

LA DIGITALIZZAZIONE PER LA DOCUMENTAZIONE, LO STUDIO E LA FRUIZIONE DI UN SITO ARCHEOLOGICO. LA VR EXPERIENCE DEL TEATRO DI *RICINA*

1. INTRODUZIONE

La rappresentazione digitale del Patrimonio Culturale (Cultural Heritage, CH) trova sempre maggiore diffusione tanto in ambito scientifico, quanto come strumento divulgativo dedicato ad un pubblico di non esperti. Le prime sperimentazioni in tal senso si fanno risalire già agli anni '70, con un ruolo divenuto via via sempre più cruciale e determinante ai fini della salvaguardia del CH (STONE 1999). In particolare, uno dei primi campi di applicazione dove le nuove tecnologie e la computer grafica sono state sperimentate risulta essere quello archeologico. Risale infatti all'inizio degli anni '90 il termine "Virtual Archaeology" coniato da Paul REILLY (1991) per indicare la sperimentazione della computer grafica e della realtà virtuale (Virtual Reality, VR) per la simulazione di scavi archeologici. Nei decenni successivi il forte incremento nell'utilizzo di queste soluzioni tecnologiche è stato supportato dall'abbattimento dei costi e dal contemporaneo aumento delle prestazioni hardware, che hanno permesso lo sviluppo di soluzioni visive più complesse e di indagarne le relazioni con i processi cognitivi (CARD, MACKINLAY 1999; WARE 2012).

La diffusione del ricorso alla rappresentazione digitale ha quindi portato la comunità scientifica ad interrogarsi sulla validità effettiva di questo strumento e in particolare sulla necessità di renderne rigoroso il processo di creazione. Al fine di stabilire principi cardine riguardo l'utilizzo scientifico di queste risorse, si è così redatta nel 2006 la Carta di Londra (NICCOLUCCI *et al.* 2006), seguita nel 2009 dalla Carta di Siviglia dell'International Forum of Virtual Archaeology, un documento fondato su 8 principi tramite cui rendere esecutiva la Carta di Londra nella gestione del Patrimonio Archeologico (BRUSAPORCI, TRIZIO 2013). Grazie anche alle riflessioni sviluppatesi attorno alla stesura di tali documenti, numerose sono le esperienze di VR legate al mondo dell'archeologia rese disponibili da diverse istituzioni culturali, come ad esempio "Virtual Archaeology. Re-creating Ancient Worlds", una raccolta di oltre 50 siti archeologici accomunati dall'uso del digitale (BROUCKE *et al.* 1999); "The Flamina project", un museo virtuale legato alla via Flaminia (FORTE *et al.* 2006); "Rome Reborn", un progetto mirato a creare una rappresentazione visiva della Roma imperiale, presentando il risultato di una ricerca decennale circa i suoi più avanzati studi di ricostruzione topografica e urbanistica (GUIDI *et al.* 2007).

Negli ultimi anni notevole è stato poi lo sviluppo di esperienze VR immersive, basate sull'utilizzo di visori che permettono all'utente di essere trasportato in un ambiente completamente virtuale, in cui il coinvolgimento emotivo è amplificato dall'immersività e dal grado di fotorealismo. Vari sono gli esempi: il progetto "i-MARECULTURE", dove l'utente può effettuare una visita virtuale subacquea nel sito del naufragio di Mazotos (LIAROKAPIS *et al.* 2017); il progetto "CIVITAS", con l'esperienza VR dello Studiolo del Duca di Urbino, che l'utente può esplorare richiamando informazioni testuali e audio relativi non solo alla struttura architettonica, ma anche alle allegorie rappresentate nelle tarsie lignee e ai ritratti degli Uomini Illustri (CLINI *et al.* 2020); il progetto "Ipogei etruschi di Volterra in 3D", che ha prodotto lo sviluppo di un'applicazione per la visita delle tombe etrusche ipogee nel territorio del Comune di Volterra, fruibile tramite touchscreen così come in modalità VR (TACCOLA *et al.* 2021). Risulta dunque evidente l'esponenziale aumento di applicazioni digitali per musei e siti archeologici in grado di produrre esperienze sempre più efficaci grazie all'avanzamento tecnologico, ma anche alla grande attenzione posta verso la drammatizzazione e lo storytelling (PALOMBINI, FANINI 2019), elementi imprescindibili per amplificare le potenzialità divulgative grazie al coinvolgimento emotivo (FERDANI *et al.* 2020).

