

RECONSTRUCCIÓN CON REALIDAD AUMENTADA DE OBRAS DE ARTE DETERIORADAS

CÉSAR ROMANOS MARTÍNEZ¹, DANIEL LEÓN GONZÁLEZ¹, MARTA SALAS GARCÍA¹, M. CRUZ GALINDO LÓPEZ¹

¹UNIVERSIDAD FRANCISCO DE VITORIA, ESPAÑA

PALABRAS CLAVE	RESUMEN
Patrimonio Cultural Románico Revitalización rural Grafitos Conservación del arte Realidad Aumentada Aplicación móvil España Vaciada	ARRDA (<i>Augmented Reality Reconstruction of Deteriorated Art</i>) es una aplicación móvil que utiliza realidad aumentada para revitalizar el patrimonio cultural rural. Su piloto, implantado en la iglesia románica de San Miguel (Soria), permite visualizar reconstrucciones digitales de grafitis centenarios y hoy casi borrados. Desarrollada con Unity y ARFoundation, enriquece la experiencia del visitante y recoge datos sobre uso y comportamiento. ARRDA busca preservar el patrimonio y dinamizar territorios afectados por la «España vaciada», fortaleciendo el vínculo cultural y emocional con entornos olvidados y con nuestra historia.

RECIBIDO: 03 / 09 / 2025

ACEPTADO: 28 / 09 / 2025

1. Introducción

La realidad aumentada (RA) ha ganado una popularidad sin precedentes en la última década como una tecnología con un potencial muy alto para transformar la forma en que las personas interactúan con su entorno. La RA llegó al gran público con el éxito masivo del juego para móviles Pokemon Go, que permitía a los jugadores interactuar y ver a sus Pokemons integrados en el entorno. Su capacidad para superponer información digital sobre el mundo físico abre nuevas posibilidades en campos como la educación, el turismo, la medicina o el patrimonio cultural. En este contexto, este proyecto surge con un objetivo claro: utilizar la realidad aumentada para poner en valor el patrimonio cultural deteriorado y, en consecuencia, contribuir a la revitalización de comunidades rurales en riesgo de despoblación.

1.1. Contexto del proyecto

España se enfrenta en la actualidad a uno de los mayores retos demográficos de la era moderna, este reto es conocido popularmente como la *España Vacía*. Esta expresión ha cobrado relevancia recientemente para describir la persistente despoblación que afecta a las regiones del interior de España, (Pazos-Vidal, 2022). Este fenómeno se caracteriza por el creciente envejecimiento de la población, la desaparición de servicios básicos y el abandono del patrimonio cultural en un porcentaje sustancial del interior de España.

Como consecuencia, se produce una creciente fractura entre las grandes áreas urbanas, en constante expansión y saturación, y las pequeñas comunidades rurales, que no pueden sino observar cómo su tejido económico y social se deteriora con el paso del tiempo. Una de las consecuencias más visibles y a menudo más olvidadas es el deterioro del patrimonio cultural rural. En muchos pueblos y aldeas, el arte, la arquitectura y las tradiciones que han definido la identidad de España durante siglos corren el riesgo de desaparecer. El paso del tiempo, la falta de recursos dedicados a su conservación y la carencia de medios tecnológicos para su promoción han provocado que la mayor parte de este patrimonio haya caído en el olvido y el deterioro. Sin una intervención adecuada, el conocimiento de este legado corre el riesgo de perderse tanto para las generaciones futuras como para las comunidades que lo custodian.

Con esta realidad, se hace cada vez más urgente comprender cuáles son los medios y las técnicas que pueden utilizarse para preservar y aprovechar el patrimonio cultural de estas comunidades en el siglo XXI. Más allá de su valor estético e histórico, este patrimonio puede convertirse en un activo estratégico para el turismo. El patrimonio cultural puede funcionar como un poderoso imán turístico cuando se presenta adecuadamente y se hace accesible a los visitantes, convirtiendo estos activos en un recurso inestimable para ayudar con el reto demográfico y la revitalización de estas zonas rurales. Este tipo de estrategias se han explorado académicamente, como en el caso de Tárbena, donde el patrimonio del pueblo se transformó en un activo turístico-cultural para hacer frente a la despoblación rural (Signes-Pont et al., 2022). La integración de nuevas tecnologías, como la realidad aumentada, permite no sólo proteger estos bienes sin una intervención física sobre ellos, sino también reinterpretarlos, hacerlos accesibles a nuevos tipos de visitantes y explotar su valor como herramienta de desarrollo local. La oportunidad reside en convertir el descuido en experiencia y la negligencia en una conexión significativa con el pasado.

1.2. Iglesia de San Esteban de Gormaz y San Miguel

San Esteban de Gormaz (SedG) es una localidad situada en la provincia de Soria, una de las más afectadas por el reto demográfico del interior de España. Con una población de poco más de 3.000 habitantes, esta localidad ha tenido un papel clave en la historia de España. Este trabajo se centra

en la iglesia de San Miguel y los secretos que guarda entre sus muros. Este templo fue construido entre 1060 y 1081, lo que la convierte en la primera iglesia románica porticada construida (Arribas, 2024).

La figura 1 muestra la iglesia en la actualidad. Permanece como estandarte de la cristiandad y de la Reconquista española. Además, y como ya se ha mencionado, el pórtico es uno de los elementos más relevantes de la iglesia. Su importancia radica en que este tipo de galería parece remontarse al románico español, apareciendo por primera vez en las iglesias de San Esteban de Gormaz, y evidencia la influencia del arte oriental en la Península. Para algunos autores como Gaya Nuño (Pantoja, 2012), las galerías porticadas en el románico llegan por primera vez a través de la convivencia pacífica entre cristianos y omeyas en Siria durante la invasión islámica de estos últimos y con el posterior asentamiento de los omeyas en España. Soria fue una zona con fuerte presencia omeya y, posteriormente, mudéjar tras la Reconquista. Este pórtico servía de punto de encuentro de todos los pueblos próximos a San Esteban de Gormaz, que era *cabecera de comarca*. Estas reuniones se realizaban semanalmente y en ellas un representante de cada pueblo se ponía de acuerdo para gestionar correctamente los recursos.

La iglesia está rodeada de ménsulas (*canecillos*), que son esencialmente los antecesores primitivos de lo que hoy se conoce como gárgolas. En la figura 2, hay una ménsula en particular que sostiene un libro abierto en el que se lee: «IVLIANUS MAGISTER FECIT ERA MCXVIII», «Juliano se hizo maestro en la era 1119» que es el año 1081 de nuestro calendario. Esto aporta pruebas irrefutables de que se trata de la primera iglesia románica porticada de la historia.

Figura 1. Iglesia de San Miguel



Fuente: Iglesia de San Miguel (2016)

Figura 2. Ménsula de Juliano



Fuente: Iglesia de San Miguel (2016)

La iglesia de San Miguel ha sufrido varias intervenciones a lo largo de su historia, algunas de las cuales no tuvieron éxito y supusieron una pérdida parcial de las pinturas murales y los grafitos. Sin embargo, entre 2007 y 2012, la iniciativa *Soria Románica* realizó una investigación en profundidad sobre San Miguel. Esta investigación reveló descubrimientos excepcionales bajo las capas de polvo y suciedad de los muros. Se encontraron varios grafitos datados entre los siglos XI y XIII. Estos variados bocetos representan diferentes figuras, como soldados, inscripciones latinas y una tribuna perimetral antaño desconocida.

Estos grafitos se muestran en detalle más adelante en el documento, pero el muro norte de la iglesia puede verse en la figura 3, que muestra la mayoría de los grafitos resaltados en blanco. Los muros de San Miguel contienen varios centenares de marcas medievales diferentes. Algunos de

esos grafitos son visibles a simple vista, sin embargo, una mayoría sustancial de estas marcas no pueden ser apreciadas por los visitantes, por lo que sigue siendo imposible una conexión cultural entre el visitante y el patrimonio cultural.

Figura 3. Pared norte de San Miguel.



