

DALLA VETRINA AL TERRITORIO: REPLICHE DIGITALI PER LA REALTÀ MISTA NEL PARCO ARCHEOLOGICO DI *FORUM SEMPRONII*

1. INTRODUZIONE

Le relazioni tra musei, manufatti e loro siti di provenienza sono intrinsecamente complesse e spesso fonte di controversie. Da sempre, il museo è stato concepito come il luogo privilegiato per la conservazione e l'esposizione di beni culturali, preservati per le generazioni future. Tuttavia, la relazione tra musei e patrimonio culturale è caratterizzata da dicotomie ancora oggi irrisolte – come quelle tra centro e periferia o tra conservazione e contesto originale – che rappresentano sfide significative per chi si occupa di innovazione nella comunicazione culturale. In ambito nazionale, numerosi sono gli studi che hanno affrontato il tema della valorizzazione dei contesti di origine del patrimonio, sollecitati dalla crescente domanda di autenticità nel consumo culturale e turistico. Da tali ricerche è ad esempio emerso il concetto di “museo di compensazione” (DRAGONI 2005; CERQUETTI 2007), che mira a ristabilire i legami tra gli oggetti e i loro contesti di riferimento, promuovendo una visita consapevole del territorio. A livello internazionale, temi analoghi sono spesso affrontati da una prospettiva storico-sociale legata al tema della decolonizzazione, combinato con la sfida di difendere i musei come istituzioni fondamentali al servizio della società, che promuovono il pensiero critico, la libertà di parola e i diritti umani (RIVET 2020; WALI, COLLINS 2023).

In ambito archeologico, la rimozione di reperti dal loro ambiente originale, con successiva conservazione ed esposizione in istituzioni centralizzate, è una pratica che risale alle prime collezioni private e che, se da un lato ha consentito la salvaguardia di numerosi manufatti, dall'altro ha spesso comportato saccheggi, mancate restituzioni e una perdita irreparabile del contesto storico e culturale originario (CUNO 2010). Questa tensione tra il museo e il sito archeologico, tra il mantenimento fisico degli oggetti e la loro ricontestualizzazione dà origine a un paradosso fondamentale: i musei preservano gli oggetti, ma ne alienano il contesto; i siti originali conservano il contesto, ma sono privati degli artefatti. La rimozione di reperti dai loro contesti originali impoverisce così l'esperienza sensoriale e culturale che gli oggetti trasmettono, limitandone la capacità di comunicare il loro significato completo e interconnesso al luogo di origine (HAMILAKIS 2013). Tuttavia, le nuove tecnologie digitali offrono opportunità senza precedenti per colmare questa distanza, consentendo una riconnessione virtuale tra reperti e siti di origine (PIETRONI *et al.* 2023). Attraverso diversi dispositivi tecnologici, le



Fig. 1 – Schema del flusso di lavoro seguito per la realizzazione dell’esperienza di visita in Realtà Mista.

repliche digitali dei manufatti possono essere restituite al loro ambiente originale, creando esperienze immersive che offrono ai visitatori la possibilità di vivere il patrimonio culturale nel suo contesto autentico (CLINI *et al.* 2024). Questo approccio si è dimostrato utile nell’ampliare la comprensione e l’accesso al patrimonio culturale, aprendo nuove strade per una narrazione che integri in modo armonioso la conservazione museale con la valorizzazione dei siti archeologici (PUIG *et al.* 2020).

I costi dei dispositivi e le limitazioni tecnologiche nello sviluppo di interazioni tra contenuti virtuali, utente e spazio fisico hanno favorito l’adozione di soluzioni di Realtà Virtuale (Virtual Reality, VR) in cui lo spazio fisico è completamente escluso dalla percezione dell’utente. Inserendosi in tale ambito, il presente contributo intende proporre una fruizione digitale di un sito archeologico in cui la percezione del luogo fisico mantiene la sua centralità, ricollocando virtualmente alcuni reperti oggi esposti in un museo urbano nel loro luogo di scavo: l’antica città romana di *Forum Sempronii*. La ricerca parte dalla digitalizzazione dei manufatti archeologici, le cui repliche digitali diventano strumentali alla narrazione in sito. L’utente, seguendo il percorso di visita all’interno del parco, può così intraprendere un viaggio interattivo alla scoperta degli scavi e delle evidenze riportate alla luce, senza mai perdere la percezione del contesto archeologico in una rinnovata relazione con i suoi contenuti (Fig. 1).

2. IL CASO DI STUDIO: LA DOMUS DI EUROPA E I SUOI REPERTI

La città romana di *Forum Sempronii* (Fossombrone, PU), situata nella media vallata del Metauro, sorse nel II sec. a.C. su un terrazzo fluviale a circa 100 m sul livello del mare e si sviluppò grazie alla connessione con la via consolare Flaminia, che ne costituì l’asse viario principale. Probabilmente fondata per iniziativa del tribuno Gaio Sempronio Gracco durante le operazioni legate alla *lex Sempronia* (133 a.C.), la città assunse il ruolo di *municipium* nel 49 a.C. Il massimo splendore si ebbe tra il I e il II secolo d.C., mentre a partire dal V secolo l’abitato fu progressivamente abbandonato, anche a causa delle invasioni barbariche, che ne compromisero la difesa. Gli abitanti si trasferirono quindi sul

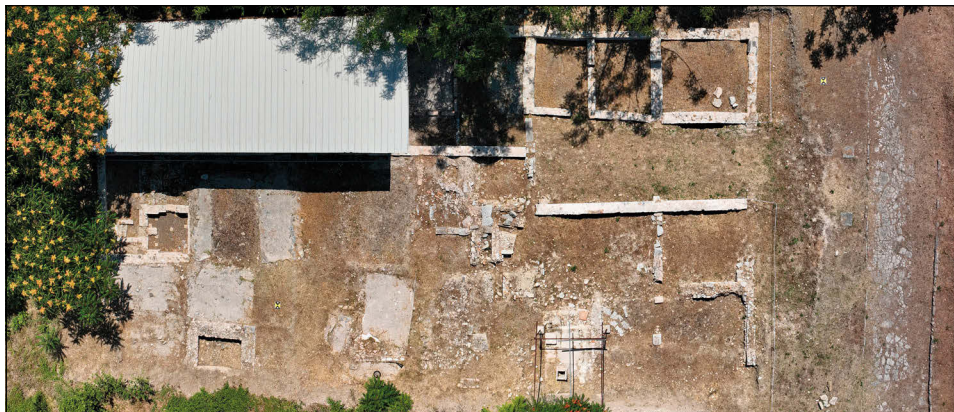


Fig. 2 – Vista aerea dell'area di scavo della Domus “di Europa”.