Il presente contributo si inserisce così in questo panorama e nell'ambito specifico delle ricostruzioni virtuali di teatri antichi – tra le quali possiamo annoverare quella del teatro di Catania (MALFITANA *et al.* 2016) e del teatro romano di Taormina (GABELLONE *et al.* 2017) – e delle ricostruzioni virtuali di teatri romani finalizzate alla sperimentazione di esperienze non solo visive ma anche uditive, proponendone simulazioni dell'acustica (MANZETTI, PAPA-DOPOULOS 2021). Il caso di studio qui indagato è quello del teatro romano di *Ricina*, situato a Macerata (MC), di cui attualmente rimangono presenti solo alcuni resti delle costruzioni murarie e della scena. Lo scopo è quello di mostrare un processo di lavoro specifico, caratterizzato dall'esecuzione di acquisizioni laser scanner e fotogrammetriche integrate con l'analisi filologica della documentazione archeologica e delle fonti storiche, al fine di ottenere un modello ricostruttivo digitale del teatro, non solo scientificamente valido, ma anche ingegneristicamente corretto, grazie alla stretta collaborazione tra figure professionali differenti come l'archeologo, l'ingegnere e l'architetto.

2. CONTESTO STORICO-ARCHEOLOGICO: IL TEATRO DI *RICINA*

La città romana di *Ricina* (VERMEULEN *et al.* 2017, 96-99), nella frazione di Villa Potenza di Macerata, sorge sulla sponda settentrionale del fiume Potenza. La sua organizzazione urbanistica è fatta risalire alla seconda metà del I secolo a.C. all'atto dell'istituzione del *municipium*. Si sviluppa nella vallata alluvionale all'incrocio di due importanti strade, un diverticolo della



Fig. 1 – A) Ricostruzione della planimetria archeologica dell'area urbana di Ricina; B) Planimetria del teatro di Ricina; C) Foto dei resti del teatro di Ricina.

via Flaminia, la Flaminia Prolaquense, e la Salaria Gallica (PERNA 2018). L'impianto sembra avere un perimetro pressoché rettangolare che occupa una superficie di 20 ha e si sviluppa sull'asse generatore del diverticolo Prolaquense, ricalcato dall'attuale provinciale settempedana, che la taglia in diagonale fungendo da principale asse EO (Fig. 1). Un'evidente zampa d'oca, dove la viabilità si sviluppa verso le due direzioni di *Potentia* e *Auximum*, segna anche la collocazione della porta E e il limite NE della città stessa.

Il teatro è l'unico edificio attualmente visibile ed era già completo e funzionale a partire dalla prima metà del I secolo d.C. In seguito all'istituzione in età severiana della colonia di *Helvia Ricina Pertinax*, esso subì una serie di rifacimenti, come testimoniano alcuni elementi architettonici in marmo, in parte esposti. Le successive vicende che hanno interessato l'edificio nel corso dei secoli, dovute in parte all'azione distruttiva dell'uomo, in parte ai fenomeni atmosferici, hanno comportato la perdita di dati fondamentali per la comprensione della sua struttura. Il teatro è largo m 75,45 e lungo m

62,55, presenta una cavea elevata artificialmente su terreno pianeggiante e con molta probabilità doveva avere un'altezza intorno ai 17 m.