Fuente: Sadia, J.M. (2019)

1.3. Objetivos y alcance

El objetivo principal del presente trabajo es el diseño y desarrollo de una solución tecnológica que aborde la preservación y comunicación innovadora del deteriorado patrimonio mural de la iglesia de San Miguel a través de una experiencia inmersiva mediante RA. El enfoque propuesto consiste en proporcionar una aplicación móvil que aproveche el uso de la RA para superponer las reconstrucciones digitales de los grafitos (graffiti) medievales directamente sobre los muros originales, permitiendo al visitante descubrir los bocetos y marcas que no son visibles a simple vista. Se han utilizado enfoques similares para visualizar grafitos a través de la RA en entornos patrimoniales como el Templo de Debod (Gutiérrez et al., 2015). Esto puede ayudar a mejorar la riqueza de la visualización, a proporcionar información más vívida y también mejora la experiencia del patrimonio (Wang & Zhu, 2022). Esta propuesta no sólo pretende enriquecer la experiencia cultural, sino también proporcionar una herramienta a las autoridades locales para gestionar y analizar el comportamiento de los visitantes, facilitando así la toma de decisiones en materia de turismo, conservación y desarrollo.

Este proyecto adopta un doble enfoque. Por un lado, se concibe como una intervención cultural con impacto social al visibilizar y revalorizar un patrimonio en peligro, por otro, es un esfuerzo de innovación tecnológica que explora las posibilidades de la RA en entornos rurales con condiciones técnicas y logísticas desafiantes. A nivel funcional, la aplicación permite el escaneo de zonas concretas del templo, la visualización de la reconstrucción digital y la interacción con ellas por parte del usuario, así como la recogida de métricas de uso como número de usuarios, tiempo medio por sesión, ratio de escaneos completados, etc.

El alcance de este trabajo conlleva el desarrollo de la mencionada aplicación, así como la coordinación de los diferentes actores que han sido cruciales para el desarrollo de ARRDA como son las autoridades de San Esteban de Gormaz y los investigadores de *Soria Románica*. Asimismo, la aplicación ofrece una arquitectura modular y escalable que garantiza su aplicabilidad a otros entornos diferentes del patrimonio cultural. En definitiva, este trabajo aspira a ser un modelo demostrativo de cómo la tecnología puede servir a las zonas rurales de España y de otros países

en condiciones similares, generando valor cultural, social y económico en un contexto de reto demográfico.

2. Investigación previa y estado del arte

El uso de alternativas tecnológicas para la reconstrucción del arte en el patrimonio cultural ha ido en aumento en los últimos años. Esto se debe a varias razones como la mejora de la RX (Realidad Extendida) que implica RV o RA, y los recientes avances en IA generativa. Estudios recientes han identificado una tendencia en la aplicación de la RA en el patrimonio cultural, incluyendo la reconstrucción, la educación y el turismo (Boboc et al., 2022).

2.1. La RA como herramienta de revitalización cultural

Este trabajo se centra en la RA y en cómo aprovecharla para el reto demográfico en España, ya que ha emergido como una de las tecnologías clave en el contexto de la difusión del patrimonio artístico y la reactivación y dinamización de espacios culturales. Su capacidad para superponer capas de información digital como reconstrucciones, narrativas o piezas de información sobre espacios físicos permiten la reinterpretación e interacción con el patrimonio cultural y artístico sin alterar los bienes artísticos físicos. En el caso del patrimonio rural, donde varias manifestaciones artísticas permanecen olvidadas o abandonadas, la RA proporciona un método eficaz para devolver la visibilidad y el significado a estos entornos y generar al mismo tiempo nuevas formas de conectar e interactuar con el patrimonio.

Diversos estudios han demostrado que el uso de la RA puede aumentar significativamente el nivel de compromiso, retención y comprensión de los visitantes, especialmente en entornos históricos. Por ejemplo, (Bekele et al., 2018) destacan cómo la RA puede mejorar la interpretación del patrimonio al ofrecer una visualización en tiempo real que involucra al usuario. Del mismo modo, (Tom Dieck & Jung, 2017) examinan su aplicación en el contexto del turismo patrimonial y concluyen que la RA no solo mejora el nivel de inmersión y disfrute del usuario, sino que también contribuye a fomentar una mayor fidelidad de los visitantes y una promoción más amplia del lugar visitado.

En el contexto de la *España Vacía*, donde la mayoría de los bienes culturales carecen de los recursos necesarios para su restauración, conservación o digitalización, la RA surge como una alternativa sostenible y escalable. Su despliegue no depende de infraestructuras físicas, ni altera o degrada los bienes culturales, si no que fomenta la innovación y la preservación para las generaciones futuras. Al mismo tiempo, al ofrecer experiencias inmersivas e interactivas, la RA puede generar un importante interés por estos espacios, atrayendo nuevos perfiles de visitantes y contribuyendo a la revitalización económica y social de estas zonas.

2.2. Trabajos similares

El uso de tecnologías inmersivas dedicadas al patrimonio cultural ha creado un número creciente de trabajos que buscan mejorar la preservación, accesibilidad o interpretación del pasado de estos diferentes bienes. A continuación, se presenta una reseña de estudios representativos.

El trabajo de (Tukhboeva, 2023) presenta un sistema de reconstrucción digital para el patrimonio cultural medieval del palacio del emir Timur en Uzbekistán. Este sistema se basa en el uso de RA y RV para recrear la estructura original del palacio, y su objetivo es proporcionar una experiencia agradable e interactiva a los visitantes. En este caso, la obra se basa en la reconstrucción 3D del templo, proporcionando un modelo totalmente recreado del palacio original. Aunque el objetivo de este trabajo es el mismo que el de este documento, los alcances difieren ampliamente.

El estudio de (Shih & Kung, 2024) presenta un sistema que permite a los usuarios crear, compartir y almacenar grafitos virtuales. Esto permite crear una próspera cultura del grafiti sin dañar las infraestructuras. También se basa en la tecnología de RA, y los grafitos también pueden ser tridimensionales. Aunque el objetivo de este trabajo es diferente del presentado en este documento, comparte el mismo espíritu de permitir a la gente ver y comprender la creatividad de otras personas a través de sus teléfonos.

Gemelos digitales (Ćosović & Maksimović, s.f.) son representaciones virtuales exactas de un objeto real; guardan la misma información y parámetros para su posterior estudio. Mediante el uso de tecnologías como HBIM (*Heritage Building Information Modelling*), IoT y el análisis de datos es posible crear una réplica perfecta de un bien cultural. Esta sería una de las formas más precisas y eficaces de abordar nuestro proyecto, sin embargo, también puede significar que la aplicación no sea tan ligera como el proyecto requiere, por lo que los turistas podrían considerarla un inconveniente a la hora de visitar la iglesia.

La RA no sólo puede ser útil para usuarios finales como visitantes o turistas, sino que también puede ser beneficiosa para profesionales como los restauradores de arte. Esto es precisamente lo que hace ARTworks (Brondi & Carrozzino, 2015). Permite a los profesionales de la restauración superponer información crucial como imágenes UV o radiografías sobre la obra de arte que se va a restaurar. Aunque tiene un objetivo diferente al de ARRDA, el fundamento es muy similar debido a que tiene una «imagen objetivo» y su respectiva información que se proyecta sobre el objetivo.

Narralive (Vrettakis et al., 2019) presenta el Narrative Storyboard Editor (NSE), una herramienta diseñada para facilitar la creación e investigación de narrativas digitales móviles en relación con el patrimonio cultural. Este sistema capacita a autores independientes y multidisciplinares para generar experiencias inmersivas centradas en el valor histórico de los bienes. La RA no está del todo integrada, aunque se presenta como un posible siguiente paso, sin embargo, este trabajo es relevante para esta propuesta, ya que mantiene la idea narrativa en el centro, facilitando la comprensión del patrimonio y haciéndolo más atractivo para futuros visitantes.