colle di S. Aldebrando, dando origine all'attuale Fossombrone. L'area recintata dalle mura copriva circa 25 ettari, delimitati naturalmente dal Metauro a S, dal Fosso della Conserva a O e dal Monte delle Cesane a N. Il tessuto urbano presentava una struttura regolare, con vie ortogonali che definivano *insulae* rettangolari. Il *decumanus maximus* era costituito dalla Flaminia, mentre il *cardo maximus*, noto come “via dei Seviri” per la scoperta di un'iscrizione menzionante un intervento dei *Seviri Augustales* relativamente alla lastricatura della strada, collegava la città al guado del Metauro. Scavi condotti dall'Università di Urbino hanno portato alla luce edifici pubblici, *tabernae* e due *domus*, tra cui la Domus “di Europa”, localizzata lungo il *cardo maximus* (LUNI, MEI 2012, 2013; MEI *et al.* 2017; VENTURINI 2017; MEI 2024) (Fig. 2).

La Domus “di Europa” rappresenta un'importante testimonianza archeologica dell'età imperiale romana, in particolare per l'alto valore artistico dei suoi mosaici. L'abitazione è stata interessata da due interventi di sterro: il primo tra il 1878 e il 1880 da parte di A. Vernarecci, che ne disegnò anche la pianta, il secondo nel 1926, effettuato dall'allora Regia Soprintendenza allo scopo di prelevare i mosaici individuati mezzo secolo prima. In questa occasione vennero staccati e trasportati al Museo Archeologico di Ancona il mosaico raffigurante il ratto di Europa, che decorava il *triclinium* della *domus*, ed un altro mosaico geometrico, pertinente all'ambiente immediatamente vicino. Dal 2004 l'area della Domus “di Europa” è interessata da un intervento di scavo programmato che ha permesso di riconoscere i due ambienti da cui sono stati asportati i pavimenti musivi nel secolo scorso, di mettere in luce ulteriori stanze non scavate in precedenza e quindi di entrare in possesso di dati stratigrafici prima non disponibili. È stata individuata una stanza adibita a dispensa, con quattro anfore integre ancora *in situ*, un ambiente adibito a

fullonica e una serie di stanze costituenti il settore termale della ricca abitazione, subito a N del triclinio. Le pareti affrescate e i pavimenti a mosaico denotano la disponibilità economica del ricco proprietario e probabilmente il suo livello culturale (LUNI 2007; LUNI, MEI 2012; VENTURINI 2017).

Nel 2007 è stato inoltre possibile riportare a Fossombrone il mosaico raffigurante il ratto di Europa, che ha dato il nome all'abitazione. Oggi il tessellato è esposto nella sala di fondo del Museo Civico Archeologico "A. Vernarecci" di Fossombrone. L'altro mosaico, staccato nel 1926, con decorazione geometrica, non ha fatto ancora ritorno a Fossombrone in quanto, allo stato attuale, non sussistono ambienti museali abbastanza ampi per poterlo accogliere: si trova quindi ancora nei depositi del Museo Nazionale delle Marche.

3. LA DIGITALIZZAZIONE DEL SITO ARCHEOLOGICO E DEI REPERTI

La generazione dei contenuti digitali che saranno fruiti dall'utente è una delle fasi principali nella realizzazione di un'esperienza culturale in XR. In particolare, la ricostruzione dell'ambiente in cui si svolgeranno le interazioni e la modellazione di quegli oggetti con cui l'utente potrà interagire assolvono un ruolo fondamentale ai fini del successo dell'esperienza proposta. L'efficacia dell'acquisizione digitale ai fini della rappresentazione tridimensionale di scavi e manufatti archeologici è comprovata da numerosi studi (BIANCONI, FILIPPUCCI 2019; BRANDOLINI *et al.* 2020; GIORGI *et al.* 2021; CINGOLANI *et al.* 2024). Il processo di ricontestualizzazione dei reperti provenienti dagli scavi della città romana di *Forum Sempronii* ha così visto come primo passo la loro digitalizzazione, eseguita tramite fotogrammetria, seguendo un flusso di lavoro ormai consolidato (GARAGNANI 2021). Gli scatti sono stati realizzati utilizzando una fotocamera Sony $\alpha 7RV$, equipaggiata con obiettivo macro a distanza focale fissa 90mm e flash anulare, entrambi dotati di filtro polarizzatore. L'acquisizione è stata realizzata da cavalletto fotografico, a una distanza di 70 cm dall'oggetto da digitalizzare, posizionato su piatto rotante dotato di riferimenti metrici.

Impostato pari a 15° il suo angolo di rotazione tra uno scatto e il successivo, di ciascun reperto è stata ripresa in maniera automatica la parte superiore, quella centrale e quella inferiore, garantendo il completo ricoprimento dell'oggetto e una sovrapposizione tra gli scatti adeguata alla successiva fase di ricostruzione tridimensionale. Per ciascun reperto sono state così acquisite 72 immagini, oltre a un singolo scatto relativo al colorchecker, successivamente utilizzato come riferimento colorimetrico. I diversi scatti, memorizzati in formato non compresso, sono stati processati in Adobe CameraRaw, editandone il bilanciamento del bianco e il profilo colore. Tramite la funzione di riconoscimento automatico del soggetto di Adobe Photoshop, per ciascuna immagine è stata inoltre generata una maschera, volta a evidenziare il reperto digitalizzato ed escludere il fondale della ripresa. La ricostruzione



Fig. 3 – Ricostruzione tridimensionale tramite fotogrammetria di un reperto proveniente dal sito di *Forum Sempronii*. Da sinistra verso destra, allineamento delle immagini, modello highpoly (2mln di poligoni), modello lowpoly (8K poligoni) prima e dopo le operazioni di normal e diffuse baking.

tridimensionale è stata effettuata utilizzando Agisoft Metashape, suddividendo il lavoro in set di immagini relative al medesimo reperto e seguendo il flusso operativo standard del software: allineamento delle immagini, inserimento di marker come riferimento metrico, ottimizzazione dell'allineamento, generazione di una nuvola di punti e, da questa, di una mesh 3D. Tale modello, caratterizzato da un elevato livello di dettaglio geometrico (highpoly), è stato quindi ulteriormente elaborato in Meshlab per correggere errori topologici, chiudere eventuali buchi e procedere alla retopology, ottenendone una seconda versione a maglia quadrata e con numero ridotto di poligoni (lowpoly). Entrambi i modelli sono stati sottoposti a UV unwrapping in Blender; il modello highpoly è stato quindi prima reimportato in Agisoft Metashape, per essere texturizzato tramite la proiezione delle immagini fotografiche; poi, nuovamente in Blender, per garantire una resa visiva dettagliata dell'oggetto digitalizzato anche tramite il modello lowpoly, grazie alle operazioni di normal e diffuse baking (Fig. 3).

