, biológicos, históricos y etnográficos— en soportes físicos y digitales. Sin estándares claros de organización y denominación, la información se fragmenta, se duplica y pierde trazabilidad, lo que dificulta el acceso, obstaculiza la coordinación interdisciplinaria e incrementa el riesgo de errores operativos (Crowder *et al.* 2015). En un enfoque biocultural, este problema se intensifica porque la evidencia sobre componentes naturales (p. ej., vegetación, suelos, hidrología) debe integrarse con la documentación del patrimonio construido. Por ello, se requiere un sistema de clasificación que use la unidad espacial como llave primaria y estabilice la relación entre datos, dichas unidades y versiones de trabajo, de modo que la información permanezca recuperable y reutilizable a largo plazo, más allá de equipos, plataformas y ciclos administrativos (Wilkinson *et al.* 2016; Borgman 2015).

En México, la conservación e investigación del patrimonio cultural están reguladas por ley y a cargo del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) desde 1939 (Olivé Negrete y Urteaga 1988). Con el fin de integrar acervos escritos, fotográficos y digitales, el INAH ha desarrollado plataformas y repositorios como la Mediateca, el Repositorio, el Sistema Único de Registro Público de Monumentos y Zonas Arqueológicos e Históricos (SUR), el Sistema Institucional de Proyectos (SIP) y el Sistema de Información de Intervenciones de Conservación (SIINCO). Sin embargo, su adopción enfrenta resistencias asociadas a cargas de trabajo prolongadas, desconfianza por experiencias de baja usabilidad o riesgo percibido de pérdida de datos, así como reservas para compartir información sensible (CNCPC 2022: 69). Por ejemplo, el SIP ha sido señalado como un instrumento de alta fricción por sus requisitos extensos y cambiantes, con efectos obstructivos sobre la labor académica y administrativa (López Camacho 2021). A esto se suman restricciones presupuestarias e institucionales para desarrollar y mantener plataformas integradas por proyecto (Fundar 2024: 46), así como la coexistencia de sistemas con alcances parciales (INAH 2023) y sin interoperabilidad efectiva. En conjunto, este escenario favorece registros incompletos o tardíos y deja parte sustantiva de la evidencia técnica en repositorios locales sin reglas estables. Por ello, resulta necesario un esquema mínimo de organización y nomenclatura por proyecto que preserve la trazabilidad, el contexto y la recuperabilidad de la información a largo plazo, con independencia de su incorporación parcial o selectiva en plataformas (Crowder *et al.* 2015).

El INAH cuenta con diversos conjuntos de datos generados en Chichén Itzá tras décadas de investigación y conservación, entre ellos cédulas de deterioro, registros del estado de conservación de bienes inmuebles y acervos gráficos y cartográficos (p. ej. García Solís y Ocampo Flores 2020; Autor 2019). Esta información se encuentra dispersa entre plataformas institucionales, archivos técnicos de proyecto y registros internos de acceso restringido, lo que dificulta su articulación y el seguimiento comparado en el tiempo. A nivel internacional, la documentación del sitio en el inventario de Patrimonio Mundial se orienta al Valor Universal Excepcional y al estado de conservación, pero no sustituye la gestión operativa de los datos técnicos de intervención (UNESCO s. f.). Esta dispersión y heterogeneidad limitan el uso integrado de la evidencia y justifican la necesidad de un sistema que permita organizar, vincular y reutilizar la información a lo largo del ciclo de vida de los proyectos de conservación.

En este contexto, la adopción de metodologías simplificadas alineadas con los principios FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable) posibilita la sistematización de datos esenciales y su preparación para la reutilización futura (Wilkinson *et al.* 2016). Esto resulta especialmente relevante cuando la información se encuentra dispersa en registros institucionales, pues el reto no radica únicamente en almacenarla, sino en mantenerla interpretable y reutilizable a través del tiempo. De manera complementaria, el uso de herramientas asociadas a Building Information Modeling (BIM) —HBIM en conservación patrimonial— ofrece criterios para estructurar entornos de información, gestionar flujos de trabajo y mejorar la trazabilidad entre productos, versiones y unidades de análisis, favoreciendo la coordinación interdisciplinaria sin requerir la implementación plena de plataformas complejas (Néroulidis *et al.* 2024; Lovell *et al.* 2023).

Chichén Itzá, Patrimonio Mundial de la UNESCO y uno de los sitios arqueológicos más representativos de México [Figura 1], acumula desde el siglo pasado una vasta producción de datos generados a partir de sucesivas intervenciones arqueológicas y de conservación. Dicha información refleja la compleja interacción entre los elementos arquitectónicos, el patrón de asentamiento, los recursos naturales, las prácticas culturales y la cosmovisión maya (Bíró y Pérez de Heredia 2024; García Solís 2017; Ruppert 1952). No obstante, la heterogeneidad de formatos y la acumulación histórica de registros dificultan la trazabilidad, el intercambio y el uso comparado de la información, particularmente cuando se requiere integrar evidencia biocultural mediante referencias espaciales consistentes.

Frente a este desafío, el artículo presenta el diseño e implementación de un sistema de gestión de información para proyectos de conservación basado en una nomenclatura jerárquica y clasificación por unidades espaciales, alineado con principios FAIR (Wilkinson *et al.* 2016) y compatible con ISO 19650 (BuildingSMART Spain 2021, 2020; International Organization for

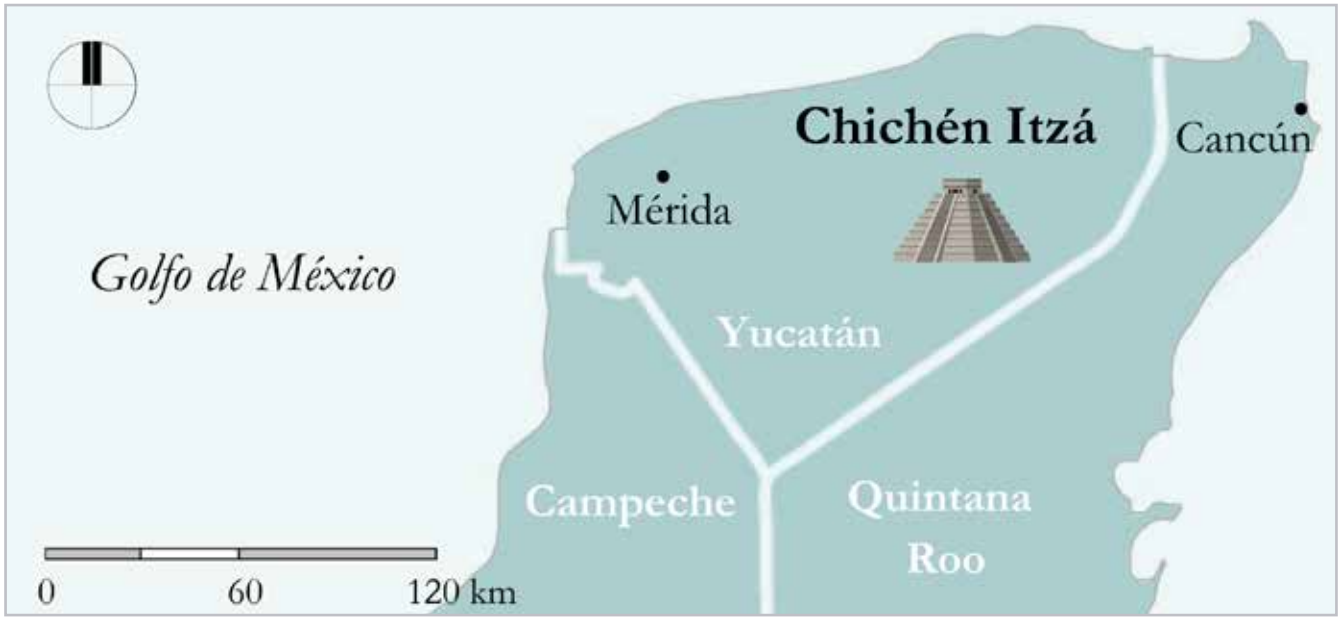


Figura 1.- Localización de Chichén Itzá en la Península de Yucatán, México. Fuente: Elaboración propia.

Standardization 2018). Esta propuesta se concentra en una infraestructura mínima de proyecto —clasificación espacial, nomenclatura y versionado— orientada a reducir la distancia entre producción y reutilización, de modo que la documentación biocultural permanezca recuperable y útil a largo plazo (Borgman 2015).

Situación actual del tema a estudiar

Para contextualizar la propuesta, adoptamos una concepción biocultural del patrimonio en la que el espacio funciona como eje articulador de la gestión y la conservación (Bridgewater y Rotherham 2019). Desde este enfoque, los sitios no se reducen a su materialidad, sino que se entienden como entramados de relaciones entre comunidades, prácticas y los paisajes y ecosistemas que los sostienen. En este marco, el concepto de lugar permite precisar esa dimensión espacial y relacional del patrimonio biocultural al entenderlo también como un espacio vivido e interpretado, en el que convergen dimensiones físicas, funcionales y simbólico-emocionales. Siguiendo a Switalski y Grêt-Regamey (2021), el lugar articula la forma, la función y la imagen. Aplicado a la conservación, este enfoque ayuda a comprender la interacción del sitio con su entorno, con las y los actores sociales, y orienta intervenciones que integren de manera más consistente aspectos tangibles e intangibles mediante procesos de place-making (Switalski y Grêt-Regamey 2021).

Llevar este enfoque a la práctica requiere una infraestructura de información que mantenga continuidad y trazabilidad. Borgman (2015) advierte que los datos dependen de condiciones sociotécnicas para seguir siendo interpretables y reutilizables; cuando se pierde el vínculo entre registros, contexto y organización, la información persiste como archivo pero deja de funcionar como evidencia operativa. En esta investigación, la unidad espacial se asume como llave primaria de esa continuidad, porque permite anclar y relacionar evidencia natural y cultural en escalas comparables.

En ese marco los principios FAIR orientan la sistematización de datos para que sean localizables, accesibles, interoperables y reutilizables, y constituyen un criterio mínimo de organización viable incluso en contextos con recursos limitados (Wilkinson et al. 2016). De manera complementaria, herramientas empleadas en BIM son útiles para gestionar información digital durante el ciclo de vida del proyecto e integrar procesos y actores, incluyendo datos técnico-constructivos, de diagnóstico, geoespaciales y de operación y mantenimiento (Race 2019). En conservación patrimonial, el HBIM articula modelos 3D con información semántica para documentar y gestionar edificios y conjuntos patrimoniales, integrando datos históricos, estructurales y de mantenimiento en entornos colaborativos (Lovell *et al.* 2023; Khan *et al.* 2022).

Además, la ISO 19650 establece un marco para la gestión de información en entornos BIM y enfatiza reglas de clasificación y denominación, así como el uso de un Entorno Común de Datos (CDE) como fuente acordada para recopilar, gestionar y difundir contenedores de información mediante procesos controlados (International Organization for Standardization 2018; BuildingSMART Spain 2021). En Chichén Itzá, su pertinencia radica en adoptar criterios compatibles —clasificación espacial, nomenclatura consistente y control de versiones— que reduzcan fricción entre producción y reutilización, y faciliten la articulación entre prácticas de proyecto y requerimientos institucionales (Borgman 2015).

Metodología

— *Sondeo*

Un componente del estudio consistió en valorar la pertinencia y utilidad de sistemas estandarizados para organizar y nombrar datos en proyectos de conservación, dado que las buenas prácticas de gestión asociadas a BIM recomiendan identificar requerimientos con los actores involucrados y diagnosticar necesidades antes de establecer reglas y flujos de trabajo (BuildingSMART Spain 2021; UNESCO *et al.* 2014). Para ello se aplicó un cuestionario autoadministrado de 15 preguntas en dos rondas: la primera en 2024 y la segunda entre finales de 2025 e inicios de 2026. El instrumento se distribuyó por canales digitales y comunidades profesionales en línea mediante muestreo no probabilístico por conveniencia, dirigido a especialistas en arqueología y conservación vinculados a proyectos y redes disciplinares en México, con un periodo de apertura de aproximadamente un mes por ronda. La participación fue voluntaria y anónima; no se recabaron variables de género o sexo. El proceso se ajustó a los lineamientos éticos institucionales y al Código de Conducta del INAH (INAH 2024). Tras la depuración, se conservaron 53 casos válidos.

El instrumento combinó preguntas dicotómicas, de opción múltiple, de selección múltiple y escalas tipo Likert para explorar percepciones y experiencias sobre la gestión de información (nomenclaturas, bases de datos, modelos 3D/BIM), los beneficios percibidos de la estandarización, las barreras de adopción de orden técnico, organizacional y financiero, así como las recomendaciones de implementación en materia de capacitación, guías, soporte y financiamiento. El análisis fue descriptivo (frecuencias y medidas de tendencia central) y se procesó en hojas de cálculo. Dado el tamaño muestral y el tipo de muestreo, los resultados se interpretaron como evidencia exploratoria no generalizable.

— *Componentes*

Para estructurar el proyecto y facilitar una gestión integral del sitio se realizó un análisis con enfoque sistémico orientado a identificar los componentes fundamentales de las intervenciones de conservación. Este ejercicio implicó la revisión cruzada de documentación técnica (diagnósticos de conservación desde 2005), entrevistas semiestructuradas a ocho actoras y actores clave (de restauración, arqueología y arquitectura) y la sistematización de resultados de seis talleres internos participativos (Feilden y Jokilehto 2003). La propuesta de componentes se validó mediante revisión por comités técnicos internos. Con base en ello se definieron seis componentes interrelacionados que conforman la base operativa del proyecto.

— *Estructuración jerárquica*

Con el propósito de organizar de manera sistemática los elementos patrimoniales sujetos a intervención se adoptó una metodología jerárquica en la que el lugar y la unidad espacial funcionan como ejes integradores para vincular registros heterogéneos (Switalski y Grêt-Regamey 2021). El proceso se articuló en dos etapas complementarias: primero, el diseño de una estructura conceptual basada en una jerarquía espacial, —del sitio a las unidades de intervención—; y segundo, su traducción a herramientas operativas de gestión documental mediante un árbol de carpetas y un sistema de codificación y nomenclatura alineado con criterios de gestión de información asociados a BIM (BuildingSMART Spain 2023).

El árbol de carpetas se definió a partir de un análisis funcional de necesidades de clasificación y consulta, considerando flujos de trabajo y requerimientos técnicos y administrativos. La estructura base se organizó con las categorías principales derivadas de los seis componentes operativos del proyecto y se anidó internamente siguiendo la jerarquía espacial, con énfasis en el componente de Conservación por su centralidad. Para asegurar aplicabilidad, se incorporaron criterios de subdivisión flexibles (por fases de intervención, tipo de bien o cronología) y se validó el diseño mediante pruebas de uso interno y retroalimentación de los equipos técnicos.

Finalmente, se diseñó una nomenclatura de archivos compuesta por campos concatenados bajo convenciones definidas, con posibilidad de emplear ciertos campos como metadatos opcionales; sus reglas mínimas se sintetizan en la Tabla 1.

En paralelo, se adoptaron los principios FAIR para orientar la organización de la información hacia su localización,

Regla	Especificación
Estructura alfanumérica	Caracteres alfanuméricos en mayúsculas y minúsculas, separados por guiones bajos.
Restricciones en caracteres	Sin signos de puntuación, letras como "ñ" o "Ç", acentos, espacios ni caracteres especiales; se permite el punto (".") para la extensión y paréntesis solo para numeración automática.
Separador	Guión bajo ("_") para compatibilidad entre sistemas y bases de datos y para evitar errores de sintaxis.
Longitud de los campos	Longitud constante por campo (según catálogo interno), ajustable manteniendo consistencia.
Longitud total del archivo	No exceder los 60 caracteres en el nombre; omitir palabras innecesarias.
Orden de los campos	Orden predeterminado; ajustes posibles según necesidades del proyecto (siempre documentados).
Campos no aplicables	Si un campo no aplica, se omite y se continúa con el siguiente.
Extensión	Conservar extensión original (.pdf, .tif, .dwg).
Versión	Incluir identificador de versión (V01, V02).

Tabla 1.- Descripción de las reglas para la creación de la nomenclatura, modificada de BuildingSMART Spain (2023).

acceso, interoperabilidad y reutilización (Wilkinson *et al.* 2016). En términos operativos, se asignaron identificadores y rutas estables por unidad espacial, se registraron metadatos mínimos en una plantilla común (p. ej., autoría, fecha, versión) y se priorizaron formatos abiertos y vocabularios controlados compatibles con sistemas de información geográfica (SIG) y HBIM. Con ello se reforzó la trazabilidad y se redujeron ambigüedades en el intercambio y la reutilización de documentación biocultural.

Estas pautas se implementaron en un Entorno Común de Datos (CDE) conforme a ISO 19650, entendido como fuente acordada para recopilar, gestionar y difundir contenedores de información mediante un proceso controlado (BuildingSMART Spain 2021; International Organization for Standardization 2018). En la práctica, los archivos transitaron por cuatro estados simplificados —Trabajo, Compartido, Publicado y Archivado— con responsables definidos para revisión y aprobación, registrando control de cambios y versionado (BuildingSMART Spain 2023, 2021). El CDE integró el árbol de carpetas y la nomenclatura para asegurar consistencia de denominación y trazabilidad documental, facilitando que los equipos localicen y reutilicen datos sin pérdida de coherencia.

Como verificación de transferibilidad, el esquema de clasificación y nomenclatura se probó de manera piloto en el Proyecto de Conservación de Mayapán, con el fin de identificar ambigüedades y ajustes necesarios, sin incorporar sus resultados como un segundo caso de estudio.

Resultados

— *Validación*

El sondeo (n = 53) estuvo integrado principalmente por especialistas en restauración (58.5%), con participación casi generalizada en proyectos de conservación y restauración (96.2%) y, en menor medida, en arqueología (49.1%). El uso de sistemas de gestión de información no aparece como práctica consolidada: 24.5% indicó no haberlos utilizado nunca y 45.3% reportó haberlos empleado solo en algunos proyectos. No obstante, la disposición hacia la implementación de un sistema estandarizado resultó alta: 56.6% respondió "sí, definitivamente" y 39.6% "sí, pero requiere formación". Esta apertura se encuentra condicionada por las capacidades técnicas disponibles, dado que 77.4% identificó la falta de formación como principal desafío y 88.7% recomendó priorizar la capacitación presencial del equipo de trabajo.

Previo a la adopción de la versión final, el sistema se probó mediante una implementación piloto interna, lo que permitió ajustar campos y reglas a partir de incidencias recurrentes en la gestión documental (p. ej., ambigüedad en la identificación de unidades intervenidas y duplicidad de versiones). Tras su implementación, se observó mayor coherencia en la denominación de archivos y una recuperación más precisa de documentación técnica por unidad espacial y fase de intervención, en comparación con prácticas previas basadas en nombres libres; estas mejoras operativas se registran como evidencia aplicada de funcionalidad del sistema, aunque no fueron cuantificadas estadísticamente. De manera complementaria, el esquema fue aplicado de forma piloto en Mayapán como verificación de transferibilidad, sin desarrollarlo aquí como segundo caso de estudio.

— *Componentes*

El análisis del ciclo de gestión de proyectos (planificación, intervención, seguimiento, evaluación y cierre) permitió definir seis componentes interrelacionados, con Conservación como eje del sistema y los restantes como funciones complementarias que articulan evidencia técnica, contexto espacial y gestión institucional [Figura 2]. Esta definición operativa se utilizó para estructurar el árbol de carpetas y como criterio de clasificación de los productos documentales.



Figura 2.- Componentes de un proyecto de restauración y conservación. Fuente: Elaboración propia.

Como componente central, Conservación se materializa en un registro técnico orientado a la trazabilidad del bien en el tiempo, documentando diagnóstico y decisiones de intervención (qué, dónde, cuándo, cómo y quién). Incluye, de manera representativa, fichas y formularios, series fotográficas (inicio–proceso–cierre), ortofotografías, planos y esquemas de diagnóstico, mapas de deterioro y planos de intervención; se complementa con bitácoras, actas e informes de avance y cierre.

El Análisis contextual organiza la información espacial mediante sectorización e identificación de conjuntos arquitectónicos y relaciones entre estructuras, e integra variables del paisaje relevantes para la conservación (p. ej., microrelieve, cobertura vegetal, suelos, hidrología superficial y subterránea y condiciones microclimáticas). Se apoya en cartografía y capas SIG, fotografías georreferenciadas, modelos digitales de terreno y modelos 3D, así como en mapas temáticos de riesgos e impactos. En este marco, los modelos 3D cumplen una función instrumental dentro del sistema de información, ya que permiten ubicar, relacionar y consultar datos de conservación, sin constituir por sí solos el eje central del trabajo. La Investigación interdisciplinaria sustenta decisiones con estudios técnicos, biológicos, históricos y arqueológicos, expresados en informes, bases de datos, mapas, modelos y referencias bibliográficas. La Vinculación registra procesos de colaboración y consulta con actores sociales pertinentes (minutas, talleres, diagnósticos participativos y materiales bilingües) así como prácticas y significados socialmente asociados a lugares específicos del sitio. Finalmente, la Difusión reúne productos de comunicación pública (informes, presentaciones, materiales didácticos y repositorios), orientados a socializar avances y resultados.

— *Jerarquía multiescalar*

En esta línea, y manteniendo el concepto de lugar como eje central (Switalski y Grêt-Regamey 2021), se diseñó un sistema jerárquico multiescalar para organizar los elementos sujetos a intervención, avanzando de lo general a lo específico. El sistema parte del sitio como conjunto patrimonial, y desciende a conjuntos/sectores y edificios. A su vez, cada estructura se organiza por espacios (p. ej., cuartos, pasillos y patios), dentro de los cuales se registran bienes muebles asociados (p. ej., relieves, esculturas y pintura mural). Finalmente, los espacios se descomponen en elementos arquitectónicos que constituyen la unidad mínima de registro (p. ej., muros, bóvedas y vanos), descritos mediante atributos físicos básicos como sección y orientación [Figura 3].

Una vez definida esta jerarquía que articula las dimensiones física, funcional y cultural del sitio incluyendo variables del paisaje relevantes para conservación, el enfoque se tradujo en herramientas y protocolos que aseguran una gestión de la información eficiente y coherente. En este marco, el árbol de carpetas y la nomenclatura operaron como mecanismos para materializar la jerarquía y asegurar trazabilidad y coherencia en la organización de los datos, como se explica a continuación.

— *Árbol de carpetas*

La información se organizó en un árbol de carpetas cuya raíz refleja los seis componentes del proyecto. Cada componente se subdivide en subcarpetas de primer y segundo nivel conforme a los flujos de trabajo y productos documentales. En el componente de Conservación, el primer nivel agrupa los edificios intervenidos; cada edificio se desglosa en bienes y elementos asociados y en sus espacios específicos de intervención, en correspondencia con la jerarquía espacial definida.

La Figura 4 muestra el ejemplo del Templo Norte. La carpeta principal del edificio contiene subcarpetas de primer nivel para cada bien asociado con su ubicación codificada (p. ej., CHI_2D1N_REP_CUA_BOVNOR). En el segundo subnivel la información de la intervención se ordena por proceso, utilizando las carpetas Deterioro, Procesos y Técnica. De este modo, la ruta de navegación mantiene coherencia desde el edificio hasta el espacio de intervención y el proceso correspondiente.

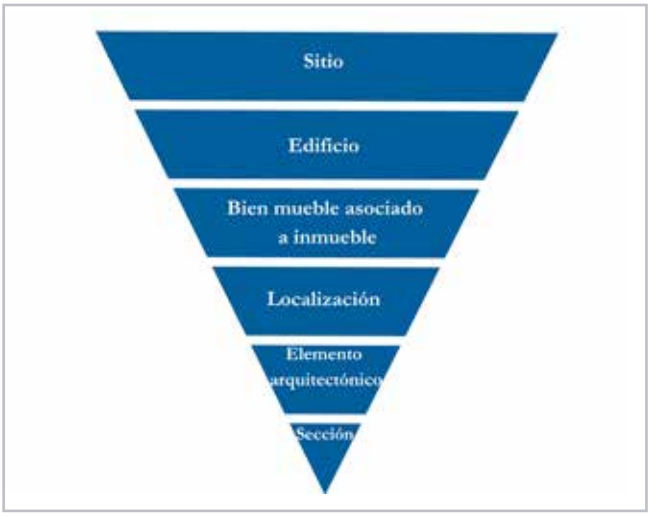


Figura 3.- Jerarquía de elementos sujetos a intervenciones. Fuente: Elaboración propia.



Figura 4.- Carpeta del Templo Norte con subcarpetas. Fuente: Elaboración propia.

— N*omenclatura*

Para estructurar la nomenclatura de los archivos se utilizó un esquema de codificación compuesto por 14 campos concatenados. Algunos campos son obligatorios (identificador del proyecto, descripción, fecha y creador/a), mientras que otros son opcionales y se activan según el tipo de registro y el nivel espacial requerido; cada campo mantiene una longitud acordada para asegurar consistencia. Los campos principales (1-3) y la nomenclatura de los componentes de las unidades mínimas de registro (4-8) fueron establecidos con base en una propuesta previa elaborada por el Proyecto de Conservación del Área Puuc, dirigido por la Mtra. Natalia Hernández Tangarife. Su homologación busca que los diagnósticos de proyectos de conservación en Yucatán se integren en una base de datos común de consulta. El catálogo de claves fue definido en un manual interno (Geovannini 2024) y se recomienda ajustar estas claves a los requerimientos de cada proyecto. La Tabla 2 ejemplifica los campos y su función en un archivo del componente Investigación, mientras que la Figura 5 muestra su anclaje espacial en un conjunto intervenido.

Discusión

# Campo	Nombre del campo	Descripción del campo	Condición	Longitud caracteres	Ejemplo clave
1	Proyecto	Identificador del proyecto	Requerido	3	CHI Chichén Itzá
2	Categoría general	Sólo se añade si corresponde con una de las áreas de soporte: DIF, OPE, INV, VIN, ANA	Opcional	3	INV Investigación
3	Categoría específica	Edificio	Opcional	3 a 4	3C1 Clave edificio Ruppert (1952)
4	Categoría asociada	Bien o elemento asociado, por ejemplo ALT altares, ESA esculturas adosadas, MOP mosaicos de piedra	Opcional	3	PIM Pintura mural
5	Nivel o localización general	Localización en edificio, por ejemplo cuartos (CUA), escalinatas (SCL), pasillos (PAS)	Opcional	3 a 4	CUA2 Cuarto 2
6	Localización específica	Elemento arquitectónico, por ejemplo alfarda (ALF), banqueta (BAQ), columna (COL)	Opcional	3	MUR Muro
7	Calificativo	Información relevante elemento arquitectónico: parte, orientación, calificativo, por ejemplo norte (NOR) o inferior (INF)	Opcional	3	SUR
8	Tipo de registro	De arquitectura, estadio de intervención o muestreo, por ejemplo deterioro (DET), intervención (PRO) o alzado (ALZ)	Opcional	3	MUE muestreo
9	Información extra	Información extra relativa al muestreo, resolución, por ejemplo matriz de excavación (ME) o capa pictórica (CA)	Opcional	1 a 3	PI piedra
10	Descripción	Descripción de contenido en minúsculas sin pronombres ni determinantes	Requerido	máximo 20	sales
11	Fecha	Día, mes y año escritos como seis cifras continuas: DDMMAA	Requerido	6	310523
12	Creador/a	Iniciales del nombre y apellido del/de la creador/a; en caso de coincidencia, se utiliza la inicial del nombre y las dos primeras letras del apellido.	Requerido	2 a 3	GC Gerardo Calderón
13	Número	Número consecutivo entre paréntesis a partir de la presencia de dos archivos.	Opcional	3 a 6	(3)
14	Revisión	Letra V o P más el número de versión o parte del archivo	Opcional	2	V02 Versión 2

Tabla 2.- Descripción de los campos para la codificación de la nomenclatura de un archivo del componente de investigación: CHI_INV_3C1_PIM_CUA2_MUR_SUR_MUE_PI_sales_310523_GC_(3)_V02.jpg. Fuente: Elaboración propia.

