

Caracterización de las amenazas derivadas del cambio climático e identificación de los impactos en sitios arqueológicos

Elena García Martínez, Marta Plaza Beltrán

Resumen: En sus etapas iniciales, la conservación de los sitios arqueológicos tuvo un carácter reactivo, en la que las intervenciones estaban encaminadas a paliar daños producidos por diferentes causas y a devolverlos a su estado más próximo al original. Más adelante, gracias a la incorporación de la disciplina en conservación preventiva, las intervenciones van precedidas de una identificación de los impactos producidos y consisten en unas medidas que, con carácter proactivo, tienen como objetivo paliar futuros deterioros. Las amenazas derivadas de cambio climático suponen un reto en el que, en primer lugar, tenemos que adelantarnos a la identificación de los impactos con ayuda de proyecciones; en segundo lugar, es necesario el estudio de vulnerabilidades desconocidas y, por último, implantar medidas adaptativas para afrontar esta nueva situación.

Este artículo contempla la primera fase, con una revisión de los estudios realizados hasta el momento que relacionan las amenazas derivadas del cambio climático y los impactos producidos en los sitios arqueológicos.

Palabras clave: amenaza, exposición, índice climático, impacto

Characterization of threats arising from climate change and identification of impacts on archaeological sites

Abstract: In initial stages, the conservation of archaeological sites had a reactive nature, in which interventions were aimed at alleviating damage caused by different causes and returning them to their state closest to the original. Later, thanks to the incorporation of the discipline in preventive conservation, the interventions are preceded by an identification of the impacts produced and consist of measures that, proactively, aim to alleviate future deterioration. The threats derived from climate change represent a challenge in which, first of all, we have to anticipate the identification of the impacts with the help of projections; Secondly, it is necessary to study unknown vulnerabilities and finally, implement adaptive measures to face this new situation.

This article contemplates the first phase, with a review of the studies carried out that relate to the threats derived from climate change and the impacts identified on archaeological sites.

Keywords: threat, exposure, climate index, impact

Caracterização das ameaças derivadas das alterações climáticas e identificação dos impactos em sítios arqueológicos

Resumo: Nas suas fases iniciais, a conservação de sítios arqueológicos tinha um carácter reativo, em que as intervenções procuravam mitigar danos causados por diferentes fatores e devolver os sítios ao estado mais próximo do original. Posteriormente, com a introdução da conservação preventiva, as intervenções passaram a ser precedidas pela identificação dos impactos e consistem em medidas proativas destinadas a prevenir futuros danos. As ameaças decorrentes das alterações climáticas representam um desafio que exige, em primeiro lugar, a antecipação na identificação dos impactos com o auxílio de projeções; em segundo lugar, o estudo de vulnerabilidades ainda desconhecidas; e, por fim, a implementação de medidas adaptativas para enfrentar esta nova realidade.

Este artigo contempla a primeira fase, apresentando uma revisão dos estudos realizados até ao momento que relacionam as ameaças associadas às alterações climáticas com os impactos nos sítios arqueológicos.

Palavras-chave: ameaça, exposição, índice climático, impacto

Introducción

Independientemente de los esfuerzos que se realicen reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero, las consecuencias derivadas del cambio climático ya las estamos viviendo y sus impactos, a corto y medio plazo, son ya inevitables.

La Agencia Estatal de Meteorología (AEMET en adelante) en su resumen anual correspondiente al año 2023 en España, concluye que ese año ha sido extremadamente cálido, con una temperatura media de 15,2 °C, valor que queda 1,3 °C por encima de la media de esta estación (periodo de referencia 1991-2020). Los nueve años más cálidos de la serie pertenecen al siglo XXI. En cuanto a precipitaciones, ha sido en su conjunto muy seco, con un valor de precipitación media 536,6 mm, valor que representa el 84 % del valor normal en el periodo de referencia 1991-2020. Se ha tratado del sexto año más seco desde el comienzo de la serie en 1961, y el cuarto del siglo XXI, (AEMET 2023).

En cuanto a la subida del nivel del mar, según las últimas investigaciones, creció a un ritmo de 1,6 mm. por año desde 1948 hasta 2019 mientras que, desde ese año, la velocidad a la que se incrementa dicho nivel es de 2,8 milímetros. Este ascenso se debe, por un lado, al calentamiento de las aguas que produce su expansión térmica con el consiguiente aumento de volumen y, por otro, al incremento de la masa de agua, debido al drástico deshielo de Groenlandia y la Antártida. (Greenpeace 2024).

La situación en el Mediterráneo es especialmente grave debido al fenómeno de subsidencia (el lento hundimiento

del suelo debido a causas naturales o antropogénicas) que provoca que en algunas zonas el nivel del mar esté aumentando casi tres veces más rápido que en las zonas estables de costa (Marcos 2021; Vecchio *et al.* 2023)

La sinergia de los efectos del cambio climático afecta a todos los aspectos de nuestra vida, cómo nos movemos, nos calentamos o qué comemos, así como al patrimonio cultural. En la actualidad, cualquier programa o plan de gestión en patrimonio cultural sería poco riguroso si no tuviera en cuenta las estrategias que permitirán la sostenibilidad de sus intervenciones, así como la adaptación a los efectos del cambio climático en sus proyectos.

El objetivo de este artículo es llevar a cabo una revisión de los estudios realizados hasta el momento que relacionan las amenazas derivadas del cambio climático y los impactos producidos en sitios arqueológicos.

A continuación, se propone un flujo de trabajo a seguir en cuanto a la conservación de yacimientos arqueológicos ante las amenazas derivadas del cambio climático, objetivo último de la investigación, donde se resaltan, en línea continua, las etapas que describimos en el presente artículo.