L'edificio è stato realizzato utilizzando l'*opus testaceum* con mattoni che fanno da paramento all'anima in cementizio del muro. Nella cavea gli ingressi ai *vomitoria* e alle botteghe erano costituiti da piattebande e archi di scarico fatti con mattoni *bipedales*; la stessa soluzione veniva usata nelle arcate della facciata e nelle nicchie della *scaena*. La cavea presenta due ordini di gradinate su cui si aprono undici forniche, che immettevano nell'ambulacro, e dodici porte con architrave, che davano accesso agli ambienti di servizio. I due ordini di gradinate erano divisi da una *praecinatio*, alla quale si accedeva da scalinate, i *vomitoria*, dei quali si conservano parzialmente sul lato sinistro le volte di sostegno. In corrispondenza del fornice centrale si apriva un corridoio coperto, attualmente ricalcato dalla attuale passerella, che introduceva dall'esterno direttamente all'orchestra, tagliando a metà la cavea del teatro e alcuni radiali delle gradinate. All'interno della cavea e sotto la *praecinatio* corre un corridoio semicircolare che collegava i due *aditus* all'ingresso centrale. L'orchestra, lo spazio semicircolare compreso tra la cavea e il palcoscenico, ha un diametro di ca. m 18; ad essa si accede tramite i due *aditus* laterali e dall'ingresso centrale. Sopra gli *aditus* avevano sede i due *tribunalia*; un terzo poteva essere collocato sopra l'ingresso centrale. L'edificio scenico, molto danneggiato, è lungo m 40,40 e presenta una pianta rettangolare. I *parascaenia*, i due ambienti laterali che racchiudevano l'edificio scenico, erano a pianta rettangolare e comunicavano con il *proscenium* per mezzo di due porte, le *versurae*. Il palcoscenico, che aveva una larghezza di m 6, era diviso dalla cavea dal *pulpitum*, largo m 1,20 e munito di una decorazione di rivestimento.

Nei due *parascaenia* laterali alla *scaena* si vedono ancora gli incassi per le travi che venivano messe per reggere il pavimento in legno del palco. Tra la *frons pulpiti* e il *proscenium* si aprono dei pozzi quadrangolari in laterizio che dovevano ospitare le antenne destinate a sorreggere l'*aulaeum* (il sipario o telone). La *scaenae frons* si conserva per un'altezza di m 9 nel lato destro dell'edera centrale; questa, a pianta semicircolare, aveva una parete articolata nella parte alta da una serie di nicchie rettangolari coperte a volta, di cui due conservate sul lato destro. Il *postscaenium* chiude posteriormente la *scaenae frons* composta da due piani o ordini di colonne, entrambi decorati in stile corinzio per il quale Vitruvio, III (GROS 1997) dice che il rapporto tra base e fusto deve essere 1 a 10. Rientranze rettangolari nel muro di fondo della *frons scaena* inquadravano i due *hospitales* e l'edera semicircolare davanti alla porta regia. Della decorazione della scena abbiamo conservati diversi elementi architettonici che evidenziano ancora bene le modanature e che permettono di essere utilizzati al fine della ricostruzione architettonica. Il *postscaenium* era anch'esso formato da enormi nicchie, dodici in totale, distribuite in due piani; ai lati si trovano i *parascaenia* e le due basiliche.

L'edificio trova i suoi confronti più diretti con il teatro di Ostia (CALZA 1927; GRECO, BATTISTELLI 2002), che presenta una pianta molto simile ed è costruito con la stessa tecnica e soluzioni ingegneristiche, differendo solo nelle dimensioni (molto più piccole quelle di *Ricina*) e nell'assenza della *porticus* retrostante. Ciò conferma complessivamente la tendenza locale all'applicazione di modelli direttamente mutuati da Roma e dal mondo italico, ma declinati in forma originale e autonoma.

3. LA DOCUMENTAZIONE DIGITALE DELLO STATO DI FATTO

L'intento del lavoro condotto su tale caso di studio è stato quindi quello di indagarne la rappresentazione digitale come strumento centrale in un processo di documentazione, studio e fruizione dell'area archeologica, perseguendo la scientificità del dato, la ricerca del coinvolgimento emotivo mediante la libera esplorazione e il fotorealismo, la sperimentazione di un prototipo di Virtual Museum VR e il confronto diretto tra presente e passato, tra reale e ricostruzione virtuale.