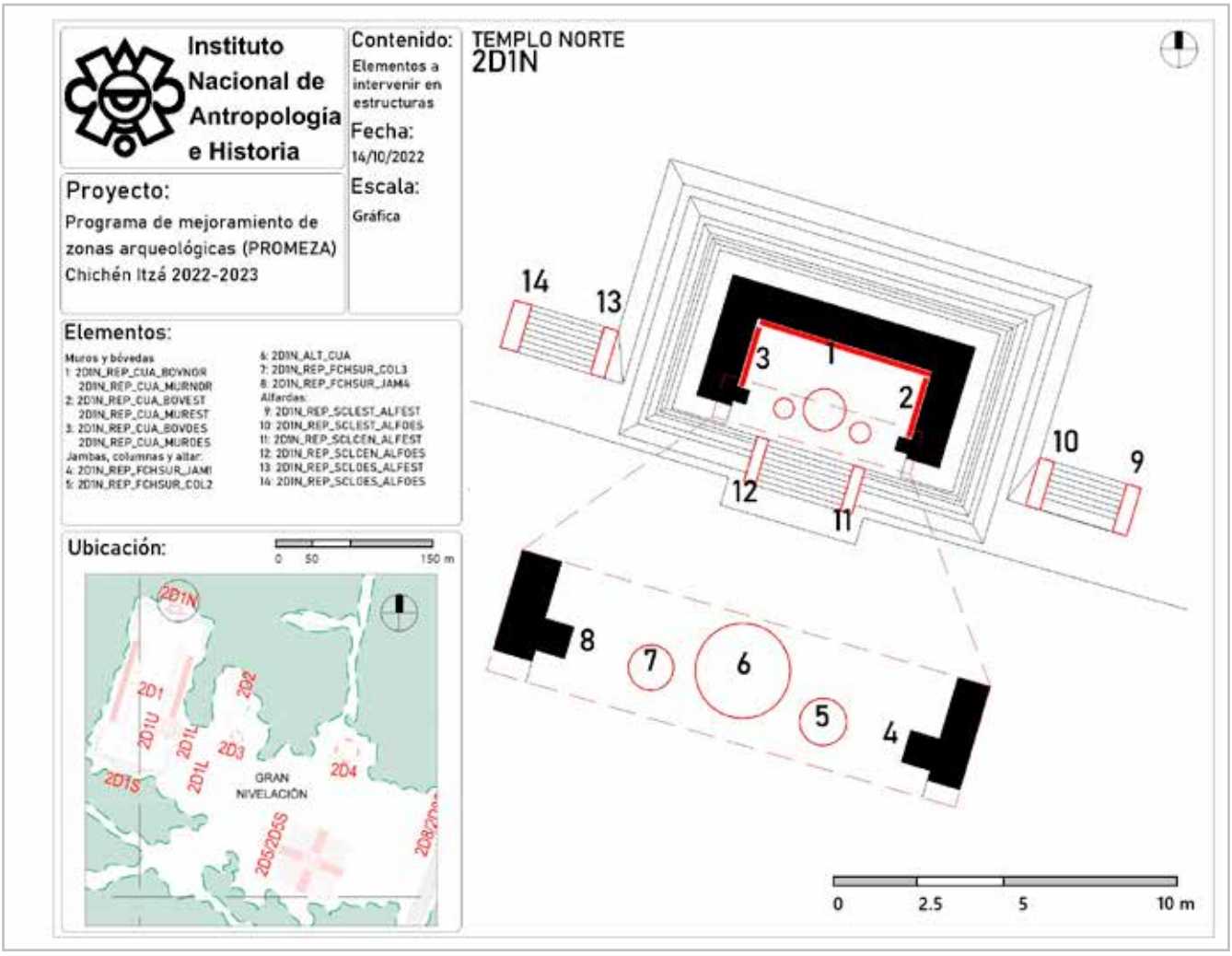


Figura 5.- Elementos intervenidos en el Templo Norte. El código une edificio–espacio–elemento y se usa para nombrar carpetas/archivos. Fuente: Elaboración propia.

El caso de Chichén Itzá muestra que una jerarquía multiescalar —del sitio al elemento construido— no es solo ordenamiento, sino una estrategia para conectar información heterogénea (planimetría histórica, registros de conservación, fotografía técnica, muestreos, SIG) a lo largo del ciclo de intervención. La adopción de claves espaciales basadas en la retícula de Ruppert (1952) para identificar edificios (p. ej., 2D8) ancla la nomenclatura en una convención arqueológica establecida, mejora la trazabilidad entre temporadas y facilita el cruce con cartografía y bases de datos previas del sitio.

La traducción del concepto del "lugar" (forma–función–imagen) a una estructura de carpetas y códigos opera como un puente entre dimensiones físicas (muro, bóveda, vano), usos y valores simbólicos asociados a espacios concretos (p. ej., cuarto 1, escalinata central). En términos operativos, la jerarquía basada en el lugar reduce ambigüedades al momento de nombrar y archivar, y permite consultas consistentes por ubicación, tipo de bien y fase de intervención. Además es coherente con marcos que operacionalizan el concepto de lugar para orientar decisiones en sistemas socioecológicos (Switalski y Grêt-Regamey 2021).

Integrar esta jerarquía con prácticas de gestión asociadas a BIM e ISO 19650 refuerza el uso de un Entorno Común de Datos (CDE) mediante reglas de denominación, control de versiones y atribución de autoría. En el contexto de un sitio continuamente intervenido como Chichén Itzá, estos lineamientos hacen más fiable la colaboración interdisciplinaria y la incorporación de nuevos datos (p. ej., análisis de materiales, fotogrametría, modelos 3D) sin romper la coherencia del acervo digital (BuildingSMART Spain 2021).

Desde la conservación patrimonial, HBIM puede funcionar como un contenedor semántico para asociar los elementos codificados a atributos de estado, materiales y tratamientos, y para sostener procesos de documentación, planeación de intervenciones y mantenimiento. La literatura reciente destaca tanto el potencial como los retos persistentes de estas tecnologías para la gestión documental en conservación-restauración del patrimonio edificado (Korro *et al.* 2025; Lovell *et al.* 2023; Khan *et al.* 2022). En

Chichén Itzá, el beneficio operativo central consiste en recuperar con rapidez "familias" de evidencias por unidad espacial y fase (p. ej., deterioros en muros asociados a un espacio específico), facilitando comparación, priorización y seguimiento (Lovell *et al*. 2023).

Asimismo, al alinear la estructura con principios FAIR, el sistema avanza hacia información localizable, accesible, interoperable y reutilizable, condición previa para compartir selectivamente evidencia entre equipos y escalar hacia plataformas más complejas sin rehacer convenciones básicas (Wilkinson *et al.* 2016). Este punto es especialmente relevante en contextos donde la adopción de BIM es desigual por brechas de capacidad técnica, costos y marcos institucionales incipientes (Fundar 2024; Soto y Manríquez 2023). En este sentido, la propuesta es operativa, pero su continuidad depende de capacitación, guías claras, soporte técnico y una gobernanza mínima (roles, responsabilidades y mantenimiento), además de condiciones de infraestructura digital y políticas internas de resguardo y acceso. Esto es consistente con el sondeo aplicado (n = 53), donde la falta de formación técnica se identificó como principal barrera (77.4%) y la disposición a adoptar un sistema estandarizado fue alta, aunque condicionada a formación (56.6% "sí definitivamente"; 39.6% "sí, pero requiere formación").

En un sitio como Chichén Itzá, caracterizado por la interacción cotidiana entre patrimonio, comunidades locales, personal técnico y una afluencia turística elevada, la gestión de información no es un proceso neutro. En 2025 el sitio registró 2,182,034 visitantes, cifra que ilustra la escala operativa en la que se documentan, organizan y actualizan las intervenciones (INAH 2026). En este contexto, las decisiones sobre qué se registra, cómo se estructura y bajo qué condiciones se comparte la información tienen implicaciones sociales e institucionales, particularmente en un sitio donde el patrimonio también forma parte de economías locales y de prácticas contemporáneas de uso y gestión. Por ello, la adopción progresiva de principios FAIR y de entornos compatibles con HBIM debe acompañarse de criterios claros de responsabilidad, control de acceso y apertura gradual de la información, de modo que la mejora técnica no comprometa la coherencia ni la gobernanza del acervo documental (Wilkinson *et al.* 2016).

Conclusión

Este estudio muestra, a partir del caso de Chichén Itzá, que un sistema de gestión de información basado en clasificación espacial, nomenclatura jerárquica y control de versiones puede contribuir a una mayor trazabilidad de la documentación a nivel edificio–espacio–elemento, a una identificación más consistente de archivos y a una recuperación más precisa de registros técnicos generados durante intervenciones de conservación. En un proyecto con enfoque biocultural, esta organización permite además articular de manera más consistente información relativa al patrimonio construido, al contexto espacial y a variables del paisaje relevantes para su gestión. En este sentido, la compatibilidad del sistema con los principios FAIR y con marcos de gestión de información asociados a BIM e ISO 19650 resultó operativamente viable en un contexto institucional con recursos técnicos y presupuestarios limitados.

Como proyección, se identifican como líneas de desarrollo la construcción de vocabularios controlados específicos, el refinamiento de catálogos de claves y la validación del sistema en otros contextos patrimoniales. Estas líneas no constituyen resultados empíricos del presente estudio, sino orientaciones para futuras aplicaciones, ajustes y evaluaciones del sistema.

Agradecimientos

Se agradece a la Mtra. Natalia Hernández Tangarife y al arqueólogo Benjamín Esqueda Lazo de la Vega por las reuniones sostenidas en torno al manejo bases de datos de los sitios arqueológicos de Yucatán. Agradecemos también a las conservadoras Mariela Saraí Carrillo Díaz y Mariana Colín Gámez, al Dr. Eduardo Pérez de Heredia Puente y a la Dra. Verónica Vázquez López por su contribución al desarrollo y la aplicación del sistema de gestión del sitio. Extendemos nuestro agradecimiento al equipo del Proyecto de Conservación Integral de Chichén Itzá por su paciencia y apoyo a lo largo del proceso de implementación del sistema, a las y los especialistas que respondieron la encuesta, y a las tres personas revisoras anónimas cuyos comentarios contribuyeron a enriquecer este trabajo. Este proyecto se realizó con el apoyo del Centro INAH Yucatán y con financiamiento del Programa de Mejoramiento de las Zonas Arqueológicas (PROMEZA), como parte del megaproyecto del Tren Maya.

Referencias

BÍRÓ, P. y PÉREZ DE HEREDIA, E. (2024). "No tan Imposible: la Llegada de los Toltecas de Tula a Chichén Itzá." *Estudios de Cultura Maya* 63: 77–106. https://doi.org/10.19130/iifl.ecm.63.2024/00171s0xw33.

BORGMAN, C.L. (2015). *Big data, little data, no data: scholarship in the networked world*. Cambridge: The MIT Press. https://doi.org/10.7551/mitpress/9963.001.0001

BRIDGEWATER, P. y ROTHERHAM, I. D. (2019). "A critical perspective on the concept of biocultural diversity and its emerging role in nature and heritage conservation." *People and Nature*, 1(3): 291–304. https://doi.org/10.1002/pan3.10040

BUILDINGSMART SPAIN. (2020). *Guía BIM para propietarios y gestores de activos. Versión 02-A*. Barcelona: BuildingSMART Spain. Disponible en: https://www.buildingsmart.es/recursos/gu%C3%ADa-bim-para-propietarios-y-gestores-de-activos-1/ [consulta: 6/2/2025].

BUILDINGSMART SPAIN. (2021). *Introducción a la serie EN ISO 19650*. Barcelona: BuildingSMART Spain. Disponible en: http://www.buildingsmart.es/recursos/en-iso-19650/ [consulta: 6/2/2025].

BUILDINGSMART SPAIN. (2023). *Manual de nomenclatura de documentos al utilizar BIM*. Barcelona: BuildingSMART Spain. Disponible en: https://www.buildingsmart.es/recursos/nomenclatura-documentos-bim [consulta: 6/12/2025].

CNCPC. (2022). "Estrategia Nacional de Conservación de Bienes Culturales Muebles y de los Asociados a Inmuebles Paleontológicos, Arqueológicos e Históricos". Ciudad de México: Coordinación Nacional de Conservación del Patrimonio Cultural, Instituto Nacional de Antropología e Historia. https://conservacion.inah.gob.mx/pdf/estrategias_conservacion/Estrategia_Nacional_de_Conservaci%C3%B3n.pdf

CROWDER, J.W., MARION, J.S. y REILLY, M. (2015). "File naming in digital media research: examples from the humanities and social sciences", *Journal of Librarianship and Scholarly Communication,* 3(3): eP1260. https://doi.org/10.7710/2162-3309.1260

FEILDEN, B.M. y JOKILEHTO, J. (2003). *Manual para el manejo de los sitios del Patrimonio Cultural Mundial*. Roma: ICCROM. Disponible en: https://www.iccrom.org/sites/default/files/2018-02/2003_feilden_manual_manejo_spa_85882_light.pdf [consulta: 19/3/2025].

FUNDAR. (2024). *Nuevas propuestas, menos presupuestos. Análisis del Paquete Económico 2025*. Colección PPEF. Ciudad de México: Fundar, Centro de Análisis e Investigación. Disponible en: https://fundar.org.mx/publicaciones/analisis-del-paquete-economico-2025-nuevas-propuestas-menos-presupuesto/ [consulta: 19/9/2025].

GARCÍA SOLÍS, C.A. (2017). "Archaeology and tourism: the performance of conservation at the World Heritage Site of Chichén Itzá". Tesis de doctorado. Melbourne: La Trobe University.

GARCÍA SOLÍS, C.A. (2019). "Proyecto de Conservación Integral de Chichén Itzá 2019: Subestructura de Guerreros, La Iglesia, Juego de Pelota". Informe remitido al Sistema Institucional de Proyectos, INAH.

GARCÍA SOLÍS, C.A. y OCAMPO FLORES, C. (2020). "Proyecto Integral Chichén Itzá 2020: Monitoreo, mantenimiento y registro". INAH. https://investigacion.inah.gob.mx/node/7963

GEOVANNINI, H. (2024). "Manual de nomenclatura del Proyecto de Conservación de Chichén Itzá". Documento interno, Sección de Conservación y Restauración, Centro INAH Yucatán.

INAH. (2023). *Guía para la elaboración y presentación de proyectos de conservación-restauración de bienes muebles y de los asociados a inmuebles del patrimonio cultural.* Disponible en: https://tramites.inah.gob.mx/Guia_para_la_elaboraci%C3%B3n_de_proyectos.pdf [consulta: 20/12/25].

INAH. (2024). Código de conducta del Instituto Nacional de Antropología e Historia. Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación. Disponible en: https://www.dof.gob.mx/2024/CULTURA/Codigo_Conducta_INAH.pdf [consulta: 17/2/2025].

INAH. (2026). "Reporte Visitantes Zonas Arqueológicas (1996-2025)". Archivo XLS. https://estadisticas.inah.gob.mx/ [consulta: 10/2/2026].

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. (2018). *ISO 19650-1: Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling — Information management using building information modelling — Part 1: Concepts and principles.* Geneva: ISO. Disponible en: https://www.iso.org/standard/68078.html [consulta: 7/2/2025].

KORRO, J., RODRÍGUEZ MIRANDA, Á., VALLE-MELÓN, J.M., ZORNOZA-INDART, A., CASTELLANO-ROMÁN, M., ANGULO-FORNOS, R., PINTO-PUERTO, F., ACOSTA IBÁÑEZ, P., y FERREIRA-LOPES, P. (2021). "The role of information management for the sustainable conservation of cultural heritage". *Sustainability*, 13: 4325. https://doi.org/10.3390/su13084325

KORRO, J., VALLE-MELÓN, J.M., ZORNOZA-INDART, A. y RODRIGUEZ, A. (2025). "New perspectives and usual challenges: present technologies for document management in architectural heritage conservation-restoration works", *ACM J. Comput. Cult. Herit.*, 18 (2), Art. 29:1-28. https://doi.org/10.1145/3723455

KHAN, M., KHAN, M., BUGHIO, M., TALPUR, B., KIM, I. y SEO, J. (2022). "An integrated HBIM framework for the management of heritage buildings", *Buildings*, 12(7): 964. https://doi.org/10.3390/buildings12070964

LÓPEZ CAMACHO, M. de L. (2021). *La problemática con el sistema de proyectos SIP. Ponencia para el foro INAH del futuro*. Instituto Nacional de Antropología e Historia. Recuperado de https://www.inah.gob.mx. [consulta: 28/12/25].

LOVELL, L.J., DAVIES, R.J. y HUNT, D.V.L. (2023). "The application of Historic Building Information Modelling (HBIM) to cultural heritage: A review", *Heritage*, 6(10): 6691-6717. https://doi.org/10.3390/heritage6100350

MAFFI, L. (2018). "Biocultural diversity". En: *The International Encyclopedia of Anthropology.* Hoboken: Wiley. https://doi.org/10.1002/9781118924396.wbiea1797

NÉROULIDIS, A., POUYET, T., TOURNON, S., ROUSSET, M., CALLIERI, M., MANUEL, A., ABERGEL, V., MALAVERGNE, O., CAO, I., ROUSSEL, R., GRANIER, X., RODIER, X. y DE LUCA, L. (2024). "A digital platform for the centralization and long-term preservation of multidisciplinary scientific data belonging to the Notre Dame de Paris scientific action", *Journal of Cultural Heritage*, 65: 210–220. https://doi.org/10.1016/j.culher.2023.09.016.

OLIVÉ NEGRETE, J.C. y URTEAGA, A. (Coords.). (1988). INAH. Una historia. Distrito Federal: Instituto Nacional de Antropología e Historia.

PALACIO, R.D., y GOLI, S. (2025). "Bridging the nature–culture divide: A biocultural reclassification of the World Heritage Sites", *Ecology and Society*, 30(1): 31. https://doi.org/10.5751/ES-15827-300131

RACE, S. (2019). *BIM Demystified: An architect's guide to Building Information Modelling/Management* (BIM) (2.a ed.). London: RIBA Publishing. https://doi.org/10.4324/9780429347627

RUPPERT, K. (1952). *Chichen Itza. Architectural notes and plans.* Washington D.C.: Carnegie Institution of Washington.

SOTO, C. y MANRÍQUEZ, S. (2023). *Panorama general del avance de BIM en América Latina y el Caribe*. Caracas: CAF. Disponible en: https://scioteca.caf.com/handle/123456789/2022 [consulta: 16/6/2025].

SWITALSKI, M. y GRÊT-REGAMEY, A. (2021). "Operationalising place for land system science", *Sustainable Science* (16): 1–11. https://doi.org/10.1007/s11625-020-00827-5

UNESCO. (s. f.). Chichén Itzá (No. 483): Documents. UNESCO World Heritage Centre. Disponible en: https://whc.unesco.org/en/list/483/documents/ [consulta: 20/12/25].

UNESCO, ICCROM, ICOMOS y UICN. (2014). *Gestión del patrimonio mundial cultural*. París: Centro del Patrimonio Mundial. Disponible en: https://whc.unesco.org/en/managing-cultural-world-heritage [consulta: 16/6/2025].

VURPILLOT, D., PITTET, P., FORTE, J. y PIERRE, B. (2019). "From heterogeneous data to heterogeneous public: thoughts on transmedia applications for digital heritage research and dissemination", *ArXiv*, 1905.08988. https://doi.org/10.48550/arXiv.1905.08988

WILKINSON, M.D. *et al*. (2016). "The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship", *Scientific Data,* 3(1): 160018. https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18.

Autor/es



Claudia García Solís
claudia_garciasl@inah.gob.mx
Centro INAH Yucatán
https://orcid.org/0000-0002-5007-891X

Conservadora e investigadora mexicana del Centro INAH Yucatán, además de Nivel 1 en el Sistema Nacional de Investigadores e Investigadoras en México. Es egresada de la Escuela Nacional de Conservación, Restauración y Museografía 'Manuel del Castillo Negrete' con estudios de arqueología con maestría de la Universidad Autónoma de Yucatán y doctorado en La Trobe University, Australia. Con más de 20 años de experiencia ha estudiado y se ha especializado en la conservación y manejo del patrimonio arqueológico e histórico de la región sureste de México, coordinado decenas de proyectos de conservación de acabados arquitectónicos en varios sitios del área maya como Mayapán, Becán, Chicanná, Calakmul, Chichén Itzá, entre otros. En Chichén Itzá, desde 2005, es la responsable de su conservación. En 2011 fue merecedora del Premio Paul Coremans en reconocimiento a los resultados del proyecto de conservación de la pintura mural del sitio de Mayapán. En colaboración interdisciplinaria, su línea de estudio está enfocada a la arqueometría de los acabados arquitectónicos para abonar al conocimiento histórico y para profundizar sobre mecanismos de deterioro. Además, realiza estudios orientados a generar nuevas metodologías para la resolución de los problemas específicos de conservación.



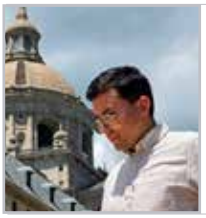
Helga Geovannini Acuña
helga.ga@enesmerida.unam.mx
Centro INAH Yucatán
https://orcid.org/0000-0002-0345-9787

Doctora en Antropología por La Trobe University, Australia, Maestra en Ciencias por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y Licenciada en Antropología con especialidad en Arqueología por la Universidad de las Américas Puebla. Actualmente es integrante del Proyecto de Conservación Integral de Chichén Itza del Centro INAH Yucatán y docente en Ciencias Ambientales en la Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Mérida de la UNAM. Sus líneas de trabajo incluyen arqueología del paisaje, gestión de riesgos patrimoniales y articulación de saberes locales en contextos socioambientales. Ha colaborado en proyectos arqueológicos en el área maya, entre ellos Calakmul, Edzná, Chichén Itzá, Naachtún y Yaxnohcah. Pertenece al Sistema Nacional de Investigadores e Investigadoras de México. Además, participa en colectivos dedicados a la agroecología, la sustentabilidad y la divulgación del patrimonio biocultural. Su práctica combina métodos participativos, enfoques de conservación preventiva y herramientas digitales para documentación y análisis, con énfasis en vinculación comunitaria y manejo responsable de datos.



Claudia Angélica Ocampo Flores
claudia_ocampo@inah.gob.mx
Centro INAH Yucatán
https://orcid.org/0009-0003-0004-5831

Conservadora adscrita al Centro INAH Yucatán, con más de dos décadas de trayectoria profesional dedicada a la conservación del patrimonio arqueológico e histórico. Su experiencia se centra en la intervención de bienes muebles e inmuebles por destino, con especialización en piedra labrada, pintura mural y metales. En los últimos años ha coordinado proyectos de gran relevancia, entre los que destacan el Proyecto de Conservación Integral de Chichén Itzá y del Gran Museo del mismo sitio, así como la coordinación de proyectos de conservación en otros sitios arqueológicos como Acanceh e Izamal. Su labor ha contribuido de manera significativa a la preservación de sitios y monumentos emblemáticos de la península de Yucatán. Paralelamente, ha desarrollado una activa labor académica colaborando con instituciones como la Universidad Autónoma de Yucatán y la Universidad Anáhuac Mayab. Sus contribuciones se reflejan en publicaciones y ponencias presentadas en foros especializados, abordando temáticas sobre conservación de piedra, criterios de intervención y experiencias de conservación en contextos arqueológicos. Fue delegada sindical del Sindicato de Restauradores del INAH y actualmente es miembro del Consejo Nacional para la Conservación del INAH, funciones que fortalecen su papel como referente en la definición de políticas y en la representación del gremio de la conservación en México.



Alberto Emilio Ramírez Balam
alberto951123@gmail.com
Escuela Nacional de Conservación, Restauración y Museografía
https://orcid.org/0009-0006-0737-2108

Arquitecto egresado de la Universidad Autónoma de Yucatán con diez años de experiencia en diversas áreas del ejercicio profesional tanto en la iniciativa privada como en diferentes niveles de gobierno. Entre algunas actividades que ha desempeñado se encuentran: la elaboración planos, levantamientos arquitectónicos a detalle, digitalización de registros, fotogrametría terrestre y con dron, procesado de información y residencia, supervisión y control de obra. Desde el año 2017, ha enfocado su trabajo en la conservación del patrimonio edificado, participando en proyectos de restauración de monumentos históricos, incluidas casonas y haciendas en el estado de Yucatán. Su experiencia destaca en el Proyecto de Conservación Integral de Chichén Itzá, donde se desempeñó como Coordinador de Registro de Información Gráfica. Actualmente, continúa su formación académica cursando el programa de Maestría en Conservación y Restauración de Bienes Culturales Inmuebles de la Escuela Nacional de Conservación, Restauración y Museografía (ENCRyM) donde ha contribuido en proyectos para la conservación de los monumentos históricos de San Rafael Tlalmanalco, de la Zona de Monumentos Arqueológicos de Cuicuilco y a través de programas externos, en excavaciones arqueológicas en Extremadura, España. Hoy realiza prácticas profesionales en la Dirección de Patrimonio Mundial del Instituto Nacional de Antropología e Historia.

Artículo enviado 16/10/2025
Artículo aceptado el 29/03/2026

https://doi.org/10.37558/gec.v29i1.1452



Evaluation of biodeterioration control methods for fungal damage on paper based cultural heritage materials

María Domínguez Rojas, Maria Alejandra García Luna, Juan Sebastian Valencia, Esra Keles, María Camila Patiño R.

Abstract: Fungal deterioration is one of the main threats to the conservation of paper documents, compromising both their physical and aesthetic integrity. Despite this, many institutions lack specific research evaluating the effectiveness of methods used to control fungal biodeterioration. This study assessed the effectiveness of ethanol at concentrations of 70%, 75%, and 80%, as well as mechanical vacuum cleaning, in controlling *Eurotium sp*. and *Penicillium sp*. isolated from historical manuscripts. The treatments were analyzed both independiently and in combination. The results challenge traditional recommendations, by demonstrating that 70% ethanol concentration is not fully effective against *Eurotium sp*. and *Penicillium sp*., two fungal genera commonly found in archives and libraries. Notably, the combined treatment -vacuum cleaning followed by the application of 80% ethanol-proved particularly effective, highlighting its potential as a viable strategy for controlling biodeterioration in historical documents.

Keywords: Biocide, Ethanol, Eurotium sp., Penicillium sp., Vacuum cleaning

Evaluación de métodos de control de biodeterioro causado por hongos en obras del patrimonio cultural en papel

Resumen: El deterioro fúngico es una de las principales amenazas para la conservación de documentos en papel, afectando tanto su integridad física como estética. A pesar de ello, muchas instituciones carecen de investigaciones específicas que evalúen la efectividad de los métodos empleados para controlar el biodeterioro fúngico. En este estudio se evaluó la efectividad del etanol (70%, 75% y 80%), así como de la limpieza mecánica con aspiradora, en el control de *Eurotium sp.* y *Penicillium sp.* aislados de manuscritos históricos. Se analizaron los efectos del etanol y el aspirado como tratamientos independientes y combinados. Los resultados desafían las recomendaciones tradicionales, al demostrar que la concentración de etanol al 70% no es totalmente eficaz contra *Eurotium sp.* y *Penicillium sp*., dos géneros fúngicos comúnmente reportados en archivos y bibliotecas. En particular, el tratamiento combinado -limpieza con aspiradora seguido de la aplicación de etanol al 80%- resultó especialmente eficaz, lo que pone de relieve su potencial como estrategia viable para controlar el biodeterioro de los documentos históricos.

Palabras clave: Biocida, Etanol, *Eurotium sp., Penicillium sp*.,Aspiradora.

Avaliação de métodos de controlo da biodeterioração para danos fúngicos em materiais de património cultural em papel

Resumo: A deterioração fúngica é uma das principais ameaças à conservação de documentos em papel, comprometendo tanto a sua integridade física como estética. Apesar disso, muitas instituições carecem de investigação específica que avalie a eficácia dos métodos utilizados para controlar a biodeterioração fúngica. Este estudo avaliou a eficácia do etanol em concentrações de 70%, 75% e 80%, bem como da limpeza mecânica por aspiração, no controlo de *Eurotium sp*. e *Penicillium sp*., isolados de manuscritos históricos. Os tratamentos foram analisados tanto de forma independente como em combinação. Os resultados põem em causa recomendações tradicionais, ao demonstrar que a concentração de etanol a 70% não é totalmente eficaz contra *Eurotium sp*. e *Penicillium sp*., dois géneros fúngicos frequentemente encontrados em arquivos e bibliotecas. Destaca-se que o tratamento combinado, limpeza por aspiração seguida da aplicação de etanol a 80%, revelou uma eficácia particularmente elevada, evidenciando o seu potencial como estratégia viável para o controlo da biodeterioração em documentos históricos.