Según el esquema propuesto en la Figura 1, la secuencia sería, en primer lugar, determinar gracias a los visores climáticos cuales pueden ser las amenazas susceptibles de impactar en el yacimiento, y realizar un seguimiento gracias a los índices climáticos. Una vez identificadas las amenazas es fundamental estudiar las vulnerabilidades del yacimiento. Un claro ejemplo de lo anterior sería corroborar, cuando la ubicación del mismo es en un

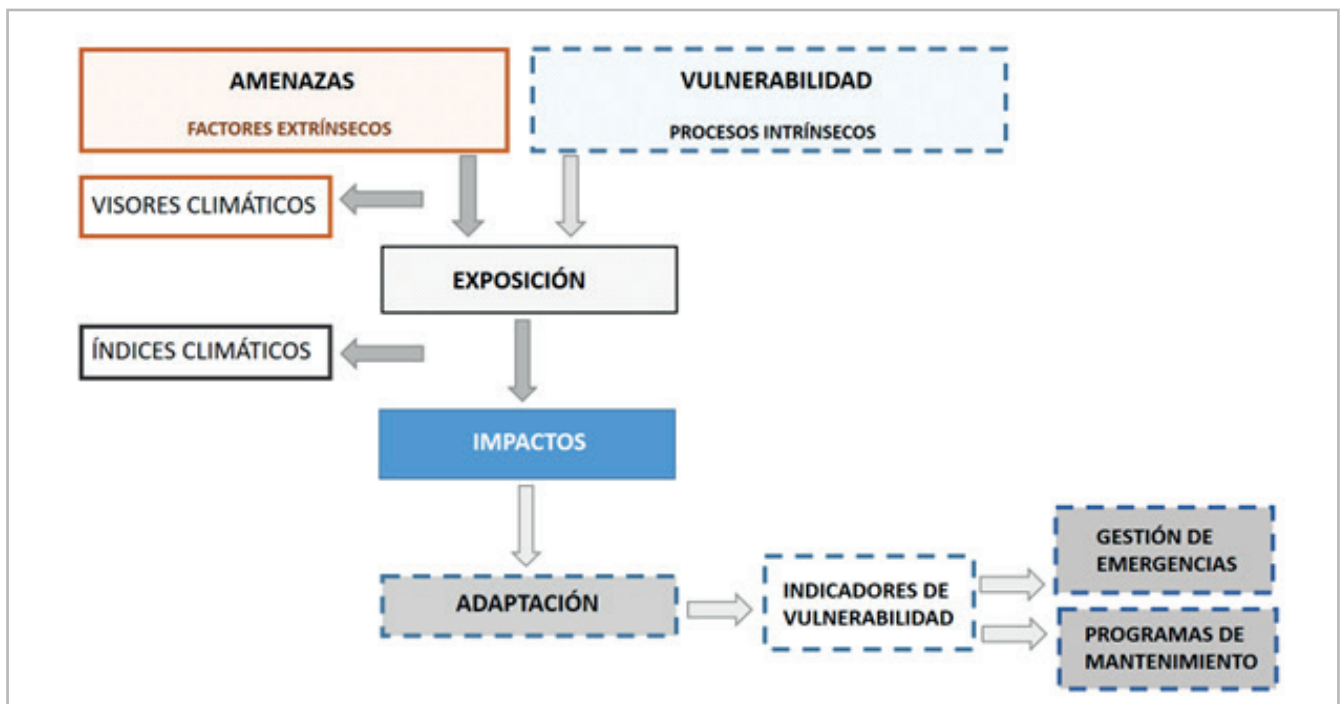


Figura 1.- Esquema de los componentes que intervienen en la interacción, cambio climático y patrimonio cultural. Fuente: Autoras.

enclave costero, si la altura pronosticada del nivel de mar en una marea meteorológica puede impactar y en qué medida, analizando los recorridos de entrada del agua y, por último, implantar las medidas adaptativas necesarias.

Estado de la cuestión

Respecto de los apartados del esquema anterior a continuación describimos los principales conceptos y experiencias que se han llevado a cabo en el ámbito que nos ocupa.

—Caracterización de las amenazas derivadas del cambio climático

En primer lugar, para entender los procesos, mecanismos y futuros escenarios en el contexto de cambio climático, recomendamos la publicación del Consejo Superior de Investigaciones Científicas titulada “*Global Change Impacts*” ya que desde estas líneas se alejaría del objetivo que nos ocupa (García y Jordano 2021).

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC en adelante) define el término Amenaza como la posibilidad de que se produzca un acontecimiento o un evento físico, inducido por la naturaleza o por el hombre, que pueda causar la pérdida de vidas humanas, lesiones u otras repercusiones en la salud, así como daños y pérdidas en los bienes, las infraestructuras, los medios de subsistencia, la prestación de servicios, los ecosistemas y el medio ambiente. (IPCC 2022a).

La Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR), que coordina los esfuerzos para la reducción de desastres, dentro de la aplicación del Marco de Sendai ha publicado un informe técnico con una guía descriptiva de 302 amenazas, desarrollado mediante un proceso de consulta de expertos de todo el mundo que trabajan en la reducción de riesgos, gestión de emergencias y cambio climático. En las fichas identificativas se describe la amenaza con la métrica y sinónimos, los impulsores que la generan y las pautas para su gestión siendo, sin duda es un punto de partida para la caracterización de las amenazas en todas las disciplinas (UNDRR 2021).

A nivel europeo, la Agencia Medioambiental Europea ha publicado su informe *European Climate Risk Assessment* (EEA 2023:179) caracterizando 36 riesgos con los impulsores que los provocan y los impactos derivados, dentro de los cuales, en el subsistema de edificaciones no residenciales, identifica el patrimonio cultural como vulnerable a riesgos como la subida del nivel del mar entre otros.

En cuanto a la sinergia cambio climático y patrimonio, son varias las iniciativas que desde organismos internacionales tienen por objetivo abordar los desafíos que supone, entre los que destacamos La Agenda Global de Investigación y Acción

sobre Cultura, Patrimonio y Cambio Climático, resultado de la colaboración científica entre ICOMOS, UNESCO y IPCC (Morel *et al.* 2022).

Concretando en los estudios de caso de sitios arqueológicos, se han implementado diferentes proyectos europeos en los que se caracterizan las amenazas y diseñan herramientas para su detección temprana, entre los que destacamos proyectos como *ProtechtCHT2save* (Sardella *et al.* 2020).

En el presente trabajo haremos una selección de las amenazas que afectan directamente a los sitios arqueológicos en el apartado Resultados.

—Herramientas de monitoreo. Visores climáticos

Los satélites en órbita terrestre, las estaciones climáticas remotas y las boyas oceánicas se utilizan para monitorear el estado del tiempo y el clima actual. Por otro lado, los datos paleoclimáticos de fuentes naturales como núcleos de hielo, anillos de árboles y sedimentos de oceánicos permiten obtener registros climáticos de millones de años con los que los científicos elaboran modelos que pueden pronosticar las tendencias climáticas.