Particolarmente sfidante è stato il processo di digitalizzazione del mosaico raffigurante il ratto di Europa. L'intera superficie musiva (4,64×2,68 m) è stata acquisita utilizzando una macchina fotografica Sony $\alpha 9$ montata su di uno slider lineare ed equipaggiata con obiettivo a distanza focale 50mm e flash anulare, entrambi dotati di filtro polarizzatore. Sono state così scattate 500 foto secondo lo schema presentato in Fig. 4, garantendo una GSD pari a 0.12 mm. La successiva ricostruzione tridimensionale è stata eseguita utilizzando Agisoft Metashape, in maniera analoga a quanto presentato per gli altri reperti.

Passando dalla ricostruzione degli oggetti a quella dell'ambiente virtuale, occorre innanzitutto sottolineare che un'esperienza di Mixed Reality (MR) prevede la percezione visiva da parte dell'utente dello spazio fisico in cui si trova e non della sua replica digitale. La finalità della digitalizzazione del sito archeologico è stata quindi quella di generare un modello tridimensionale in

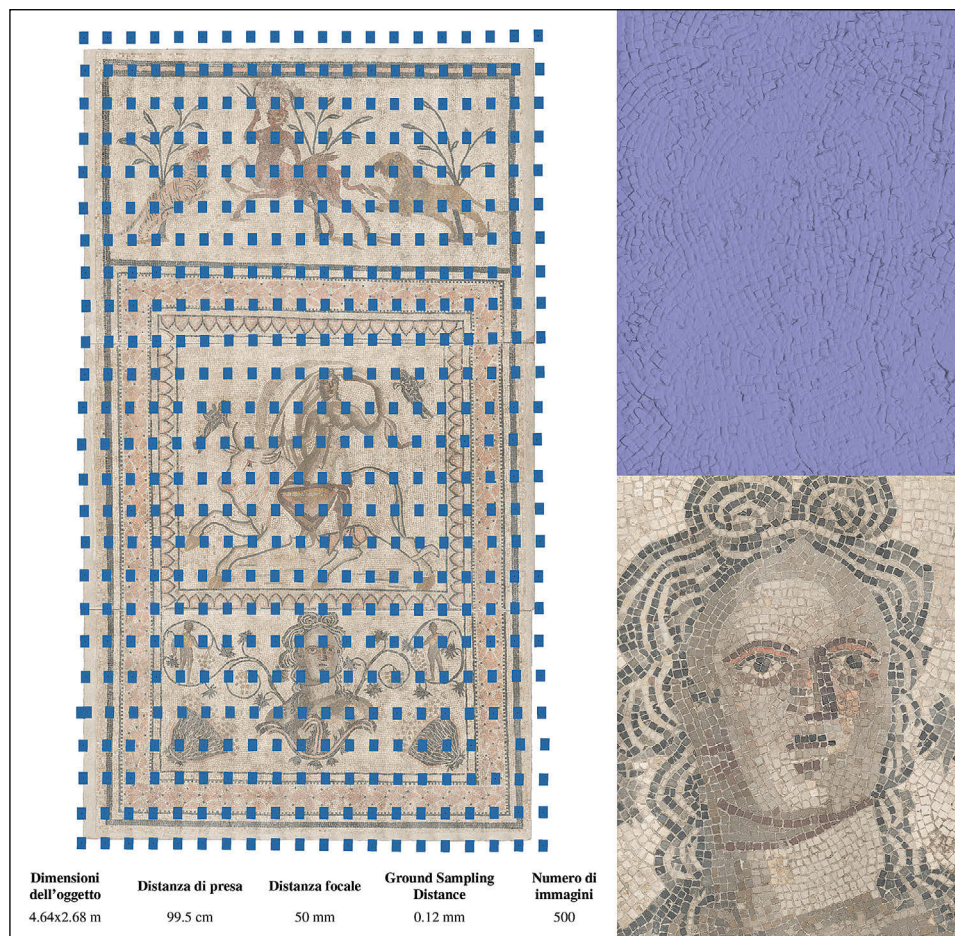


Fig. 4 – A sinistra, schema di ripresa e principali dati relativi all'acquisizione di immagini del mosaico raffigurante il ratto di Europa. A destra, vista non texturizzata e texturizzata di una porzione della sua ricostruzione tridimensionale.

grado di permettere la corretta interazione tra contenuti virtuali-utente-spazio fisico. Al fine di garantire la più completa copertura dell'area, si sono quindi integrate acquisizioni aeree da drone e scansioni da scanner laser terrestre. L'intera area è stata acquisita tramite drone Matrice 350 RTK dotato di sensore LiDAR Zenmuse L2, per la zona delle *domus* si sono inoltre effettuate 15 scansioni, utilizzando uno scanner laser terrestre Leica RTC360, in modo da acquisire anche quelle strutture protette da coperture metalliche, quindi non visibili da drone. Sfruttandone le aree di sovrapposizione, le singole nuvole di



Fig. 5 – Vista della nuvola di punti dell'intera area ottenuta dall'integrazione di scansioni da UAV e TLS.

punti ottenute da ciascuna scansione e dal drone sono state allineate tramite Leica Cyclone Register360+ e, sfruttando le coordinate di alcuni ground control point battuti tramite ricevitore GNSS HiPer HR, riferite al sistema WGS 84/UTM zone 33N. La singola nuvola di punti ottenuta al termine di tale processo (Fig. 5) è stata ulteriormente elaborata in un modello mesh utilizzando Leica Cyclone 3DR, che ha permesso, inoltre, di correggere errori topologici, chiudere buchi e semplificarne la geometria, al fine di rendere il modello adatto per la sua implementazione nell'esperienza del sito in MR.

4. IL DIALOGO TRA MUSEO E TERRITORIO: LA RICONTESTUALIZZAZIONE DEI REPERTI TRAMITE MIXED REALITY

La realizzazione di un'esperienza Extended Reality (XR) volta a supportare la fruizione di un sito archeologico necessita di una progettazione preliminare in cui definire i suoi principali aspetti narrativi. In questo modo le scelte tecnologiche saranno guidate dai contenuti culturali che si intende comunicare al visitatore. Solo a valle della definizione di tali aspetti, potrà quindi essere sviluppata l'esperienza, garantendo la più efficace interazione possibile tra spazio fisico, utente e contenuti virtuali.