2.3. Propuesta de valor diferencial

Aunque algunas de estas soluciones guardan similitudes con este estudio, el trabajo presentado aporta un enfoque y un valor únicos que ningún otro ofrece. Estas son algunas de las características más relevantes:

Enfoque local y rural: Uno de los principales objetivos de este proyecto es fomentar el turismo y la actividad de todo tipo en la *España Vacía*. Para conseguirlo, la solución debe ofrecer una mejor experiencia a los visitantes actuales y futuros. Un enfoque modernizado e interactivo para hacer más atractiva la idea de visitar y alojarse en pueblos como éste.

Objetivos de imagen in situ: Los visitantes no deberían tener que buscar códigos QR o soluciones similares. En la propuesta actual, el objetivo es ofrecer una experiencia sin fisuras, de modo que sólo con apuntar con el móvil a la pared aparezcan los grafitis, permitiendo a los visitantes localizarlos con precisión en los muros de la iglesia.

Enfoque interdisciplinar: En el desarrollo de una aplicación como ésta deben intervenir varias disciplinas. En primer lugar, el desarrollo técnico, que se basa en la visión por ordenador, el desarrollo móvil y la realidad aumentada. Para ello se ha contado con proyectos como *Soria Románica* para la reconstrucción exacta de los diferentes grafitos y con la colaboración de la consejería de cultura de San Esteban de Gormaz. Por último, esta app pretende servir de apoyo al guía local, por lo que también implica a las personas de la concejalía de cultura de San Esteban de Gormaz.

Modularidad y escalabilidad: La solución propuesta se ha creado pensando en la facilidad de escalado. No es necesario alterar la lógica de la aplicación para utilizarla en otros entornos de

patrimonio cultural. Los únicos elementos que habrá que añadir son las nuevas imágenes objetivo para las detecciones y las superposiciones de las reconstrucciones que se mostrarán sobre las referencias objetivo.

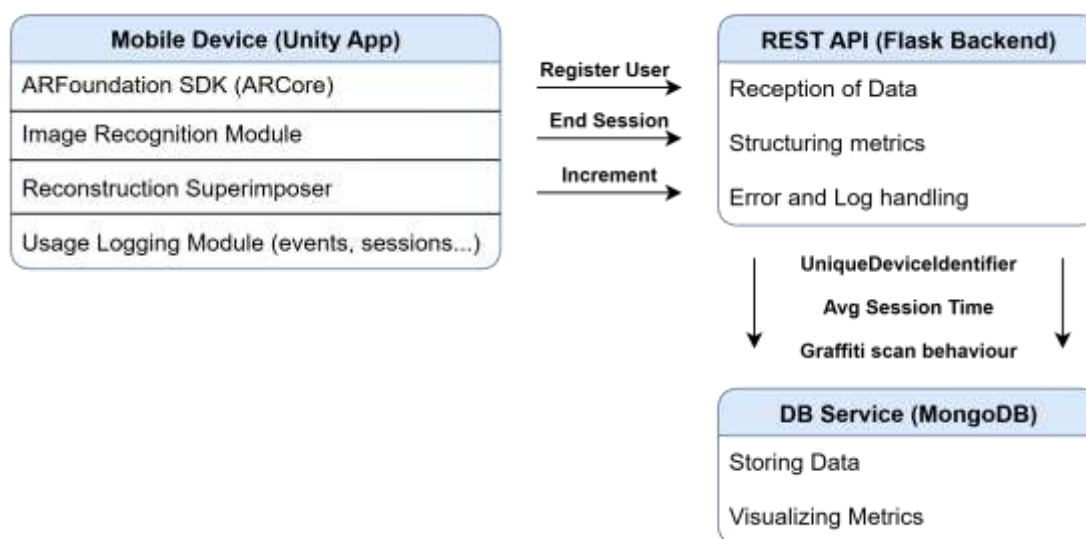
3. Metodología y diseño del sistema

Esta sección presenta la discusión de la metodología y las decisiones que guiaron el desarrollo de ARRDA. Este trabajo utiliza un enfoque iterativo, basado en ciclos de validación y mejora continua con un objetivo claro: crear una herramienta accesible, no invasiva y contextualizada dentro del patrimonio cultural de la *España Vacía*.

3.1. Diseño de la arquitectura

El sistema ARRDA está compuesto por una arquitectura modular de 3 capas: Una app móvil para la gestión de los datos y una base de datos que almacena las métricas clave de la aplicación. Esta estructura permite presentar una experiencia fluida al usuario final, a la vez que facilita el mantenimiento y crea la posibilidad de escalabilidad futura para nuevos entornos de patrimonio cultural.

La aplicación en sí está desarrollada bajo Unity 6, aprovechando los recursos de ARFoundation enfocados a la creación de experiencias AR multiplataforma a través de ARCore y ARKit. Se ha elegido esta herramienta por la posibilidad de reconocimiento de imágenes objetivo en tiempo real, anclaje al espacio físico y renderizado de modelos 2D y 3D. ARFoundation de Unity es un sistema altamente modular que proporciona una interfaz común para la funcionalidad AR específica de la plataforma tanto para ARCore (Android) como para ARKit (iOS) y se utiliza en proyectos similares (Putro & Setyowati, 2022). ARRDA está diseñado para detectar parches específicos de las paredes dentro de San Miguel y superponer la reconstrucción digital asociada para ese parche. El backend se basa en una API REST, que permite a la aplicación recopilar y gestionar los diferentes datos y métricas del comportamiento de los visitantes. Esta capa intermedia facilita la separación entre el frontend y la parte lógica de la aplicación, manteniendo una arquitectura cliente-servidor. Por último, los datos se almacenan en MongoDB, un moderno sistema de gestión de bases de datos (DBMS) ampliamente utilizado para proyectos intensivos en datos como la IA o el aprendizaje automático. En este caso, no hay cantidades sustanciales de datos para procesar, pero su estructura JSON proporciona un nivel de flexibilidad especialmente útil para el proyecto y los datos que se van a almacenar. La Figura 4 muestra una visión detallada de la arquitectura y los módulos de la aplicación.

Figura 4. Arquitectura del sistema.

Fuente: Elaboración propia, 2025.

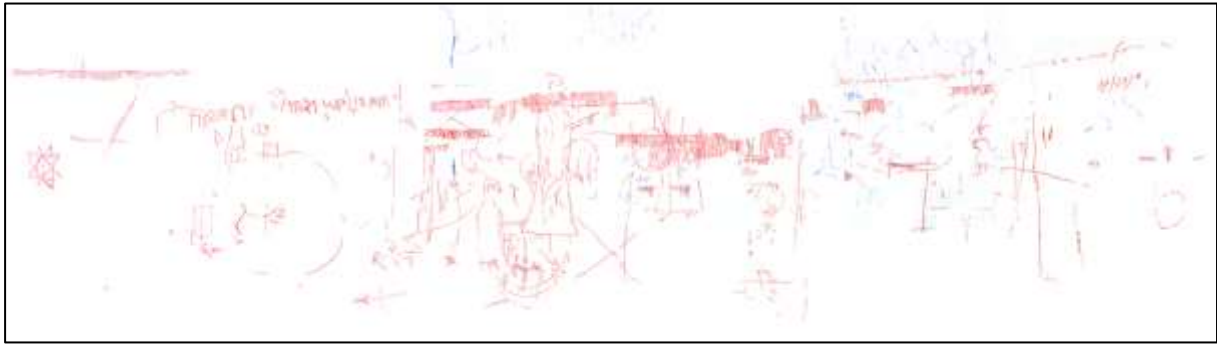
3.2. Recursos culturales y digitales

ARRDA se apoya en gran medida en los diferentes recursos que necesita para proporcionar una experiencia significativa y fluida a los visitantes de San Miguel. El primer tipo de recursos se compone de los diferentes grafitos que se superpondrán sobre los muros del templo. El segundo tipo reúne las imágenes de referencia de múltiples objetivos que el prototipo utiliza para detectar cuándo un usuario está mirando un clúster concreto y, posteriormente, superponer el clúster de grafito asociado a esa sección de la pared.