El visor climático es una herramienta de visualización de escenarios que nos permite tener una visión futura del clima, y que ayudará a la toma de decisiones siempre referidas a un horizonte superior del 2050. En este apartado haremos referencia a los visores en los que las predicciones hacen referencia a parámetros climáticos y en los que también se puede pronosticar la subida del nivel del mar.

Los estudios sobre el clima futuro se apoyan en simulaciones numéricas que exploran la evolución del clima medio y de su variabilidad. Este aspecto queda recogido en la expresión ‘proyección climática’, entendida como “la respuesta simulada del sistema climático a diversos escenarios” (Amblar *et al.* 2017).

El IPCC define escenario como “descripción plausible, y generalmente simplificada, sobre cómo puede desarrollarse el futuro (...) Conjunto de hipótesis de trabajo sobre cómo puede evolucionar la sociedad y qué puede suponer esa evolución para el clima”. Estos escenarios se denominan Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, de sus siglas en inglés). Aunque existen cuatro escenarios en los informes AR del IPCC, en el presente trabajo hablaremos del RCP 4.5, (referido al escenario más favorable y al RCP 8.5, considerado el más alarmante. Por otro lado, también se establecen “horizontes”, referido a plazos de tiempo, (IPCC 2022:8).

A nivel global, el IPCC ha creado un atlas interactivo con variables divididas en cuatro grupos, índices de temperatura y precipitaciones; océano con variables sobre subida del nivel del mar, temperatura superficial y pH, y otros como ozono y partículas, basándose en los datos del último informe AR6 (IPCC *interactive atlas*).

En cuanto a la elevación del nivel del mar destacamos el visor de la NASA (NASA sealevel) que, en el caso de España, cuenta con 23 puntos costeros de observación.

Por su parte, el Servicio de Cambio Climático es uno de los seis servicios de información temática que proporciona Copernicus, el Programa de Observación de la Tierra de la Unión Europea. La prestación del Servicio de Cambio Climático de Copernicus está a cargo del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Medio Plazo (CEPMMP), que actúa por cuenta de la Comisión Europea. El Servicio de Cambio Climático de Copernicus (C3S) apoya a la sociedad proporcionando información sobre el clima pasado, presente y futuro en Europa y su visor *C3S atlas climate copernicus*, da cobertura a nivel mundial (Copernicus atlasC3S). C3S y la Agencia Europea de Medioambiente (AEMA) han desarrollado conjuntamente el Explorador Europeo de Datos Climáticos (alojado en Climate-ADAPT)

En el caso de España, las observaciones presentadas siempre se refieren a una rejilla observacional que se obtiene por métodos de interpolación a partir de datos puntuales de las estaciones climáticas de AEMET. En lo que respecta a la dimensión de la rejilla observacional en la Península y Baleares, esta es de 5 km y de mayor resolución 2.5 km para las islas Canarias, (Peral et al. 2017). El visor estatal está alojado en la plataforma AdapteCCa, una iniciativa conjunta de la Oficina Española de Cambio Climático y la Fundación Biodiversidad, ambas del Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico (AdapteCCa). Las variables están agrupadas en cuatro grupos, temperatura, humedad, y viento. En algunos casos se trata de variables proporcionadas directamente por las simulaciones y en otros casos son índices derivados calculados por el visor. En cuanto a los escenarios, es de interés el denominado Histórico, que comprende el periodo de entre los años 1971 al 2000, además de escenarios futuros RCP4.5 y RCP 8.5. Los datos se pueden filtrar para meses, estaciones o año completo. También se seleccionan las áreas geográficas desde los municipios. En el caso de los horizontes los ha dividido en futuro cercano (2011-2024), medio (2041-2070) y lejano (2071-2100). Su uso es bastante intuitivo, pero para su mejor comprensión y uso recomendamos la Jornada "Herramientas para la Adaptación al Cambio Climático", celebrada el 30 de junio de 2021, fruto del proyecto LIFE SHARA, promovido por el mismo ministerio (Salazar M. 2021).

Respecto a la erosión costera es un fenómeno que se está observando en numerosos litorales europeos, y es probable que empeore a medida que aumente el nivel del mar. Vigilar el movimiento de las costas es clave para comprender la evolución de los entornos costeros, además de servir para demostrar información fundamental a los responsables de la toma de decisiones a nivel regional.

La European Space Agency (ESA) ha estado desarrollando varios productos para responder a estos retos. En el marco del programa Ciencia de Observación de la Tierra para la Sociedad de la ESA, el proyecto Cambio Costero desde el Espacio (Coastal Change from Space) está proporcionando

información importante sobre los cambios en los litorales a nivel mundial. Aprovechando las imágenes satelitales recopiladas durante 25 años, incluidos datos de las misiones Sentinel-1 y Sentinel-2 de Copernicus, el equipo ha cartografiado 2.800 km de línea de costa analizados en cuatro países: el Reino Unido, Irlanda, España y Canadá (Martín 2021).

Dentro del anterior proyecto, a nivel estatal, la preocupación se centra en la gestión costera por lo que la comprensión del diseño y funcionalidad de un visor para la participación pública es fundamental (Díaz P. 2012). En este contexto, destaca el proyecto "Elaboración de la metodología y bases de datos para la proyección de impactos de cambio climático en la costa española (Losada I. 2020) financiado por el Ministerio de Transición Ecológica. Esta investigación ha desarrollado las proyecciones regionales de cambio climático de variables marinas necesarias para el estudio de impactos costeros a lo largo de la costa española. Las variables son: oleaje; nivel del mar asociado a la marea meteorológica; aumento del nivel del mar y temperatura superficial. Los datos generados proporcionan información climática para los escenarios RCP 4,5 y RCP 8,5 hasta fin del siglo XXI, gracias al almacén de datos climáticos y su Visor C3E (Ihcantabria.c3e).

Este último punto, la cuantificación del aumento del nivel del mar, es más complejo a escala del impacto que puede producir en un yacimiento arqueológico, ya que habría que estudiar otros aspectos específicos que pueden provocar modificaciones positivas o negativas. Es el caso de infraestructuras como puertos o diques cercanos que pueden aumentar la velocidad de las corrientes y la intensidad del oleaje ampliando la erosión costera. Aunque, el uso del visor es un punto de partida imprescindible para la toma de decisiones en cuanto al encargo de estudios posteriores.