4.1 Progettazione dell'esperienza

Nell'ambito del presente lavoro, le tematiche da affrontare sono state individuate a partire dall'obiettivo di strutturare un'esperienza in grado di trasmettere all'utente quel legame intrinseco tra il manufatto e il suo luogo di ritrovamento; finalità che può essere raggiunta tramite il "ripopolamento" del sito archeologico con le repliche digitali dei suoi reperti. Si è quindi deciso di strutturare una visita guidata in forma di esperienza in MR. La principale peculiarità di tale tecnologia è infatti la coesistenza di realtà fisica e virtuale,

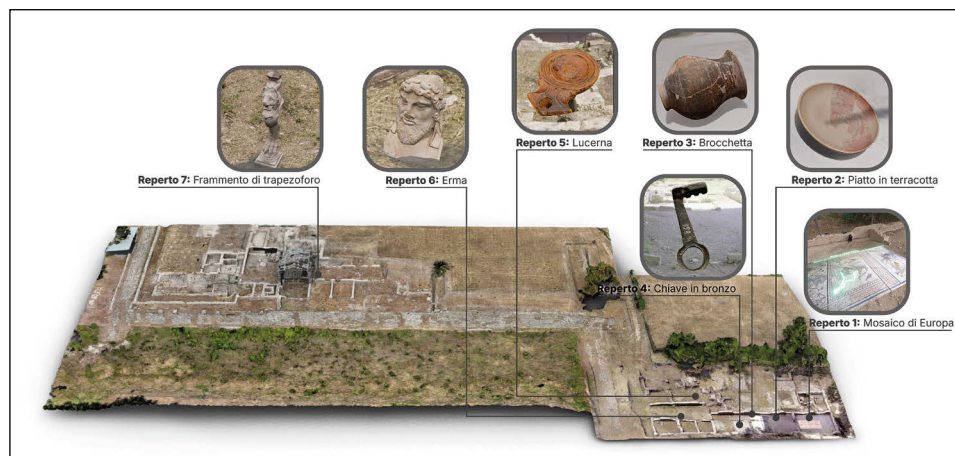


Fig. 6 – Vista del modello 3D dell'area archeologica con individuazione della collocazione dei modelli virtuali.

che interagiscono tra loro in tempo reale. La MR abbatte infatti il confine tra i due ambiti, superando il principio di sovrimposizione di contenuti virtuali alla realtà fisica, proprio della fruizione in realtà aumentata (BAČELIĆ *et al.* 2016; GIMENO *et al.* 2017), garantendo le stesse modalità di interazione e grado di coinvolgimento di un'esperienza immersiva in Virtual Reality (FERDANI *et al.* 2020; LIASKOS *et al.* 2022; MARTO *et al.* 2022).

Si è così deciso di riposizionare il mosaico del ratto di Europa nel *triclinium* della *domus* di provenienza, offrendo al visitatore una percezione del suo ricco apparato decorativo; allo stesso modo, si è previsto il ricollocamento nel loro contesto di scavo di oggetti di uso comune, quali lucerne, brocche, chiavi e statuette votive, a supporto della narrazione della quotidianità di chi viveva questi luoghi (Fig. 6). Si è inoltre pensato di offrire una narrazione non limitata al sito e ai suoi reperti, ma una che potesse abbracciare anche la storia e il processo degli scavi archeologici: dal primo rinvenimento, avvenuto nel XIX secolo, ai giorni nostri. Il percorso narrativo include così anche le tecniche utilizzate per portare alla luce i resti, le metodologie adottate dagli archeologi nelle diverse epoche e le sfide incontrate durante il lavoro sul campo, offrendo un'inedita modalità di racconto delle campagne di scavo.

Le scelte narrative hanno quindi guidato la scelta del dispositivo per la fruizione dell'esperienza. Al fine di massimizzare l'aspetto immersivo (LEOPARDI *et al.* 2021; ZHANG *et al.* 2024), stimolando vista e udito, è stato individuato il visore Meta Quest 3. Tale scelta è stata dettata dalla necessità di offrire un'esperienza che permetta all'utente di spostarsi liberamente nel sito archeologico, assicurando al contempo costi contenuti, rendendo la

soluzione economicamente sostenibile anche per enti museali con risorse limitate. Difatti, questo dispositivo è in grado di supportare esperienze a sei gradi di libertà (traslazione e rotazione del punto di vista) ed elimina la necessità di ulteriori strumenti per il tracciamento della posizione utente e la renderizzazione dei contenuti digitali, riducendo così notevolmente i costi della componente hardware. Rispetto a visori utilizzati in altre esperienze di MR (CARRE *et al.* 2022; FERRETTI *et al.* 2022) il Meta Quest 3 consente una migliore interazione tra fisico e virtuale, grazie al tracciamento di oggetti fisici che fungono da riferimenti per la generazione e il posizionamento degli oggetti virtuali. Attraverso le telecamere e i sensori di profondità integrati nel visore, è infatti possibile effettuare una scansione dell'area in cui l'esperienza sarà fruita, su cui successivamente impostare delle ancore spaziali (spatial anchors) permanenti, che fungono da punti di riferimento stabili nel mondo reale. Queste ancore permettono quindi di richiamare oggetti virtuali e posizionarli correttamente dove desiderato, garantendo un'integrazione accurata tra elementi fisici e digitali.

Il design narrativo ha successivamente visto la definizione dei contenuti audio e delle animazioni dell'interfaccia grafica e delle repliche digitali. Essendo concepita come una visita guidata, l'intera esperienza in MR è supportata da una voce narrante che illustra dettagliatamente i reperti e fornisce indicazioni sul tragitto da percorrere. Per le repliche digitali, è stato ideato un processo di comparsa graduale, attivato quando l'utente entra in un'area virtualmente definita che circonda l'oggetto. Ad eccezione del mosaico, si è ritenuto necessario garantire la possibilità di afferrare e movimentare gli oggetti tramite l'uso delle mani, favorendone così la visione. L'interfaccia grafica è stata invece progettata prevedendo elementi caratterizzati da differenti animazioni, a seconda della loro funzione, come fasce luminose dinamiche che guidano e forniscono informazioni al visitatore, arricchendone il percorso.