Para la selección de los clusters de graffiti incluidos en la aplicación se eligieron dos muros de iglesia, por su relevancia histórica y proximidad: el muro norte y el muro oeste (*Hastial*), obteniéndose la reconstrucción digital de sus grafitos. Estas reconstrucciones se presentan en las Figuras 5 y 6.

La Figura 5 muestra la reconstrucción digital de los diferentes grafitos y marcas presentes en el muro oeste de San Miguel. Estas figuras se encuentran a una altura de entre 4 y 5 metros del suelo y están difuminadas hasta resultar irreconocibles. La reconstrucción revela diferentes informaciones. Empezando de izquierda a derecha, dos símbolos que se repiten por todo el muro. El primero es una estrella de David y, sobre ella, se aprecia una línea de marcas primitivas. Es probable que estas marcas se utilizaran con fines contables, como llevar la cuenta de distintos bienes, como el ganado o los productos agrícolas. El elemento más importante es un monje señalador situado en el centro, que es la figura más destacada del lado oeste de San Miguel. Siguiendo hacia la derecha, los símbolos antes mencionados, como las marcas contables, se repiten junto con algunas otras marcas irreconocibles.

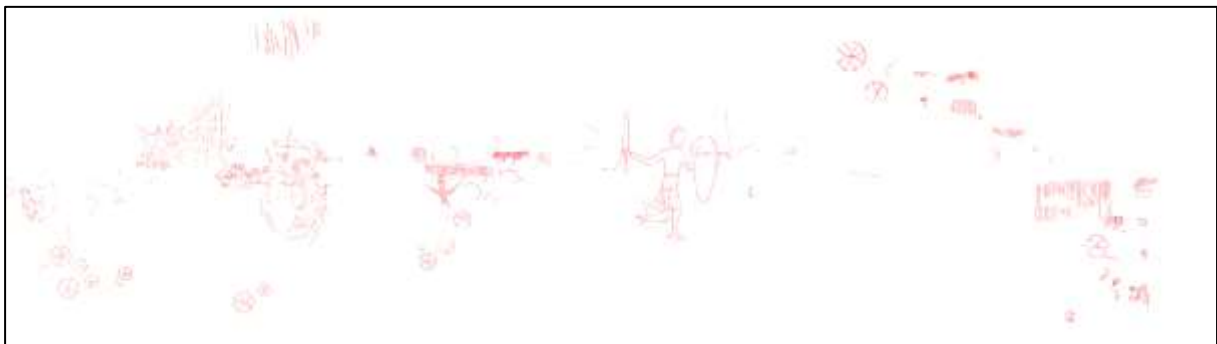
Figura 5. Reconstrucción digital de la muralla oeste.



Fuente: Reconstrucciones virtuales de la Muralla Oeste de San Miguel por Iniciativa Soria Románica, 2009.

El segundo muro seleccionado fue el muro norte, posiblemente la superficie más grande y con más grafitos del templo. La figura 6 presenta la reconstrucción digital de los grafitos del lado norte de la iglesia. Este muro es mucho más grande que el oeste y en él aparecen dos de los tres grupos seleccionados para el prototipo. En este caso, hay algunos grafitos del mismo tipo que los del muro oeste, como Estrellas de David y marcas para seguir la pista del ganado o de los bienes agrícolas. Una vez más, los elementos principales se sitúan en el centro del muro. El primero es una inscripción gótica junto a una figura con los brazos abiertos. La última es la figura más relevante y de mayor tamaño de San Miguel, se asemeja a un soldado en posición de combate, blandiendo una espada y un escudo.

Figura 6. Reconstrucción digital del Muro Norte.



Fuente: Reconstrucciones virtuales de la Muralla Norte de San Miguel por Iniciativa Soria Románica, 2009.

El segundo paso consistió en reunir el mayor número posible de materiales y recursos de las murallas de San Miguel. La figura 7 muestra una parte de los recursos tomados para este fin. En este caso, la estructura retratada es el Muro Norte, el que alberga la mayor parte de las expresiones artísticas de la iglesia. Una vez que el concejal de cultura facilitó los paramentos murales más significativos de la iglesia, el proceso de documentación se centró en captar esas zonas concretas con el mayor detalle posible. Se tomaron decenas de fotografías y vídeos desde múltiples ángulos, luces y distancias. Este *modus operandi* se repitió sistemáticamente para cada uno de los muros principales del interior de la iglesia. Aunque en este caso, debido a los escasos grafitos, las fotografías se tomaron con un dispositivo móvil, en los materiales originales extraídos de la iniciativa *Soria Románica* se utilizaron técnicas avanzadas de imagen digital como la fotogrametría de corto alcance, que ha demostrado ser muy eficaz (Georgieva & Seaton, 2022).

Figura 7. Múltiples ángulos del muro norte



Fuente: Múltiples ángulos tomados de la pared norte en la primera visita a San Miguel. Trabajo propio, César Romanos (2025).

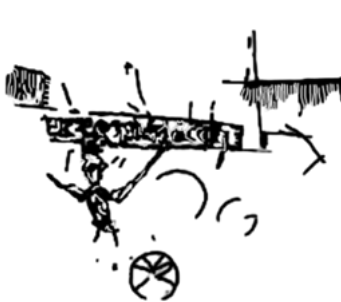
Tras una cuidadosa revisión de los recursos de reconstrucción digital y discutir la relevancia cultural de los diferentes elementos, se seleccionaron tres clusters de graffiti para la aplicación prototipo. Estos clusters fueron seleccionados y extraídos de las reconstrucciones originales proporcionadas por *Soria Románica* y posteriormente fueron limpiados y formateados para su utilización e imágenes superpuestas en los muros de San Miguel. Las figuras 8, 9 y 10 muestran los clusters de grafitos seleccionados. La figura 8 muestra el único cluster de la pared oeste, que es el monje que señala. La figura 9 muestra el grupo situado más a la izquierda en el muro norte, donde una pequeña figura con los brazos abiertos yace bajo una inscripción gótica y marcas contables. El último, en la figura 10, representa al soldado, armado con una espada y un escudo.

Figura 8. Monje señalador.



Fuente: Conjunto de grafitos de la Muralla Oeste extraídos de los recursos de la Iniciativa Soria Románica, 2009.

Figura 9. Inscripción gótica.



Fuente: Conjunto de grafitos del muro norte extraído de los recursos de la Iniciativa Soria Románica, 2009.

Figura 10. Soldado.



Fuente: Conjunto de grafitos de la Muralla Norte extraídos de los recursos de la iniciativa Soria Románica, 2009.

3.3. Seguimiento de imágenes basado en muros

La experiencia que proporciona la ARRDA pretende ser lo más fluida posible. La razón es evitar dañar o deteriorar aún más los grafitos de San Miguel y evitar cualquier posible distracción que

pueda interrumpir la inmersión del usuario. Por este motivo, debe evitarse el uso de marcadores artificiales como códigos QR o marcadores ArUco. Los grafitos son evidentemente difuminados y sin textura realmente perceptible, las paredes son irregulares, no tienen marcas o referencias claras para que la aplicación discierna hacia dónde apunta, la altura a la que se encuentran los grafitos y las condiciones variables de iluminación a lo largo del día.

Para hacer frente a estos problemas, se realizó una amplia documentación fotográfica de los distintos grupos seleccionados en el interior del templo, lo que permitió a ARRDA disponer de una sólida reserva de imágenes de referencia para poder actuar en las condiciones cambiantes de la iglesia. En las figuras 11 y 12 se pueden ver las dos paredes que se utilizarán en ARRDA, así como los lugares en los que los grupos de grafitos seleccionados están presentes, aunque no se puedan ver sin ayuda.

Figura 11. Clusters del muro norte.



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Figura 12. Cluster de la Pared Oeste.



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Tras configurar la *XRReferenceImageLibrary* con esta colección, la aplicación demostró tener la capacidad de detectar y rastrear las imágenes objetivo en tiempo real, validando también los objetivos borrosos y con zoom. Una experiencia fluida y con capacidad de respuesta es clave (Akçayır & Akçayır, 2017) si la intención es crear una conexión entre el usuario y el patrimonio cultural.