De mayor complejidad es el comportamiento de eventos extremos, cuyo punto de partida son las proyecciones climáticas obtenidas mediante los modelos globales del clima, pero sin un visor ya que éstos ocurren ocasionalmente. Sin embargo, existen estudios de la caracterización del efecto que tiene el cambio climático sobre determinados aspectos de la ocurrencia de fenómenos hídricos extremos: modificaciones en su frecuencia, intensidad, duración, magnitud o severidad. Una revisión sobre los trabajos realizados al respecto es el promovido por la Fundación del Canal de Isabel II (Garrote L. 2020). Incluidos en los eventos extremos, y con la misma problemática, se encontrarían los visores de rayos y de las alarmas de riesgo de incendios, siempre en periodos cortos de tiempo (NASA fire).

— Nivel de exposición, índices y datos climáticos

Derivados de la necesidad de ejemplarizar experiencias, la caracterización de las amenazas conlleva la determinación de su exposición, es decir, el grado, la duración y/o extensión en el que el sistema (patrimonio) está en contacto con la amenaza.

La cuantificación del nivel de la exposición depende del parámetro a medir. Por ejemplo, lo expuesto que estaría un yacimiento arqueológico costero a la amenaza que supone la subida del nivel del mar serían los centímetros de aumento del nivel del mar, referido a una medida ya tomada o en la actualidad, y la pronosticada para los horizontes cercano y lejano.

En el caso de eventos meteorológicos extremos el nivel de exposición se cuantifica a través de unos índices climáticos ya estandarizados, y que en el contexto del cambio climático son de gran interés porque permiten el seguimiento del evento, en cuanto a intensidad y frecuencia, así como establecer niveles de alarma. En esta línea trabaja el Equipo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático (ETCCDI) de la Organización Meteorológica Mundial OMM, que ha establecido una serie de 27 índices para la identificación y registro de eventos climáticos considerados extremos.

En cuanto al ámbito que nos ocupa hay que destacar los esfuerzos de dos proyectos de investigación por estandarizar el registro de los índices en relación con el patrimonio con

el objetivo de establecer protocolos para situaciones de alarma.

Así, y en aplicación al estudio de patrimonio, el proyecto de la Unión Europea ProteCHt2save seleccionó cuatro de entre los 27 índices del ETCCDI, que en posteriores proyectos han sido empleados (ProteCHt2 2017). Por su parte, el proyecto Hyperion, en su aplicación a los estudios de casos del conjunto básico de los 27 índices descriptivos ETCCDI selecciona 8 que enumeramos a continuación (Hyperion 2023).

Por último, añadimos los establecidos para los sitios declarados por la UNESCO del arco Mediterráneo por Kapsomenaskis *et al.* (2023).

En el caso de España, AEMET facilita los resúmenes climatológicos, anuales, estacionales o mensuales. Por otro lado, y gracias a la red de estaciones climáticas, también facilita los datos estadísticos de las mismas que, una vez descargados, permiten calcular los índices deseados para un sitio arqueológico en particular (AEMET). Del mismo modo, las CCAA cuentan con estaciones climáticas, pudiendo elegir entre las que más se aproximen al sitio objeto de estudio.

ProteCHt2	
Índice	Descripción
R20 mm	Días de precipitaciones intensa
Rx5día	Cantidad de precipitación más alta en 5 días
DDC	Número máximo de días secos consecutivos
Tx90p	Porcentaje de días extremadamente cálidos
Hyperion	
FE	Días de heladas
ID	Días de formación de hielo
TN10p	Noche frías
TN90p	Noches cálidas
DRT	Rango de temperatura diurna
Rx5dat	Precipitación máxima en cinco días
R95pTOT	Precipitación por días muy húmedos
R99pTOT	Precipitación debida a días extremadamente húmedos
Kapsomenaskis. UNESCO	
TX ₃₇	Número de días de calor extremo >37° al año
FWI45	Número de días al año de riesgo extremo de incendio
PR99	Número de días de precipitación extrema por década
AI	Índice de Aridez. Relación precipitación y evapotranspiración
TNO	Número de días con -0°C al año
SRL	Subida del nivel del mar

Tabla 1.- Selección de índices climáticos en el patrimonio cultural. Fuente: ProteCHt2 2017; Sardella 2020; Hyperion 2023 y Kapsomenaskis *et al.* 2023.

Igualmente, esta información resulta interesante en relación al análisis de riesgos naturales y al establecimiento de niveles de alerta recomendados en el ámbito de D.G. de Protección Civil y Emergencias (Basconillos 2024), en particular cuando el objetivo sea la implantación de un plan de salvaguarda.

— *Identificación de los impactos en los sitios arqueológicos*

El IPCC define el término Impactos como las consecuencias de las amenazas. Generalmente se refiere a efectos sobre vidas, medios de subsistencia, salud y bienestar, ecosistemas y especies, activos y servicios económicos, sociales y culturales e infraestructuras. Los impactos pueden ser denominados consecuencias o resultados, y pueden ser adversos o beneficiosos (IPCC 2022b).

En España, el informe titulado “Impactos y riesgos derivados del cambio climático en España” promovido por la Oficina Española de Cambio Climático (OECC), enumera y evalúa los impactos que afectarán al territorio español. Sin particularizar en un sector específico sí menciona la pérdida de valores culturales y la inmersión de sitios patrimoniales por la subida del nivel del mar, así como otros impactos atribuidos en diferentes sectores que pueden reconocerse en sitios arqueológicos, por lo que puede ser un punto de partida para poder coordinar disciplinas con el objetivo de implantar medidas adaptativas con los mejores resultados (Sanz y Galán 2020).

Dos años más tarde, igualmente promovida por la OECC, se publica la Guía para la evaluación de riesgos asociados al cambio climático (Abajo *et al.* 2023), en la que se

establece el sector Servicios culturales (patrimonio, paisaje, accesibilidad) y turismo y, de forma genérica, determina daños directos en el patrimonio e indirectos en los ingresos debido al turismo.