Ci si è quindi focalizzati sulla necessità di garantire la coerenza visiva tra elementi reali e virtuali, tema essenziale in un'esperienza di MR. In ambienti esterni, l'illuminazione naturale, inclusa quella del sole e del cielo, influisce su ombre, riflessi e illuminazione globale. Secondo KOLIVAND, SUNAR 2014, modelli basati sulla posizione solare e algoritmi avanzati generano ombre realistiche e adattabili in tempo reale, migliorando l'integrazione visiva in scenari dinamici. Tecniche di relighting raffinano l'illuminazione virtuale in condizioni meteorologiche mutevoli (LIU, GRANIER 2012; ZHU *et al.* 2023). Nel caso specifico, si è deciso di adottare una renderizzazione in tempo reale del sistema di illuminazione, simulando il movimento del sole durante l'arco della giornata in base alla georeferenziazione dei reperti, le cui repliche digitali sono state corredate di coordinate geografiche (latitudine, longitudine e quota s.l.m.). Come mostrato in Fig. 7, gli oggetti classificati come "reperto" corrispondono alle repliche digitali acquisite e vengono posizionati e visualizzati

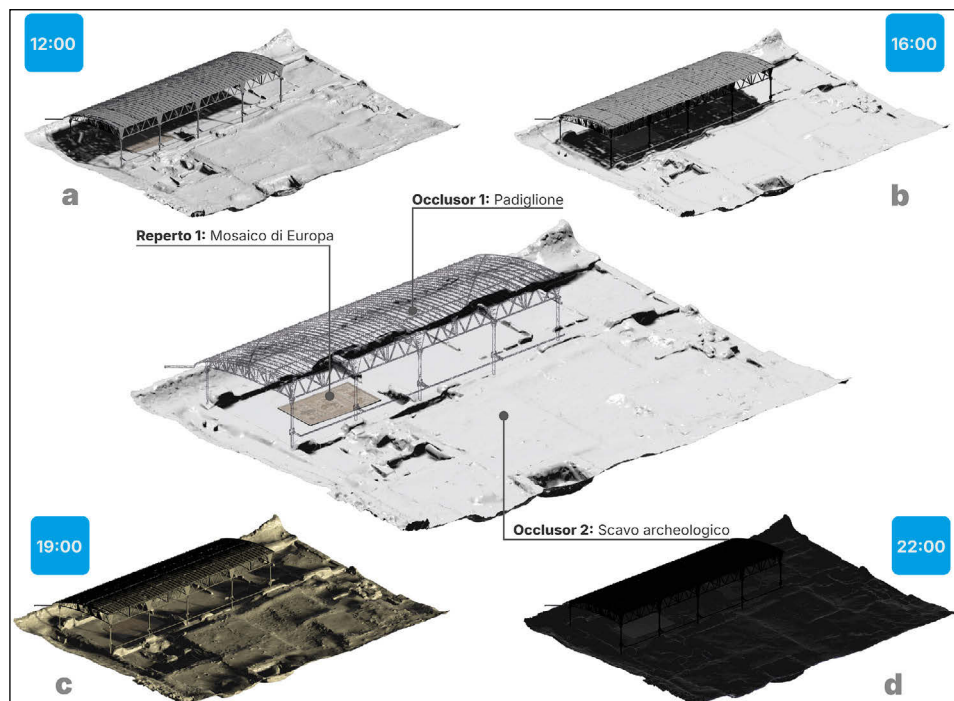


Fig. 7 – Gli oggetti “reperto” corrispondono alle repliche digitali acquisite e vengono posizionati e visualizzati in MR nel loro luogo di origine. Gli oggetti “occlusor” sono modelli 3D dotati di materiali speciali che li rendono invisibili in MR, ma capaci di generare ombre; a) nello scenario I, l’ombra del padiglione reale copre interamente il mosaico virtuale; b) nello scenario II, l’ombra del padiglione reale copre parzialmente il mosaico virtuale; c) nello scenario III, che simula un tramonto, il colore ambientale vira verso tonalità più calde; d) nello scenario IV, viene simulata una condizione notturna priva di luci.

in MR nel loro luogo di origine. Parallelamente, gli oggetti definiti come “occlusor” sono modelli 3D non visibili in MR, ma capaci di generare ombre. Questo approccio consente così, ad esempio, di simulare quelle proiettate dal padiglione fisico utilizzando il suo modello 3D (occlusor), garantendo così un’integrazione coerente e fluida tra elementi fisici e virtuali.

4.2 Sviluppo dell’applicativo

Terminata la fase di progettazione della narrazione e definite le principali scelte in merito alla visualizzazione e all’interazione con i contenuti, si è passati alla fase di sviluppo informatico dell’esperienza. La piattaforma Unity 3D e gli asset standard di Meta sono stati sfruttati per l’integrazione di contenuti e interazioni e per la generazione dell’applicazione necessaria per la fruizione

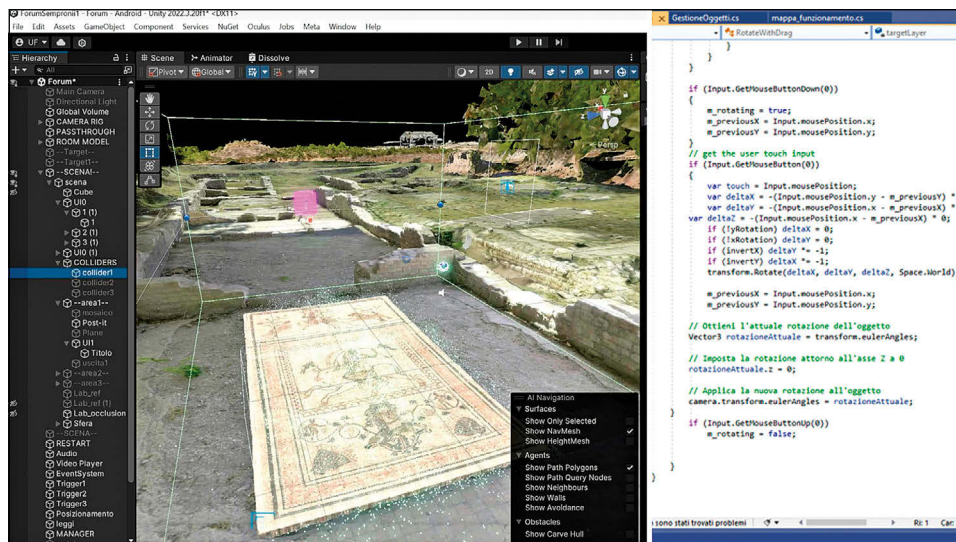


Fig. 8 – A sinistra, l'ambiente di lavoro della piattaforma Unity, raffigurante il mosaico ricontestualizzato virtualmente; a destra, alcune stringhe del codice, in ambiente Microsoft Visual Studio, che gestisce lo svolgimento dell'applicativo.

dell'esperienza tramite visore (Fig. 8). Gli effetti particellari impiegati nella sequenza di comparsa dei modelli 3D sono stati realizzati mediante l'utilizzo del sistema di programmazione visuale a nodi noto come VFX Graph (Visual Effects Graph). Questo strumento ha consentito di progettare un sistema particellare dinamico, capace di simulare l'aggregazione delle particelle verso un volume rappresentativo degli oggetti, partendo da uno stato iniziale di apparente disordine. Attraverso il controllo di specifici parametri, è stato possibile governare con precisione il comportamento delle particelle: il numero di particelle ha definito la densità del sistema, mentre la forza cinetica e la velocità hanno regolato l'intensità e il ritmo del movimento. Le coordinate di partenza hanno permesso di stabilire la posizione iniziale delle particelle nello spazio virtuale, e l'implementazione della gravità ha simulato una forza di attrazione verso il volume finale dell'oggetto. La fase finale della generazione dei reperti è stata eseguita tramite l'impiego di uno shader graph personalizzato. Questo ha permesso l'integrazione di una texture dinamica nel processo di materializzazione, simulando gradualmente la comparsa della superficie dell'oggetto fino al completamento del modello 3D.