Palavras-chave: biocida, etanol, Eurotium sp., Penicillium sp., limpeza por aspiração

Introduction

The conservation of documentary heritage, especially paper documents, faces considerable challenges due to various agents of deterioration, among which fungal colonization stands out as one of the main causes of loss of information and aesthetic features of the documents. The term biodeterioration has been widely adopted in the scientific field to refer to the biological degradation processes of materials. Biodeterioration refers to the harmful modifications that a material undergoes as a result of the biological activity of living organisms. This phenomenon often occurs alongside physicochemical deterioration processes, whose progression is influenced by environmental factors such as relative humidity, temperature, and exposure to light (Sameño,2018). In the case of paper, fungal biodeterioration follows a four-phase cycle: contamination (via air, contact with contaminated materials, or vectors), spore germination, hyphal and colony development, and finally, the decomposition of the work (Gallo *et al.* 2003). During this process, fungi produce enzymes such as cellulases, amylases, xylanases, and gelatinases, which break down the main structural components of paper, including cellulose, adhesives, and glues (Abdel-Maksoud *et al.* 2022; Vaillant 2013). Consequently, hyphal growth and enzymatic action trigger a loss of mechanical resistance in the paper, weakening it and making it more susceptible to degradation (Kirtzel *et al.* 2019).

This general mechanism of fungal deterioration has been corroborated by numerous case studies. For instance, research by Shamsian *et al.* (2006) and Zotti *et al.* (2008) has highlighted the high prevalence and diversity of *Aspergillus* and *Penicillium* species in historical manuscripts, emphasizing their ability to degrade cellulosic materials and thrive even under low humidity conditions. In a collection of ancient manuscripts, Shamsian *et al.* (2006) reported that *Aspergillus spp*. and *Penicillium spp.* accounted for approximately 64% of fungal contaminations, with a high frequency of both surface and internal colonization. Similarly, Zotti *et al.* (2008) identified 14 species of filamentous fungi in samples from historical paper, with *Penicillium* being the most represented genus. These findings are not isolated; other studies worldwide support this trend, reporting up to 61 species of *Penicillium* and 44 of *Aspergillus* isolated from deteriorated paper materials, as well as from surfaces and air in libraries and archives (Pinheiro *et al.* 2019; Oetari *et al.* 2016; Teixeira *et al.* 2018). Species such as *A. flavus, A. fumigatus*, A. *versicolor, P. citrinum, P. spinulosum*, and *P. commune* have been consistently isolated from deteriorated documents in various regions and environmental conditions (Zotti *et al.* 2008; Okpalanozie *et al.* 2018; Kraková *et al.* 2018). This widespread distribution, along with their enzymatic potential and adaptability, explains why these two genera are recurrently associated with the biodeterioration of paper worldwide.

Recent studies have shown that fungi like *Aspergillus niger* and *Penicillium chrysogenium* possess a remarkable ability to secrete extracellular hydrolytic enzymes that weaken and alter the paper structure, significantly contributing to biodeterioration (Fouda *et al.* 2022). Additionally, these organisms produce acidic metabolites and pigments that cause aesthetic deterioration and stains. These include naphthoquinones, anthraquinones, and azaphilones, responsible for reddish, yellow, and violet discolorations on paper (Pavlović *et al.* 2022). The restoration and conservation of paper-based works previously affected by fungal contamination aim to halt the degradation process and preserve the original characteristics of the documents (Cubero 2007).

Control methods can be classified into indirect and direct approaches. Direct methods involve physical, chemical, and biological treatments designed to eliminate the microorganisms responsible for deterioration (Sameño 2018). Among the chemical approaches, biocides, also known as chemical agents, are frequently used. Ethanol, for example, is a widely applied antiseptic effective in the inactivation of bacteria, viruses, and fungi (Vargas 2011). Its mechanism of action involves the denaturation of microbial proteins and disruption of cell membranes, compromising the structural integrity and viability of the organisms (Droguett 2023). On the other hand, mechanical methods focus on the physical removal of microbial structures from the document surface. This procedure typically involves the use of tools such as brushes, spatulas, and vacuum cleaners to remove hyphae, spores, and other accumulated contaminants from affected substrates (Cappitelli *et al*. 2020). While these techniques are effective at reducing visible fungal load, their action is limited as they do not ensure complete eradication of fungal spores, which may remain dormant and reactivatable under favorable environmental conditions.

The preservation of documentary heritage becomes even more critical when considering that historical documents are not merely physical artifacts but also carriers of knowledge. Their deterioration represents a direct threat to the transmission of information to future generations. A particularly concerning case involves manuscripts preserved by the Turkish Manuscripts Institution in Istanbul, where restoration professionals face significant challenges due to the lack of specific studies evaluating the effectiveness of current biodeterioration control methods. Of particular interest is the limited understanding of whether vacuum cleaning alone is sufficient or if it should be complemented by chemical treatments such as ethanol application. Therefore, the aim of this study is to identify the most effective method for controlling fungal biodeterioration in paper-based materials. To achieve this, the efficacy of various ethanol concentrations will be assessed, both independently and in combination with mechanical cleaning technique, to determine the optimal strategy for the conservation of contaminated documentary heritage.

Materials and Methods

—*Isolation of Fungal strains*

Two fungal strains (F1 and F2) isolated from historic callighraphy paper sheets mounted on wooden panel were employed. Isolation has been carried out in laboratories of Directorate of the Turkish Institution for Manuscripts in

Istanbul. Callighraphy sheets which were in bad condition were found in Bursa Manuscripts Library [Figure 1]. There were stains, lost parts and decomposition on paper through activity of microorganisms.



Figura 1.- Callighraphy sheets. Bursa Manuscripts Library. *Copywright*: authors.

The samples were taken with cotton sterile swabs from the biodeteriorated areas. Swabs were inoculated on PDA medium petri dishes with spread plate method. Plates were incubated at 26±1ºC for 7 days. Pure fungal colonies were obtained by subculturing from media containing all the isolated fungi of mixed colonies. Morphological characterization of each strain was carried out using lactophenol blue staining to observe fungal reproductive structures under a microscope.

Evaluation of antifungal activity *in vitro*

The effectiveness of ethanol as biocide was evaluated using ethanol concentrations of 70%, 75%, and 80%. The procedure involved extracting an agar "plug" with fungal growth, which was submerged in an Eppendorf tube containing the respective ethanol concentration for an exposure time of 8 minutes. This exposure time was selected based on the results obtained by Lucas *et al.* (2017). Subsequently, the agar plug was placed on PDA plates and incubated at 25 °C for 8 days. This procedure was performed in triplicate for each strain, using 0.85% w/v sterile saline solution as a control.

Fungal growth following exposure to different ethanol concentrations was evaluated by measuring the diameter of the fungal colonies and comparing it to growth without ethanol exposure. The percentage inhibition of fungal growth was calculated using Equation 1.

$$\% \text{ of inhibition} = \frac{(\text{Control plate diameter} - \text{Biocide plate diameter})}{(\text{Control plate diameter})} \times 100$$

Evaluation of the effect of ethanol on conidial germination

From the pure cultures of the two selected fungal strains, a 5 mm agar plug was transferred into a tube containing 10 ml of 0.85% w/v sterile saline solution. After shaking to detach conidia from the agar, a 10 µl aliquot of the conidial suspension was transferred to a Neubauer chamber. The concentration was adjusted by diluting the suspension with sterile saline to reach a final concentration of 1×10^6 conidia/ml for inoculation (Sequeira *et al.* 2017). A microculture chamber was set up by placing a coverslip elevated on two swabs in a Petri dish, which was sterilized in an autoclave. After sterilization, a 1 x 1 cm fragment of solid PDA was placed in the center of the coverslip within the Petri dish.

Inoculation and ethanol treatment

Following Sequeira *et al.* (2017), 3 µl of the conidial suspension were inoculated onto the agar fragment, and 10 µl of the respective ethanol solution (70%, 75%, or 80%) were applied to the inoculated samples. A flame-sterilized coverslip was placed over the sample. For the control, 0.85% w/v saline solution was used instead of ethanol. To maintain humidity, 1 ml of sterile glycerinated water was added to the bottom of the Petri dish. The microcultures were incubated at room temperature (19°C approx.) and daily microscopic observations were performed for 5 days to assess conidial germination. For each ethanol treatment and control, five replicates were prepared for each strain (F1 and F2). Conidial development was classified as follows: "-" for no germination, "+" for conidial germination, "++" for hyphal development, and "+++" for intense mycelial growth (Sequeira et al., 2017).

Evaluation of control methods on paper samples

— Preparation of paper samples with fungal growth

Following Sequeira *et al.* (2017), discs of Whatman No. 1 filter paper (90 mm diameter) were sterilized in autoclave. The discs were placed in individual Petri dishes containing PDA media, inoculated with 10 µl of a conidial suspension (1×10^6 conidia/ml) prepared from a mixture of the two fungal species (F1 and F2), and incubated at 25 °C for 3 days. The paper discs were then transferred to sterile Petri dishes and air-dried for 10 days. Subsequently, the discs were cut into triangular shapes to facilitate treatment application.

Application of treatments

Biodeterioratin control methods were applied as follows:

Treatment 1: Ethanol application. Ethanol was evenly applied to both sides of the paper discs using a swab. A second application ensured thorough impregnation. Two ethanol concentrations were tested: 80% identified as the most effective in in vitro tests, and 70%, a concentration commonly in conservation practices.

Treatment 2: Vacuum cleaning + Ethanol application. Paper discs were cleaned using a vacuum cleaner employed by restorers, applying suction for 60 seconds on each side. Ethanol was then applied at the two tested concentrations (80% and 70%).

Treatment 3: Vacuum cleaning only. Discs were cleaned using the vacuum cleaner for 60 seconds with no ethanol applied.

Each treatment was performed in triplicate, with untreated samples serving as controls. After treatment, the paper discs were placed in fresh Petri dishes containing PDA and incubated at 19-20 °C for seven days. Fungal recolonization on the paper samples was documented through photographs.

Assessment of treatment effectiveness

A qualitative scale was used to classify fungal growth:

"-": No visible fungal growth, indicating the treatment was effective.
"+": Minimal growth, suggesting partial effectiveness.
"++": Moderate growth, indicating limited treatment effectiveness.
"+++": Extensive and dense fungal growth, signifying ineffective treatment.

Results and Analysis

The macroscopic and microscopic observations revealed distinct morphological features in the two isolated fungal strains. Strain F1 displayed oval to elliptical greenish ascospores, while strain F2 exhibited round yellow-green conidiospores [Figure 2]. These characteristics led to identification of F1 as a species within the subgenus *Eurotium*, and F2 within the genus Penicillium.

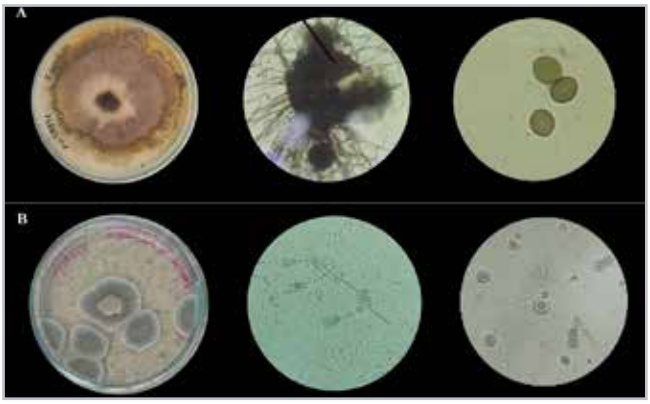


Figura 2.- Microscopic characteristics observed at 40x of strains F1 and F2. (A) Cleistothecium and ascospores of strain F1 (*Eurotium sp.*); (B) Conidioma and conidiospores of strain F2 (*Penicillium sp.*). Copywright: photographs taken by the authors.

The identification of F1 as a potential member of *Eurotium* is supported by the presence of cleistothecia, a hallmark of this subgenus. These sexual reproductive structures are consistent with descriptions by Benjamin (1955), who noted the presence of yellow, globose ascocarps ranging from 50 to 175 µm in diameter, embedded in a dense hyphal matrix. This observation aligns with the findings of Visagie *et al*. (2017), who described *Eurotium* species as the teleomorphic (sexual) state of certain *Aspergillus* species. The morphological features observed here are therefore indicative of this group and suggest a possible link to xerophilic fungi often associated with biodeterioration in archival materials. In contrast, strain F2 exhibited a typical *Penicillium* morphology, with conidiophores arising from the hyphae and branching into terminal clusters. This structure is characteristic of the asexual reproductive phase of the genus and is commonly found in indoor environments and on cellulose-based degraded substrates (Borrego *et al.* 2012).

***In vitro* antifungal activity**

In vitro assays demonstrated fungal growth for both strains (F1 and F2) at all ethanol concentrations tested (70%, 75%, and 80%) [Figure 3].

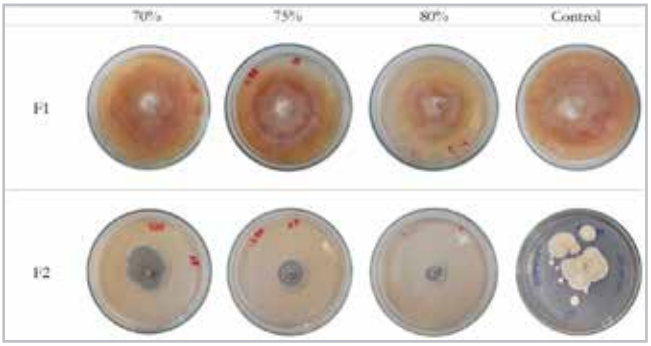


Figura 3.- Microscopic characteristics observed at 40x of strains F1 and F2. (A) Cleistothecium and ascospores of strain F1 (*Eurotium sp.*); (B) Conidioma and conidiospores of strain F2 (*Penicillium sp.*). Copywright: photographs taken by the authors.

However, a progressive reduction in colony diameter was observed with increasing ethanol concentration, suggesting a dose-dependent inhibitory effect. The largest colony areas were recorded at 70% ethanol, while the smallest were observed at 80% ethanol. These results provide initial evidence of the tolerance mechanisms exhibited by both *Eurotium sp*. and *Penicillium sp*., as growth was maintained even at higher ethanol concentrations. Such behavior suggests that these strains possess adaptive strategies that allow survival under stress conditions imposed by ethanol exposure.

Results presented in Figure 4 highlight a marked difference in sensitivity between the two strains. F2 (*Penicillium sp*.) exhibited higher inhibition percentages compared to F1

(*Eurotium sp.*) at all ethanol concentrations [Figure 4 A]. At 80% ethanol, *Penicillium sp*. achieved 63% inhibition, contrasting with *Eurotium sp.*, which only reached 31%. This trend persisted at lower ethanol concentrations: 49.99% and 19.01% inhibition for *Penicillium sp*. at 75% and 70% ethanol, respectively, compared to 7.17% and 1.6% for *Eurotium sp*. Statistical analysis of colony diameters confirmed the significance of these findings [Figure 4 B].

At 70% ethanol, *Eurotium sp*. exhibited significantly larger growth (82.33 mm average diameter) compared to *Penicillium sp.* (49.67 mm). Increasing ethanol concentration to 75% further reduced colony diameters for both strains, with *Penicillium sp.* showing a more pronounced decrease (30.67 mm). At 80% ethanol, both strains exhibited further reductions, though *Eurotium sp*. maintained significantly larger growth compared to *Penicillium sp.* The observed

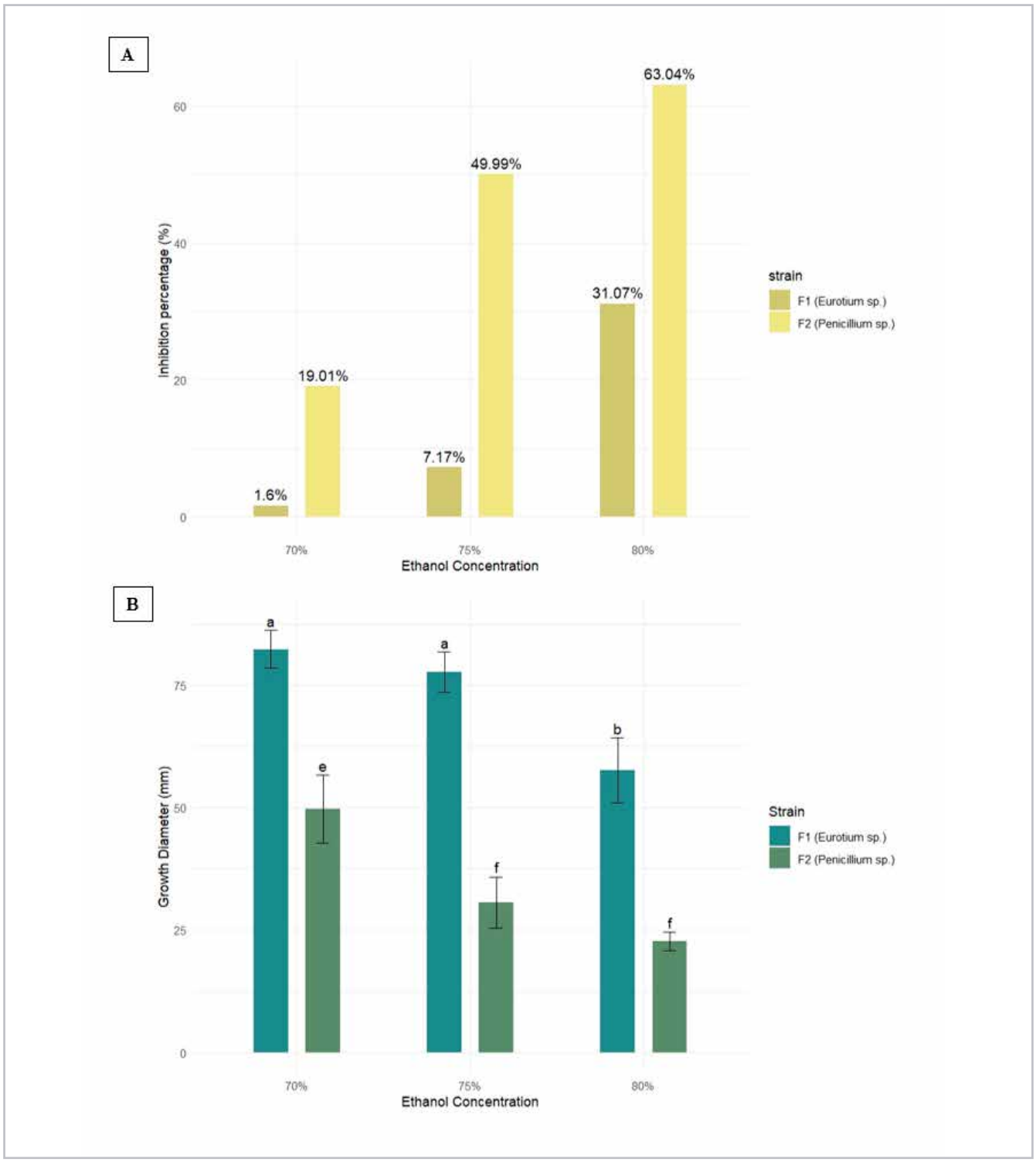


Figura 4.- A. Evaluation of the antifungal activity of 70%, 75% and 80% ethanol. B. Growth diameters of strains F1 and F2 in response to ethanol concentrations based on Tukey's test.

resistance may primarily be associated with metabolic stress response mechanisms. Certain fungal strains can activate biochemical pathways to repair cellular damage or modify their metabolism to better tolerate environmental stress (Pontón & Quindós 2006). The tolerance of *Eurotium sp*. and *Penicillium sp*. to high ethanol concentrations indicates the presence of detoxification mechanisms or antioxidant systems that mitigate ethanol's toxic effects. For instance, in *Penicillium purpurogenum*, ethanol can affect biofilm formation and biomass, generating oxidative stress that some filamentous fungi can counteract using antioxidant systems to neutralize the toxic effects of this solvent (Husseiny *et al.* 2014).

Additionally, ethanol's quick evaporation implies that its concentration decreases over time, removing the stress factor on treated surfaces. Once the unfavorable conditions cease due to ethanol evaporation, these fungi may exit their dormant state and resume their normal metabolic processes, promoting growth. This phenomenon could explain the fungal development observed in both strains after ethanol exposure during the contact method. These results suggest that ethanol primarily acts as a fungistatic agent, temporarily limiting the growth of *Eurotium sp.* (strain F1) and *Penicillium sp*. (strain F2) but not fully eliminating fungal colonies.

Evaluation effect on conidial germination

The results obtained from the microcultures show a differential response in the germination of conidia from *Eurotium sp.* (F1) and *Penicillium sp.* (F2) under increasing ethanol concentrations, reflecting their distinct structural and metabolic strategies for stress resistance. Figure 5 and table 1 show the results for *Eurotium sp*.

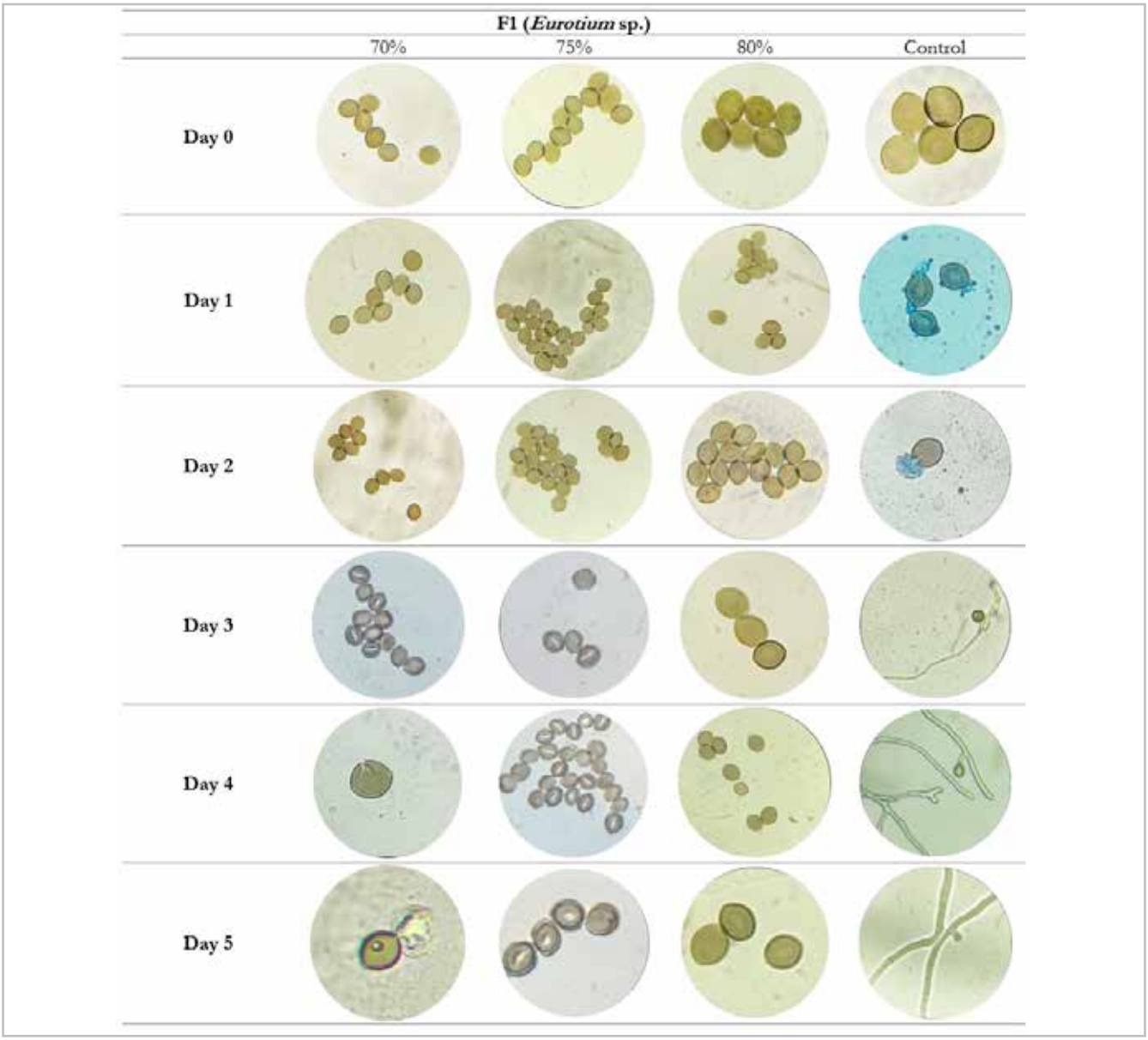


Figura 5.- Microscopic observations of F1 ascospore germination under ethanol effect (100x).

	F1					
						Days
Ethanol concentration	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
70%	-	-	-	-	+	+
75%	-	-	-	-	-	-
80%	-	-	-	-	-	-
Control	-	+	+	++	+++	+++

Table 1.- Qualitative analysis of F1 ascospore germination over 5 days. -: Absence of germination, +: Conidia germination, ++: Hyphae development, +++: Intense mycelium development.

At 70% ethanol, germination began on the first day, reaching "+" classification by day 5. At 75% and 80%, no germination was observed during the evaluation period. In the ethanol-free control, conidial germination occurred from day 1, with intense mycelial development classified as "+++" by days 4 and 5. Figure 6 and table 2 show the results for *Penicillium sp*.

F2 conidia germinated across all ethanol concentrations. Germination began on day 2 at 70% ethanol, and on day 3 at 75% and 80% ethanol. Moderate mycelial development ("++") was observed in all treatments. This behavior may be related to physiological differences between

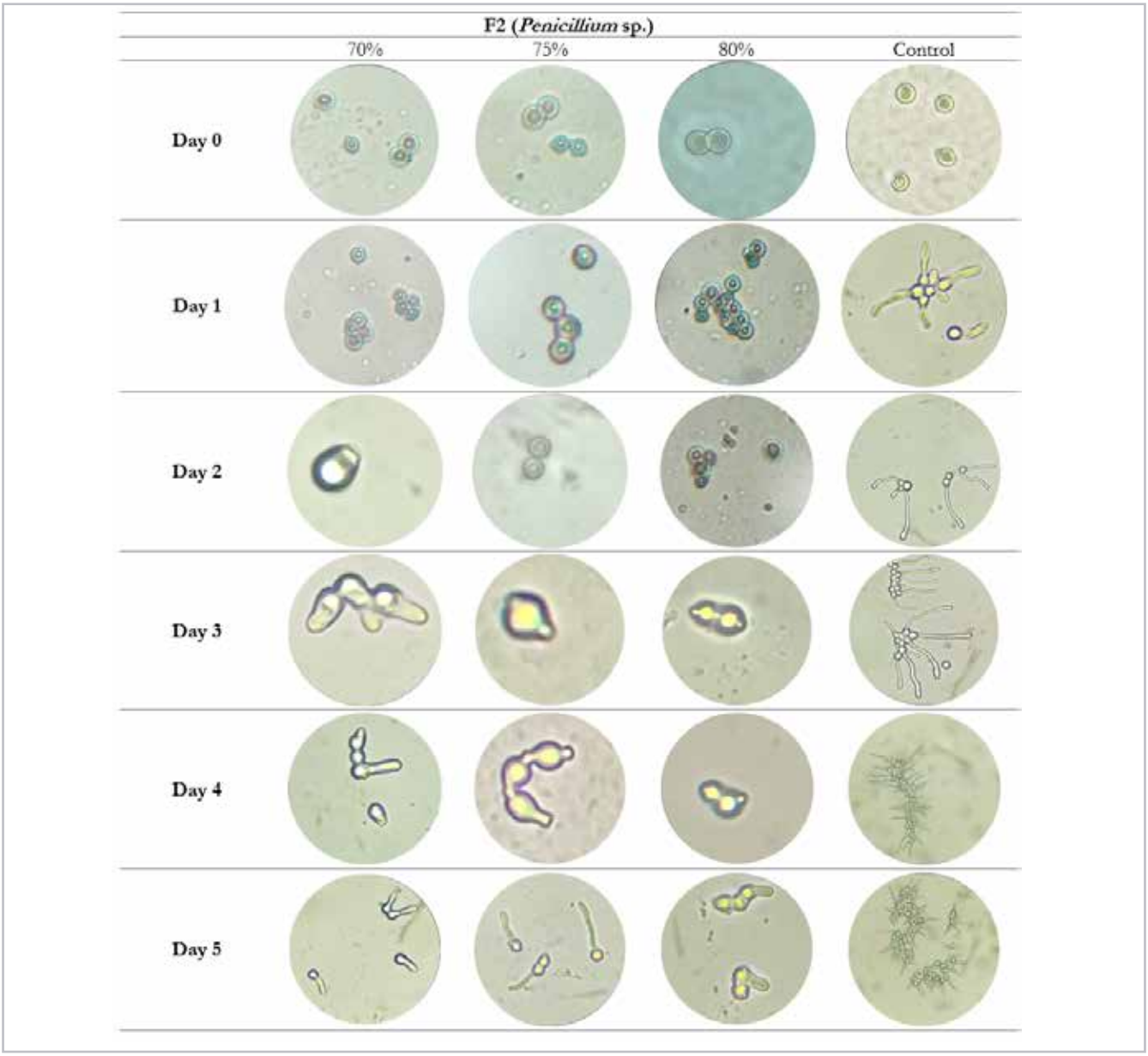


Figura 6.- Microscopic observations of F2 conidiospore germination (100x).