En el caso del patrimonio cultural, diversos proyectos europeos han promovido metodologías que han supuesto un avance en la caracterización de las amenazas y los impactos derivados de las mismas, (Sesana 2018; Scott 2021). Algunos de ellos han priorizado categorías patrimoniales, como los yacimientos arqueológicos. Igualmente, estas metodologías se han aplicado en zonas con características climáticas susceptibles de obtener resultados extrapolables, como son los sitios patrimonio mundial en la cuenca del mediterránea (Reiman 2018; Kapsomenakis 2023; Vecchio 2023)

Por otro lado, ICOMOS en su documento *The Future of Our Past: Engaging Cultural Heritage in Climate Action. Heritage and Climate Change Outline* (2019), realiza una descripción de 22 amenazas y sus los impactos derivados en las cuatro categorías patrimoniales entre las que se encuentran los sitios arqueológicos.

Metodología

La metodología del presente trabajo es cualitativa y se basa en la revisión de publicaciones y experiencias realizadas en el ámbito del cambio climático y el patrimonio cultural. Esta búsqueda se realiza gracias a la base de datos Cisne de la Universidad Complutense de Madrid, con las palabras clave fueron “patrimonio” y “cambio climático”, en español e inglés.

También se revisan los proyectos europeos, con los mismos parámetros de búsqueda, que se desarrollan dentro la Plataforma Europea de Adaptación al Clima Climate-ADAPT, asociación entre la Comisión Europea y la Agencia Europea de Medio Ambiente, (Clima-ADAPT).

En cuanto a las referencias en el apartado de “amenazas”, la bibliografía que se propone no siempre es específica del campo patrimonial, es decir, el estudio de la subida del nivel del mar, por ejemplo, es global, y en cuanto a las referencias respecto de los “impactos”, la revisión sí es específica en patrimonio y, particularmente, en sitios arqueológicos.

El alcance del estudio incluye los sitios arqueológicos definidos en el Tratado de La Valeta, como “los vestigios, objetos y cualesquiera otras trazas de manifestaciones humanas (...) cuya preservación y estudio permitan reconstruir la historia de la humanidad y su relación con el medio ambiente”. Este mismo documento, especifica que dentro de dicho patrimonio arqueológico se “incluyen las estructuras, construcciones, grupos arquitectónicos, lugares de asentamiento, objetos muebles, monumentos de otra naturaleza, así como su contexto, localizados en tierra o bajo el agua” (BOE 2011 a: art 1). Aunque se encuentran incluidos en la definición de patrimonio arqueológico, aquí no vamos

a contemplar el estudio de la vulnerabilidad de objetos muebles o transportables, que entendemos, pueden protegerse en museos con las medidas de conservación preventiva adecuadas. Según lo anterior, atenderemos a los efectos producidos en el aspecto tangible e inmueble de los restos arqueológicos, dejando para otros estudios la significancia de los sitios y la pérdida de valores patrimoniales.

En el apartado Resultados, la tabla de correlación entre las amenazas e impactos está propuesta para los sitios arqueológicos en el territorio español, por lo que no se reflejan los producidos en otras latitudes con consecuencias del deshielo o tormentas tropicales, entre otros. Para su diseño, se han agrupado las amenazas en cuatro categorías.

Las dos primeras categorías estarán relacionadas con los eventos extremos, que dividimos a su vez en eventos meteorológicos extremos y fuego, ya conocidos pero que, como hemos mencionado anteriormente, presentan alteraciones en su frecuencia e intensidad. La tercera categoría está relacionada con los cambios que se manifiestan con dinámicas progresivas o denominados lentos y que serían los derivados de las oscilaciones térmicas e impactos físico-químicos (Sabioni *et al.* 2010; Daly 2011, 2014). Por último, una cuarta categoría relacionada con la subida del nivel del mar y su sinergia con las marejadas ciclónicas, quizás el más tratado y que representa un fenómeno específico derivado de los efectos del cambio climático (Cid *et al.* 2016). Según los expertos, esta subida del nivel mar tendrá efectos graves, como el retroceso de la línea de costa y pérdida de playas, o el mayor impacto de los temporales sobre las construcciones e infraestructuras costeras (Vargas-Yáñez *et al.* 2021, 2023), por ende, en el patrimonio cultural.

En el campo de impactos pueden estar identificadas amenazas del catálogo de UNDRR que hemos considerado, en el caso de sitios arqueológicos, impactos concatenados, como los deslizamientos o los cambios de patrones en la fenología y la biodiversidad de las especies. En la siguiente Tabla 2 se incluye, a modo de superíndice, la nomenclatura referente al catálogo UNDRR, en el que se identifica con letras la categoría de la amenaza seguida de un número correlativo. De esta forma “MH” serían las amenazas meteorológicas e hidrológicas y “EN” las ambientales.

Dentro de las amenazas incluimos en los eventos extremos las Depresiones Aisladas en Niveles Altos (DANAs), (Martín 2003; National Geographic 2025), que provocan lluvias intensas e inundaciones, y que son de especial interés en la zona mediterránea por su alto nivel de exposición.

En los sitios arqueológicos dividimos los daños en estructuras, cuando hacemos referencias a muros, o edificaciones compuestas de varios elementos, y en materiales, haciendo alusión a materiales pétreos, morteros, metales y orgánicos, pero siempre formando parte de estructuras inmuebles.