L'efficacia di un'acquisizione digitale per il rilievo di architetture e scavi archeologici è comprovata da numerosi studi (BIANCONI, FILIPPUCCI 2019; BRANDOLINI *et al.* 2020; GIORGI *et al.* 2021). Tale soluzione permette infatti un'approfondita documentazione geometrica e morfologica dell'oggetto indagato, fondamentale tanto per un adeguato studio dello stato di fatto, quanto per la formulazione di ipotesi ricostruttive (D'EREDITÀ 2021). Da tale punto di vista, il teatro romano di *Helvia Ricina* si presenta come caso esemplare di applicazione, caratterizzandosi per porzioni di costruzioni murarie difficilmente accessibili e parti in quota non visibili da terra. Per ottenerne una documentazione completa si è quindi proceduto all'integrazione di acquisizioni GNSS, scansioni laser terrestri (Terrestrial Laser Scanner, TLS) e fotogrammetria aerea da drone (Unmanned Aerial Vehicle, UAV), seguendo una metodologia di lavoro strutturata in 3 fasi: acquisizione, elaborazione e integrazione dati (Fig. 2).

La fase di acquisizione è stata progettata e realizzata in modo da ottenere una copertura completa del teatro. Sul terreno sono stati disposti 12 target con funzione di Ground Control Point (GCP), rilevati in maniera specifica mediante strumentazione GNSS-RTK e presenti nelle scansioni TLS così come nelle foto scattate da UAV. Al fine di garantire un adeguato livello di dettaglio e al contempo la speditività della fase di acquisizione, le scansioni laser sono state eseguite imponendo una risoluzione pari a 6,3 mm a 10 m, mentre le immagini da UAV sono state acquisite con un Ground Sampling Distance pari a 5 mm.

L'elaborazione dei dati grezzi è stata quindi realizzata in maniera distinta: le 34 scansioni TLS sono state importate nel software Leica Cyclone, dove, si

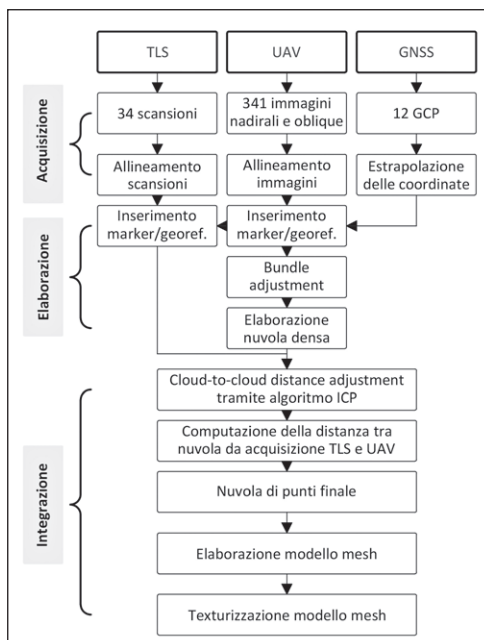


Fig. 2 – Schema della metodologia di acquisizione applicata.