F2						
						Days
Ethanol concentration	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
70%	-	-	+	+	+	+
75%	-	-	-	+	+	+
80%	-	-	-	+	+	+
Control	-	+	++	++	++	++

Table 2.- Qualitative analysis of F2 conidiospore germination over 5 days. -: Absence of germination, +: Conidia germination, ++: Hyphae development, +++: Intense mycelium development.

ascospores and conidia. Ascospores are widely recognized for their high resistance to extreme conditions such as heat, dehydration, UV radiation, pressure, and oxidative stress, compared to asexual spores (Wyatt *et al.* 2014a). This resistance is due to a series of adaptations, including a thick cell wall, low water content, high cytoplasmic viscosity, and the accumulation of compatible solutes such as trehalose, mannitol, and trehalose-derived oligosaccharides (Dijksterhuis *et al.* 2007; Dijksterhuis *et al.* 2002). These characteristics enable ascospores to survive even dry heat treatments above 60 to 85 °C (Dijksterhuis & Teunissen 2004; Reyns *et al.* 2003; Butz *et al.* 1996). For example, ascospores of *Talaromyces macrosporus* survive more than 30 minutes at 85 °C, with germination rates above 90% after exposure (Wyatt *et al.* 2015), while those of *Neosartorya fischeri* (teleomorph of *Aspergillus*) survive for more than 7 days at 60 °C with a relative humidity below 0.5% (Wyatt *et al.* 2014b).

From this perspective, the absence of germination in F1 at 75% and 80% ethanol may be due to a mechanism of induced dormancy, through which ascospores avoid initiating metabolic processes under adverse conditions that could compromise their viability. This behavior has been associated with high cytoplasmic viscosity, a characteristic observed in ascospores of *Neosartorya fischeri* and *Talaromyces macrosporus*, which limits intracellular mobility and delays metabolism, thereby reducing the production of reactive metabolites (Wyatt *et al*. 2014c). In fact, comparative studies have shown that cytoplasmic viscosity in these ascospores can reach values close to 15 cP, significantly higher than those recorded in conidia (3.5–4.8 cP), supporting their ability to remain dormant until conditions become favorable for germination (Dijksterhuis *et al.* 2007). In this context, the behavior of F1 may be interpreted as an adaptive response that favors long-term survival at the cost of immediate germination.

In contrast, the conidia of F2 showed a greater tendency to germinate even under ethanolic stress conditions. Although conidia are generally less resistant than ascospores, a wide variability in stress tolerance has been documented. For example, conidia of *Aspergillus niger* can survive at 50 °C for an hour and retain their germination capacity (Ruijter *et al.* 2003). This tolerance has been broadly associated with structural properties common to fungal conidia, whose cell wall is composed of multiple layers, including an outer layer rich in melanins and hydrophobins, which are responsible for resistance to adverse conditions such as desiccation and UV radiation (Pihet *et al*. 2009; Yang *et al.* 2022; Ball *et al.* 2019).

In the case of the genus *Penicillium*, it has been shown that hydrated conidia of *P. chrysogenum*, *P. italicum*, and *P. digitatum* can be inactivated after prolonged ethanol treatments (Dao *et al*. 2008). However, *P. chrysogenum* exhibits lower susceptibility, which has been attributed to its greater physiological tolerance and its ability to grow under low water activity conditions (Dantigny *et al.* 2005; Wyatt *et al.* 2014a). This suggests that strain F2 may share similar adaptations, enabling it to maintain germination processes even in the presence of ethanol. Although germination was slower at higher concentrations, the ability to activate under these conditions reflects significant physiological plasticity.

Moreover, germination processes are also conditioned by the environmental conditions of the incubation setting. In this case, conditions were used to simulate heritage environments such as archives and libraries, with temperatures around 19 °C. This factor may have contributed to slowing the germination process in both strains. The results suggest that F1 ascospores, although highly resistant, tend toward dormancy in ethanol-containing environments, while F2 conidia exhibit a greater, though limited, active tolerance that allows them to germinate even under ethanolic stress. Understanding these mechanisms is crucial for developing more effective control strategies against fungal biodeterioration, particularly in contexts where alcohols are used as biocides.

Effectiveness of control methods on paper samples

The treatments application on paper discs showed Ethanol at 80% effectively reduced fungal colonization and growth time. Combined treatment of vacuum cleaning followed by ethanol application proved particularly effective, resulting in complete inhibition of F2 colonies and minimal development of F1 colonies [Figure 7], [Table 3].

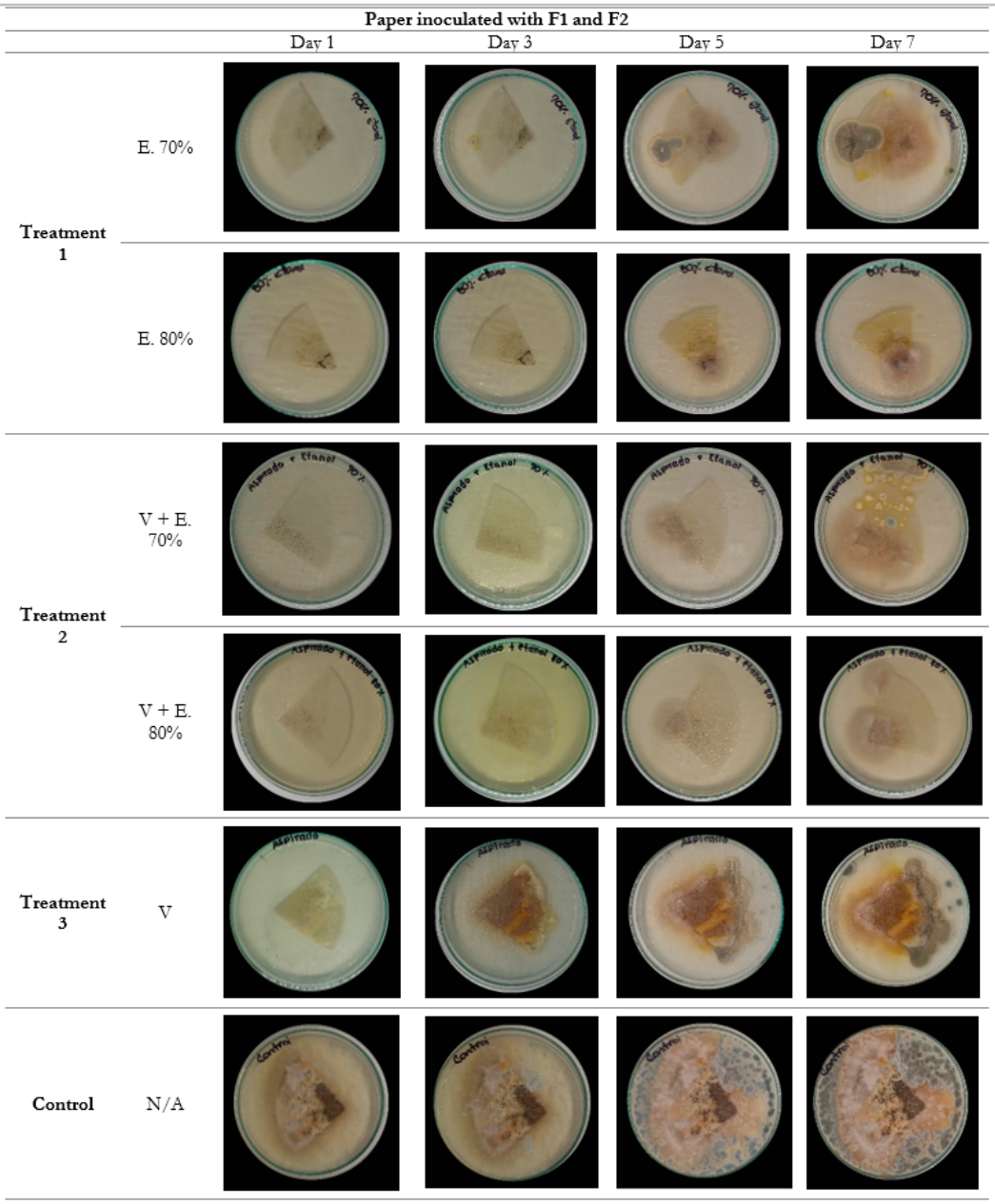


Figura 7.- Photographic evidence of fungal development on paper inoculated with F1 and F2 strains under various control treatments: ethanol (E), vacuum cleaning (A), vacuum cleaning followed by ethanol application (A+E), and no treatment (N/A).

	Development of F1 colonies on paper				**Development of F2 colonies on paper**			
	Days				Days			
	1	3	5	7	1	3	5	7
E. 70%	-	-	++	+++	-	+	++	+++
E. 80%	-	-	+	++	-	-	-	-
V + E. 70%	-	-	++	+++	-	-	+	++
V + E. 80%	-	-	+	++	-	-	-	-
V	-	+	+++	+++	-	+	+++	+++
Control	+	++	+++	+++	-	+	+++	+++

Table 3.- Intensity of fungal colony development on paper samples. +: Minimal growth with limited paper coverage; ++: Visible growth covering a significant portion of the paper; +++: Extensive and dense fungal growth covering most of the paper.

In most conservation centers, libraries and museums, the use of 70% ethanol has been considered one of the most effective techniques for restoring and preserving artifacts. A water-ethanol mixture in a 30:70 (v/v) ratio is a recommended practice (Lucas *et al.* 2017). However, the results of this study challenge this recommendation, showing that 70% ethanol concentration is not completely effective against *Eurotium sp*. and *Penicillium sp*., common fungal genera found in archives and libraries.

Vacuum cleaning, a common method for conserving paper materials, also presented limitations. Observations revealed that fungal colony development in vacuum-treated areas was comparable to the control group, which received no treatment. Although vacuuming effectively removes a significant portion of surface spores and hyphae, previous studies (Cappitelli & Villa 2020) have highlighted its drawbacks, such as the risk of spore dispersion and limited surface cleaning efficacy. Spores may adhere to vacuum nozzles and disperse during cleaning movements, increasing the risk of contamination to other objects and the workspace. Furthermore, this method may be insufficient to remove hyphae deeply embedded in paper fibers, allowing fungal re-emergence and potential recolonization of the material.

Although treatment with 80% ethanol alone reduced the growth of strain F1 and no colony formation was observed for strain F2 [Table 3], the paper exhibited intense yellowing, suggesting aesthetic damage to the material [Figure 7]. Fungi produce various pigments, mainly polyketides and carotenoids, which stain paper surfaces (Pavlović *et al.* 2022). When active fungi are present on the paper surface, they produce secondary metabolites, including pigments like melanin (Pavlović *et al.* 2022; Nitiu *et al.* 2020). These pigments, along with acids and enzymes secreted by fungi, can significantly alter the physical and chemical properties of paper (Borrego *et al.* 2018). When ethanol is applied directly to these active fungi, the metabolites, such as pigments, can dissolve and diffuse on the paper surface, causing yellow discoloration. However, as observed in Figure 7, the combined treatment of vacuuming followed by 80% ethanol application did not result in prominent discoloration. This suggests that vacuuming helps partially remove spores, mycelium, and other fungal structures present on the paper surface. Consequently, the amount of pigmented or acidic substances reacting with ethanol is significantly reduced. When 80% ethanol was applied after vacuuming, a significant reduction in strain F1 growth diameter was observed, while strain F2 showed no signs of development. This combination increases the success rate of fungal colony elimination while maintaining paper integrity.

Conclusion

Although 70% ethanol is commonly used in conservation treatments in archives, libraries and museums, this study questions its effectiveness against strains of *Eurotium sp*. and *Penicillium sp*. isolated from paper artifacts. The in vitro procedures, including contact method and microcultures, suggest that 80% ethanol concentrations are more effective in inhibiting the growth of these strains. In this context, 80% ethanol primarily acts as a fungistatic agent, providing a high inhibition percentage but not eliminating fungal colonies.

The research suggests a combined method in which vacuum cleaning is first incorporated to remove surface fungal growth, followed by an 80% ethanol application, which is more efficient in inhibiting fungal growth and conidia germination, as well as preventing recolonization on paper. This protocol significantly reduces the growth of *Eurotium sp*. (strain F1) and eliminates the development of *Penicillium sp.* (strain F2), achieving greater effectiveness in combating fungal biodeterioration in paper artifacts.

References

ABDEL-MAKSOUD, G., ABDEL-NASSER, M., SULTAN, M.H., EID, A.M., ALOTAIBI, S.H., HASSAN, S.E.-D. y FOUDA, A. (2022). "Fungal biodeterioration of a historical manuscript dating back to the 14th century: An insight into various fungal strains and their enzymatic activities". *Life*, 12: 1821. https://doi.org/10.3390/life12111821

BALL, S.R., KWAN, A.H. y SUNDE, M. (2019). "Hydrophobin rodlets on the fungal cell wall". En LATGÉ, J.P. (ed.). *The Fungal Cell Wall.* Cham: Springer (Current Topics in Microbiology and Immunology, vol. 425), 29–51.

BENJAMIN, C.R. (1955). "Ascocarps of Aspergillus and Penicillium", *Mycologia*, 47(5): 669–687. https://doi.org/10.1080/00275514.1955.12024485

BORREGO, S., GUIAMET, P., VIVAR, I. y BATTISTONI, P. (2018). "Fungi involved in biodeterioration of documents in paper and effect on substrate", *Acta Microscopica*, 27 (1): 37-44. https://acta-microscopica.org/acta/article/view/112

BORREGO, S., LAVIN, P., PERDOMO, I., GÓMEZ DE SARAVIA, S. y GUIAMET, P. (2012). "Determination of Indoor Air Quality in Archives and Biodeterioration of the Documentary Heritage", ISRN *Microbiology*, 2012: 1–10. https://doi.org/10.5402/2012/680598

BUTZ, P., FUNTENBERGER, S., HABERDITZL, T. y TAUSCHER, B. (1996). "High pressure inactivation of *Byssochlamys nivea* ascospores and other heat resistant moulds", L*WT – Food Science and Technology,* 29(5-6): 404-410. https://doi.org/10.1006/fstl.1996.0062

CAPPITELLI, F., CATTÒ, C. y VILLA, F. (2020). "The Control of Cultural Heritage Microbial Deterioration", *Microorganisms*, 8(10): 1542. https://doi.org/10.3390/microorganisms8101542

CUBERO, M. (2007). "Preservación del patrimonio documental de La Palma", *Revista de Estudios Generales de la Isla de La Palma*, 3: 321-362.

DANTIGNY, P., TCHOBANOV, I., BENSOUSSAN, M. y ZWIETERING, M.H. (2005). "Modeling the effect of ethanol vapor on the germination time of Penicillium chrysogenum", *Journal of Food Protection*, 68(6): 1203–1207. https://doi.org/10.4315/0362-028X-68.6.1203

DAO, T., BENSOUSSAN, M., GERVAIS, P. y DANTIGNY, P. (2008). "Inactivation of conidia of Penicillium chrysogenum, P. digitatum and P. italicum by ethanol solutions and vapours", *International Journal of Food Microbiology*, 122(1–2): 68–73. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2007.11.054

DIJKSTERHUIS, J. y TEUNISSEN, P.G.M. (2004). "Dormant ascospores of Talaromyces macrosporus are activated to germinate after treatment with ultra-high pressure", *Journal of Applied Microbiology*, 96(1): 162-169. https://doi.org/10.1046/j.1365-2672.2003.02133.x

DIJKSTERHUIS, J., NIJSSE, J., HOEKSTRA, F.A. y GOLOVINA, E.A. (2007). "High viscosity and anisotropy characterize the cytoplasm of fungal dormant stress-resistant spores", *Eukaryotic Cell*, 6(2): 157-170. https://doi.org/10.1128/ec.00247-06

DIJKSTERHUIS, J., VAN DRIEL, K.G.A., SANDERS, M.G., MOLENAAR, D., HOUBRAKEN, J.A., SAMSON, R.A. y KETS, E.P. (2002). "Trehalose degradation and glucose efflux precede cell ejection during germination of heat-resistant ascospores of Talaromyces macrosporus", *Archives of Microbiology*, 178(1): 1-7. https://doi.org/10.1007/s00203-002-0410-x

DROGUETT, D.M. (2023). "Una experiencia de limpieza de líquenes en cerámica arqueológica, ensayo con etanol y amonio cuaternario", *Patrimonio y Arqueología*, 1(1): 109-120. https://ojs.umsa.bo/ojs/index.php/patrimonio_arqueologia/article/view/460/384

FOUDA, A., ABDEL-NASSER, M., KHALIL, A.M.A., HASSAN, S.E.-D. y MAKSOUD, G.A. (2022). "Investigate the role of fungal communities associated with a historical manuscript from the 17th century in biodegradation", *npj Materials Degradation*, 6: 88. https://doi.org/10.1038/s41529-022-00296-4

GALLO, F., PASQUARIELLO, G. y VALENTI, P. (2003). "Libraries and archives". En MANDRIOLI, P., CANEVA, G. y SABBIONI, C. (eds.). Cultural heritage and aerobiology. Methods and measurement techniques for biodeterioration monitoring. Berlín: *Springer*, 175-193.

HUSSEINY, S.M., EL KAREEM, H.A., GOMAA, O.M. y TALAAT, R. (2014). "The role of ethanol in preventing biofilm formation of Penicillium purpurogenum", *Annals of Microbiology*, 64: 1429-1437. https://doi.org/10.1007/s13213-013-0788-5

KIRTZEL, J., UEBERSCHAAR, N., DECKERT-GAUDIG, T., KRAUSE, K., DECKERT, V., GADD, G.M. y KOTHE, E. (2019). "Organic acids, siderophores, enzymes and mechanical pressure for black slate bioweathering with the basidiomycete Schizophyllum commune". *Environmental Microbiology*, 22(4): 1535–1546. https://doi.org/10.1111/1462-2920.14749

KRAKOVÁ, L., ŠOLTYS, K., OTLEWSKA, A., PIETRZAK, K., PURKRTOVÁ, S., SAVICKÁ, D., PUŠKÁROVÁ, A., BUČKOVÁ, M., SZEMES, T., BUDIŠ, J., et al. (2018). "Comparison of methods for identification of microbial communities in book collections: Culture-dependent (sequencing and MALDI-TOF MS) and culture-independent (Illumina MiSeq)", *International Biodeterioration & Biodegradation*, 131: 51–59. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.02.015

LUCAS, C., DÉNIEL, F. y DANTIGNY, P. (2017). "Ethanol as an Antifungal Treatment for Silver Gelatin Prints: Implementation Methods Evaluation", Restaurator. *International Journal for the Preservation of Library and Archival Material,* 38(3): 235-248. https://doi.org/10.1515/res-2017-0003

NITIU, D. S., MALLO, A. C. y SAPARRAT, M. C. N. (2020). "Fungal melanins that deteriorate paper cultural heritage: An overview", *Mycologia*, 112 (5): 859–870. https://doi.org/10.1080/00275514.2020.1788846

OETARI, A., SUSETYO-SALIM, T., SJAMSURIDZAL, W., SUHERMAN, E.A., MONICA, M., WONGSO, R., FITRI, R., NURLAILI, D.G., AYU, D.C. y TEJA, T.P. (2016). "Occurrence of fungi on deteriorated old dluwang manuscripts from Indonesia", I*nternational Biodeterioration & Biodegradation,* 114: 94–103. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.05.025

OKPALANOZIE, O.E., ADEBUSOYE, S.A., TROIANO, F., CATTÒ, C., ILORI, M.O. y CAPPITELLI, F. (2018). "Assessment of indoor air environment of a Nigerian museum library and its biodeteriorated books using culture-dependent and –independent techniques", *International Biodeterioration & Biodegradation,* 132: 139–149. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2018.03.003

PAVLOVIČ, J., FARKAS, Z., KRAKOVÁ, L. y PANGALLO, D. (2022). "Color stains on paper: fungal pigments, synthetic dyes and their hypothetical removal by enzymatic approaches", *Applied Sciences,* 12: 9991. https://doi.org/10.3390/app12199991

PIHET, M., VANDEPUTTE, P., TRONCHIN, G., RENIER, G., SAULNIER, P., GEORGEAULT, S., MALLET, R., CHABASSE, D., SYMOENS, F. y BOUCHARA, J.P. (2009). "Melanin is an essential component for the integrity of the cell wall of Aspergillus fumigatus conidia", *BMC Microbiology*, 9: 177. https://doi.org/10.1186/1471-2180-9-177

PINHEIRO, A.C., SEQUEIRA, S.O. y MACEDO, M.F. (2019). "Fungi in archives, libraries, and museums: a review on paper conservation and human health", *Critical Reviews in Microbiology,* 45(5-6): 686–700. https://doi.org/10.1080/1040841x.2019.1690420

PONTÓN, J. y QUINDÓS, G. (2006). "Mecanismos de resistencia a la terapéutica antifúngica", *Medicina Clínica*, 126(Supl.1): 56-60. https://doi.org/10.1157/13097528

REYNS, K.M.F.A., VERAVERBEKE, E.A. y MICHIELS, C.W. (2003). "Activation and inactivation of Talaromyces macrosporus ascospores by high hydrostatic pressure", *Journal of Food Protection*, 66(6): 1035-1042. https://doi.org/10.4315/0362-028x-66.6.1035

RUIJTER, G.J.G., BAX, M., PATEL, H., FLITTER, S.J., VAN DE VONDERVORT, P.J.I., DE VRIES, R.P., VAN KUYK, P.A. y VISSER, J. (2003). "Mannitol is required for stress tolerance in Aspergillus niger conidiospores", *Eukaryotic Cell*, 2(4): 690–698. https://doi.org/10.1128/ec.2.4.690-698.2003

SAMEÑO, M. (2018). El biodeterioro en edificios del patrimonio cultural. Metodología de evaluación de tratamientos biocidas. Tesis doctoral. Sevilla: Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla / Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico.

SEQUEIRA, S. O., PHILLIPS, A. J. L., CABRITA, E. J. y MACEDO, M. F. (2017). "Ethanol as an antifungal treatment for paper: Short-term and long-term effects", *Studies in Conservation*, 62: 33-42. https://doi.org/10.1080/00393630.2015.1137428

SHAMSIAN, A., FATA, A., MOHAJERI, M. y GHAZVINI, K. (2006). "Fungal contaminations in historical manuscripts at Astan Quds Museum Library, Mashhad, Iran", *International Journal of Agriculture & Biology,* 8(3): 420–422. https://www.researchgate.net/publication/228361110_Fungal_Contaminations_in_Historical_Manuscripts_at_Astan_Quds_Museum_Library_Mashhad_Iran

TEIXEIRA, F.S., DOS REIS, T.A., SGUBIN, L., THOMÉ, L.E., BEI, I.W., CLEMENCIO, R.E., CORRÊA, B. y SALVADORI, M.C. (2018). "Disinfection of ancient paper contaminated with fungi using supercritical carbon dioxide", *Journal of Cultural Heritage*, 30: 110–116. https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.09.009

VAILLANT CALLOL, M. (2013). "Introducción al estudio de los agentes biológicos y el biodeterioro de las colecciones documentales". En VAILLANT CALLOL, M. (ed.). *Biodeterioro del patrimonio histórico documental: alternativas para su erradicación y control.* Río de Janeiro: MAST / FCRB, 15 19.

VARGAS, A.C. (2011). *Evaluación y selección de productos para el control del biodeterioro en los fondos históricos de la Biblioteca Nacional de Colombia*. Trabajo de grado. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ciencias, Carrera de Microbiología Industrial.

VISAGIE, C.M., YILMAZ, N., RENAUD, J.B., SUMARAH, M.W., HUBKA, V., FRISVAD, J.C., CHEN, A.J., MEIJER, M. y SEIFERT, K.A. (2017). "A survey of xerophilic Aspergillus from indoor environment, including descriptions of two new section Aspergillus species producing eurotium-like sexual states", *MycoKeys*, 19: 1–30. https://doi.org/10.3897/mycokeys.19.11161

WYATT, T.T., GOLOVINA, E.A., VAN LEEUWEN, M.R., WÖSTEN, H.A.B. y DIJKSTERHUIS, J. (2014c). "Two-stage maturation of extreme heat resistant ascospores of Neosartorya fischeri (Aspergillus fischeri) involves reduction of bulk water and accumulation of trehalose and trehalose-based oligosaccharides". En *Mechanisms underlying extreme heat resistance of ascospores of Neosartorya fischeri*. Utrecht: Uitgeverij Merlin, 99-121.

WYATT, T.T., VAN LEEUWEN, M.R., GERWIG, G.J., GOLOVINA, E.A., HOEKSTRA, F.A., SNYDER, N., SEEBERGER, P.H., VAN DOORN, T., VISAGIE, C., VERKENNIS, A., KAMERLING, J.P., WÖSTEN, H.A.B. y DIJKSTERHUIS, J. (2014b). "Novel trehalose-based oligosaccharides from extreme stress-tolerant ascospores of Neosartorya fischeri (Aspergillus fischeri) protect against heat". *En Mechanisms underlying extreme heat resistance of ascospores of Neosartorya fischeri.* Utrecht: Uitgeverij Merlin, 59-98.

WYATT, T.T., VAN LEEUWEN, M.R., GOLOVINA, E.A., HOEKSTRA, F.A., KUENSTNER, E.J., PALUMBO, E.A., SNYDER, N.L., VISAGIE, C., VERKENNIS, A., HALLSWORTH, J.E., WÖSTEN, H.A.B. y DIJKSTERHUIS, J. (2015). "Functionality and prevalence of trehalose-based oligosaccharides as novel compatible solutes in ascospores of Neosartorya fischeri (Aspergillus fischeri) and other fungi", *Environmental Microbiology*, 17(2): 395–411. https://doi.org/10.1111/1462-2920.12558

WYATT, T.T., WÖSTEN, H.A.B. y DIJKSTERHUIS, J. (2014a). "General Introduction". En Mechanisms underlying extreme heat resistance of ascospores of Neosartorya fischeri. Utrecht: Universiteit Utrecht, 9-57.

YANG, F., CHENG, L., DU, Y., XIA, L. y LONG, C. (2022). "Functional identification of the DHN melanin synthesis gene cluster and its role in UV-C tolerance in citrus postharvest pathogenic fungus Penicillium digitatum", *Fungal Biology,* 126(9): 566–575. https://doi.org/10.1016/j.funbio.2022.07.002

ZOTTI, M., FERRONI, A. y CALVINI, P. (2008). "Microfungal biodeterioration of historic paper: Preliminary FTIR and microbiological analyses", I*nternational Biodeterioration & Biodegradation*, 62(2): 186–194. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2008.01.005

Autor/es



María Domínguez Rojas
est.mariap.dominguez@unimilitar.edu.co
Universidad Militar Nueva Granda
https://orcid.org/0009-0004-9586-5636

María Domínguez Rojas is an undergraduate Biology student at the Universidad Militar Nueva Granada. She is currently involved in a research project focused on the evaluation of natural extracts and essential oils from plants as antifungal agents for the conservation of movable cultural heritage. Her interests center on the development of ecological strategies for the control of biodeterioration, through the use of natural products and traditional knowledge from Latin America. This experience represents her first formal engagement with scientific research applied to heritage conservation and has strengthened her commitment to this interdisciplinary field that bridges biology, microbiology, and cultural heritage management.