Un reto técnico crucial es evitar la superposición simultánea de las diferentes reconstrucciones digitales. Esto es causado por las diferentes imágenes del mismo grupo de grafitos, ya que hay más de una imagen objetivo para cada reconstrucción debido a que tienen diferentes ángulos e iluminación. Para solucionarlo, se configura un pool dinámico de imágenes agrupadas. Cada pool agrupa las imágenes con perspectivas e iluminación cambiantes de un trozo de pared y el sistema elige dinámicamente sólo una imagen activa por grupo. Esto se hace mediante el uso de un diccionario (*activePoolImages*), en el que, en cada fotograma, se guarda la última imagen detectada y, tras ella, el sistema comprueba si hay una superposición activa para ese grupo. Si lo hay, la imagen se descarta, si no, se muestra la superposición asociada a esa parte de la pared.

Tras la comprobación de la idoneidad de los parches del muro de San Miguel como imágenes de destino, el siguiente paso es aumentar el nivel de inmersión e interactividad de la aplicación.

El objetivo es que los visitantes sientan que realmente pueden manipular y sentir las reconstrucciones de los grafitos, dando al usuario la posibilidad de pararse y hacer zoom en el grupo de grafitis que decida. Esto era necesario debido a que las reconstrucciones proyectadas en su tamaño real podrían ser demasiado pequeñas y no permitirían apreciar adecuadamente el patrimonio cultural de San Miguel y San Esteban de Gormaz. Los pasos seguidos para desarrollar esta característica son los siguientes:

Captura de la superposición activa: Al pulsar el botón de zoom-in, se identifica la superposición activa visible (si existe) y, a continuación, se extrae dicha superposición y se convierte en un objeto fijo (*fixedOverlay*).

Reposicionamiento de la pantalla: El centro de la pantalla del usuario se calcula en coordenadas del mundo real con *ScreenToWorldPoint* a una distancia fija de la cámara. A continuación, la superposición se posiciona en ese punto para garantizar la máxima visibilidad. **Zoom de la superposición:** La anchura de la superposición se calcula y luego se compara con el 90% de la anchura de la pantalla del usuario. Este valor se ha predefinido para que la superposición muestre la máxima visibilidad sin estar en contacto con los márgenes de la pantalla.

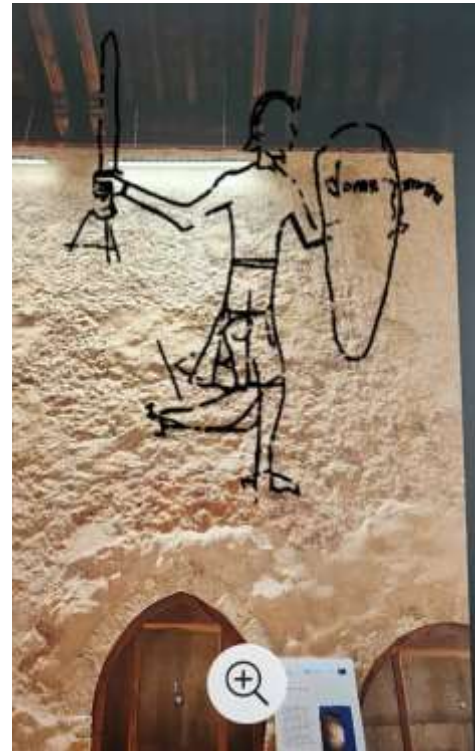
Desactivación de las superposiciones: Cuando el usuario hace clic en el botón de ampliación, la superposición activa que estaba seleccionada se destruye para que no interfiera con la ampliada. Cuando el usuario vuelve a pulsar el botón, la superposición ampliada y todas las demás activas se destruyen y se restablece el sistema de detección. Las Figuras 13 y 14 ilustran el comportamiento de las funcionalidades descritas, presentando cómo la app rastrea y superpone la reconstrucción digital y, posteriormente, el zoom-in para apreciar en detalle el grafito enfocado:

Figura 13. Grafito de soldado escaneado en entorno de laboratorio.



Fuente: Instantánea tomada del prototipo de la app en el entorno de laboratorio que muestra la viabilidad del módulo de seguimiento de imágenes. Trabajo propio, César Romanos (2025).

Figura 14. Grafito de soldado ampliado con zoom en entorno de laboratorio.



Fuente: Instantánea tomada del prototipo de la app en el entorno de laboratorio mostrando la funcionalidad de zoom-in. Trabajo propio, César Romanos (2025).

3.5. Seguimiento de métricas de comportamiento

La columna vertebral de este trabajo es la creación de un prototipo funcional capaz de detectar las imágenes objetivo de partes de la pared de la iglesia de San Miguel y superponer sobre ellas la reconstrucción digital de los grafitos. En este caso particular, el objetivo secundario del prototipo es proporcionar las herramientas al ayuntamiento de San Esteban de Gormaz para extraer los datos producidos por el comportamiento de los visitantes de la iglesia y aprovechar esta información para promocionar y dinamizar el turismo y la afluencia de visitantes a San Esteban de Gormaz y Soria. El diseño de la arquitectura del sistema está compuesto por tres módulos diferentes. El principal es la aplicación funcional para detectar y superponer reconstrucciones digitales. Los dos módulos restantes serán los necesarios para este último paso del trabajo.

Como se ha comentado anteriormente, uno de los elementos diferenciales que propone este proyecto es la capacidad de monitorización de los datos de la app de realidad aumentada (RA) respecto al comportamiento de los visitantes dentro de la iglesia. El proceso comienza con el desarrollo del segundo módulo de la arquitectura del sistema, este módulo consiste en la creación de un servicio API REST desarrollado bajo el marco Flask, el cual es especialmente adecuado para este trabajo debido a los bajos requerimientos necesarios y la cantidad de datos enviados.

Para la base de datos, la tecnología elegida es MongoDB. Se trata de un servicio muy utilizado por su capacidad de big data y procesamiento de datos, características que no son necesarias en este proyecto. Sin embargo, proporciona una estructura extremadamente flexible debido al enfoque NoSQL y JSON, que es crucial en un desarrollo dinámico con varios prototipos diferentes y un conjunto difuso de requisitos que requerían un servicio de base de datos que pudiera

gestionar dichos cambios y almacenar de forma eficiente diferentes tipos de datos como imágenes o vídeos. El back-end de la base de datos se estructura en tres grupos diferentes:

Usuarios: Contiene un identificador único por dispositivo (*deviceUniquelIdentifier*) y una lista de los grafitos escaneados por usuario único. Esto sirve para saber qué porcentaje de usuarios han escaneado los tres posibles grupos de grafitos.

Grafitos: Contiene los tres clusters de grafito, guardando su id, nombre y el número de veces que cada uno de ellos ha sido escaneado por algún usuario.

Estadísticas: Este grupo se encarga de calcular todas las métricas agregadas del proyecto. Contiene datos como el número de usuarios únicos, el número de usuarios que han escaneado los tres clusters de grafito y la duración media de la sesión (esto es, mantener la app abierta) de cada visitante.

Una de las funcionalidades clave de la API es la posibilidad de registrar en la app la duración de cada sesión, es decir, llevar un registro del tiempo total que un visitante ha estado utilizando la app durante su estancia en la iglesia. Esta métrica permite analizar cuánto tiempo invierten los visitantes en investigar el patrimonio cultural y, de ese modo, evaluar hasta qué punto la experiencia es profunda e inmersiva. Métricas temporales como la duración de la sesión y los patrones de navegación se han utilizado con éxito en entornos de patrimonio cultural para gestionar la participación de los visitantes (Yoshimura et al., 2017). Esta funcionalidad se basa en el componente *UserRegister*, encargado de extraer el id de usuario único proporcionado por Unity, que permite varias funcionalidades diferentes como calcular el tiempo medio de uso.

Al abrir la aplicación, ésta comprueba si el dispositivo es nuevo y, en caso afirmativo, lo registra con su identificador único. Tras esta primera comprobación, la aplicación registra la hora a la que se ha abierto. Cuando se cierra la aplicación, la duración de la sesión se calcula con la marca de tiempo a la que se cerró la aplicación, y la solicitud se envía a la API mediante una solicitud POST.