Le fasce luminose dinamiche sono state create utilizzando il software Adobe After Effects e successivamente esportate come file video per essere integrate nell'ambiente virtuale di Unity. Per ottenere un effetto di trasparenza coerente con il contesto virtuale e reale, è stato implementato uno shader personalizzato

basato sulla tecnica del Chroma Key, che ha permesso di rimuovere lo sfondo dei video. Oltre alle fasce luminose, numerosi elementi nella scena, tra cui i sistemi particellari, sono stati arricchiti con effetti visivi volti ad aumentare l'impatto emotivo sull'utente. Tali effetti sono stati gestiti attraverso il sistema di post-processing della Universal Render Pipeline (URP) di Unity 3D, che ha consentito di regolare parametri come l'intensità, il raggio e il colore per ottenere una resa visiva ottimale. L'intero sistema è stato temporizzato e programmato utilizzando script in C# nell'ambiente di Microsoft Visual Studio. La sfera sonora è stata registrata e missata sfruttando il software Steinberg Cubase. La voce narrante è stata integrata nell'esperienza in modo da rimanere sincronizzata con i movimenti dell'utente, migliorando significativamente il grado di immersione. L'interpretazione del testo della narrazione è accompagnata da effetti sonori, realizzati attraverso audio spaziali 3D che suggeriscono all'utente l'orientamento corretto. Sempre per favorire la facilità di utilizzo, sfruttando il sensore di prossimità, il visore riconosce l'assenza dell'utente e ripristina la condizione iniziale. Questa funzione è particolarmente utile in un contesto di fruizione pubblica, poiché elimina qualsiasi necessità di assistenza esterna nel passaggio del dispositivo da un utente al successivo.

5. RISULTATI

Il risultato di tale processo è dunque un'esperienza di visita in MR il cui percorso narrativo inizia con il racconto degli scavi che si sono susseguiti nell'area. Un modello virtuale del terreno occlude la vista delle emergenze archeologiche, che sono quindi gradualmente svelate seguendo l'ordine cronologico del loro rinvenimento. L'utente è quindi guidato verso la stanza del triclinio della Domus di Europa, dove il mosaico raffigurante il ratto di Europa viene introdotto attraverso una sequenza di effetti sonori spaziali e visualizzazioni dinamiche (Fig. 9). La voce narrante contestualizza archeologicamente la casa della *Forum Sempronii* del II sec. d.C., descrivendo il corredo e le decorazioni della stanza del triclinio, focalizzandosi sui dettagli della replica digitale del mosaico e sulle sue raffigurazioni principali. Durante questa fase, fasce luminose dinamiche sincronizzate con la narrazione evidenziano i motivi del tessellato, arricchendo l'esperienza visiva e rafforzando la comprensione del contenuto.

Conclusa questa prima tappa, la voce narrante invita i visitatori a proseguire nella ricerca di altri reperti, disseminati nell'area archeologica. L'intero percorso è guidato attraverso una segnaletica virtuale composta da pannelli luminosi sospesi sopra i reperti e da fasce luminose proiettate a terra. Una volta che il visitatore entra nel volume virtuale associato a un reperto, viene attivata un'animazione che ne genera la comparsa, un audio ne fornisce la descrizione e l'utente può interagire con esso, movimentandolo con le sue mani. Dopo essere stato manipolato e osservato, l'oggetto torna automaticamente

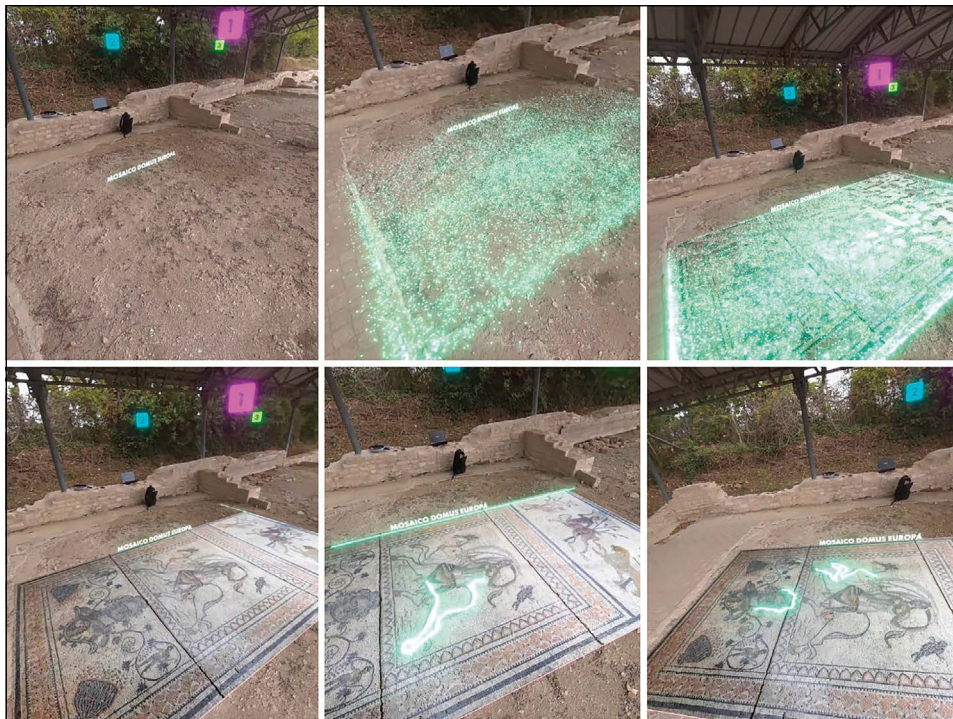


Fig. 9 – Sequenza di immagini del test effettuato *in situ* con visore Meta Quest 3. Il processo di comparsa delle repliche virtuali avviene in due fasi: inizialmente, un aggregato di particelle luminose si dispone per formare un volume rappresentativo dell'oggetto; successivamente, il modello 3D vero e proprio emerge gradualmente, grazie all'integrazione di una texture dinamica. Infine, delle fasce luminose sincronizzate supportano il racconto delle raffigurazioni del mosaico.

alla sua posizione iniziale. Tutti i reperti sono mostrati nello stato attuale di conservazione e nel luogo di ritrovamento, secondo un approccio che mira a garantire una rappresentazione scientificamente accurata e a preservare l'integrità dei dati archeologici.

6. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

L'esperienza presentata offre un contributo significativo nell'ambito della valorizzazione e comunicazione del patrimonio archeologico, esplorando modalità innovative per ricreare virtualmente il legame tra i manufatti e il loro contesto originario. Applicate all'area di *Forum Sempronii* e alla Domus “di Europa”, le soluzioni proposte sfruttano la MR per combinare la fruizione fisica con la rappresentazione digitale, offrendo una nuova prospettiva sulla relazione tra conservazione museale e sito archeologico.

La scelta narrativa di ricollocare i reperti nel loro luogo di ritrovamento permette di sfruttare pienamente la replica digitale dello stato attuale, consentendo di proporre una narrazione rigorosa e rispettosa delle fonti, capace al contempo di rispondere alle esigenze di coinvolgimento di un pubblico eterogeneo. Raccontare un sito archeologico tramite la storia degli scavi e dei suoi ritrovamenti offre una lettura cronologica, sicuramente sfidante, intermedia tra l'ora e il com'era in origine, che vuole per prima cosa trasmettere quella che è la natura intrinseca di quei luoghi, cioè la scoperta. L'integrazione delle repliche digitali con effetti grafici avanzati contribuisce a una rappresentazione scientifica dei manufatti, che può essere replicata in altri contesti archeologici.

Gli sviluppi futuri del presente lavoro prevedono la ricostruzione virtuale della stanza del triclinio e dei reperti digitalizzati, con l'intento di ricrearne ambienti domestici e arricchirne la narrazione storica. Questa implementazione verterà sui principi della narrazione virtuale immersiva, integrando la fruizione dello stato attuale con la rappresentazione di come il sito doveva apparire in epoca romana. L'attuale applicativo rappresenta dunque una solida base per ulteriori sviluppi, assicurando la qualità e la coerenza scientifica dell'intero percorso. Si prevede, inoltre, il ricorso a strumenti di valutazione dell'esperienza proposta: verranno condotti test per validare l'efficacia del design adottato, seguiti dalla somministrazione di questionari di gradimento.

In conclusione, il contributo ha evidenziato come l'uso consapevole delle tecnologie digitali possa favorire nuove forme di accesso al patrimonio archeologico, stimolando una riflessione sulle relazioni tra passato e presente. La metodologia proposta, che integra elementi di documentazione e valorizzazione, rappresenta un modello replicabile per iniziative future volte a coniugare ricerca, comunicazione e partecipazione pubblica.

PAOLO CLINI, ROMINA NESPECA, RENATO ANGELONI

Università Politecnica delle Marche

p.clini@univpm.it, r.nespeca@univpm.it, r.angeloni@univpm.it

OSCAR MEI

Università degli Studi di Urbino

oscar.mei@uniurb.it

UMBERTO FERRETTI

Sapienza Università di Roma

umberto.ferretti@uniroma1.it

BIBLIOGRAFIA

- BAČELIĆ G.B., PAVIĆ J., PERIŠA M. 2016, *Revitalization of (the Fortresses of) Šibenik*, «Defensive Architecture of the Mediterranean XV to XVIII Centuries», 413.
- BIANCONI F., FILIPPUCI M. 2019, *La fotomodellazione per il rilievo archeologico*, «Archeologia e Calcolatori», 30, 205-228 (<https://doi.org/10.19282/ac.30.2019.13>).

- BRANDOLINI F., CREMASCHI M., MARIANI G.S., ZERBONI A., LISCHI S., DEGLI ESPOSTI M. 2020, *SfM-photogrammetry for fast recording of archaeological features in remote areas*, in G. BAGNASCO GIANNI, S. BORTOLOTO, A. GARZULINO, M. MARZULLO (eds.), *Milano internazionale: la fragilità territoriale dei contesti archeologici. Atti del Convegno Internazionale (Milano 2019)*, «Archeologia e Calcolatori», 31.2, 33-45 (<https://doi.org/10.19282/ac.31.2.2020.04>).
- CARRE A.L., DUBOIS A., PARTARAKIS N., ZABULIS X., PATSIOURAS N., MANTINAKI E., ZIDIANAKIS E., CADI N., BAKA E., THALMANN N.M., MAKRYGIANNIS D., GLUSHKOVA A., MANITSARIS S. 2022, *Mixed-Reality demonstration and training of glassblowing*, «Heritage», 5, 1, 103-128 (<https://doi.org/10.3390/HERITAGE5010006>).
- CERQUETTI M. 2007, *La componente culturale del prodotto turistico integrato: la creazione di valore per il territorio attraverso i musei locali (The cultural component of integrated tourist product: The value creation for context through local museums)*, «Sinergie», 73-74, maggio-dicembre, 421-438 (<https://ssrn.com/abstract=2500235>).
- CINGOLANI S., CLINI P., QUATTRINI R., ANGELONI R., ANGELO F., SFORZINI L., DI GIOVANNI A., BOLLATI R. 2024, *Dalla replica digitale alla modellazione informativa. Un approccio scan-to-BIM alla documentazione del microscavo e restauro della tomba 27 di Colle Vaccaro (AP)*, «Archeologia e Calcolatori», 35.1, 407-426 (<https://doi.org/10.19282/ac.35.1.2024.25>).
- CLINI P., ANGELONI R., D'ALESSIO M., BARDELLI G., FINOCCHI S. 2024, *Un Virtual Immersive movie per la fruizione del patrimonio archeologico: il viaggio nella "Tomba della Regina" di Sirolo-Numana*, «Archeologia e Calcolatori», 35.1, 473-490 (<https://doi.org/10.19282/ac.35.1.2024.28>).
- CUNO J. 2010, *Who Owns Antiquity? Museums and the Battle Over our Ancient Heritage*, Princeton University Press.
- DRAGONI P. 2005, *Antimarketing dei musei italiani*, «Sinergie», 68, 55-75.
- FERDANI D., FANINI B., PICCIOLI M.C., CARBONI F., VIGLIAROLO P. 2020, *3D reconstruction and validation of historical background for immersive VR applications and games: The case study of the Forum of Augustus in Rome*, «Journal of Cultural Heritage», 43, 129-143 (<https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.12.004>).
- FERRETTI U., QUATTRINI R., D'ALESSIO M. 2022, *A comprehensive HBIM to XR framework for museum management and user experience in Ducal Palace at Urbino*, «Heritage», 5, 3, 1551-1571 (<https://doi.org/10.3390/heritage5030081>).
- GARAGNANI S. 2021, *Quick digitization techniques: The case study of Numana necropolis*, in V. BALDONI (ed.), *From pottery to context. Archaeology and virtual modelling*, «Archeologia e Calcolatori», 32.2, 53-62 (<https://doi.org/10.19282/ac.32.2.2021.06>).
- GIMENO J., PORTALÉS C., COMA I., FERNÁNDEZ M., MARTÍNEZ B. 2017, *Combining traditional and indirect augmented reality for indoor crowded environments. A case study on the Casa Batlló museum*, «Computers&Graphics», 69, 92-103 (<https://doi.org/10.1016/j.cag.2017.09.001>).
- GIORGI E., LUPPINO L., LAPACCIANA N., SCOZ J. 2021, *Accurata, ma sostenibile: soluzioni operative per la documentazione grafica e fotografica dello scavo sul sito di Vignale*, «Archeologia e Calcolatori», 32.1, 155-174 (<https://doi.org/10.19282/ac.32.1.2021.09>).
- HAMILAKIS Y. 2013, *Archaeology and the Senses: Human Experience, Memory, and Affect*, Cambridge, University Press.
- KOLIVAND H., SUNAR M.S. 2014, *Realistic real-time outdoor rendering in Augmented Reality*, «PLOS ONE», 9, 9, e108334 (<https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0108334>).
- LEOPARDI A., CECCACCI S., MENGONI M., NASPETTI S., GAMBELLI D., OZTURK E., ZANOLI R. 2021, *X-reality technologies for museums: A comparative evaluation based on presence and visitors experience through user studies*, «Journal of Cultural Heritage», 47, 188-198 (<https://doi.org/10.1016/j.culher.2020.10.005>).
- LIASKOS O., MITSIGKOLA S., ARAPAKOPOULOS A., PAPATZANAKIS G., GINNIS A., PAPA-DOPOULOS C., PEPPA S., REMOUNDOS G. 2022, *Development of the virtual reality*