Maria Alejandra García Luna
est.maria.garcia6@unimilitar.edu.co
Universidad Militar Nueva Granda
https://orcid.org/0009-0007-2039-136X

María Alejandra García Luna is an undergraduate Biology student at the Universidad Militar Nueva Granada. She has a strong interest in microbiology, particularly in the study of microorganisms and their application across different areas of biology. Throughout her academic training, she has participated in research experiences related to the conservation of cultural heritage, which have allowed her to explore the role of microorganisms in biodeterioration processes and their control. While her main focus lies within the broader field of microbiology, she is especially interested in applying this knowledge in interdisciplinary contexts such as heritage conservation, environmental health, and biological control.



Juan Sebastián Valencia
Juan.valencia@uexternado.edu.co
Universidad Externado de Colombia
https://orcid.org/0000-0002-2462-7954

Conservator-Restorer of Cultural Heritage from Universidad Externado de Colombia. Master's degree in design of Cultural Spaces and Experiences from the Higher School of Design of Barcelona (ESDESIGN) and the International University of Valencia, Spain. Has extensive knowledge in areas related to the conservation and restoration of cultural heritage, particularly in preventive conservation; conservation and restoration of easel painting, mural painting, paper, and graphic and documentary materials; polychrome wooden sculpture; ceramics; and pre-Hispanic metalwork. For the past 23 years to the present, has been involved in academia and university teaching within the Cultural Heritage Conservation and Restoration program at the Faculty of Cultural Heritage Studies, Universidad Externado de Colombia. Since 2016, has served as lead conservator-restorer of the Restoration Workshop of the Franciscan Community, Province of Santa Fe in Colombia.



Esra Keles
esra.keles@ktb.gov.tr
Türkiye Yazma Eserler Kurumu Başkanlığı
https://orcid.org/0000-0001-9517-1846

Esra Keleş was born in Istanbul and have a PhD in Molecular Biology and Genetics from Istanbul Kültür University, where her doctoral research focused on the molecular identification of microbial communities responsible for the deterioration of historical manuscripts. She completed her undergraduate studies in Biology at Istanbul University, and later earned a master's degree in Forest Entomology and Conservation with a thesis on The Damage And Control of Stegobium Paniceum (L.) to Manuscripts and Rare Printed Books. From 2009 to 2017, she worked at the Süleymaniye Manuscript Library, and since 2017, she has been working as a Book Pathologist at the Department of Conservation and Archive. Her areas of expertise include diagnosing and preventing biological deterioration in manuscripts, analyzing microbial communities, implementing integrated pest management strategies in library environments, and applying cold and anoxic disinfestation techniques. Keleş is also actively involved in the field of biocodicology, exploring how DNA and protein analyses can contribute to the preservation of historical manuscripts.



María Camila Patiño R
Maria.patino2@uexternado.edu.co
Universidad Externado de Colombia
https://orcid.org/0000-0003-3090-6658

Industrial Microbiologist, Master in Museology and Heritage Management from the Universidad Nacional de Colombia, obtained a Master's degree in Diagnosis of the State of Conservation of Historical Heritage from the Universidad Pablo de Olavide in Seville, Spain. Specialist in University Teaching. She works in the lines of care and management of collections, processes of biodeterioration of materials and preventive conservation, integrating scientific analysis in decision making. Professor of Biology Applied to Heritage Conservation at the Universidad Militar Nueva Granada, and currently teaches at the Faculty of Cultural Heritage Studies at the Universidad Externado de Colombia and is the coordinator of the Cultural Heritage Research Center (CIPAC) at the same institution.

Artículo enviado 13/07/2025
Artículo aceptado el 09/04/2026

https://doi.org/10.37558/gec.v29i1.1415



Conservation Ethics and Sacred Heritage: Reflections from a Megillat Esther

Luís Pereira, Ângela Ferraz, Pedro Proença Cunha

Abstract: This article discusses the conservation treatment of a *Megillat Esther* (Scroll of Esther) undertaken at the Polytechnic Institute of Tomar, which served as a point of departure for a broader reflection on the ethical and methodological challenges involved in conserving Jewish sacred objects. Beyond the technical intervention, the study explores the complex interplay between halakhic prescriptions, ritual function, and professional conservation ethics. It underscores the scarcity of clear, accessible guidelines and scholarly research addressing the care of ritual heritage, leaving conservators with limited reference frameworks when dealing with objects of living religious significance. Drawing on contemporary approaches to values-based and community-centred conservation, the discussion argues for the establishment of interdisciplinary collaboration between conservators, Jewish Studies' scholars, and religious authorities to develop coherent, context-sensitive ethical protocols that respect both the material integrity and the spiritual meaning of sacred artefacts.

Keywords: conservation ethics, sacred objets, jewish heritage, religious heritage preservation, intercultural conservation practices, parchment conservation

Ética en la conservación del patrimonio sagrado: reflexiones a partir de una Meguilat Ester

Resumen: Este artículo presenta la intervención de conservación de una *Meguilat Ester* (Rollo de Ester) realizada en el Instituto Politécnico de Tomar, que sirvió como punto de partida para una reflexión más amplia sobre los desafíos éticos y metodológicos implicados en la conservación de objetos sagrados judíos. Más allá del tratamiento técnico, el estudio explora la compleja relación entre las prescripciones halájicas, la función ritual y la ética profesional de la conservación. Se subraya la escasez de directrices claras y accesibles, así como la falta de estudios académicos dedicados al cuidado del patrimonio ritual, lo que deja a los conservadores con marcos de referencia limitados al tratar con objetos de significado religioso vivo. A partir de enfoques contemporáneos basados en los valores y centrados en las comunidades, se propone el establecimiento de una colaboración interdisciplinar entre conservadores, estudiosos judíos y autoridades religiosas para desarrollar protocolos éticos coherentes y sensibles al contexto, que respeten tanto la integridad material como el significado espiritual de los artefactos sagrados.

Palabras clave: ética de la conservación, objetos sagrados, patrimonio judío, preservación del patrimonio religioso, práticas de conservación intercultural, conservación de pergaminos

Ética da conservação de património sagrado: reflexões a partir de uma Meguilat Ester

Resumo: Este artigo apresenta o tratamento de conservação de uma Megillat Esther (Rolo de Ester) realizado no Instituto Politécnico de Tomar, que serviu como ponto de partida para uma reflexão mais ampla sobre os desafios éticos e metodológicos envolvidos na conservação de objetos sagrados judaicos. Para além da intervenção técnica, o estudo explora a complexa relação entre as prescrições haláchicas, a função ritual e a ética profissional da conservação e restauro. Salienta a escassez de diretrizes claras e acessíveis, bem como de investigação académica sobre o cuidado do património ritual, deixando os conservadores-restauradores com poucos referenciais ao lidar com objetos de significado religioso vivo. Com base em abordagens contemporâneas centradas nos valores e nas comunidades, a discussão defende o estabelecimento de uma colaboração interdisciplinar entre conservadores, estudiosos do judaísmo e autoridades religiosas, com vista a desenvolver protocolos éticos coerentes e sensíveis ao contexto, que respeitem simultaneamente a integridade material e o significado espiritual dos artefatos sagrados.

Palavras-chave: ética da conservação, objetos sagrados, património judaico, preservação do património religiosos, práticas de conservação intercultural, conservação de pergaminhos

Introduction

Between October 2023 and May 2024, a conservation and restoration intervention was carried out at the Polytechnic Institute of Tomar (Portugal) on a parchment scroll containing a Hebrew text belonging to a private collection. The parchment scroll was in a very poor condition, severely desiccated, and the various layers of the scroll had become fused together, making it impossible to open or read the text.

The conservation intervention was undertaken in response to specific objectives defined by the owner, Pedro Proença Cunha. The primary aim was to reveal the concealed text, thereby enabling its study. From the outset, considering its typology and the materials employed, it was presumed to be, in all likelihood, a religious text. Additionally, the owner expressed the intention that the conservation and restoration treatment should allow the parchment to be returned, in rolled form, to its original silver case.

Due to the object's poor state of preservation, the intervention began without a clear understanding of the precise nature of the text. The process proved to be highly complex: in addition to the technical challenges arising from the extensive damage to the parchment, ethical considerations emerged as one of the major difficulties throughout the intervention—both during the treatment and in its aftermath. From the outset, the work was guided by a difficult dilemma: either to present a partially completed intervention, thereby preserving a significant portion of the text still concealed but safeguarding its informational content for future generations, or to proceed with the complete unrolling of the scroll, accepting the considerable risk of losing parts of the text and damaging sections of the parchment support.

The first option was chosen. Following the intervention, and once the content of the text had been identified, it became necessary to critically assess the entire conservation process and its boundaries. The object was ultimately identified as a *Megillat Esther*—a parchment scroll recounting the story of Queen Esther, traditionally read in synagogues during the Jewish festival of Purim (Mucznik *et al.* 2009).

None of the conservator-restorers involved in the intervention were Jewish, nor did they possess prior knowledge of Jewish culture. Following an initial phase of research to understand the cultural significance of the object, it became clear that, according to Jewish law, a *Megillat Esther*—although not occupying the same level of sanctity as a Torah scroll—may nonetheless be regarded as a sacred object. Consequently, certain precepts must be observed with regard to its conservation.

At this stage, a fundamental question emerged: what potential implications might the intervention have had, both for the object and for the conservator-restorers themselves, due to a possible lack of awareness of the strict precepts outlined in *Halakhah*—the body of Talmudic and rabbinic legal writing—concerning interventions in sacred texts?

This article addresses two interrelated dimensions of ethical dilemmas. One the one hand, it considers the decision-making process involved in the defining the conservation and restoration treatment, acknowledging the inherent risks and limitations associated with any chosen course of action. One the other, it examines the broader ethical implications of engaging with sacred text, particularly when they belong to a specific community to which neither the conservation team nor the objects's owner belongs. In this context, the present case study—the conservation and restoration of a *Megillat Esther* and its particular circumstances—is understood as a point of departure, offering an opportunity to explore more broadly the complexity inherent in the conservation and restoration of religious heritage, in which multiple dimensions coexist and must be carefully considered: the ongoing need to assess the limits of intervention; the need to interpret the symbolic and ritual values of Jewish objects; and the need to reconcile their devotional, functional, and cultural dimensions—which, as this case illustrates, may at times be in conflict.

Conservation of the Esther scroll

In October 2023, when the scroll arrived at the Graphic Documents Conservation Laboratory of the Polytechnic Institute of Tomar for treatment, it was found to be in a highly fragile condition. The object, measured 20,6 centimeters in height, consisted of a handwritten parchment scroll with Hebrew characters, rolled around a silver central handle [Figures 1]. The upper part of this roller (with a diameter of 4,1 cm) was also made of silver and featured a decorative finial in the form of a crown with a pendant and vegetal motifs [Figure 2]. This element was the upper terminal of a cylindrical case forming the main body of the container designed to hold and protect the parchment, which was in the owner's possession. The winding rod used to roll and unroll the parchment within the case was missing; it was likely also made of silver and would have been sewn to the edge of the first membrane of the scroll.

The parchment exhibited several signs of degradation, including tears, material losses, surface soiling, and abrasion marks [Figure 3].The surface was found to be extremely rigid and brittle, a condition attributed to prolonged fluctuations in internal relative humidity (Kite and Thomson 2006) and to extensive gelatinisation, which caused the different layers of the scroll to fuse together [Figure 4]. This adhesion of layers represented the main challenge in the process of unrolling the parchment.

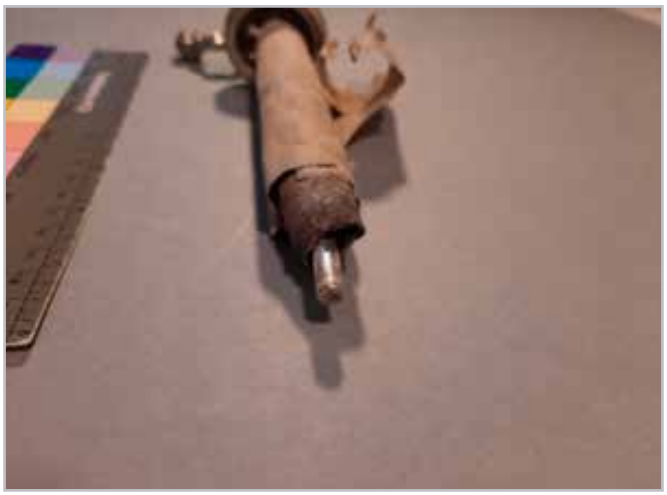
The transformation of collagen—the primary protein in animal skin—into gelatine is a common form of deterioration





Figures 1-2 .- Figure 1: The scroll before the conservation treatment. Figure 2: Decorative silver crown from the upper part of the protective case (now missing).





Figures 3-4.- Figure 3: The parchment exhibited significant physical damage, including tears and losses. Figure 4.:The effects of gelatinisation were particularly visible in the lower section of the document, where several fused layers could be observed.

in parchment. Factors such as high temperature and relative humidity, as well as exposure to pollutants, induce chemical and morphological changes in the collagen fibres, resulting in the formation of brittle surfaces and, in the case of scrolls, the fusion of multiple parchment layers (Kite and Thomson 2006; Larsen *et al.* 2013).

The main objective of the conservation and restoration intervention was to mitigate the impact of the existing damage and to enable the complete unrolling of the parchment. The proposed intervention was therefore designed to address these specific requirements and included the following procedures:

a) humidification of the parchment in a controlled humidity chamber, to promote the adsorption of moisture by the support and thereby increase its flexibility;
b) localized humidification of the gelatinised areas, which had caused the adhesion between parchment layers and prevented the scroll from being opened;
c) consolidation of tears, to prevent further fragmentation and allow the safe handling of the document;
d) design and construction of an archival storage box, to ensure the long-term protection and appropriate housing of the scroll.

Humidification of the parchment in a controlled humidity chamber produced positive results, increasing its flexibility and consequently reducing its rigidity [Figure 5]. However, during the subsequent stage of localized humidification of the gelatinised areas (using an ultrasonic humidifier) [Figure 6], the main technical challenges — as well as the first ethical dilemmas — began to emerge. On the one hand, the use of moisture on parchment affected by gelatinisation is generally discouraged (Larsen *et al.* 2013), as there is a significant risk of its transformation into a colloidal substance. On the other hand, localized treatment is referenced in the literature as the recommended method for addressing such conditions (Quandt 1996; Kite and Thomson 2006).




Figures 5-6.- Figure 5: The scroll inside the humidity chamber. Figure 6: Localized humidification of the parchment using water vapour.




Figures 7-8.- Figure 7: Detail of the parchment flattening process. After humidification of the support, blotting paper and weights were applied to the surface, as shown in the image. Figure 8: A view of the Megillat Esther after 14 cm of parchment had been unrolled, revealing a visible section of the text.

The intervention confirmed this delicate balance: while the process successfully enabled the separation of several overlapping layers, it also resulted in some damage to the text, including loss of information. After unrolling approximately 14 cm of the parchment [Figure 5-6, 7-8], it became evident that further humidification could not proceed without compromising the object's integrity—that is, without risking significant loss of textual content or structural stability—since the surface remained extremely rigid and brittle, and the underlying layers were strongly adhered to one another.

This situation presented an ethical dilemma: to preserve the scroll partially unrolled, ensuring the protection of the concealed text for the future, or to pursue full unrolling at the cost of a considerable risk of damaging the parchment and losing parts of the text. Ultimately, the first option prevailed. The commitment that conservator-restorers hold toward cultural heritage is clearly articulated in several articles of the profession's Code of Ethics and Deontology (European Confederation of Conservator-Restorers' Organizations – E.C.C.O.). The Code states that "the conservator-restorer shall respect the […] physical integrity of the cultural heritage entrusted to her/his care" (Art. 5); that they "shall not continue a treatment, which is not in the best interest of the cultural heritage" (Art. 11); and that they "should limit the treatment to only that which is necessary" (Art. 8). Upon evaluation, all these principles were directly applicable to the situation at hand. Moreover, recent advances in artificial intelligence and digital 3D tomography open new possibilities for future approaches in cases such as this—particularly for the potential non-invasive reading of texts that remain inaccessible due to their fragile state or the inherent limitations of conservation treatments. Notable examples include the recent studies on the Herculaneum and Pompeii papyrus scrolls (Marchant & Nature 2024; Weber 2024).

Finally, the conservation and restoration work carried out in this case allowed for the partial unrolling of the scroll and the recovery of a substantial portion of the text, thus enabling its identification and fulfilling one of the primary objectives of the intervention.





Figures 9-10.- Figure 9: Consolidation of the tears. Figure 10: Detail of the support system for the silver crown, made from Plastazote© (high-density polyethylene foam).





Figures 11-12.- Figure 11: Detail of the parchment flattening process. After humidification of the support, blotting paper and weights were applied to the surface, as shown in the image. Figure 12: A view of the *Megillat Esther* after 14 cm of parchment had been unrolled, revealing a visible section of the text.

Once this decision had been made, the consolidation of tears was carried out using lamb gut and starch paste [figure 9]. Finally, a storage structure for the scroll was designed, consisting of a base onto which the parchment was secured with polyester ribbons, and a protective enclosure made of acid-free grey-white cardboard [Figures 10 and 11]. This housing was intended to ensure the mechanical stability of the scroll and to provide adequate protection against environmental fluctuations and handling-related stress during storage and transport.

The status of the *Megillat Esther:* ritual function and halakhic frameworks

Once the conservation and restoration intervention had been completed, it became possible to identify the content of the scroll, as part of the text was now visible [Figure 12]. It was determined that the object was a *Megillat Esther* (*megillat* meaning "scroll" in Hebrew)—the parchment containing the biblical Book of Esther, which is read in synagogues during the festival of Purim (Rothschild Foundation Hanadiv Europe). This festival commemorates a Biblical story wherein Jews in Babylonia escaped a planned attack orchestrated by Haman, an advisor to King Ahasuerus (or Xerxes I). It was the timely intervention of the Jewish queen Esther that persuaded her husband to revoke the decree, that led instead to Haman's downfall and execution (Mucznik *et al.* 2009).

The *Megillat Esther* is written in ink on parchment and stitched together in the form of a scroll, much like the Torah. It is one of the five *megillot* (scrolls) that form part of the *Tanakh* (the Hebrew Bible), specifically within the section known as the *Ketuvim* (Writings). For this reason, it is considered a sacred text, recognized as part of the divine scripture and bearing religious and spiritual significance (Avnery 2019; Wexler 2024).

Traditional Judaism recognizes two categories of ritual objects: those that possess an inherent quality of holiness, and those that are essential for the performance of a particular ritual or commandment but lack an intrinsic quality that can be defined as "sacred" (Greene 1992; Schindler 2023). Within the category of sacred objects (*klei kodesh*) are included the three written texts: the *Sefer Torah* (Torah scroll), the *tefillin* [1], and the *mezuzah* [2]. All of these are, or contain, biblical texts that must be handwritten on parchment, in a specific script, and in strict accordance with prescribed rules, by specially trained scribes (*soferim*). These scribes are also responsible for assembling the Torah scrolls—sewing together the sheets of parchment and mounting them on rollers—and for producing the cases that contain the *tefillin* (Greene 1992).

The defining characteristic shared by objects in this group is that they contain words—specifically, the name of God, or by extension, any divinely written or inspired words—from which their sanctity is derived. The *Megillat Esther* does not contain the name of God, and although it is regarded as a sacred text (Greene 1992), it does not possess the same level of holiness as a *Sefer Torah*, which is considered the most sacred text in Judaism (Thomson 1998; Maggen 2005), reflecting a hierarchical structure among sacred texts in Judaism.

In Judaism, the concept of a sacred object also depends on its religious use. For example, a *Megillat Esther* scroll used for the public reading of Purim in a synagogue possesses a form of functional sanctity. The reverence afforded to this object is linked to its role in fulfilling a specific commandment and to its solemn reading, which recalls a pivotal event in Jewish history. Thus, according to Jewish law, the *Megillat Esther* may be considered a sacred object, primarily because of its liturgical function during Purim and its inclusion within the *Tanakh*.

Also, in the case of the *Megillat Esther*, each word must likewise be written by a Jewish scribe (*sofer*), and all the lines must be scored, as for a *Sefer Torah* (Grossman 1997; Friedman 2006-2014). According to Jewish law and tradition, primacy is given to the text itself; this centrality of textual discourse in Jewish life—as both reflection and guide for practice—shapes the production, use, and treatment of sacred writings. These texts are created for communal and private study as well as for devotional observance; they are more instrumental than iconic. Because such texts constitute an essential part of Jewish culture and its material heritage, they are preserved in good condition for as long as possible. When they cease to be ritually suitable for use—meaning they no longer meet the *halakhic* (Talmudic or rabbinic legal) requirements, usually because the text is no longer easily legible—they are either buried or placed in a *genizah*, a storage repository for worn or unusable ritual objects, particularly those containing the name of God (Grossman 1997; Scheleicher 2010; Schindler 2023). At that point, they are referred to as *pasul* (invalid) or non-*kosher* objects.

A *Megillat Esther* may become *pasul* due to issues arising during its production. Because each word is believed to possess divine significance, any error in writing, or the fact that it was not written by a qualified scribe, renders it invalid. The text must be generally written in Hebrew [3], free from errors, and each letter must be clearly formed and distinct from the others. The same applies if inappropriate materials are used. The megillah must be handwritten on parchment prepared from the skin of a kosher animal, using suitable ink—typically composed of natural materials—in accordance with Jewish law. The text is inscribed on several membranes of parchment that are sewn together with thread made from sinew (Elka and Mintz 2009).

A Megillat Esther also becomes pasul if it suffers damage affecting the parchment—such as tears or stains—or the writing ink, for instance through fading, flaking, or losses that compromise legibility, rendering words incomplete or unreadable (Shear 2013).

Conservation-restoration practice Vs Sacred law

The religious prescriptions cited above not only define the material and ritual life of the scroll but also impose ethical considerations for conservators-restorers, who must navigate between technical intervention and respect for sacred law. The following section examines the halakhic and ethical parameters governing the conservation of sacred Jewish manuscripts, with particular attention to the implications of material choice and ritual permissibility.

Given the condition of the *Megillat Esther* under study, it can be considered that the halakhic requirements governing its ritual use are no longer met, and that it therefore constitutes a *pasul* object. It is no longer suitable for public reading during the Purim festival in the synagogue, and given the extent of the damage, it cannot be repaired by a *sofer* (Scheleicher 2010). Consequently, like any other object within this category, it may be treated by any qualified conservator, whether Jewish or non-Jewish (Greene 1992).

By contrast, in the case of a *kosher* (ritually valid) Torah scroll, halakhic restrictions are far stricter: a non-Jewish person is not permitted to carry out any conservation treatment (Maggen 2005; Shear 2013). Only a *sofer* may prepare the ink and repair damaged letters. A conservator may never apply pigment to a manuscript or parchment scroll, even if such an act would be regarded as "retouching" or "reintegration" in conservation terminology (Shear 2013). Similarly, only a *sofer* is permitted to mend tears or re-stitch the seams that join the parchment sheets. However, the restoration of the wooden rollers that support the parchment (*ets hayyim*) is specifically permitted to be carried out by a non-Jew (Thomson 1998).

In conservation and restoration practice, there are no general restrictions regarding the use of synthetic

materials and all plant-based products are intrinsically *kosher*. However, according to Jewish law, the use of organic materials is subject to halakhic regulations that exclude any substance derived from non-*kosher* animals (Maggen 2005). Any product obtained from a forbidden animal (such as milk, eggs or hide) is prohibited. An animal is considered kosher only if it both chews the cud and has cloven hooves. All sea creatures are forbidden, except those possessing fins and scales. For instance, the use of glue derived from non-kosher fish or rabbit-skin, as well as pigskin leather for bindings, is considered unacceptable.

When conserving objects that are no longer intended for ritual use (as in the case of the *Megillat Esther* discussed here), the halakhic requirements concerning the use of *kasher* materials are less stringent, and non-kosher materials may be used. Nevertheless, even when an object is no longer destined for liturgical use, certain ethical considerations must prevail. Deprived of its original ritual function, the object nevertheless remains a meaningful symbol of cultural and religious heritage. Conservation and restoration treatments should therefore be guided by principles of respect for the object's authenticity and for the values it embodies.

Although in this particular case the use of non-*kosher* materials would have been permissible, the intervention on the *Megillat Esther* employed sheep gut. Indeed, the literature suggests that when animal-derived materials are used, they should, as far as possible, come from *kosher* species (Grossman 1997) and that the conservation process should always be carried out with due respect and sensitivity (Maggen 2005).

Furthermore, it is generally recommended that Jewish ritual materials be treated as anthropological objects, with conservation prioritizing their cultural context, use and significance, and maintaining interventions at a minimal level, avoiding extensive restoration more commonly applied to artistic objects (Greene 1992).

Handling and display of sacred scrolls

Both handling, whether in conservation-restoration practice or in museum contexts, as well as the display of sacred scrolls that are ritually valid (*Kosher*), is also subject to halakhic requirements,. A *Sefer Torah* is kept in the *Aron Hakodesh* (Holy Ark) and requires special handling procedures. It should only be touched when covered with its protective mantle (*mantle of the Torah*) and must never come into contact with the ground. Likewise, the Torah should never be placed beneath any other object, as it is regarded as the most sacred of all ritual items. According to Jewish tradition, one should stand when the Torah is removed from the Ark (Neustadt 2010). Should a Torah scroll fall to the ground, both the person responsible and those who witnessed the incident are required to fast as a sign of mourning and reverence (Schindler 2023).

According to Margalit Schindler, a Jewish preventive conservator, although these practices may not correspond to standard professional conservation procedures, similar levels of respect and consideration should be applied to the object even when it is removed from its ritual or communal setting (Schindler 2023). In their view, this approach should also be adopted within the museum context.

Regarding transport, Schindler notes that the Torah should never be placed in a car trunk, but rather in the passenger compartment, and it should never be left in a vehicle overnight (Schindler 2023). Therefore, a detailed logistical planning is required in order to keep the holiness of the scrolls untainted, especially when long-distance transporting (Scheleicher 2010).

Traditionally, direct contact with the parchment is avoided, as the natural oils from human skin can stain the ink and render the text unfit for ritual use (Schindler 2023). For this reason, the Torah is unrolled using wooden rollers, and a pointer (*yad*), often crafted in the shape of a hand, is used to follow the text during reading (Neustadt 2010). The *yad* is meant to hover just above the surface of the Torah rather than touch or roll across it, as direct contact may scrape the parchment and even damage the letters (Sofer on Site International; Askotzky 2003).

When the scroll is opened, no more than three columns are unrolled at a time, a practice rooted in Jewish tradition to preserve both modesty and the physical integrity of the scroll (Schindler 2023). All individuals, including non-Jews and women, are permitted to hold a *Sefer Torah* and read from it. Although some communities maintain customary restrictions, no halakhic law prohibits this (Schindler 2022).

The *Megillat Esther* must also be treated with care and reverence. However, unlike the Torah, it does not need to be kept in the *Aron Hakodesh*, and the regulations governing its handling are less stringent. For instance, the text of the *Megillat Esther* may be touched directly with bare hand but only if one previously washed his hands (Neustadt 2010).

Torah scrolls, *tefillin*, and *mezuzah* scrolls are not normally displayed unrolled, particularly if they are no longer fit for ritual use. Otherwise, rabbinic consultation should always be sought before exhibition (Greene 1992). It is generally accepted that the respectful display of a *pasul* parchment is halakhically permissible for educational purposes, in contrast to a *kosher* one (Abelson 1997).

In light of these considerations, the acquisition of ritually valid (kosher) sacred objects into museum collections may warrant careful reflection. Given that their handling, conservation, and display can involve specific requirements, it is important to consider whether institutions are equipped to address such conditions. In cases where this may be challenging, it could be beneficial for acquisition policies to acknowledge these constraints by prioritizing the incorporation of objects that are *pasul*

(a pattern already well established in museum collections), thereby reducing potential tensions between institutional practice and religious frameworks.

The literature reviewed indicates that halakhic rules have a significant impact on the handling, display, and conservation practices involving Jewish sacred objects. However, further empirical research is needed to better understand the handling and exhibition of such items and other ceremonial objects in museums and memory institutions (Ariese 2022). Specific cases should be referred to a curator or conservator specializing in Judaica (a professional profile currently unavailable in Portugal and relatively scarce internationally) and/or to a rabbi with expertise in this area (Greene 1992). In certain contexts, such as Morocco, non-Jewish caretakers with multi-generational experience in the stewardship of Jewish ritual or sacred objects may also constitute relevant sources of knowledge (Boum 2018).