Resultados

EVENTOS METEOROLÓGICOS EXTREMOS	
AMENAZAS	Lluvias intensas ^{MH0003} ; inundaciones fluvial ^{MH0007} ; vientos fuertes ^{MH0054} ; granizo ^{MH0036} ; nieve ^{MH0038} ; tormentas de nieve ^{MH0034} (1)
IMPACTOS	<ul style="list-style-type: none"> - Precipitaciones sólidas de partículas de hielo provocan acumulación con aumento de peso sobre las estructuras y riesgo de colapso (A) - Deslizamientos de tierra y rocas^{MH0052}, que pueden colapsar estructuras (A) - Daños en estructuras y materiales por la acción física de fuertes lluvias y viento (A) - Daños y pérdida total por la fuerza del agua de inundación, escombros y sedimentos (4) - Inundación de estructuras sin posible evacuación, enterramientos, piletas, etc (A) - Riesgo de subsidencia de estructuras por debilitamiento del asentamiento (A) - Daños por la construcción de defensas contra inundaciones fluviales (3) - Pérdida de estratigrafías (4) - Daños por congelación/descongelación de materiales porosos (4)
FUEGO	
AMENAZAS	Incendios forestales ^{EN0013} (1) Aumento del número de episodios de tormentas secas y rayos (5)
IMPACTOS	<ul style="list-style-type: none"> - Daño o destrucción de las estructuras de origen orgánico (3) - Alteración por calor de materiales. Fractura por calor de artefactos de piedra. Decoloración, exfoliación, desplazación y manchas de imágenes de rocas y petroglifos (3) - Mayor susceptibilidad a la erosión e inundaciones del suelo (3) - Daños por caída de árboles muertos (3) - Daño físico por esfuerzos de extinción de incendios (3)
OSCILACIONES TÉRMICAS E IMPACTOS FÍSICO-QUÍMICOS DE EFECTOS CON DINÁMICAS PROGRESIVAS	
AMENAZAS	Ola de frío ^{MH0040} , heladas ^{MH0042} ; ola de calor ^{MH0047} ; sequía ^{MH0035} ; viento ^{MH0060} (1)
IMPACTOS	<ul style="list-style-type: none"> - Erosión del suelo^{EN0019} (2) y mayor riesgo a pérdida de material por escorrentía (A) - Erosión de los materiales por acción del viento (3) - Estrés térmico de los materiales (2), microfisuras en materiales (3) - Termoclascismo (4) - Disolución de materiales (matrices en morteros, etc) (6) - Oxidación acelerada en recursos sumergidos y litorales debido a temperaturas marinas más cálidas (3) - Descomposición más rápida de materiales orgánicos materiales debajo y sobre el suelo (3) - Daños por aumento de actividad biológica en sitios submarinos poco profundos (3) - Aumento del crecimiento de árboles y vegetación con raíces asociadas u otros daños (3) - Reducción del caudal de los embalses y lagos (2) y desecación de depósitos anegados; pérdida de información paleoambiental (3) - Exposición de sitios sumergidos debido a niveles más bajos de agua en lagos y embalses (3) - Salinidad^{EN0007}, aerosoles marinos. Mayor penetración de sales y lluvia en piedra y materiales porosos, donde los cristales en crecimiento o el congelamiento/descongelamiento pueden comenzar a romper el material (3) - Pérdida de biodiversidad^{EN0008} (2) colonias líquénicas protectoras (6) - Riesgo de ataque de microorganismos e insectos (4) - Daños por disminución de la humedad en materiales orgánicos (4) - Movimiento de dunas con enterramiento de estructuras (A)
SUBIDA DEL NIVEL DEL MAR Y MAREJADAS CICLÓNICAS	
AMENAZAS	Subida del nivel del mar ^{EN0023} , marejada ciclónica ^{EN0027} (1)
IMPACTOS	<ul style="list-style-type: none"> - Inundación costera^{MH0027}, inmersión de estructuras (2) - Alteración de las condiciones de conservación debido a la intrusión salina (3) - Erosión costera y cambio de la línea de costa^{EN0020} (2), pérdida de estructuras costeras. (3) - Daños a sitios arqueológicos por la construcción de defensas contra inundaciones costeras (3)
REF (1) UNDRR 2021; (2) Sanz y Galán 2020; (3) ICOMOS 2019; (4) Kapsomenaskis <i>et al.</i> 2023; (5) Romps <i>et al.</i> 2014; Machibata T. 2024; (6) Daly C. 2011; (A) Autoras [1]	

Tabla 2.- Listado de amenazas y posibles impactos derivados del cambio climático en sitios arqueológicos. En el campo Ref. se incluyen las empleadas para la tabla si bien muchos de los impactos están descritos por varios autores.

Conclusiones

En este artículo hemos seleccionado las referencias de las principales amenazas y los posibles impactos en sitios arqueológicos, intentando abarcar todas las posibilidades que pueden darse en el territorio español, selección en la que se debe seguir trabajando ayudados por las experiencias en otras disciplinas.

Algunas de las ventajas de adoptar metodologías heredadas de otros ámbitos es el empleo de herramientas ya diseñadas y glosarios estandarizados que permitan un trabajo interdisciplinar. En el ámbito del cambio climático es una necesidad ineludible, ya que impone un entendimiento global en cuanto a la hora de medir sus impactos cuantificar las pérdidas e implantar medidas de adaptación.

Por otro lado, en el caso del aumento de las temperaturas, cuyo seguimiento es posible gracias a los índices climáticos y las previsiones de los visores, tienen graves y generalizadas consecuencias en todos los sitios arqueológicos de la península ibérica. La vulnerabilidad de los materiales arqueológicos aumenta debido al estrés térmico y a la erosión posterior, llegando a ser alarmante en el caso de lluvias torrenciales.

A través de este artículo se ha pretendido realizar una revisión de las herramientas más actualizadas en la materia de identificación de amenazas derivadas del cambio climático, acercándolas al ámbito de la conservación del patrimonio cultural y realizando un análisis más exhaustivo sobre aquellas que tienen un impacto específico sobre los yacimientos arqueológicos. No cabe duda de que hay que seguir profundizando en la gravedad de los mismos, poniendo el foco en aspectos con dinámicas progresivas de degradación de los materiales o las modificaciones en los valores intangibles causados, por ejemplo, por el cambio de hábitos en el turismo. Aspectos que no están más que empezando a vislumbrarse. De cualquier forma, es algo que no se puede afrontar sin tener en cuenta otros sectores y sin poner realmente en práctica la interdisciplinariedad de los estudios, como ha quedado demostrado en la revisión aquí realizada.

Notas

[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).

Agradecimientos

Nuestro más sincero agradecimiento al Doctor Fernando Carrera Ramírez, por su tiempo y reflexiones, que han sido decisivas para la redacción del presente artículo.