El backend actualiza el campo *average_session_time* de forma incremental utilizando una media, que proporciona una estimación realista del tiempo medio por sesión de cada visitante. Esta métrica es clave para validar el segundo objetivo específico relacionado con el aumento de la estancia media de los visitantes en San Miguel. Además del registro de la media por sesión, la aplicación también recoge información relacionada con los diferentes grafitos que hay sobre las paredes de San Miguel y cómo interactúan los visitantes con las reconstrucciones y las posibles dificultades a la hora de escanear, apuntar con el dispositivo o encontrar los trozos de pared pertinentes.

La columna vertebral de esta actividad es el componente *SimpleImageIncrementer*. Este script se encarga de reconocer cuándo se ha escaneado una referencia de destino concreta. Cuando se produce ese evento, se envía una solicitud POST al servicio API. Esta petición hace lo siguiente: Incrementa el total de escaneos de ese grafito en particular, añade el ID del grafito escaneado al array de ese usuario en particular, comprueba si ha sido completado por los tres IDs, en cuyo caso el estado de ese usuario pasa a completado y significaría que el usuario ha escaneado todos los grafitos posibles en San Miguel.

Con la información que proporciona esta petición, ARRDA accede a las siguientes métricas: Cuántas veces se ha escaneado cada grafiti, lo que podría dar al ayuntamiento de San Esteban de Gormaz información sobre cuáles son más populares. Cuántos visitantes han escaneado todos los grafitos posibles, lo que podría reflejar el nivel de compromiso de los visitantes o reflejar posibles problemas a la hora de reconocer los parches murales. Por último, la tasa de grafitos escaneados (*usuarios completados / usuarios únicos*).

4. Evaluación y resultados

Las pruebas del prototipo se realizaron en el interior de la iglesia de San Miguel, en una salida de campo organizada con el apoyo de la concejalía de cultura del Ayuntamiento de San Esteban de Gormaz. El entorno, como se ha mencionado anteriormente, presenta múltiples retos para la detección de las imágenes de los objetivos como son la iluminación variable a lo largo del día, las superficies irregulares, las imágenes de los objetivos deterioradas y la altura a la que se encuentran estos objetivos. A continuación, las figuras 15, 16 y 17 muestran una grabación de pantalla del dispositivo móvil en el que se ha probado el prototipo. Estas figuras muestran los tres grupos de grafitos que la aplicación puede superponer sobre los muros de San Miguel, demostrando que los parches de los muros de la iglesia pueden ser utilizados como objetivos de referencia para una aplicación de RA como la creada en este trabajo.

Figura 15. Grafito de inscripción gótica en el interior de San Miguel.



Fuente: Instantánea tomada desde la app en el interior de la iglesia de San Miguel superponiendo el cluster de inscripciones góticas. Trabajo propio, César Romanos (2025).

Figura 16. Grafito del Monje Señalador en el interior de San Miguel.



Nota: Instantánea tomada desde la aplicación en el interior de la iglesia de San Miguel superponiendo el conjunto del monje señalador. Trabajo propio, César Romanos (2025).

Figura 17. Grafito del soldado ampliado en el interior de San Miguel.



Fuente: Instantánea tomada desde la app en el interior de la iglesia de San Miguel superponiendo el cluster de soldados ampliado. Trabajo propio, César Romanos (2025).

Para asegurar una experiencia satisfactoria y accesible, las pruebas se realizaron en dos dispositivos diferentes de distintas capacidades y rangos de precio. Los dispositivos son los siguientes: Xiaomi MI 11 lite (gama baja/media): Representa un perfil de usuario final que utiliza un dispositivo económico con recursos gráficos y de procesamiento limitados. Samsung Galaxy

s25 (Nivel alto): Representa un perfil de usuario final con un dispositivo reciente, optimizado para actividades que consumen muchos recursos, como la RA.

La Tabla 1 muestra el rendimiento medio de los distintos dispositivos, con el dispositivo de gama baja con un descenso del rendimiento y un tiempo de detección ligeramente más lento. Sin embargo, ambos dispositivos rindieron adecuadamente, ya que las cifras del de gama baja se encuentran dentro de un rango aceptable y de usuario que permite una experiencia satisfactoria en ambos niveles. Si el objetivo de iniciativas como ésta es democratizar el acceso a la cultura y a la herencia de un pasado que pertenece a toda la humanidad, dicho acceso debe ser lo más fácil de alcanzar posible. Por esta razón, tener un rendimiento optimizado en los diferentes niveles de calidad de los dispositivos es crucial para permitir que todos los visitantes conecten por igual con este patrimonio.

Tabla 1. Rendimiento medio del dispositivo en pruebas en vivo

	Tiempo de detección	Estabilidad de seguimiento	Rendimiento
Xiaomi mi11	Entre 1 y 2 segundos	Estable	~30 FPS
Samsung s25	Menos de 1 segundo	Estable	~60 FPS

Fuente: Elaboración propia, 2025.

El desarrollo del proyecto ARRDA tiene como objetivo final demostrar la viabilidad técnica y el impacto real de una solución basada en tecnología de RA para revitalizar las comunidades rurales en España. Esta propuesta pretende liberar el potencial del patrimonio cultural como catalizador de la actividad turística y económica. Mediante el uso de una aplicación móvil de RA desarrollada en unity y conectada con un backend de Flask y MongoDB, este proyecto ha logrado la creación de una experiencia inmersiva que permite al visitante descubrir y apreciar los grafitos ocultos de la histórica iglesia de San Miguel en San Esteban de Gormaz, que en su mayoría están descoloridos y no se pueden apreciar a simple vista. Esta solución se construye y perfecciona mediante un método iterativo de creación de prototipos, validado in situ por el concejal de cultura.

Es importante tener en cuenta que los resultados se obtienen en un entorno donde las condiciones no son las más adecuadas para que una app de RA reconozca las imágenes objetivo debido a la baja iluminación de San Miguel, las superficies irregulares y el grave deterioro de los grafitos originales. Además, la logística necesaria para la recopilación de recursos y las pruebas finales se vio seriamente restringida debido a la limitada disponibilidad de la iglesia y de los expertos locales. No obstante, los resultados demuestran que el enfoque técnico no sólo es factible, sino también escalable y eficaz.

5. Debate y conclusiones

Tras el análisis de los resultados obtenidos, esta sección se centra en la interpretación de las diferentes conclusiones y la evaluación del trabajo a una escala más amplia. Más allá de la viabilidad técnica, se analizan diferentes aspectos como el modo en que esta solución se posiciona como herramienta estratégica para la valorización del patrimonio cultural y la revitalización de comunidades rurales en riesgo de despoblación. También se examinan las limitaciones vinculadas al trabajo y, por último, se ofrece una evaluación del potencial de esta herramienta para futuros trabajos de investigación.

5.1. Limitaciones técnicas y logísticas

Una de las principales limitaciones técnicas es la complejidad del entorno físico. Los grafitos se localizan en muros irregulares, se desvanecen con el paso del tiempo, los bordes y las siluetas no están definidos y se encuentran a más de 4 metros del suelo, lo que supuso un obstáculo importante. Este obstáculo pone de manifiesto una de las dificultades más comunes cuando se trata de RA basada en marcadores y visión: la necesidad de un objetivo preciso y la correspondencia entre el mundo físico y la información digital. Este concepto se demostró inicialmente en pequeños espacios de trabajo de RA con gran precisión mediante el seguimiento móvil en tiempo real (Klein & Murray, 2007). Como señalan algunos estudios en este campo, la variación de la iluminación a lo largo del día y las texturas irregulares afectan negativamente a la estabilidad del seguimiento y, por tanto, a la experiencia del usuario (Noh et al., 2009).