Discussion

The conservation treatment of the *Megillat Esther* presented in this study proved to be particularly challenging due to the complex questions that had to be considered during decision-making. The treatment carried out may not be universally accepted, but after careful reflection, it was deemed to be the approach most consistent with the ethical principles of the conservation profession and the one that best served the object's significance. This intervention sought to preserve the scroll in its highest possible integrity while safeguarding the potential for future technical developments to enable new conservation or reading approaches.

At the same time, this intervention provided an opportunity to undertake research and reflection on the ethical and practical issues involved in the conservation of Jewish sacred texts. It quickly became evident that there is a significant gap in the technical literature on this subject. There is a notable lack of clear and accessible guidance for conservators on how to handle, treat, or display objects with ritual or spiritual significance. Existing information is dispersed across religious texts, a small number of academic publications, and informal community knowledge. It is often contradictory, context-dependent, and difficult to interpret for professionals unfamiliar with Jewish law and cultural practices. This fragmentation increases the likelihood that conservators, even with the best intentions, may inadvertently act in ways that conflict with religious precepts or community values.

The issue of agency in the treatment of sacred objects also proved to be complex and difficult to understand when viewed from the conservator's perspective — that of a technically and scientifically trained professional. Under Jewish law, only a *sofer* may repair a *Sefer Torah* considered *kosher*, whereas a non-Jew may restore objects already deemed *pasul*. This distinction implies that the practitioner's identity and faith may be considered as important as the technical method applied. However, *sofrim* rarely receive adequate training for conservation work that meets rigorous professional standards (Askotzky 2003). They are generally not trained in materials science, preventive conservation or conservation theory. Their education focuses on Jewish law, traditions, and the practical skills of scriptural writing, but not on the stabilization of fragile materials. The resulting question is both ethical and practical: is an repair carried out by a religiously qualified practitioner preferable to a technically correct intervention by a conservator-restorer who does not share the same faith (Thomson 1998)? In fact, it became evident that in certain cases religious prescriptions may require actions that differ from, or even contradict, accepted conservation practice. For example, in repairing a Torah scroll, it is common for a *sofer* to remove old ink and rewrite letters with new ink (Sofer on Site International), whereas a conservator-restorer would normally avoid such irreversible alteration of the original material. Another example illustrates the divergence in professional understanding: a *sofer* recently shared on social media photographs of a Torah he was repairing outdoors, placed partially unrolled on a table beside a swimming pool, captioned, "I do it outside so the sun kills the mold. Sunlight is a good remedy" [4]. Such a practice, while certainly well-intentioned, would be considered unacceptable within conservation-restoration practices. These cases expose a clear tension between ritual legitimacy and professional conservation-restoration standards, where religiously required actions may contradict what is ethically acceptable in conservation-restoration.

These tensions are not merely theoretical; they directly affect decisions regarding intervention limits and the future usability of sacred artefacts. The literature on conservation ethics (Avrami et al. 2000; Muñoz Viñas 2005; Marçal 2021) consistently advocates for a contextual, values-based approach in which meaning and significance—rather than material criteria alone—guide decision-making. However, in the case of Jewish sacred texts, the complexity of *Halakhic* law means that such contextualization requires collaboration among conservators, rabbis, *sofrim*, and community representatives [5]. Without this interdisciplinary dialogue, even well-intentioned conservation and restoration treatments risk violating the very values they are meant to protect. This dilemma highlights the need to reconsider how conservation-restoration ethics defines competence, authority, and legitimacy in intercultural and religious contexts.

In Jewish heritage, the notion of value is closely tied to the functional nature of objects. In many cases, they are regarded primarily as instruments of worship rather than autonomous heritage artefacts. As Ariese (2024) observed in her study of the Portuguese Synagogue of Amsterdam, "There is a consistent lack of interest in preservation here, in Jewish heritage. The objects are seen simply as utensils." Within this community, a functional view of objects prevails, which may imply, in this case, that preservation

means maintaining the capacity for continued ritual use. This represents a conceptual shift: conservation does not necessarily mean keeping an object in a static state but ensuring that it remains meaningful and useful to the community it serves, thereby embodying the notion of "living heritage" (UNESCO).

The Jewish concept of *le-dor va-dor* ("from generation to generation") encapsulates the importance of transmission and continuity over time. This principle aligns with contemporary heritage conservation approaches that emphasize people-centered and community-based practices (Peters 2000; Owczarek 2023). Rather than focusing exclusively on the object, conservator-restorers are increasingly encouraged to understand why an artefact matters and to whom it matters. In the context of sacred heritage, this requires integrating theological, ethical, and social dimensions into the decision-making process.

In conclusion, the conservation and restoration of Jewish sacred objects demands a framework that unites professional conservation-restoration ethics with religious and cultural sensitivity. Clearer interdisciplinary protocols—developed collaboratively among conservator-restorers, Jewish scholars, and community leaders—are essential to prevent ethical conflicts and to promote mutual respect. Only through structured dialogue and collaboration can conservation-restoration practice engage responsibly with living religious heritage, ensuring that material care supports rather than contradicts or diminishes the values and traditions it seeks to preserve.

Notes

[1] *Tefillin* are parchment scrolls inscribed with biblical passages kept in small leather boxes, which observant Jews bind with leather straps (retzuot) to their left arm and forehead during morning prayers (Rothschild Foundation Hanadiv Europe).

[2] *Mezuzah* is a parchment scroll with biblical verses that is placed in a case on the doorposts of Jewish houses or public buildings and recalls the Covenant (Rothschild Foundation Hanadiv Europe).

[3] However, for individuals who do not understand Hebrew, the use of a translated version of the *Megillah* is permitted. For example, those who read only English may consult a translation written in ink on parchment (Melamed).

[4] The *sofer* referenced in this example remains anonymous in order to safeguard personal privacy and comply with ethical research practices. The case is cited solely to illustrate differing approaches to conservation, without any intent of personal critique or identification.

[5] Given that not all Jewish communities adhere to the same halakhic percepts, another significant challenge lies in identifying the most appropriate community representatives to consult in each case. In situations such as the case under study, where the original community of the parchment is unknown, this difficulty is further increased. Moreover, the relative absence of significant Jewish communities in Portugal and Spain, as a result of historical expulsions, adds an additional layer of complexity to this process of consultation and representation.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge Rabbi Ruben Suiza for the generous sharing of his knowledge and insights, which were essential to understanding the cultural and religious significance of the Megillat Esther under study.

References

ABELSON, R. K. (1997). Display of a Pasul Torah Scroll in a Museum Case. Committee on Jewish Law and Standards of the Rabbinical Assembly, 153-162. Available: https://www.rabbinicalassembly.org/sites/default/files/public/halakhah/teshuvot/19912000/abelson_pasul.pdf . [Accessed 13/11/2025].

ASKOTZKY, Y. (2003). Caring for Torahs, *Tefillins and Mezuzahs*. In: STAM. Available: http://www.stam.net/caring_for_stam.aspx [Accessed 14/10/2025].

ARIESE, P. (2022). The entanglement of things: perceptions of the sacred in musealised synagogue space. *Jewish Culture and History*, 23: 240–261. https://doi.org/10.1080/1462169X.2022.2098635

ARIESE, P. (2024). The Jewish religious heritage continuum: Jewish religious communities' interactions with synagogues and cerimonial objects in Amsterdam. *International Journal of Heritage Studies*, 30: 799–820. https://doi.org/10.1080/13527258.2024.2334234

AVNERY, O. (2019). Using Memory, Megillat Esther Confronts the Jewish People with their Past". In: *TheTorah.com*. Available: https://thetorah.com/article/using-memory-megillat-esther-confronts-the-jewish-people-with-their-past [Accessed 07/10/2025].

AVRAMI, E., MASON, R. & De la TORRE, M. (2000). *Values and Heritage Conservation: Research Report*. Los Angeles, CA: Getty Conservation Institute. http://hdl.handle.net/10020/gci_pubs/values_heritage_research_report. [Accessed 13/11/2025].

BOUM, A. (2018). Sacred Protectors: Crossing Boundaries of Time and Faith, These Muslims Safeguard Marroco's Holly Jewish Sites. *Jewish Journal*, 10 January. Available: https://jewishjournal.com/cover_story/229491/sacred-protectors-crossing-boundaries-time-faith-muslims-safeguard-moroccos-holy-jewish-sites/. [Accessed 09/04/2026].

ELKA, D., MINTZ, S. (2009) Esther Imagined: The Art and History of Decorated Megillot. In: E.M. Cohen, S. L. Mintz, E. Schrijver. *Journey through Jewish Worlds: Highlights from the Braginsky Collection of Hebrew Manuscripts and Printed Books*, Amsterdam: Bijzondere Collecties, Universiteit van Amsterdam, 226-89.

EUROPEAN CONFEDERATION OF CONSERVATOR-RESTORERS ORGANIZATIONS (2003). *E.C.C.O. Professional Guidelines (II): Code of Ethics*. Available: https://www.ecco-eu.org/wp-content/uploads/2021/03/ECCO_professional_guidelines_II.pdf.[Accessed 27/10/2025].

FRIEDMAN, J. T. (2006-2014). Writing and seweing a Megillat Esther. In: *HaSoferet.com*. Available: https://www.hasoferet.com/halakha-for-scribes/keset-ha-sofer/chapter-28/ . [Accessed 08/10/2025].

GREENE, V., (1992). Accessories of Holiness: Defining Jewish Sacred Objects. *Journal of the American Institute for Conservation*, 31: 31-39. https://doi.org/10.1179/019713692806156411

GROSSMAN, A. K., (1997). The Gantse Megillah: Conservation of a 14-15th Century Parchment Esther Scroll. *Book and Paper Group Annual* 16: 21-32. Available: https://cool.culturalheritage.org/coolaic/sg/bpg/annual/v16/bpga16-04.pdf.[Accessed 07/10/2025].

KITE, M., & THOMSON, R. (2006). *Conservation of Leather and Related Materials*. London: Routledge. https://doi.org/10.4324/9780080454665

LARSEN, R., SOMMER, D., AXELSSON, K. & FRANK, S. (2013). Transformation of Collagen into Gelatine in Historical Leather and Parchment Caused by Natural Deterioration and Moist Treatment. In: C. Bonnot-Dicone, C. Dignard & J. Gopfrich (eds.),

ICOM-CC Leather & Related Materials Working Group: Postprints of the 10th Interim Meeting. Offenbach: ICOM-CC, 61-68.

MAGGEN, M. (2005). The conservation of sacred materials in the Israel Museum. In: Stovel, N. Stanley-Price, R. Killick (eds.), *Conservation of Living Religious Heritage*. Rome: ICCROM, 102-106.

MARÇAL, H. (2021). Becoming Difference: On the Ethics of Conserving in the In-Between. Studies in conservation, 67: 30–37. https://doi.org/10.1080/00393630.2021.1947074

MARCHANT, J. & NATURE MAGAZINE (February 6, 2024). AI Unravels Ancient Roman Scroll Charred By Volcano. Available: https://www.scientificamerican.com/article/ai-unravels-ancient-roman-scrolls-charred-by-volcano/.[Accessed 12/11/2025].

MELAMED, R. E., The Megilla. In: *Penei Halakha*. Available: https://ph.yhb.org.il/en/05-15-09/. [Accessed 07/04/2026].

MUCZNIK, L.L., TAVIM, J. A., MUCZNIK, E. & MEA, E. A. (coord.) (2009). *Dicionário do Judaísmo Português*. Lisboa: Editorial Presença.

MUÑOZ VIÑAS, S. (2005). *Contemporary Theory of Conservation*. Oxford: Elsevier.

NEUSTADT, R. D. (2010). Honor And Respect For A Sefer Torah (Part1/3). In: Torah.org. Available: https://torah.org/torah-portion/weekly-halacha-5770-korach/ . [Accessed 09/10/2025].

OWCZAREK, N. (2023). Examining Ethics from a Caregiving Perspective to Inform Human-Centered Conservation. In: N. Owczarek (ed.), *Prioritizing People in Ethical Decision-Making and Caring for Cultural Heritage Collections*: New York: Routledge, 16-23. https://doi.org/10.4324/b23092-3

PETERS, R. (2020). Conservation and engagement: transforming and being transformed. In: Peters, R. F.; den Boer, I.; Johnson, J. & Pancaldo, S. (eds.) *Heritage. Conservation and Social Engagement*. London: UCL Press, 6-29. https://www.jstor.org/stable/j.ctv13xps1g.9 . [Accessed 07/10/2025].

QUANDT A. (1996). Recent Developments in the Conservation of Parchment Manuscripts. In: *The Book and Paper Group Annual,* 15. Available: https://cool.culturalheritage.org/coolaic/sg/bpg/annual/v15/bp15-14.html. [Accessed 27/10/2025].

ROTHSCHILD FOUNDATION HANADIV EUROPE. Esther scroll. In: *Judaica Index*. Available: https://judaicaindex.org/object/esther-scroll/. [Accessed 07/10/2025].

SCHINDLER, M. (2022). Jewish Value Considerations When Working With Judaica. In: 50th Annual AIC Conference. Los Angeles: American Institute for Conservation. Available: https://margalitschindler.weebly.com/aic-poster.html [Accessed 13/11/2025].

SCHINDLER, M. (2023). Religious Values as Conservation Practice: Caring for Judaica. In: N. Owczarek (ed.), *Prioritizing People in Ethical Decision-Making and Caring for Cultural Heritage Collections*: New York: Routledge, 115-125. https://doi.org/10.4324/b23092-12

SCHLEICHER, M. (2010). Accounts of a Dying Scroll: On Jewish Handling of a Sacred Texts in Need of Restoration or disposal. In: K. Myrvold (ed.), *The Dead of Sacred Texts: Ritual Disposal and Renovation of Texts in World Religious:* Abingdon: Routledge, 21-40.

SHEAR, J. (February 22, 2023). Megillat Esther from Persia; The Tension Between Restoration and Conservation… and Halachic Frontier. In: Ktavtam. Available: https://www.ktavtam.com/post/megillat-esther-from-persia-the-tension-between-restoration-and-conservation-and-halachic-frontier . [Accessed 08/10/2025].

SOFER ON SITE INTERNATIONAL. Do It Yourself Torah Care. Available: https://www.soferonsite.com/Do%20It%20Yourself%20Torah%20Care.htm. [Accessed 09/10/2025].

THOMSON, J. (1998). On Restoring Sacred Objects. Available: https://cool.culturalheritage.org/byauth/thompson/sacred/ [Accessed 28/10/2025].

UNESCO. *Intangible Cultural Heritage*. Available: https://ich.unesco.org/en/home. [Accessed 09/04/2026].

WEBER, T. (march 19, 2024). Inside the AI Competition That Decoded an Ancient Herculaneum Scroll. Available: https://www.scientificamerican.com/article/inside-the-ai-competition-that-decoded-an-ancient-scroll-and-changed/ [Accessed 12/11/2025].

WEXLER, R. A. (march 15, 2024). Purim: Why is the book of Esther holy if God isn't mentioned? In: *The Jerusalem Post*. Available: https://www.jpost.com/judaism/jewish-holidays/article-791973. [Accessed 07/10/2025].

Autor/es



Luís Pereira
luispereir@gmail.com
TECHN&ART - Technology, Restoration and Arts Enhancement Center, Polytechnic Institute of Tomar, Portugal
https://orcid.org/0000-0002-0259-4784

Graduated in Conservation and Restoration from the Polytechnic Institute of Tomar (IPT); holds a master's degree in Museology from the Lusophone University of Humanities and Technologies in Lisbon; earned a doctorate in Documentation from the University of Alcalá de Henares. Since 2005, he has developed his professional and scientific activity in preventive conservation, conservation and restoration, and the dissemination of cultural heritage. With extensive experience in projects within Museums, Archives, and Libraries, he is a collaborating researcher at TECHN&ART - Technology, Restoration and Arts Enhancement Center, Polytechnic Institute of Tomar.. He teaches courses in graphic documents in the bachelor's and master's programs in Conservation and Restoration at IPT, and is President of the Professional Association of Conservators-Restorers of Portugal.



Ângela Ferraz
asaferraz@gmail.com
TECHN&ART - Technology, Restoration and Arts Enhancement Center, Polytechnic University of Tomar, Portugal
https://orcid.org/0000-0001-8774-7139

Collections manager at the Tikva Jewish Museum Lisbon, and invited adjunct professor in the Department of Archaeology, Conservation, Restoration, and Heritage at the Instituto Politécnico de Tomar (IPT). She holds a PhD in Cultural Heritage Conservation and Restoration, a master's degree in Museology and Heritage from the Universidade Nova de Lisboa, and a bachelor's degree in Conservation and Restoration from IPT. She is an integrated researcher at at TECHN&ART - Technology, Restoration and Arts Enhancement Center, Polytechnic Institute of Tomar, and an associate editor of the journal "Conservar Património". Her current research interests focus on community involvement in conservation decision-making, and ethical issues in heritage conservation



Pedro Proença Cunha
pcunha@dct.uc.pt
University of Coimbra, MARE - Marine and Environmental Sciences Centre / ARNET, Department of Earth Sciences, Portugal
https://orcid.org/0000-0002-9956-4652

He is a Full Professor in the Department of Earth Sciences at the University of Coimbra, a researcher at MARE – Marine and Environmental Sciences Centre / ARNET, Director of the Sedimentology Laboratory and Director of the Mineral Preparation Laboratory for OSL and ESR dating. He holds a degree in Geology and a PhD in Stratigraphy, Paleontology, and Geo-history from the University of Coimbra. He has forty years of experience as a university teacher and researcher in Stratigraphy, Geomorphology, Sedimentology, Geoarchaeology, and Neotectonics. Responsible for and participant in dozens of scientific research projects. He is the author of about 500 scientific publications. Member of ICOMOS - Portugal.

Artículo enviado 12/12/2025
Artículo aceptado el 30/04/2026

https://doi.org/10.37558/gec.v29i1.1475



Ge-conservación
Conservação | Conservation

Vulnerabilidad de los sitios arqueológicos ante los impactos derivados del cambio climático

Elena García Martinez, Marta Plaza Beltrán, Adoración Martínez Carmona, Marta Lago Cerviño

Resumen: En las últimas dos décadas, la metodología de estudio aplicada al análisis del impacto del cambio climático en las diferentes disciplinas ha consistido en una primera fase de conocimiento de la amenaza, y una segunda fase en la que se estudia la vulnerabilidad del sistema afectado, en nuestro caso patrimonial, con el fin de implementar las soluciones y estrategias de adaptación que permitan paliar sus impactos. Para la mejor comprensión del presente artículo, recomendamos la lectura del artículo titulado "Caracterización de las amenazas derivadas del cambio climático e identificación de los impactos en sitios arqueológicos" al que haremos referencia en el texto (García y Plaza 2025), que contempla la primera fase citada.

La presente investigación se enmarca en la segunda fase siguiendo dos metodologías diferenciadas. En primer lugar, revisa los estudios sobre la vulnerabilidad al cambio climático en los sitios arqueológicos, en base a los proyectos realizados en el ámbito europeo. En segundo lugar, expone las experiencias desarrolladas en dos casos prácticos, la Illeta dels Banyets (Alicante) y Adro Vello (Pontevedra).

Palabras clave: cambio climático, vulnerabilidad, indicador, exposición, dinámicas progresivas, yacimiento arqueológico

Vulnerability of archaeological sites to the impacts derived from climate change

Abstract: Over the past two decades, the methodology applied to analysing the impact of climate change across different disciplines has consisted of two phases: first, understanding the threat; and second, studying the vulnerability of the affected system—in our case, heritage sites—to implement solutions and adaptation strategies to mitigate its impacts. For a better understanding of this article, we recommend reading the article entitled "Characterization of Threats Arising from Climate Change and Identification of Impacts on Archaeological Sites" which we will refer to in the text (García and Plaza 2025), which covers the first phase mentioned.

This research falls within the second phase, employing two distinct methodologies. First, it reviews studies conducted on vulnerability to climate change at archaeological sites, based on projects carried out at the European level. Second, it presents the experiences developed in two case studies: Illeta dels Banyets (Alicante) and Adro Vello (Pontevedra).

Keywords: climate change, vulnerability, indicator, exposure, progressive dynamics, archaeological site

Vulnerabilidade dos sítios arqueológicos face aos impactos decorrentes das alterações climáticas

Resumo: Nas últimas duas décadas, a metodologia de estudo aplicada à análise do impacto das alterações climáticas nas diferentes disciplinas tem consistido numa primeira fase de conhecimento da ameaça e numa segunda fase em que se estuda a vulnerabilidade do sistema afetado, no nosso caso, patrimonial, com o objetivo de implementar soluções e estratégias de adaptação que permitam mitigar os seus impactos. Para uma melhor compreensão do presente artigo, recomendamos a leitura do artigo intitulado "Caracterização das ameaças decorrentes das alterações climáticas e identificação dos impactos em sítios arqueológicos", ao qual faremos referência no texto (García e Plaza 2025), e que contempla a primeira fase referida.

A presente investigação enquadra-se na segunda fase, seguindo duas metodologias diferenciadas. Em primeiro lugar, revê os estudos sobre a vulnerabilidade às alterações climáticas em sítios arqueológicos, com base nos projetos realizados no contexto europeu. Em segundo lugar, apresenta as experiências desenvolvidas em dois casos práticos: a Illeta dels Banyets (Alicante) e Adro Vello (Pontevedra).

Palavras-chave: alterações climáticas, vulnerabilidade, indicador, exposição, dinâmicas progressivas, sítio arqueológico

Introducción

La vulnerabilidad de un sitio arqueológico está relacionada con sus características estructurales y materiales que determinarán cómo responderá, durante las fases de uso, enterramiento, excavación y puesta en valor, al contexto ambiental que le rodea. Según lo anterior, la vulnerabilidad es un atributo del sistema patrimonial que está en función de la "sensibilidad", entendida como grado en el que el sistema podría verse modificado o afectado por una perturbación (Gallopín 2006: 295).

En el caso de los impactos derivados de las condiciones ambientales adversas y la subida del nivel del mar, así como los indicadores de exposición correspondientes, quedan recogidos de forma general en el artículo ya mencionado sobre caracterización de las amenazas (García y Plaza 2025). En resumen destaca que, en las proyecciones climáticas para el año 2100, los modelos simulados pronostican un ascenso en la altura del nivel del mar de 60 cm. en el Atlántico y 50 cm. en el Mediterráneo, con un oleaje extremo en el Atlántico que aumentará entre el 5 y el 10% (Losada y Fernández 2025: 184). Por otro lado, para los estudios de caso en particular, en ambos yacimientos, la erosión costera debido a las mareas ciclónicas es el impacto más grave. En Adro Vello, con la retirada parcial de la duna que lo protege, que en caso extremo puede ocasionar inundaciones de agua de mar en el yacimiento. El caso de la Illeta es más complejo y alarmante, provocando la rotura de estructuras y la inestabilidad del estrato soporte del yacimiento.

En este artículo queremos destacar los deterioros intrínsecos derivados de la vulnerabilidad ante el cambio climático, en particular de las alteraciones debidas a los impactos no inmediatos y/o acumulativos, con dinámicas progresivas o lentas.

El aspecto observable de la vulnerabilidad de un sitio patrimonial en el ámbito de la conservación-restauración son las alteraciones o deterioros, descritos en glosarios normalizados que nos permiten diagnosticar los mecanismos de degradación que se han producido (ICOMOS 2011; Laborde *et al.* 2013).

En este sentido algunos ejemplos de lo anterior serían la pérdida de materia por erosión, el deterioro sufrido por el estrés térmico, la disolución de materiales o el deterioro debido a la cobertura vegetal, son algunos de los impactos a medir para determinar el grado de vulnerabilidad de los yacimientos.

Algunos de los términos que se han utilizado en el presente artículo dentro del contexto del cambio climático, son "impacto", que se define como la consecuencia de una amenaza; "exposición" como el grado, duración y/o extensión en el que el sistema patrimonial está en contacto con la amenaza y, por último "vulnerabilidad", como la propensión o predisposición a verse afectado negativamente. (IPCC 2021: 2256, 2246, 2270).

Antecedentes

En el contexto del cambio climático, la vulnerabilidad se ha estudiado como parte de la evaluación y gestión de riesgos, proponiéndose diversos enfoques metodológicos, pero sin un consenso en la actualidad (García 2025; Fiorentino *et al.* 2026). En cualquier caso, en la práctica, el objetivo es clasificar la gravedad de las consecuencias resultantes para priorizar las medidas de adaptación.

Un ejemplo de lo anterior es el trabajo realizado en el monasterio y sitio arqueológico de Skellig Michael (Irlanda), por la investigadora C. Daly (2014), cuyo resultado es una jerarquización de los impactos en relación con la vulnerabilidad del sitio, para facilitarla implantación de medidas.

Entre los proyectos europeos que han estudiado la relación entre los impactos del cambio climático y los yacimientos arqueológicos, destacamos el proyecto Safeguarding Cultural Heritage through Technical and Organisational Resources Management, STORM, que fue coordinado por Engineering - Ingegneria Informatica S.p.A. (Roma, Italia), entre los años 2016 y 2019 (Kasnesis *et al.* 2019). En el caso de estudio de las ruinas romanas de Tróia, Portugal, el método de evaluación es semicuantitativo y consiste en ponderar indicadores de susceptibilidad, como la calidad de las estructuras o el deterioro de los materiales, asignando puntuaciones con rangos numéricos (Ravan *et al.* 2023).

Cuando el estudio de la vulnerabilidad se amplía de forma integral, incluyendo entre otros los valores inmateriales, el término empleado es "resiliencia", y hace alusión a la capacidad de los sistemas sociales, económicos y ecológicos para hacer frente a un acontecimiento peligroso o perturbación, respondiendo o reorganizándose de forma que se mantenga su función, identidad y estructuras esenciales (IPCC 2021: 2263).

En este marco, el proyecto Sustainable Historic Environments holistic reconstruction through Technological Enhancement & community-based Resilience (SHELTER), ha realizado propuestas para el fortalecimiento de la resiliencia en sitios patrimoniales. La investigación contempla los impactos directos e indirectos en tres ámbitos, estructural, social y económico, de tal forma que sus conclusiones incluyen medidas para favorecer la resiliencia en ámbitos como el cultural, social, ambiental, institucional o económico (SHELTER 2019). Este proyecto estudió el Parque

Natural Baixa Limia-Serra do Xurés y el Parque Nacional de Peneda-Gerês limítrofes entre Portugal y Galicia, con un rico patrimonio arqueológico.

Generalmente, estos estudios establecen esquemas, denominados cadenas o mapas de impacto. Una cadena de impacto tiene un enfoque analítico que permite entender cómo es que peligros dados generan impactos directos o indirectos, es una herramienta que describe de manera visual y simplificada la relación causa-efecto entre una amenaza y un receptor expuesto.

En nuestro contexto peninsular hay que tener en cuenta la vulnerabilidad de los yacimientos sumergidos o en aguas someras que se suceden a lo largo de la costa. En este sentido destacamos los trabajos del proyecto Climate change risk to underwater cultural heritage in stone (WATERISKULT) (Germinario *et al.* 2026) y los realizados en la Bahía de Cádiz (Fernández-Montblanc *et al.* 2022; Ferrero-Martín *et al.* 2025), que han estudiado la erosión de los materiales y estructuras arqueológicas sumergidas.

De especial interés para nuestro trabajo, y en particular en el caso de la Illeta dels Banyets, es el estudio realizado en la cuenca del Mediterráneo por AKTES, Society for the Study of Ancient Coastlines, basado en los denominados "indicadores arqueológicos" (AKTES 2024)

Su investigación se centra en las infraestructuras de abastecimiento, como las *piscinae* o viveros, que constituyen "sensores costeros" que establecen la relación a lo largo del tiempo entre los sitios arqueológicos costeros y los cambios de altura verticales derivados, por un lado, de los movimientos tectónicos o isostáticos, y por otro de la subida del nivel del mar (Mourtzas *et al.* 2016; Kolaiti *et al.* 2019; Vecchio *et al.* 2019).

Justificación de la elección de los estudios de caso

La elección de los dos casos de estudio ha tenido como principal objetivo afrontar el abanico más amplio de impactos, ya sea por su exposición como por su vulnerabilidad, de tal forma que tanto la metodología como las medidas que se recomiendan puedan ayudar a la toma de decisiones en otros sitios arqueológicos.
Los dos yacimientos, Adro Vello (Pontevedra) y la Illeta dels Banyets (Alicante) presentan dos ámbitos de protección, por un lado, son Bines de Interés Cultural (BIC) (Adro Vello en 2022 en la categoría de zona arqueológica, y la Illeta conjunto histórico desde 1978 y BIC en 2023) y, por otro, están protegidos dentro de la Red Natura 2000, lo que obliga a que las soluciones adoptadas se enmarquen dentro de parámetros de sostenibilidad.