Referencias

- ABAJO, B., NAVARRO D., GARCÍA G., ZORITA S., FELIU E., KLETT P., SÁNCHEZ M. Y HERAS F. (2023): *Guía para la evaluación de riesgos asociados al cambio climático 2023*. Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico. ISBN (online): 978-84-18508-95-0. https://adaptecca.es/sites/default/files/documentos/miteco_guia_evaluacion_riesgos_cambio_climatico_2023.pdf
- ADAPTECCA (s.f.). https://escenarios.adaptecca.es/#&model=EURO-CORDEX-EQM.average&variable=tasmax&enario=rcp85&temporalFilter=year&layers=AREAS&period=MEDIUM_FUTURE&anomaly=RAW_VALUE1 [consultado 05/08/2024]
- AEMET (2023). Agencia Estatal de Meteorología. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. *Informe del estado del clima en España 2023*. https://www.aemet.es/es/conocerlas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/publicaciones/detalles/informe_estado_clima.
- AEMET. (s.f.). Agencia Estatal de Meteorología. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. www.aemet.es/es/eltiempo/observaciones/ultimosdatos
- AMBLAR, P., CASADO, M. J., PASTOR, A., RAMOS, P.Y RODRÍGUEZ, E. (2017). *Guía de escenarios regionalizados de cambio climático sobre España a partir de los resultados del IPCC-AR5*. Agencia Estatal de Meteorología. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. <https://doi.org/10.31978/014-17-010-8>
- BASCONCILLOS ARCE, J. (2024). *Riesgos Naturales. Identificación y Análisis online*. Unidad Didáctica 1. Introducción a los Riesgos Naturales. D.G. de Protección Civil y Emergencias. Ministerio de Interior. <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>
- BOE (2011). N° 173, 20 de julio. *Instrumento de Ratificación del Convenio Europeo para la protección del patrimonio arqueológico (revisado), hecho en La Valeta el 16 de enero de 1992*. Convenio europeo para la protección del patrimonio arqueológico. Artículo 1. <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2011-12501>. [consulta 27/01/2024]
- CID, A., MENÉNDEZ M., CASTANELO S., ABASCAL A, MÉNDEZ F. Y MEDINA R., (2016). "Long-term changes in the frequency, intensity and duration of extreme storm surge events in southern Europe", *Clim Dyn* 46:1503–1516 <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2659-1>
- Copernicus atlasC3S. (s.f.). <https://atlas.climate.copernicus.eu/atlas> [consulta 06/08/2024]
- Climate-ADAPT. (s.f.). <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/about> [consulta 20/12/2024].
- CLIMATE CHANGE AND CULTURAL HERITAGE WORKING GROUP INTERNATIONAL (2019). *The 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>

- DALY C. (2011). "Climate Change and the Conservation of Archaeological Sites: A Review of Impacts Theory, *Conservation and mgmt of arch. sites*, 13(4): 293–310. <https://doi.org/10.1179/175355212X13315728646058>
- DALY C. (2014). "A Framework for Assessing the Vulnerability of Archaeological Sites to Climate Change: Theory, Development, and Application". *Conservation and mgmt of arch. sites*, 16(3): 268–282. <https://doi.org/10.1179/1350503315Z.00000000086>
- DÍAZ P., OJEDA, J. P. PÉREZ J. P. Y DISEÑO J. (2012). "Diseño y funcionalidades de un Visor Web para la participación pública en los procesos de planificación y gestión costera". *GEOTEMAS* 15: 105
- EEA (2023). *European Climate Risk Assessment*. Agencia Medioambiental Europea. <https://www.eea.europa.eu/publications/european-climate-risk-assessment>.
- ETCCDI (s.f.). *Equipo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático*. <https://www.wcrp-climate.org/etccdi> [consultado el 17/07/2024]
- GARCÍA GONZÁLEZ, M. B., JORDANO, P. (2020). *Global change impacts*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (España). <http://doi.org/10.20350/DIGITALCSIC/12654>
- GARROTE L., SORDO-WARD A. EIGLESIAS A. (2020). *Eventos hidrológicos y modelización*. Fundación Canal II. https://adaptecca.es/sites/default/files/documentos/2020_eventos-hidrologicos-extremos-y-cambio-climatico_fundacioncanal.pdf
- GREENPEACE (2024). *Crisis a toda costa 2024. Análisis de la situación del litoral ante los riesgos de la emergencia climática*. <https://es.greenpeace.org/es/wp-content/uploads/sites/3/2024/07/crisis-a-toda-costa-2024.pdf>
- HYPERION (2023). *Development of a Decision Support System for Improved Resilience & Sustainable Reconstruction of historic areas to cope with Climate Change & Extreme Events based on Novel Sensors and Modelling Tools*. Hyperion. <https://cordis.europa.eu/project/id/821054>.
- IHCANTABRIA C3E. (s.f.). <https://c3e.ihcantabria.com/> [consultado el 05/08/2024]
- IPCC (s.f.). INTERACTIVE ATLAS. <https://interactive-atlas.ipcc.ch/> [consultado el 05/08/2024]
- IPCC (2022 a y b). FullReport WGII. AR6. Pag 154. Recuperado 2 de agosto de 2023 en https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_FullReport.pdf
- KAPSOMENAKIS J., DOUVIS C., POUPKOU A., ZEREFOS S., SOLOMOS S., STAVRAKA T., MELISN., KYRIAKIDIS E., KREMLISG. AND ZEREFOS, Z. (2023). "Climate change threats to cultural and natural heritage
- UNESCO (s.f.). UNESCO sites in the Mediterranean". *Environment, Development and Sustainability* 25:14519–14544. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02677-w>
- LOSADA I, (coord.) (2020). Guía Metodológica. Metodología y bases de datos para la proyección de impactos de cambio climático a lo largo de la costa española. Fundación Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria. Gobierno de Cantabria.
- MARCOS M. (2021). Cómo afectará la subida del nivel del mar en la costa mediterránea por el cambio climático. <https://www.iagua.es/blogs/marta-marcos/como-afectara-subida-nivel-mar-costa-mediterranea-cambio-climatico>
- MARTÍN LEÓN F. (2003). "Las gotas frías/DANAs. Ideas y conceptos básicos. Servicio de Técnicas de Análisis de Prevención. Instituto Nacional de Meteorología. <https://www.aemet.es/danas> [consultado el 02/08/2024].
- MARTÍN LEÓN F. (2021). "Medición del retroceso de las líneas de costa". *Rev digital METEORED* www.tiempo.com/ram/med [consultado el 7/7/2024].
- MICHIBATA M. (2024). "Significant increase in graupel and lightning occurrence in a warmer climate simulated by prognostic graupel parameterization". *Scientific Reports*, 14, 3862. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-54544-5>
- MOREL H. et al. (2022). Global research and action agenda on culture, heritage and climate change. Project Report. ICOMOS & ISCM CHC, 69. <https://openarchive.icomos.org/id/eprint/2716>
- NASA sealevel. (s.f.). <https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool> [consultado el 05/08/2024]
- NASA fire. (s.f.). <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/map>. [consultado el 08/08/2024]
- National Geographic, (2025). "En el interior de la DANA", 55 (6).
- PERAL C., NAVASCUÉS B. Y RAMOS P. (2017). Serie de precipitaciones diarias en rejilla con fines climáticos. *Nota Técnica 24 de AEMET*. <https://doi.org/10.31978/014-17-009-5>.
- PROTECHT2SAVE. (2017). Interreg Central Europe. Risk assessment and sustainable protection of cultural heritage in changing environment. <https://programme2014-20.interreg-central.eu/Content.Node/ProteCHT2save.html> . [consulta el 05/02/2024]
- REIMANN L., VAFEIDIS A., BROWN S., HINKEL J AND TOL R. (2018). "Mediterranean UNESCO World Heritage at risk from coastal flooding and erosion due to sea-level rise". *Nature Communication*. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-06645-9>.
- ROMPS D., SEELEY J., VOLLARO D. AND MOLINARI J. (2014). "Climate change. Projected increase in lightning strikes in the United States due to global warming". *Science* 346(6211):851-854. <https://doi.org/10.1126/science.1259100>.
- SABIONI, C., BRIMBLECOME P. Y CASSAR M. (2010). The Atlas of climate change impacto European cultural heritage. Anthem Press. <https://data.europa.eu/doi/10.2777/11959>
- SANZ, M.J. Y GALÁN, E. (2020). *Impactos y riesgos derivados del cambio climático en España*. Oficina Española de Cambio Climático. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Madrid. NIPO (en línea): <https://www.miteco.gob.es/es/ceneam/recursos/pag-web/impactos-cambio-climatico-espana.html>