Más allá de los retos técnicos relacionados con el entorno y el estado físico de los muros de San Miguel, las limitaciones logísticas también han jugado un papel importante en el desarrollo de este trabajo. El acceso a la iglesia era limitado y dependía de la coordinación con el departamento de cultura de San Esteban de Gormaz. Esto afectó a la disponibilidad de las diferentes pruebas y a la obtención de recursos dentro de la iglesia. Esta dependencia de terceros y la falta de un acceso fiable y fácil a la iglesia son factores que a menudo se pasan por alto pero que pueden ser críticos para el éxito de un desarrollo. Este tipo de barreras pueden afectar a la capacidad de crear iteraciones rápidas del prototipo y de reunir recursos suficientes para un sistema robusto de detección de objetivos. Durante el desarrollo de este trabajo, San Esteban de Gormaz sufrió fuertes lluvias que provocaron un derrumbe parcial de la vía de comunicación más directa entre Madrid y San Esteban de Gormaz. Este es un ejemplo de obstáculo imprevisto, totalmente ajeno a la propia ARRDA, y pone de manifiesto la importancia de la flexibilidad y la planificación en las obras relacionadas con el patrimonio cultural.

Estos condicionantes, tanto técnicos, asociados a las características físicas del patrimonio, como logísticos, que limitan y dificultan las diferentes visitas a San Miguel y que son instrumentales para ARRDA, demuestran que una obra de similares características no sólo depende de la innovación técnica, sino también de un profundo conocimiento y conexión con el patrimonio, el pueblo y sus gentes.

5.2. Modelo replicable para la conservación del patrimonio y la revitalización rural

Este trabajo trasciende su primer estudio de caso para consolidarse como un modelo metodológico y técnico de alta replicabilidad, con un importante potencial para la preservación del patrimonio cultural y la revitalización social y económica de zonas rurales despobladas. La viabilidad del modelo reside en su enfoque modular, que desvincula la tecnología de las particularidades del patrimonio de San Esteban de Gormaz, permitiendo así su aplicación a un amplio abanico de contextos ambientales no sólo en las zonas rurales de España que sufren el problema de *la España Vacía*, sino también en otros contextos fuera de España que son víctimas de las mismas circunstancias.

El modelo ARRDA se basa en la integración de tecnologías de bajo coste unidas a una rigurosa documentación histórica. La capacidad de aprovechar el escaneado 3D para capturar y digitalizar con precisión el patrimonio, independientemente de su estado de observación, es una base crucial para la replicabilidad. Este estudio demuestra que la tecnología puede superar limitaciones inherentes a los contextos del patrimonio cultural, como la erosión o la accesibilidad, que son clave para la conservación del patrimonio a largo plazo. Al asociar las reconstrucciones digitales de cada grupo de grafitos, la ARRDA garantiza la conservación de estos grafitos centenarios y brinda la oportunidad de democratizar el acceso a estos recursos, que de otro modo quedarían sepultados bajo capas de burocracia. Además, abre nuevas líneas de interpretación para estos dibujos, ya que

pueden surgir nuevas y frescas perspectivas de los visitantes que arrojen luz sobre el significado y la visión del mundo de estas marcas. Este modelo está en consonancia con la creciente investigación en humanidades digitales, que subraya la importancia de los modelos 3D y RA para la creación de nuevas experiencias culturales inmersivas que complementen las visitas tradicionales.

Además de su versatilidad técnica, el valor replicable de ARRDA se encuentra en su capacidad para actuar como catalizador del desarrollo local. La despoblación y la falta de recursos y oportunidades económicas son retos crónicos en varias regiones españolas. Este modelo propone una solución innovadora al transformar un bien cultural infravalorado como los grafitos de San Miguel en un imán para nuevos visitantes de la iglesia y de San Esteban de Gormaz. Al ofrecer una experiencia cultural única e interactiva mediante el uso de la RA, este modelo fomenta un turismo sostenible y responsable ya que se preserva el patrimonio al no interactuar físicamente con los grafitos. Esta obra atraerá a visitantes interesados en el patrimonio cultural de San Miguel y también en el enfoque innovador de ARRDA. Esta estrategia no sólo crea una afluencia de nuevos visitantes, sino que también puede estimular la economía local debido al aumento de turistas y, por lo tanto, a la creación de nuevas empresas y servicios para dar cabida a dicho aumento. Numerosos estudios destacan el papel de la digitalización en el desarrollo del turismo y la promoción de zonas menos conocidas como nuevos destinos del patrimonio cultural como herramienta para la revitalización económica y social de las comunidades rurales (Jiang & Phoong, 2023).

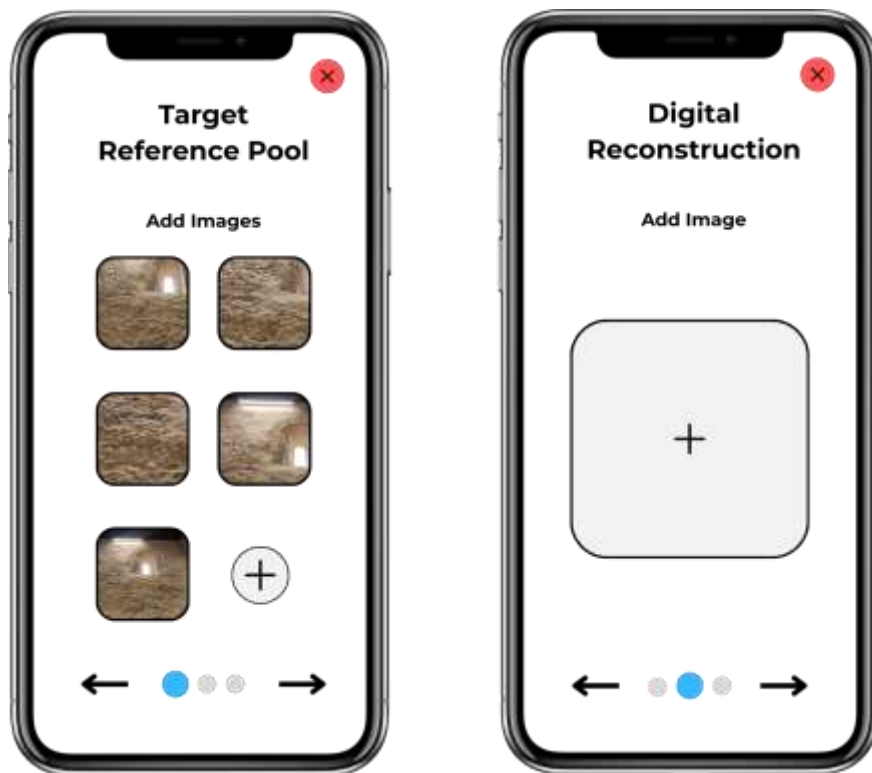
5.3. Desarrollo e investigación futuros

Este trabajo es un desarrollo exitoso de un prototipo que sienta las bases para un futuro desarrollo y una mayor investigación tanto en los aspectos técnicos como históricos. Los próximos pasos se centran en ampliar las capacidades de la aplicación y explorar nuevas formas de conservación y difusión del patrimonio cultural.

Una de las áreas clave para futuras mejoras es la actualización de la experiencia del usuario y la integración de tecnologías emergentes. Hoy, el prototipo se basa en la realidad aumentada (RA) a través de dispositivos móviles, pero debido a toda la carga histórica que contienen estos grafitos, la integración de tecnologías como la IA generativa puede mejorar sustancialmente la experiencia del usuario. La IA generativa puede crear narrativas y dinámicas personalizadas que respondan a los intereses particulares de cada visitante. Otra tecnología por implementar son las gafas de realidad aumentada. Estos dispositivos pueden ofrecer una experiencia mucho más inmersiva y manos libres al usuario, permitiendo una conexión mucho más profunda con el patrimonio.

La ARRDA pretende ser una aplicación modular, escalable y fácil de usar para entornos de patrimonio cultural rural como San Esteban de Gormaz. Por esta misma razón, la aplicación debe dar cabida a la suma de nuevas y personalizadas imágenes de destino y sus respectivas reconstrucciones digitales o información asociada. El prototipo en su estado actual no tiene forma posible de añadir estas nuevas imágenes, porque debe ser un desarrollador el que añada los objetivos en la *XRReferenceImageLibrary*. El proceso es muy sencillo; sin embargo, aún no podría ser usado por el respectivo guía cultural. Por este motivo, la próxima mejora para la ARRDA debería ser añadir una sección fácil de usar para crear y actualizar nuevas imágenes objetivo y módulos de información digital asociados, como la que se ve en la Figura 18.