Figura 1.- Adro Vello, vista aérea. Fotografía cedida por Grupo de Estudios de Arqueología, Antigüedad y Territorio (GEAAT), Universidad de Vigo.

La zona arqueológica de Adro Vello, en la parroquia de San Vicente ayuntamiento de O Grove, se emplaza al lado de la playa de O Carreiro y se sitúa en una estrecha explanada litoral, al pie de una colina rocosa.

La zona arqueológica de la Illeta dels Banyets se encuentra situada en la localidad de El Campello. Actualmente el yacimiento presenta el aspecto de un cabo artificial, ya que hasta principios de siglo XX era una isla amesetada, ovalada de este a oeste, sufriendo un intenso proceso erosivo, tanto de origen natural como antrópico.

Las ubicaciones de las dos zonas estudiadas representan en oposición, por un lado la vertiente atlántica, en una zona climática oceánica templada con verano seco suave (Csb clasificación Köppen y Geiger) y, por otro la mediterránea, con verano seco y caluroso (Csa clasificación Köppen y Geiger), dando lugar a diferentes resultados en cuanto a subida de niveles del mar y parámetros climáticos.

Sus cronologías, su tipología constructiva, así como los materiales empleados son diferentes. En el caso de Adro Vello se documenta una fábrica de salazón romana, edificaciones y enterramientos de época tardorromana, medieval y moderna, cuya construcción es principalmente de naturaleza granítica (Fernández *et al.* 2022). En el caso de la Illeta, se trata de un asentamiento neolítico, argárico, Ibéro-púnico, y viveros romanos de naturaleza calcárea (Soler y Martínez 2015).

Por último, su estado de conservación es completamente diferente. En el caso de Adro Vello aunque excavado desde los años 80, ha permanecido durante décadas en estado de semi abandono, no siendo hasta estos últimos años cuando se han acometido las primeras intervenciones de conservación-restauración, en las que se incluye el diseño de un programa de mantenimiento aún por implementar y que se pretende llevar a cabo



Figura 2.- La Illeta dels Banyets, vista aérea. Fotografía cedida por el MARQ.

en las siguientes campañas (DUVI 2025). Sin embargo, la Illeta, tiene un plan de mantenimiento ya consolidado desde el año 2000 que ha permitido su conservación y disfrute en óptimas condiciones (Pérez 2015).

Estado de conservación

Los impactos catastróficos del cambio climático son evidentes en cualquier ámbito, sin embargo, está menos estudiado el cambio gradual en las condiciones de conservación y el deterioro resultante en las estructuras patrimoniales *in situ*.

La metodología desarrollada desde la disciplina en conservación-restauración ha sido el estudio de la relación entre los factores de alteración y los deterioros observables. Estas relaciones se pueden reflejar en esquemas o gráficos, que describan el factor o agente; el proceso o mecanismo y el deterioro o alteración.

Ejemplo de lo anterior serían patologías como la cristalización salina por cambios continuos en la humedad ambiental, termoclastismo por estrés térmico, pérdida matérica por la acción del viento o colonización biológica, erosión por lluvias torrenciales derivadas del aumento de la temperatura del agua marina, entre otros.

A continuación se presentan dos esquemas en los que se refleja la relación entre los factores, procesos y deterioros observables derivados del cambio climático en ambos yacimientos.

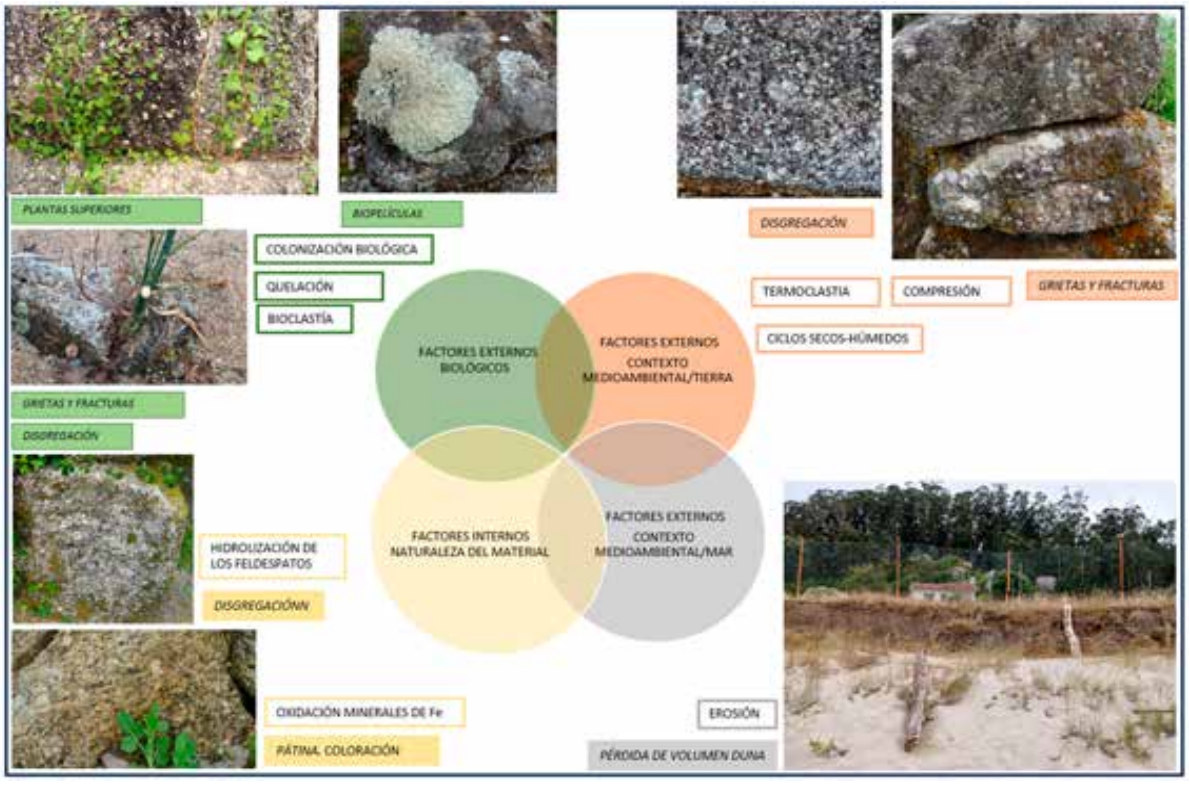


Figura 3.- Esquema en el que se refleja la relación entre los factores - procesos - deterioros, Adro Vello. Fuente: Autoras.

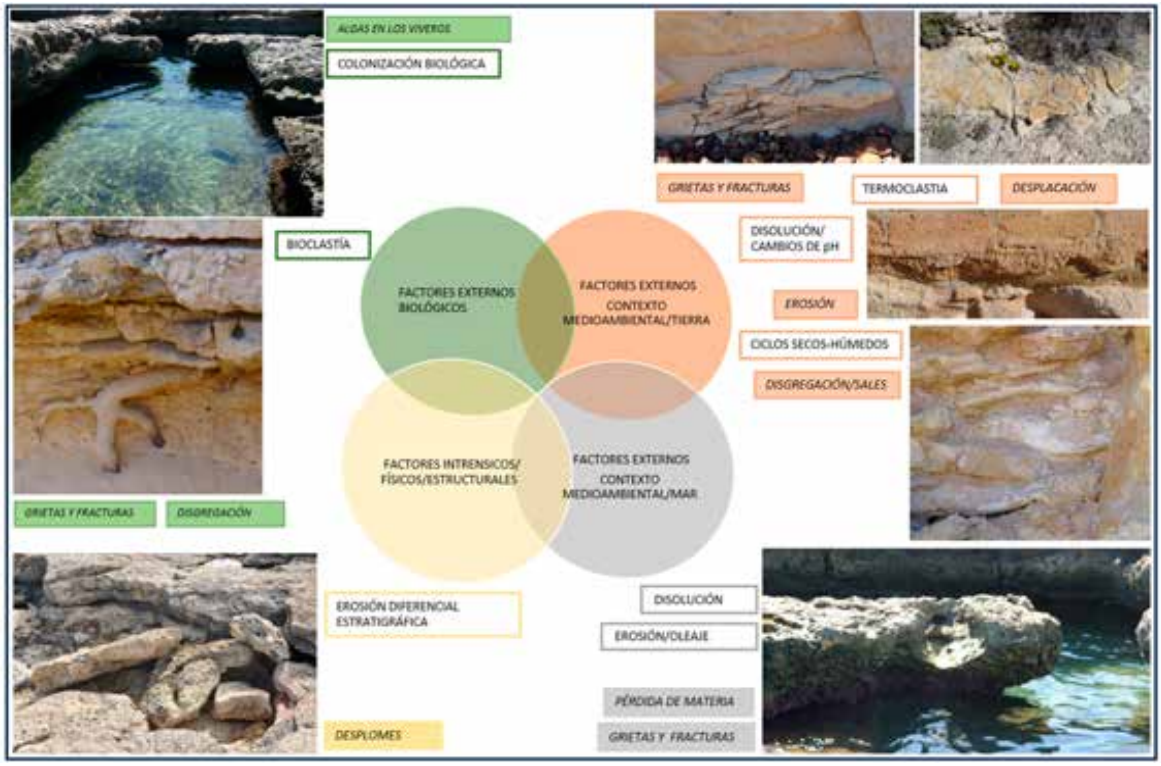


Figura 4.- Esquema en el que se refleja la relación entre lo factores - procesos - deterioros, en la Illeta dels Banyets. Fuente: Autoras

Metodología

Existe la dificultad de establecer una metodología extrapolable al estudio de la vulnerabilidad en los sitios arqueológicos. La gran diversidad de tipologías, con ubicaciones geoestratégicas como zonas costeras o escarpadas, compuesta de materiales diversos y alterados, dentro de un paisaje fruto de un clima diverso, hace necesario un enfoque individualizado de cada caso.

La cuantificación del grado de vulnerabilidad nos permite determinar la evolución del estado de conservación de elementos del sitio, estableciendo "indicadores". La vulnerabilidad es la propensión o predisposición a ser afectado negativamente y abarca una variedad de conceptos que incluyen la sensibilidad o susceptibilidad al daño y la falta de capacidad para afrontarlo y adaptarse (MITECO 2022). Se entiende como un factor intrínseco del sistema, en nuestro caso patrimonial.

Por otro lado, un indicador mide y cuantifica la evolución de un aspecto o variable visible en un elemento geolocalizado (Storemyr 2004). Según el resultado de la variable, los indicadores cualitativos valoran el estado de una cualidad (deterioro). Los cuantitativos evalúan un parámetro con un registro numérico y una unidad de medida dependiendo del equipamiento e instrumental utilizado (Rodero Riaza *et al.* 2025).

En este trabajo realizaremos una propuesta basada en los estudios de caso de los yacimientos arqueológicos de Adro Vello (Pontevedra) y la Illeta dels Banyets (Alicante), incluidos en la tesis titulada "Cambio climático y conservación de sitios arqueológicos" [1].

Como comentamos anteriormente, en este artículo se quieren destacar los deterioros intrínsecos derivados de la vulnerabilidad ante el cambio climático de los estudios de caso, en particular de las alteraciones debidas a los impactos no inmediatos y/o acumulativos, con dinámicas progresivas.

Elección de los indicadores

Los impactos no inmediatos y/o acumulativos necesitan un seguimiento a largo plazo para determinar la naturaleza de los cambios sufridos. El objetivo de este monitoreo es cuantificar, mediante parámetros objetivos y medibles los cambios graduales con la ayuda de "indicadores", también llamados "sensores" en otros trabajos (Milchin *et al.* 2025).

La selección de indicadores se determina según los criterios de representatividad de la variable a medir; repetibilidad con el objetivo de ser comparable; de fácil implantación en cuanto a recursos técnicos y humanos y de su estabilidad, tanto espacialmente (material/ estructura/yacimiento) como temporalmente (largo/ medio/corto plazo). También se puede tener en cuenta, para garantizar su eficacia, que haya sido corroborado en otras investigaciones científicas (Clay *et al.* 2020).

Los indicadores de deterioros lentos/progresivos se establecen en diferentes elementos en el propio yacimiento y/o a través de probetas expuestas *in situ*. Estas probetas de ensayo se realizan con materiales representativos del yacimiento, y sirven para testar su evolución a medio o largo plazo. Su premisa se basa en que el material de la probeta de "corte fresco" se altera más rápidamente que el original, debido a que el proceso de corte rompe su equilibrio natural, exponiendo una superficie porosa e a agentes externos (Alonso *et al.* 2006)

En cuanto a la elección de los materiales a testar se decidió que las estructuras construidas en piedra eran cuantitativamente las más significativas, aunque en ambos yacimientos existen estructuras de adobe o cerámica en menor proporción. De las estructuras, divididas en mortero y material pétreo, testamos este último.

En el caso de testar morteros, se destaca la metodología empleada en el estudio realizado en Tharros (Italia) (Sitzia 2022). En primer lugar, se muestrean y caracterizan los morteros y las patologías presentes, observándose, en el caso de bloques sumergidos, que la erosión podría minimizarse por el crecimiento de una pátina biológica. En segundo lugar, se determinan futuras amenazas como la subida del nivel del mar, erosión costera y los cambios de parámetros ambientales con ayuda de visores climáticos. Por último, se realiza un pronóstico de cómo se verán afectados, que se resume en una disolución de carbonatos debido al descenso del pH, tanto del agua de lluvia como la del mar, y una pérdida matérica por disgregación y precipitación de sales.

Desde estas líneas se corrobora el pronóstico anterior, dependiendo de la naturaleza y de la capacidad hidráulica de los morteros, pero como hemos adelantado, no incluimos los morteros en el estudio. En ambos yacimientos se realizan reintegraciones con mortero de restauración cuando su debilidad no asegura la estructura, por lo que testar la evolución de su deterioro a medio-largo plazo no es una causa probable.

Para realizar las probetas, el material pétreo escogido es el más representativo en cada yacimiento, ya caracterizado en trabajos anteriores (Martínez 2015; González-Meléndez *et al.* 2019: 21)

En el caso de Adro Vello, la elección del tipo de granito para la elaboración de las probetas tiene en cuenta el empleado en el yacimiento, eligiendo probetas de similares características de material actual de cantera, gracias al asesoramiento de la Dra. Teresa Rivas Brea, del Departamento de *Enxeñaría dos recursos naturais e medio ambiente*, Universidad de Vigo.

En el caso de la Illeta, se obtiene de piedra descontextualizada del yacimiento y conservada en la terrera, en el límite exterior de la zona musealizada, en su cara norte. Su elección se basó en la representabilidad, del caliche o piedra calcárea, utilizada en la construcción de un 90 % de los restos conservados. Una probeta se realizó con calcarenita amarilla, con el objetivo de testar el estrato donde se asienta el yacimiento y que está sufriendo un mayor impacto por erosión costera.

Registro

En ambos casos se realizan cuatro probetas, en forma de un prisma de 7 cm. de lado, en los que se registra tres parámetros, el cambio de pH, la presencia de sales y la pérdida/ganancia de materia.

Los cambios en estos parámetros han sido corroborados por diferentes investigaciones entre las que destacamos, por su especificidad en sitios arqueológicos, el informe realizado por International Council on Monuments and Sites The Future of our past, (ICOMOS 2019), y la publicación de J. Kapsomenaskis, en los sitios patrimonio de la humanidad en el Mediterráneo (Kapsomenaskis, *et al.* 2023), o las investigaciones en yacimientos norteamericanos por la Office of State the Archaelogy of North of Caolina, (DNCR).

Para documentar el peso, se establece un protocolo que incluye secados intermitentes utilizando un horno a temperatura de 105 +/- 5 0C, hasta alcanzar una masa constante (entendida como aquella en la que la diferencia entre dos pesadas efectuadas en intervalos de 24 horas no es superior al 0,001% g). Posteriormente la probeta se deja enfriar a temperatura ambiente. El equipo utilizado fue una balanza de precisión marca Ohaus Pionner modelo PA4102.

Para medir el pH y presencia de sales iniciales, es decir, estado previo a su exposición, se ha empleado el polvo resultante del corte o de las perforaciones para el anclaje a la pletina de las probetas. Esto nos permitía poder utilizar instrumentos de medida con electrodos por disolución. Los resultados obtenidos son 7.79 pH y 64.6 µs/cm para Adro Vello, y 8.71 pH y 119.0 µs/cm para la Illeta. El equipo usado es CRISON GLP 22 pH meter y MeterLab Conductivity Meter CDM230.

Ubicación de las probetas *in situ*

Para el establecimiento de los valores iniciales es necesario un punto de partida o "estado previo" (Gallopín 2006: 297). De este modo, en la práctica, el método consiste en exponer in situ tres probetas, dejando la cuarta sin exponer, como medida de referencia o medida en blanco inicial. Así mismo las ubicaciones escogidas representan tres niveles diferenciados de exposición en ambos yacimientos, siempre con la cara identificada como "B" orientada al frente marino.



Figura 5.- Izquierda Adro Vello. Probeta 3: 42028'40" N 8055'50" W. Derecha La Illeta. Probeta nº2: 38°25'54.1"N, 0°22'51.8"W.

Resultados y discusión

En este apartado se describen las "tendencias de deterioro" en los materiales, representados por nuestras probetas, producidas por los impactos derivados del cambio climático. Esto se debe a que el periodo de exposición fue muy corto, de dos años, a causa de los plazos de publicación e incorporación a la tesis, en comparación con otros estudios, como sería la experiencia desarrollada en el monasterio de Skellig Michael y castillo de Dublín, en Irlanda, cuya exposición es de una media de 10 años (Daly 2016).

Los resultados presentados en este apartado se centran en el crecimiento biológico en las probetas de Adro Vello, y en la variación del pH, del contenido en sales y de la pérdida matérica en las probetas de los dos yacimientos.

Es destacable la colonización biológica en las probetas de Adro Vello, documentándose la incipiente colonización de especies como algas (clorófitas), el desarrollo de un liquen amarillo, posiblemente de la especie *Xantoria parietina*, y cianobacterias filamentosas.

Si bien es cierto que esta colonización es fruto de las condiciones ambientales de la zona, es una alteración que debe estudiarse estudiarse en cuanto a las medidas a adoptar en relación con el cambio climático. En el caso de climas con lluvias intensas y eventos adversos, esta protección se considera fisico-mecánica, evitando la erosión de la superficie pétrea (Kshetrimayum 2025). Por otro lado, aunque el crecimiento liquénico representa un deterioro debido a la penetración en la matriz y a una alteración bioquímica, diversos estudios avalan que su eliminación puede ser contraproducente, al contrario que ocurre con las plantas superiores, ya que puede ejercer una acción protectora, o bioprotección, de los agentes ambientales (Favero y Viles 2020; Capitelli *et al.* 2020 y Ruiz *et al.* 2025).

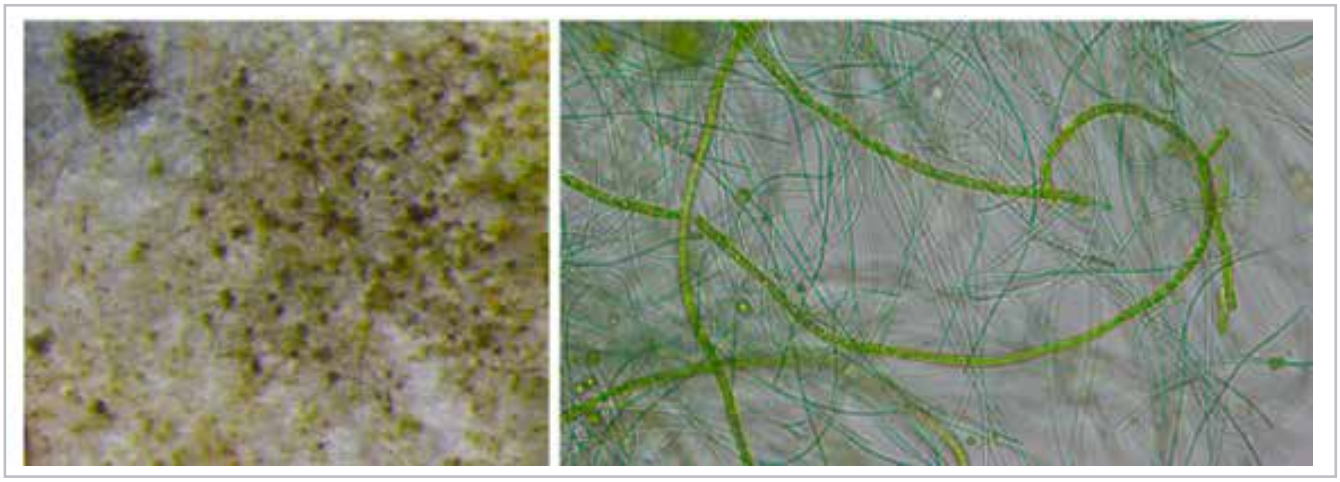


Figura 6.- Izquierda. Biodeterioro probeta 3 cara A. Filamentos fúngicos y células fotosintéticas (algas o cianobacterias). Derecha microscopía. Tras el cultivo en laboratorio con medio BG11, se han determinado el género *Ulothrix* o afin, gracias a la observación de cloroplastos en la pared celular (cloroplastos parenquimáticos). Se aprecian también algunas células engrosadas (acinetos), Género *Schizotrix* o afín.

A continuación, se presentan dos gráficas en las que se reflejan los resultados de las mediciones del pH en las cuatro probetas de cada yacimiento, es decir, incluyendo la probeta no expuesta. Los cinco puntos de muestreo se dispusieron en las esquinas y en el centro de la superficie de la cara "C" . El equipo utilizado para la toma fue un pH-metro GLP 22 marca CRISON, usando electrodo de contacto y con ayuda de material absorbente Sontara PrintMaster con un pH de 7.1., y agua desionizada.

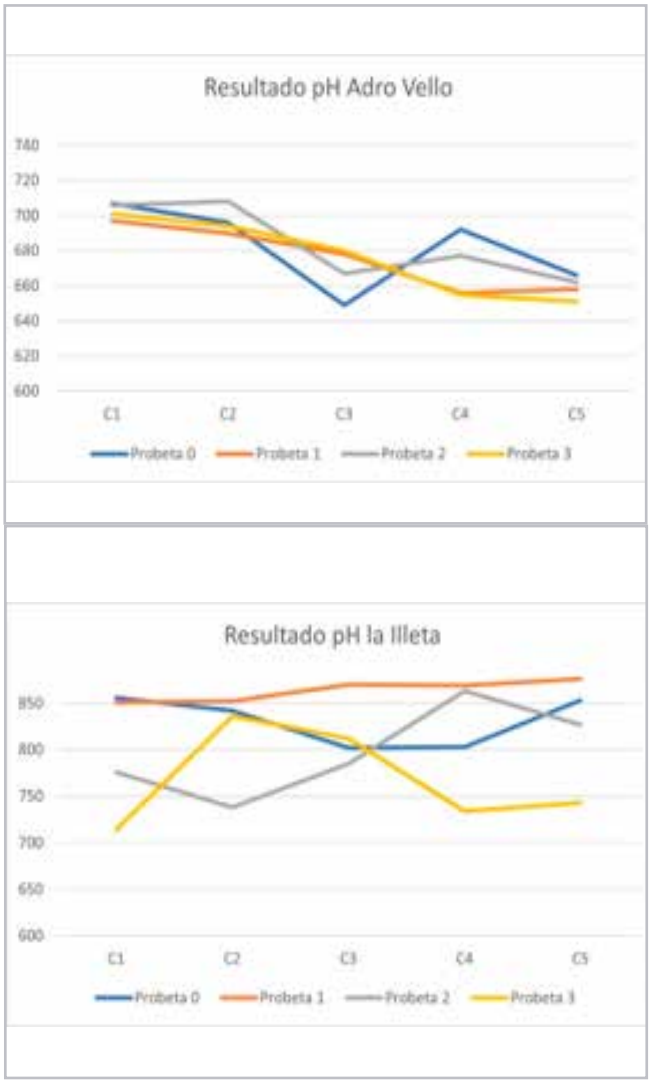


Figura 7.- Izquierda resultados obtenidos en las probetas de Adro Vello. Derecha resultados obtenidos en las probetas de la Illeta dels Banyets.

En ambos yacimientos se puede observar un ligero descenso del pH en todas las probetas en relación con la medida obtenida a partir del polvo del corte y taladro tomada con el mismo instrumental, pero con electrodo de disolución.

Por otro lado, en ambos yacimientos, las probetas más expuestas al ambiente marino muestran un descenso más significativo del pH.

En el caso de Adro Vello, las medidas presentan una mayor uniformidad, debido a la homogeneidad del material y a su baja porosidad 0.1%, de poro abierto (dato técnico según UNE-EN 1936 aportado por la empresa que lo suministra empresa DFG Quarries S.L.). En el caso de la probeta número tres, la de mayor exposición ubicada en lo alto de la duna en el frente marino, se puede observar una disminución más acentuada mostrando valores del p H 6.51.

En el caso de la Illeta, los resultados son más heterogéneos. En primer lugar, debido a que las probetas ya presentaban esa diferencia derivada de la alternancia de materiales, y en segundo lugar porque el resultado dependía del punto de contacto de medida, si era matriz porosa o conglomerado. En el caso de las probetas dos y tres se midió la porosidad después de la exposición. Los resultados fueron de 5.14 % de porosidad abierta en el número dos y de 4,96% en el número tres, evidenciando una mayor vulnerabilidad a los aerosoles marinos de la probeta dos, realizada en calcarenita amarilla (analizado por la empresa Patrimoni 2.0.).

A continuación, presentamos las tablas 1 y 2 en las que se reflejan los resultados de las mediciones de la conductimetría de sales solubles en las cuatro probetas, es decir, incluyendo la probeta no expuesta.

Los cuatro puntos de muestreo se dispusieron en las esquinas de la superficie de la cara "B". La última columna representa el aumento del contenido de sales, medida en µs/cm con referencia a la probeta 0 que no fue expuesta.

En el caso de Adro Vello, se considera que los resultados representan una ausencia de sales, con una medida por debajo de 100 µs/cm, según la experiencia en materiales arqueológicos de los expertos del Laboratorio de Análisis de Materiales del Instituto del Patrimonio Cultural de España. Probablemente, el motivo de estos resultados se deban al corte fresco de roca de cantera, su baja porosidad y el poco tiempo de exposición, además se corrobora que no es una patología significativa en el yacimiento.

En el caso de la Illeta estas medidas son significativas y heterogéneas, destacando, en el caso de la probeta número dos un aumento de 1.958,25 µs/cm. Esto se debe, muy probablemente, a la capacidad de absorción del material, la porosidad antes apuntada. Esta tendencia se corrobora en las alteraciones presentes en el yacimiento.

En la tabla 3, se presentan las tablas con la disminución de peso, pérdida matérica de las probetas. Se comparan en el caso de las tres expuestas, los resultados se comparan con el peso obtenido en 2023 y se calcula el porcentaje de pérdida bianual.

RESULTADOS DE CONTENIDO DE SALES ADRO VELLO				
Nº Probeta	Situación en "B"	Medida µs/cm	Media µs/cm	Aumento contenido en sales respecto probeta 0 µs/cm
0	B_1	37	36,5	--------
0	B_2	44		
0	B_3	33		
0	B_4	32		
1	B_1	41	40,5	4
1	B_2	47		
1	B_3	27		
1	B_4	47		
2	B_1	44	47	10,5
2	B_2	25		
2	B_3	53		
2	B_4	66		
3	B_1	37	44,75	8,25
3	B_2	57		
3	B_3	43		
3	B_4	42		

Tabla 1.- Resultados de las medidas del contenido de sales en las probetas de Adro Vello.