SARDELLA, A., PALAZZI, E., HARDENBERG, J., DEL GRANDE, C.; DE NUNTIIS, P., SABBIONI, C. Y BONAZZA, A. (2020). "Risk Mapping for the Sustainable Protection of Cultural Heritage in Extreme Changing Environments", *Atmosphere* 11(7):11-18. <https://doi.org/10.3390/atmos11070700>

SALAZAR M. (2021). *Jornada nacional de herramientas para la adaptación al cambio climático*. Oficina Española del Cambio Climático. Proyecto LIFE-SHARA. <http://www.lifeshara.com>.

SCOTT A., RICHARDS J. AND FATORÍĆ S. (2021). "Climate Change and Cultural Heritage: A Systematic Literature Review (2016–2020)", *The Historic Environment: Policy & Practice*, 12 (3-4): 434-477, <https://doi.org/10.1080/17567505.2021.1957264>

SESANA E, GAGNON A.S. Y BERTOLIN C. (2018). "Adapting Cultural Heritage to Climate Change Risks: Perspectives of Cultural Heritage Experts in Europe". *Geosciences*, 8(8):305; <https://doi.org/10.3390/geosciences8080305>

UNDRR (2021). UNDRR-ISC Hazard Information Profile Supplement to UNDRR-ISC Hazard Definition & Classification Review - Technical Report. <https://doi.org/10.24948/2021.05>

VARGAS-YÁÑEZ, M.; TEL, E.; MOYA, F.; BALLESTEROS, E.; GARCÍA-MARTÍNEZ, M.C. (2021). "Long-Term Changes, Inter-Annual, and Monthly Variability of Sea Level at the Coasts of the Spanish Mediterranean and the Gulf of Cádiz". *Geosciences*, 1: 350-370 <https://doi.org/10.3390/geosciences11080350>

VARGAS-YÁÑEZ, M.; TEL, E.; MARCOS, M.; MOYA, F.; BALLESTEROS, E.; ALONSO, C.; GARCÍA-MARTÍNEZ, M.C. (2023). "Factors Contributing to the Long-Term Sea Level Trends in the Iberian Peninsula and the Balearic and Canary Islands". *Geosciences*, 13(6): 160. <https://doi.org/10.3390/geosciences13060160>

VECCHIO A., ANZIDEI M. AND SERPELLONI E. (2023). "Sea level rise projections up to 2150 in the northern Mediterranean coasts". *Environmental Research*. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad127e>.

Autor/es



Elena García Martínez

mariae80@ucm.es

Alumna doctorado - Facultad de Bellas Artes (UCM)

<https://orcid.org/0000-0003-4775-5681>

Conservadora-Restauradora, Escuela Superior de Conservación y Restauración de BBCC. Grado en Ciencias Ambientales, Facultad de Ciencias, UNED. Máster en Bienes Culturales: Conservación, Restauración y Exposición, Facultad de Bellas Artes, UCM. Máster en Estudios Avanzados de Museos y Patrimonio Histórico-Artístico, Facultad de Geografía e Historia, UCM. Recorrido laboral vinculado al ámbito de museos y yacimientos arqueológicos, en 2010 se incorpora a la plantilla del Departamento de Materiales Pétreos del IPCE.



Marta Plaza Beltrán

mplazabe@art.ucm.es

Profesora Titular del Departamento de Pintura y Conservación-Restauración de la Facultad de Bellas Artes (UCM).

<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 impartido docencia en diferentes titulaciones de Licenciatura, Grado y Máster, en la Universidad pública (UCM) y en la privada (Universidad SEK, IE University). Con estancias en centros docentes de Italia, Portugal, Taiwán, etc. Ha participado en numerosos proyectos de investigación y de docencia financiados, como directora y como miembro del equipo de investigación (I+D+I, art. 83, PIMCD). Igualmente, ha participado en importantes encuentros, seminarios y congresos. Posee publicaciones en revistas indexadas, así como monografías. Dentro del campo profesional ha sido responsable de la dirección técnica de obras de conservación-restauración en diferentes ámbitos: pintura mural, retabística, escultura, pintura de caballete, material etnográfico, etc. mediante contratación directa y concursos públicos a través de empresa propia (Sociedad Limitada). Ha trabajado para instituciones públicas y privadas (Patrimonio Nacional, Museos, Ministerios, Comunidades Autónomas, Diputaciones, Ayuntamientos, Embajadas, Obispos, Fundaciones, etc.). Ha elaborado informes técnicos específicos para concursos públicos y peritajes de conjuntos artísticos. Vinculado con la puesta en valor de conjuntos históricos destaca la realización de facsímiles de pinturas murales (gran formato). Miembro del comité científico y revisora de varias revistas especializadas. Revisora en dos editoriales, nacional e internacional. Evaluadora de la Agencia Estatal de Investigación (AEI).

Artículo enviado 19/10/2024

Artículo aceptado el 06/02/2025



<https://doi.org/10.37558/gec.v26i1.1347>