Figura 18. Imagen de objetivo personalizada y pantalla de reconstrucción digital



Fuente: Esquema creado para el desarrollo posterior de la aplicación. Esta figura muestra un procedimiento para cargar nuevas dianas de referencia y reconstrucciones virtuales asociadas a las mismas. Elaboración propia (2025).

Desde una perspectiva más amplia, este trabajo abre nuevas e importantes líneas de investigación interdisciplinar. Un campo crítico es la sostenibilidad y preservación a largo plazo del patrimonio digital. Es crucial investigar sobre metodologías estandarizadas de almacenamiento, usabilidad y acceso a los datos 3D garantizando que estos recursos no queden obsoletos y puedan ser utilizados en el futuro con fines de investigación y conservación. Además, este trabajo puede servir de trampolín para futuros estudios sobre el impacto socioeconómico real y mensurable del papel de la tecnología en el turismo rural. Las investigaciones futuras podrán evaluar cómo afecta el uso de aplicaciones como la ARRDA a la afluencia de visitantes, la economía local y la percepción del patrimonio cultural tanto por parte de los turistas como de la población local. Esto puede ayudar a demostrar la viabilidad de la tecnología como reclamo para el turismo y como herramienta para un turismo responsable y sostenible.

En definitiva, este prototipo es el primer paso hacia un camino mucho más largo que incluye una ampliación técnica, la integración de nuevos sistemas de interacción, así como experiencias personalizadas y una investigación exhaustiva sobre el mejor uso posible de la tecnología para ayudar a preservar, difundir y revitalizar el patrimonio cultural en la *España Vacía* y en otras regiones con características similares.

6. Agradecimientos

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento al Ayuntamiento de San Esteban de Gormaz, en particular, al Alcalde y a la Concejalía de Cultura por su inestimable apoyo y colaboración a lo largo de todo el trabajo.

Asimismo, estamos profundamente agradecidos a los investigadores de la iniciativa *Soria Románica*, cuya labor ha resultado fundamental en la vertiente histórica y cultural de este trabajo.

Por último, también queremos extender nuestro agradecimiento a la Escuela Politécnica Superior (EPS) de la Universidad Francisco de Vitoria (UFV) por su apoyo académico y, especialmente, al Instituto de Investigación Ciudades Inteligentes Centradas en el Ciudadano (C-CICRI) por hacer posible la financiación de esta publicación.

Referencias

- Akçayır, M., & Akçayır, G. (2017). Advantages and challenges associated with augmented reality for education: A systematic review of the literature. *Educational Research Review*, 20, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2016.11.002>
- Arribas, J. L. (2024). *59 edificios románicos de la provincia de Soria en el siglo XXI. 59 Edificios Románicos de La Provincia de Soria En El Siglo XXI*. Diputación Provincial de Soria.
- 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>
- Boboc, R. G., Băutu, E., Gîrbacia, F., Popovici, N., & Popovici, D.-M. (2022). Augmented Reality in Cultural Heritage: An Overview of the Last Decade of Applications. *Applied Sciences*, 12(19), 9859. <https://doi.org/10.3390/app12199859>
- Brondi, R., & Carrozzino, M. (2015). ARTworks: An Augmented Reality Interface as an Aid for Restoration Professionals. In L. T. De Paolis & A. Mongelli (Eds), *Augmented and Virtual Reality* (pp. 384–398). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-22888-4_28
- Ćosović, M., & Maksimović, M. (2022). Application of the digital twin concept in cultural heritage. *Visual Pattern Extraction and Recognition for Cultural Heritage Understanding*, 3266(8)
- Georgieva, Z., & Seaton, K.-L. (2022). Advanced photographic methods in studying ship graffiti from medieval churches in Nessebar. *Interdisciplinary Studies*, 27, 21-42.
- Gutierrez, J. M., Molinero, M. A., Soto-Martín, O., & Medina, C. R. (2015). Augmented Reality Technology Spreads Information about Historical Graffiti in Temple of Debod. *Procedia Computer Science*, 75, 390–397. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.12.262>
- Iglesia de San Miguel—San Esteban de Gormaz. (2016). *Iglesia de San Miguel*. <https://www.sanestebandegormaz.org/iglesia-de-san-miguel.html>
- Jiang, C., & Phoong, S. W. (2023). A ten-year review analysis of the impact of digitization on tourism development (2012–2022). *Humanities and Social Sciences Communications*, 10(1), 665. <https://doi.org/10.1057/s41599-023-02150-7>
- Klein, G., & Murray, D. (2007). Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspaces. *2007 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, 225–234. <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2007.4538852>
- Sadia, J.M. (2019, July 13). *Los misteriosos grafitos de San Miguel, en San Esteban de Gormaz (Soria)*. <https://josemariasadia.net/2019/07/13/los-misteriosos-grafitos-de-san-miguel-en-san-esteban-de-gormaz-soria/>
- Noh, Z., Sunar, M. S., & Pan, Z. (2009). A Review on Augmented Reality for Virtual Heritage System. In M. Chang, R. Kuo, Kinshuk, G.-D. Chen, & M. Hirose (Eds), *Learning by Playing. Game-based Education System Design and Development* (pp. 50–61). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-03364-3_7
- Pantoja, J. A. S. (2012). Las galerías porticadas de San Esteban de Gormaz: Legado artístico de una sociedad de frontera. *Liño*, 18(18). <https://reunido.uniovi.es/index.php/RAHA/article/view/9501>
- Pazos-Vidal, S. (2022). «Emptied Spain» and the limits of domestic and EU territorial mobilisation. *Revista Galega de Economía*, 31(2), 1–28. <https://doi.org/10.15304/rge.31.2.8365>
- Putro, H. T., & Setyowati, E. (2022). Development of Application Based on Augmented Reality as A Learning of History and Culture in Architecture Case Study Pathok Negro Mosques Yogyakarta. *Journal of Artificial Intelligence in Architecture*, 1(1), 1–9. <https://doi.org/10.24002/jarina.v1i1.4835>
- Shih, N.-J., & Kung, C.-H. (2024). grARffiti: The Reconstruction and Deployment of Augmented Reality (AR) Graffiti. *Technologies*, 12(9), 169. <https://doi.org/10.3390/technologies12090169>

- Signes-Pont, M. T., Cortés-Plana, J. J., Boters-Pitarch, J., & Mora-Mora, H. (2022). Cultural Heritage and Sustainable Rural Development: The Case of Tàrbena, Spain. *Heritage*, 5(4), 3010–3031. <https://doi.org/10.3390/heritage5040156>
- tom Dieck, M. C., & Jung, T. H. (2017). Value of augmented reality at cultural heritage sites: A stakeholder approach. *Journal of Destination Marketing & Management*, 6(2), 110–117. <https://doi.org/10.1016/j.jdmm.2017.03.002>
- Tukhboeva, N. (2023). Cultural Heritage Reconstruction using Virtual and Augmented Reality. *11th Conference on Applied Innovations (ICAIIIT)*. <http://dx.doi.org/10.25673/101935>.
- Vrettakis, E., Kourtis, V., Katifori, A., Karvounis, M., Lougiakis, C., & Ioannidis, Y. (2019). Narralive – Creating and experiencing mobile digital storytelling in cultural heritage. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 15, e00114. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2019.e00114>
- Wang, C., & Zhu, Y. (2022). A Survey of Museum Applied Research Based on Mobile Augmented Reality. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2022(1), 2926241. <https://doi.org/10.1155/2022/2926241>
- Yoshimura, Y., Krebs, A., & Ratti, C. (2017). Noninvasive Bluetooth Monitoring of Visitors' Length of Stay at the Louvre. *IEEE Pervasive Computing*, 16(2), 26–34. <https://doi.org/10.1109/MPRV.2017.33>