- application: "the ships of Navarino", «Applied Sciences (Switzerland)», 12, 7 (<https://doi.org/10.3390/app12073541>).
- LIU Y., GRANIER X. 2012, *Online tracking of outdoor lighting variations for augmented reality with moving cameras*, «IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics», 18, 4, 573-580 (<https://doi.org/10.1109/TVCG.2012.53>).
- LUNI M. 2007, *Domus di Forum Sempronii: decorazione e arredo*, Roma, L'Erma di Bretschneider.
- LUNI M., MEI O. 2012, *Forum Sempronii I: scavi e ricerche (1974-2012)*, Bari, Edipuglia (https://edipuglia.it/wp-content/uploads/2014/05/page77_av_162.pdf).
- MARTO A., GONÇALVES A., MELO M., BESSA M. 2022, *A survey of multisensory VR and AR applications for cultural heritage*, «Computers and Graphics (Pergamon)», 102, 426-440 (<https://doi.org/10.1016/j.cag.2021.10.001>).
- MEI O., CARIDDI L., GASPARINI M. 2017, *L'area forense di Forum Sempronii: Nuovi dati architettonici e urbanistici alla luce degli scavi 2013-2017*, «REUDAR European Journal of Roman Architecture», 1 (<http://dx.doi.org/10.21071/reudar.v1i0.10164>).
- PIETRONI E., MENCONERO S., BOTTI C., GHEDINI F. 2023, *e-Archeo: A pilot national project to valorize Italian archaeological parks through digital and virtual reality technologies*, «Applied System Innovation», 6, 2, 38 (<https://doi.org/10.3390/asi6020038>).
- PUIG A., RODRÍGUEZ I., ARCOS J.L., RODRÍGUEZ-AGUILAR J.A., CEBRIÁN S., BOGDANOVYCH A., MORERA N., PALOMO A., PIQUÉ R. 2020, *Lessons learned from supplementing archaeological museum exhibitions with virtual reality*, «Virtual Reality», 24, 2, 343-358 (<https://doi.org/10.1007/s10055-019-00391-z>).
- RIVET M. 2020, *Decolonization and restitution. Moving towards a more holistic and relational approach: Report on the panel on ethnographic museums and indigenous people*, ICOM Kyoto 2019, «Museum Worlds», 8, 1, 204-209 (<https://doi.org/10.3167/armw.2020.080114>).
- WALI A., COLLINS R.K. 2023, *Decolonizing museums: Toward a paradigm shift*, «Annual Review of Anthropology», 52, 1, 329-345 (<https://dx.doi.org/10.1146/annurev-anthro-052721-040652>).
- ZHANG J., WAN YAHAYA W.A.J., SANMUGAM M. 2024, *The impact of immersive technologies on Cultural Heritage: A bibliometric study of VR, AR, and MR applications*, «Sustainability», 16, 15, 6446 (<https://doi.org/10.3390/SU16156446>).
- ZHU K., LIU S., SUN W., YUAN Y., WU Y. 2023, *A lighting consistency technique for outdoor Augmented Reality systems based on multi-source geo-information*, «ISPRS International Journal of Geo-Information», 12, 8, 324 (<https://doi.org/10.3390/IJGI12080324>).

ABSTRACT

This study investigates the application of digital replicas in Mixed Reality (MR) environments to enhance accessibility and foster engagement with archaeological heritage. The research centers on the Roman site of *Forum Sempronii* (Marche Region, Italy). Photogrammetry and 3D modeling techniques were employed to digitize artifacts, resulting in high-fidelity digital reconstructions. These replicas were recontextualized within their original archaeological settings, enabling a physical experience that enhances visitors' comprehension of the excavation and history of the site. The MR application, developed for the Meta Quest 3 headset, incorporates state-of-the-art graphics, intuitive navigational tools, and dynamic real-time lighting simulations to deliver an immersive user experience. By preserving the historical and spatial context of the artifacts, the project bridges the domains of museum conservation and archaeological interpretation. This methodological approach underscores the potential of MR to convey scientifically robust narratives while addressing the dual goals of accessibility and visitor engagement, making it suitable for diverse audiences. The framework proposed in this study serves as a replicable model for cultural heritage initiatives, demonstrating the effectiveness of integrating accurate digital replicas with interactive physical settings to reinforce the connection between artifacts and their historical environments.