RESULTADOS DE CONTENIDO DE SALES EN LA ILLETA DELS BANYETS				
Nº Probeta	Situación en "B"	Medidas µs/cm	Media µs/cm	Aumento contenido de sales respecto probeta 0. µs/cm
0	B_1	93	119,75	------
0	B_2	115		
0	B_3	151		
0	B_4	120		
1	B_1	245	307,75	188
1	B_2	265		
1	B_3	202		
1	B_4	519		
2	B_1	827	1.958,25	1.838,50
2	B_2	1420		
2	B_3	1456		
2	B_4	4130		
3	B_1	192	400,5	280,75
3	B_2	230		
3	B_3	604		
3	B_4	576		

Tabla 2.- Resultados de las medidas del contenido de sales en las probetas de la Illeta dels Banyets

PESO ADRO VELLO				
N⁰ Probeta	Peso 2023. gr	Peso 2025. gr	Pérdida en gr.	% pérdida bianual
0	919.05	-----	-----	-----
1	924.46	923.36	1.1	0.19
2	926.00	924.92	1.08	0.17
3	915.24	914.66	0.58	0.06
PESO LA ILLETA				
N⁰ Probeta	Peso 2023. gr	Peso 2025. gr	Pérdida en gr.	% pérdida bianual
0	620.14	-----	-----	-----
1	806.35	801.72	4.63	0.57
2	752.26	740.40	11.86	1.57
3	762.50	754.79	7.71	1.01

Tabla 3.- Resultados obtenidos en las probetas de Adro Vello y en las probetas de la Illeta dels Banyets.

En los resultados anteriores se observa que en el caso de Adro Vello la pérdida no es significativa, aunque se aprecia una erosión en las aristas de corte del granito (material particulado del viento y estrés térmico).

En el caso de la Illeta es más significativo. La pérdida matérica se atribuye a procesos de disolución (disminución del pH por los aerosoles marinos y la lluvia) haloclastia (contenido de sales de los aerosoles marinos) y erosión (material particulado del viento y estrés térmico).

También, hay que tener en cuenta, que los resultados de pérdida bianuales tienen una progresión exponencial, es decir, la superficie que se erosiona aumenta con el tiempo debido a las irregularidades superficiales, que no presenta la probeta fabricada. Es por lo que en el mantenimiento es fundamental reintegrar grietas y vías de penetración de agua.

Conclusiones

La exposición de nuestro patrimonio costero a las amenazas del cambio climático como pueden ser la subida del nivel del mar o el aumento en la frecuencia e intensidad de los eventos adversos está corroborada científicamente y es algo que la población, en su mayoría, conoce e incluso sufre (MITECO 2025: 902).

Son menos conocidos los estudios sobre los cambios físicos y bioquímicos del mar y su impacto en nuestras costas, que, en el caso de sitios patrimoniales determinan el aumento de la gravedad de algunas patologías preexistentes.

La acidificación de los océanos (OA en sus siglas en inglés) es una consecuencia multifactorial de la absorción por el océano de un exceso de CO_2 procedente de la atmósfera. Este proceso altera el equilibrio de carbono inorgánico del océano, provocando multitud de cambios químicos en el agua de mar: desde la disminución del pH y del contenido de iones carbonato hasta el aumento de la presión parcial de CO_2.

En el caso de la Península Ibérica, se ha evaluado el progreso de la OA en aguas costeras gallegas desde 1976 y las tendencias de oscilan entre -0,0012 y -0,0039 unidades de pH al año. En el caso de la costa mediterránea la tendencia es de -0,00058 ± 0,0001 unidades de pH al año (MITECO 2024:208,209). En el caso de una proyección para el año 2100 los modelos pronostican un descenso de entre 0,3 y 0,4 unidades (Losada y Fernández 2025: 184b).

Los aerosoles marinos que llegan hasta las estructuras del yacimiento disuelven los materiales calcáreos, una de las causas de la pérdida matérica. En el caso de la Illeta, el agua de mar en el mes de recogida de las probetas, septiembre 2025 era de un pH de 7.4, y la matriz calcárea de la roca se registraba un pH de 8.71, evidenciando una diferencia considerable entre los dos niveles.

En el caso de la salinidad del mar, los simuladores utilizados para estudiar las tendencias futuras proyectan descenso de la salinidad de la entrada de agua atlántica, ya que se espera un endulzamiento de las aguas del Atlántico nororiental debido a la advección de aguas procedentes del Ártico (MITECO 2024: 335-348).

Sin embargo, en el área mediterránea el calentamiento es de dos a tres veces mayor que el ritmo global desde la década de 1980, acompañado de un aumento de la frecuencia, intensidad y duración de las olas de calor y un incremento de la salinidad de aguas superficiales (MITECO 2024:14).

Igualmente, el contenido de sales en los aerosoles marinos afectará a las estructuras produciendo pérdidas por un proceso de haloclastia.

Estos estudios científicos corroboran la importancia del conocimiento de la vulnerabilidad intrínseca de los sitios arqueológicos a conservar que determinará, la jerarquización de las medidas a tomar. En nuestro caso, podemos confirmar que los materiales en la Illeta, se degradan a una velocidad que con toda probabilidad aumente en los próximos años, por lo que las medidas deben centrarse en la protección de las estructuras. En el caso de Adro Vello, podríamos decir que el granito queda protegido con una capa colonización biológica, por lo que todos nuestros esfuerzos deberían priorizar medidas sobre el entorno, como la conservación de la duna que protege el yacimiento ante los eventos extremos.

En ambos casos, la conclusión última es la necesidad de implementar programas de mantenimiento, que deben tener en cuenta las amenazas derivadas del cambio climático. Las estrategias deben anticiparse a las consecuencias, priorizando la "conservación proactiva" frente a la "conservación reactiva", que busca paliar los daños una vez producidos. Estas medidas adaptativas se diseñan con la información que nos ofrecen herramientas predictivas de otras disciplinas y con el estudio de la vulnerabilidad de los sitios patrimoniales (García 2026).

Agradecimientos

Queremos agradecer el apoyo del grupo Arqueo-GEAAT. Universidad de Vigo, y al investigador Adolfo Fernández Fernández, que ha facilitado la documentación técnica y gráfica del yacimiento Adro Vello en O Grove.

De igual forma, el apoyo y confianza de Rafael Pérez Jiménez del Servicio de Arquitectura de la Diputación de Alicante, Manuel Olcina Doménech director del MARQ de Alicante y Dolores Sanchíz Domínguez, conservadora-restauradora del yacimiento.

También al equipo del Instituto del Patrimonio Cultural de España por su asesoramiento y apoyo técnico, Pedro Pablo Pérez García, Héctor Bolívar Sanz y Ascensión Fernández Hernández.

A la Doctora María Teresa Rivas Brea, Departamento de Enxeñaría dos recursos naturais e medio ambiente, de la Universidad de Vigo, por su asesoramiento en la elección de las probetas en Adro Vello.

Por último, nuestro más sincero agradecimiento al Doctor Fernando Carrera Ramírez, por su tiempo y reflexiones, que han sido decisivas para la redacción del presente artículo.

Nota

[1] Tesis matriculada curso 2022-2023 Facultad de Bellas Artes, Universidad complutense de Madrid. Dirigida por doctora Marta Plaza Beltrán, profesora titular del Departamento de Pintura y Conservación-Restauración de la Facultad de Bellas Artes de Madrid (UCM).

Referencias

ALONSO, J., ESBERT,R.M., ORDAZ, J. y VÁZQUEZ, P. (2006)." Análisis del deterioro en los materiales pétreos de edificación". En *ReCoPar,* Revista electronica, 3: 23-32. Universidad Politécnica de Madrid. https://polired.upm.es/index.php/recopar/article/view/2131

AKTES. Society the Study of Ancient Coastline. https://aktes.gr/en/about-us/the-society/. [consulta 15 de marzo de 2024].

CAPPITELLI F., CATTÒ C., VILLA, F. (2020). "The Control of Cultural Heritage Microbial Deterioration". *Microorganisms,* 8(10): 1542. https://doi.org/10.3390/microorganisms8101542

CLAY P.M.; HOWARD J., BUSCH D.S., COLBURN L., HIMES-CORNELL, A., RUMRILL S., ZADOR S. y GRIFFIS R. (2020). "Ocean and coastal indicators: understanding and coping with climate change at the land-sea interface". Climatic Change, 163: 1773–1793. https://doi.org/10.1007/s10584-020-02940-x

DALY C. (2014). "A Framework for Assessing the Vulnerability of Archaeological Sites to Climate Change: Theory, Development, and Application". *Conservation and magemet of arch. sites*, 16(3): 268–282. https://doi.org/10.1179/1350503315Z.00000000086

DALY C. (2016). "The design of a legacy indicator tool for measuring climate change related impacts on built heritage". Heritage Science 4, 19. https://doi.org/10.1186/s40494-016-0088-z

DUVI (2025). Diario de la Universidad de Vigo. "El grupo GEAAT finaliza las excavaciones que permitieron reconstruir los 18 siglos de historia del yacimiento de Adro Vello (O Grove)" 118/11/2025. (consultado el 18/05/2026)

DNCR. *North Carolina Department of Natural and Cultural Resources.* Office of State the Archaeology of North of Caolina. https://archaeology.ncdcr.gov/programs/education/climatechange/predictingeffects#OceanChemistry-703. (Consulta 18-05-2026).

FAVERO-LONGO S.E. y VILES H.A. (2020). "A review of the nature, role and control of lithobionts on stone cultural heritage: weighing-up and managing biodeterioration and bioprotection". World Journal of Microbiology and Biotechnology 36:100. https://doi.org/10.1007/s11274-020-02878-3

FERNÁNDEZ FERNÁNDEZ A. et al. (2022). Proposta para a delimitación e declaración como ben de interese cultural na categoría de zona arqueolóxica do xacemento de Adro Aello (O Grove, Pontevedra). Dirección Xeral de Patrimonio Cultural. Xunta de Galicia- Consellería de Cultura, Educación e Universidade.

FERNÁNDEZ-MONTBLANCK T. y BETHENCOUR; IZQUIERDO, A. (2022). "Underwater Cultural heritage risk assessment methodology for wave-induced hazards: The showcase of the Bay of Cadiz". *Frontirers in Marine Science*, 9. https://doi.org/10.3389/fmars.2022.1005514

FERRERO-MARTÍN, C., IZQUIERDO, A., BETHENCOURT, M. y FERNÁNDEZ-MONTBLANC, T. A. (2025). "Risk Assessment of Underwater Cultural Heritage for Wave-Induced Hazards: The Impact of Climate Change on Cadiz Bay". *Marine Science Engineering,* 13(1): 136. https://doi.org/10.3390/jmse13010136

FIORENTINO, S., CASAROTTO, A., FALBO, I. y VANDINI, M. (2026). "Heritage Risk Assessment: The Case of the Arian Baptistry, Ravenna (Italy)". *Heritage* 2026, 9(3): 111. https://doi.org/10.3390/heritage9030111

GARCÍA MARTÍNEZ E.; PLAZA BELTRÁN M. (2025). "Caracterización de las amenazas derivadas del cambio climático e identificación de los impactos en sitios arqueológicos". Ge-Conservacion, 27(1): 5-14. https://doi.org/10.37558/gec.v27i1.1347

GARCÍA MARTÍNEZ E. (2025). "Evaluación del impacto por el cambio climático en sitios arqueológicos: estado de la cuestión". Conservar Patrimonio, 50: 53-63. https://doi.org/10.14568/cp34089 .

GARCÍA MARTÍNEZ E. (2026). "Adaptación de los sitios arqueológicos ante los impactos derivados del cambio climático". *SAB Revista de Arqueología*, 39(1):93-111. https://doi.org/10.24885/sab.v39i1.1305

GALLOPÍN, G. (2006). "Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity", *Global Environmental Change,* 16: 293–303.

GERMINARIO L., MUNARI M., MORO I., TERLIZZI F. y MAZZOLI C. (2026). "Climate change and ocean acidification pose a risk to underwater cultural heritage". *Commun Earth Environ,* 7, 157. https://www.nature.com/articles/s43247-026-03184-w

GONZÁLEZ-MENÉNDEZ L., CUESTA A., GALLASTEGUI G., CUADRA P. y RODRÍGUEZ L.R. (2021). "Petrología de los ortogneises félsicos incluidos en granitos variscos postectónicos. Península de O Grove, Galicia, España". *Geo-Temas*, 18:426-429. https://portalinvestigacion.uniovi.es/documentos/62a194972ec0dc0951b90c4d

ICOMOS (2011). *Illustrated glossary on stone deterioration patterns.* https://openarchive.icomos.org/id/eprint/2089/

ICOMOS. (2019). T*he Future of our past. Engaging cultural heritage in climate action*. Technical Report. International Council on Monuments and Sites - ICOMOS, ICOMOS Paris, 62. https://openarchive.icomos.org/id/eprint/2459/%2026/03/2023

IPCC (2021). *FullReport WGII.* AR6. Glosary AII. 12, 24,19. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_FullReport_small.pdf. [consulta 27/01/2024]

KAPSOMENAKIS J., DOUVIS C., POUPKOU A., ZEREFOS S., SOLOMOS S., STAVRAKA T., MELISN., KYRIAKIDIS E., KREMLIS, G. AND ZEREFOS, Z. (2023) "Climate change threats to cultural and natural heritage UNESCO sites in the Mediterranean". Environment, Development and Sustainability, 25:14519–14544. https://doi.org/10.1007/s10668-022-02677-w

KASNESIS P., KPGIAS D., TOUMANIDIS L., XEVGENIS M. G., PATRIKAKIS C. Z., GIUNTA G. y LI C. (2019). "An IoE architecture for the preservation of the cultural heritage: the STORM use case". In *Harnessing the Internet of Everything (IoE) for Accelerated Innovation Opportunities,* eds. Cardoso ,P., Monteiro, J. Semião & J. M. F. Rodrigues, IGI Global, Hershey, 193-214, https://doi.org/10.4018/978-1-5225-7332-6.ch009

KOLAITE E., MOURTZAS N., KISSAS K., ANTONIOLLI F. y LAMBERCK K. (2019). "New insights into the uplifted Roman harbour at Mavra Litharia (N Peloponnese, Greece) in the geodynamic context of the southern margin of the Corinth Gulf". *Quaternary Internationa*l, 508, 23-35. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.10.020

KSHETRIMAYUM K.S. (2025). Póster ""Linchen biodeterioration of megalithic heritage of Manipur: An assessmente of risk and responser. *1st STECCI Conferenci: preserving cultural heritage in times of climate change*. 25 th-27th September 2025. University of Applied Arts Vienna. Austria.

LABORDE MEZQUEREZ A. *et al.* (2013). *Proyecto COREMANS Criterios de intervención en materiales pétreos*. Ministerios de Educación Cultura y Deporte. Instituto del Patrimonio Cultural de España. NIPO: 030-13-278-9.

LOSADA I. y FENÁNDEZ D.L. (2025). "Variable Climáticas". En: Evaluación de Riesgos e Impactos derivados del Cambio Climático en España (ERICC-2025). Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/ericc.html

MARTÍNEZ MARTÍNEZ J. (2015). "Las rocas de La Illeta dels Banyets y su degradación: una visión desde la petrología aplicada". En *La Illeta dels Banyets y los viveros de la costa Mediterránea Española. Cuestión de Conservación*. Olcina M.y Pérez R. (ed), 126-141.

MITECO (2022). "Cambio Climático: Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad" .Guía resumida del sexto informe de evaluación del IPCC, del Grupo de trabajo II. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/cambio-climatico/temas/el-proceso-internacional-de-lucha-contra-el-cambio-climatico/ipcc-guia-resumida-gt2-imp-adap-vuln-ar6_tcm30-548667.pdf

MITECO (2024). *Informe Clivar-Spain sobre el clima en España*. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, https://libreria.miteco.gob.es/libro/informe-clivar-spain-sobre-el-clima-en-espana_4604/

MITECO (2025). *Evaluación de riesgos e impactos derivados del cambio climático en España (ERICC-2025)* [en línea]. Madrid: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Disponible en: https://libreria.miteco.gob.es/libro/evaluacion-de-riesgos-eimpactos-derivados-del-cambio-climatico-en-espana-informe_4822/

MILCHIN M. et al. (2025). "Comprehensive condition assessment of steći and reference sites: methodology and results from the stecci project". *1st STECCI Conferenci: preserving cultural heritage in times of climate change.* 25 th-27th September 2025. University of Applied Arts Vienna. Austria.

MOURTZAS N., KOLAITE E. y ANZIDEI M. (2016). "Vertical land movements and sea level changes along the coast of Crete (Greece) since Late Holocene". Quaternary International, 401: 43-70. http://dx.doi.org/10.1016/j.quaint.2015.08.008

PÉREZ JIMÉNEZ R. (2015)." La musealización y la conservación del yacimiento de La Illeta dels Banyets". En: Olcina M.y Pérez R. (ed): *La Illeta dels Banyets y los viveros de la costa Mediterránea Española. Cuestión de Conservación*. Actas de las Jornadas realizadas en el Marq, Museo arqueológico de Alicante, 20 y 21 de noviembre, 98-111. https://www.marqalicante.com/contenido/publicaciones/pub2_124.pdf

RAVAN M., REVEZ M.J., VAZ I., BRUM P. y BIRKMANN J. (2023). "A Vulnerability Assessment Framework for Cultural Heritage Sites: The Case of the Roman Ruins of Tróia", *International Journal of Disaster Risk Science*, 14:26–40. https://doi.org/10.1007/s13753-023-00463

RODERO A., GARCÍA A.R., MAYANS B., PÉREZ P.P., GARCÍA M.A., ACAZ R., CULUBRET B., GARCÍA-PATRÓN N., GARCÍA E. y BUESO M. (2025). "La conservación de las tres grandes damas ibéricas del Museo Arqueológico Nacional: contextualización, estudios técnicos y protocolos de actuación". En *Ciencia y Arte X*, Ministerio de Cultura, 83-106. https://www.calameo.com/books/00007533564427d9c02af

RUIZ M.C., JÁIDAR Y. y MAGAR V. (2025). "Criterios y principios para la conservación de piedra: Confrontación de teoría y práctica en México". En: Rúiz, M.C., Jáidar, Y. y Magar, V. (coords). En *Criterios de conservación del patrimonio en piedra*.

SHELTER (2019). European Commission. ID. 821282, "D2.4. Methodology for the characterization of threats, events and impacts of climate change", 115-118. https://cordis.europa.eu/project/id/821282/results [27 de enero de 2025]

SITZIA F., PETERNA M. y LISCIA C. (2022). "Climate change and its outcome on the archaeological areas and their building materials. The case study of Tharros (Italy)". *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*. https://doi.org/10.1016/j.daach.2022.e00226

SOLER DÍAZ J. y MARTÍNEZ CARMONA A. (2015): "La Illeta dels Banyets, de El Campello. De nuevo sobre "un yacimiento síntesis de las antiguas culturas del mediterráneo". En *Olcina M.y Pérez R. (ed): La Illeta dels Banyets y los viveros de la costa Mediterránea Española. Cuestión de Conservación.* Actas de las Jornadas realizadas en el Marq, Museo arqueológico de Alicante 20 y 21 de noviembre, 64-97.

STOREMYR, P. (2004). "Monitoring and risk assesssment of monumets and archeological site in Memi basin, Colli Albani, Italy". EU-Projets DEMOTEC-A. Work package 2. https://per-storemyr.net/wp-content/uploads/2011/12/2004_039_vol1_nemi_report_screen.pdf

VECCHIO A., ANZIDEI M., SERPELLON E. y FLORINDO F. (2019). "Natural Variability and Vertical Land Motion Contributions in the Mediterranean Sea-Level Records over the Last Two Centuries and Projections for 2100". *Water,* 11(7): 1480. https://doi.org/10.3390/w11071480

WATERISKULT Climate change risk to underwater cultural heritage in Stone. https://cordis.europa.eu/project/id/101022386 [consulta 24/05/2026].

Autor/es



Elena García Martinez
mariae80@ucm.es
Universidad Complutense de Madrid
https://orcid.org/0000-0003-4775-5681

Conservadora-Restauradora por la Escuela Superior de Conservación y Restauración de BBCC (Madrid). Grado en Ciencias Ambientales, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Educación a Distancia. Máster en Bienes Culturales: Conservación, Restauración y Exposición, Facultad de Bellas Artes, Universidad Complutense de Madrid. Máster en Estudios Avanzados de Museos y Patrimonio Histórico-Artístico, Facultad de Geografía e Historia, Universidad Complutense de Madrid. Recorrido laboral vinculado al ámbito de museos y yacimientos arqueológicos. En el año 2010 se incorpora a la plantilla del Departamento de Materiales Pétreos del IPCE, hasta la actualidad. Colabora con el Laboratorio de Paisaje del Instituto Andaluz del Patrimonio en los proyectos PACTO, Paisajes culturales, conocimientos tradicionales y cambio climático 2025 y PAGUS, Paisajes patrimoniales en ámbitos metropolitanos ante el cambio global, en proceso.



Marta Plaza Beltrán
mplazabe@art.ucm.es
Universidad Complutense de Madrid
https://orcid.org/0000-0003-4545-6426

Doctora y Licenciada en Bellas Artes (UCM) en la especialidad de restauración. Profesora Titular del Departamento de Pintura y Conservación-Restauración de la Facultad de Bellas Artes (UCM). Su línea de investigación, académica y profesional se centra en la Conservación y Restauración del Patrimonio Cultural. Ha participado en numerosos proyectos de investigación y docentes financiados, como directora y como miembro del equipo de investigación (I+D+I, art. 60, PIMCD). Ha trabajado para instituciones públicas y privadas (Patrimonio Nacional, Museos, Ministerios, Comunidades Autónomas, Diputaciones, Ayuntamientos, Embajadas, Obispados, Fundaciones, etc.). Miembro del comité científico y revisora de varias revistas especializadas, así como de editoriales nacionales e internacionales. Evaluadora de la Agencia Estatal de Investigación (AEI).



Adoración Martínez Carmona
a.martinezc@diputacionalicante.es
MARQ, Museo Arqueológico de Alicante
https://orcid.org/0000-0003-1828-8252

Licenciada en Filosofía y Letras. División Geografía e Historia-Sección: Prehistoria, Historia Antigua y Arqueología por Universidad de Murcia. Trayectoria profesional ligada al campo de la arqueología, tanto en museos como el Provincial de Albacete o el MARQ de Alicante, como en diferentes yacimientos arqueológicos

entre los que destaca: El Tolmo de Minateda (Albacete), la Villa romana del parque del Palmeral, Santa Pola (Alicante), La Montañeta, Calpe (Alicante), los Baños de la Reina, Calpe (Alicante) o "Les cases de la Mare de Deu" y "Plaza Traspalacio" en Elche (Alicante). A partir del año 2000 participa en el proyecto Recuperación como espacio público del yacimiento arqueológico de la Illeta dels Banyets promovido por la Diputación de Alicante con el MARQ y del Área de Arquitectura. Desde el año 2006 trabaja en la Fundación de la CV MARQ, como arqueóloga responsable del yacimiento de la Illeta dels Banyets, dirigiendo las campañas de excavaciones. Los resultados de estas investigaciones han propiciado su participación en congresos y jornadas, con publicaciones tanto científicas como de difusión.



Marta Lago Cerviño
mlcervinho@gmail.com
GEAAT, Universidade de Vigo, Escola Superior de Conservación e Restauración de Bens Culturais de Galicia
https://orcid.org/0000-0002-0003-3596

Titulada en Conservación y Restauración de Bienes Culturales (ESCRBCG, Pontevedra) y Máster Universitario en Tecnologías para la Protección del Patrimonio Cultural Inmueble (Universidade de Vigo). Ha desarrollado su recorrido profesional en el ámbito de la conservación-restauración de materiales y yacimientos arqueológicos en Galicia, vinculada, de forma intermitente desde el año 2004, al Departamento de Arqueoloxía del GEAAT (Universidade de Vigo). Destaca la dirección de intervenciones en yacimientos como: la Villa Romana de Toralla (Pontevedra), la Cibdá de Armea (Ourense), el Campamento romano de A Ciadella (A Coruña), el Monte do Castro (Pontevedra) y el Castro da Saceda y San Millao (Ourense). Desde 2021 dirige las intervenciones de conservación del yacimiento de Adro Vello (Pontevedra), formando parte del equipo redactor de su plan director (en curso). Actualmente es profesora interina en la ESCRBCG (Pontevedra).

Artículo enviado 07/04/2026
Artículo aceptado el 28/05/2026

CC BY NC ND

https://doi.org/10.37558/gec.v29i1.1500

Reseñas



Conservación-Restauración. Diccionario Razonado

Ana Calvo Manuel

Ediciones Complutense
Madrid, 2026

ISBN: 978-84-669-4021-4
ISBN (PDF): 978-84-669-4022-1

Dimensiones: 190 x 240 mm
Páginas: 714
Idioma: Español

Este año de 2026 ha salido una nueva edición actualizada y ampliada del diccionario de Conservación y Restauración, publicado por Ana Calvo Manuel en el año 1997 con el título Conservación y restauración. Materiales, técnicas y procedimientos. De la A a la Z. Todo el colectivo profesional debemos felicitarnos por esta nueva contribución de su autora, conocedores del extraordinario compromiso que supone tal abordaje y de la importancia de la terminología especializada para entendernos entre los profesionales y para difundir el conocimiento, como ella misma destaca en la presentación a la nueva edición.

Hasta la publicación del primer proyecto, en una colección de la editorial Cultura Artística, dirigida por Joan Soreda, no había en lengua española ningún diccionario dedicado a la conservación y restauración de bienes culturales. El trabajo de Ana Calvo contribuyó a acuñar y fijar muchos términos específicos de nuestra profesión, aportando además una variada información de manera que esta publicación sirvió durante años como un manual básico de consulta para entender conceptos, métodos y técnicas. Desde los años 90 hasta ahora ha habido un aumento importante de publicaciones especializadas y glosarios multilingües, como son los de Martínez Cabetas y Rico Martínez (Madrid 2003), Xarrié (Barcelona 2005, 2006 a, 2006b, 2007), Marcos Rivadaneira y Marcos y Guillermo Narváez (Quito, 2013), Javier Madrona Ortega (Madrid, 2015), Muñoz Viñas, Osca Pons y Gironés Sarrió (Barcelona, 2014). Entre ellas cabe destacar los proyectos de normalización documental y de tesauros emprendidos por el Ministerio de Cultura desde 2006 para la gestión museográfica en España. Los tesauros del Ministerio de Cultura han supuesto un gran avance en la unificación de normas descriptivas y terminológicas en el campo de la museología, en todo lo que se refiere a denominación de ítems, sus materias primas, técnicas de fabricación y denominación de componentes.

Conviene destacar aquí las enormes dificultades que implica un trabajo de estas características para reconocer nuestro agradecimiento. En primer lugar, el carácter enciclopédico que constituye todo proyecto de diccionario razonado se amplifica aún más por la propia base multidisciplinar que caracteriza a nuestra profesión, donde coexisten muy distintos campos de conocimiento; así, la labor investigadora y documental debe transitar a cada paso entre las diversas ramas de las ciencias exactas y de las ciencias humanas. No hay más que dar un vistazo a las entradas para entender la extraordinaria diversidad de términos que necesitamos manejar en las distintas especialidades de nuestra profesión: desde nomenclatura rigurosamente científica hasta aquella más tradicional o empírica, pasando por los términos históricos recuperados y fijados para facilitar la comunicación entre profesionales.

En segundo lugar, y en relación con lo anterior, la rápida evolución que ha experimentado la actividad profesional, ampliando considerablemente sus márgenes de actuación, ha creado nuevos espacios de colaboración compartidos con otros ámbitos afines, como la museología y museografía, la gestión cultural, la biología, la química y la física, la antropología, la arquitectura, el diseño, las artes plásticas y un largo

etcétera. Esta diversidad colaborativa y la necesidad de unificar lenguajes reafirma la necesidad de este tipo de contribuciones. Desde la primera edición de 1997 hasta ahora, la autora se ha enfrentado, pues, a un importante incremento del léxico utilitario, consolidado en parte por algunas declaraciones internacionales de definición de términos (Nueva Delhi 2008) y la normalización europea desarrollada en el ámbito de la conservación del patrimonio cultural.

Con este extenso panorama, aquí resumido, pero expuesto con amplitud en la presentación de la nueva edición, la autora llevó a cabo una necesaria actualización de los términos de la anterior edición, con la adición de muchos nuevos y su traducción al inglés y el francés. Como la obra antecedente, este nuevo diccionario será de obligada consulta y manual de referencia en los ámbitos académicos y profesionales de la conservación-restauración. Solo resta comentar que, por su misma utilidad, sería muy recomendable que pueda ser de consulta en línea; ganaría en eficacia informativa, difusión y accesibilidad, con el añadido de que los nuevos formatos en red están mejor adaptados para el trabajo colaborativo y las actualizaciones periódicas necesarias, como la propia autora señala en su conclusión.

Rocío Bruquetas Galán

https://doi.org/10.37558/gec.v29i1.1521

www.revista@ge-iic.com



Edición digital del GEIIC