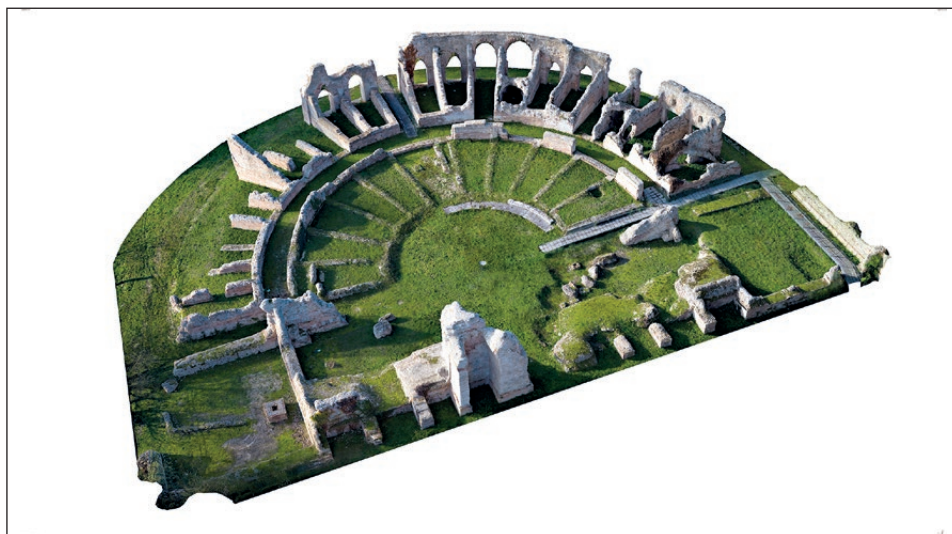


Fig. 3 – Immagine del modello reality-based ottenuto mediante integrazione dei diversi dati acquisiti.

è ottenuta, grazie al loro allineamento, una nuvola unica costituita da circa 115 milioni di punti. Le 341 immagini da UAV, opportunamente editate tramite il plugin Adobe CameraRaw, sono state invece allineate all'interno del software Agisoft Metashape. In questa stessa fase i GCP sono stati individuati sia nella nuvola di punti ottenuta dall'unione delle singole scansioni TLS che nelle foto aeree e quindi associati alle coordinate rilevate da GNSS-RTK. Tale operazione ha permesso di riferire entrambe le acquisizioni al comune sistema globale WGS84/UTM zone 33N, di ottimizzare l'allineamento fotogrammetrico e scalare correttamente la nuvola di punti elaborata tramite tale processo.

L'integrazione delle due nuvole di punti è stata infine realizzata nel software CloudCompare. Essendo già riferite al medesimo sistema di riferimento globale, si è eseguita un'ottimizzazione di tale allineamento e quindi computata la distanza tra i loro punti, in modo da escludere quelli derivanti da fotogrammetria, meno affidabili dal punto di vista metrico, riferiti a porzioni di struttura già presenti nelle scansioni TLS. In questo modo si è ottenuta una nuvola di punti completa, descrivente l'intero sito archeologico. Tale nuvola di punti è stata quindi importata in MeshLab, dove si è elaborata una mesh tridimensionale, successivamente texturizzata in AgiSoft Metashape (Fig. 3).

Oltre che per la struttura del teatro, acquisizioni fotogrammetriche con fotocamera montata su treppiede sono state eseguite per la documentazione di alcuni elementi di dettaglio oggi esposti all'ingresso dell'area archeologica di *Ricina*. Le immagini sono state pre-processate e allineate, seguendo la medesima procedura applicata a quelle acquisite da UAV. La nuvola di punti ottenuta è stata quindi scalata grazie ai riferimenti metrici inseriti durante la ripresa e da essa si è ottenuto un modello mesh successivamente texturizzato.

4. LO STUDIO E LA DEFINIZIONE DI UN'IPOTESI RICOSTRUTTIVA

La fase di lavoro successiva all'elaborazione del modello digitale dello stato di fatto ha visto la definizione di una ricostruzione storico-filologica scientificamente basata su un'ampia raccolta e analisi di dati di differente natura, messi a sistema mediante una stringente logica gerarchica legata alla loro attendibilità. Il primo passo ha dunque riguardato l'analisi delle fonti tangibili, quali i resti ritrovati *in situ*. Di conseguenza sono state studiate tutte le costruzioni murarie ancora oggi presenti, sfruttando i dati derivanti dall'integrazione del rilievo laser scanner e fotogrammetrico. Grazie a tale documentazione digitale tridimensionale, è stato possibile individuare le informazioni geometriche necessarie nella ricostruzione dei macro-elementi del teatro: la cavea, gli ingressi, la forma e le dimensioni del primo ordine del fronte scenico.

Si è quindi passati all'analisi di elementi decorativi parziali rinvenuti in sito; molti sono i conci lapidei e marmorei, come i resti di colonne, capitelli,

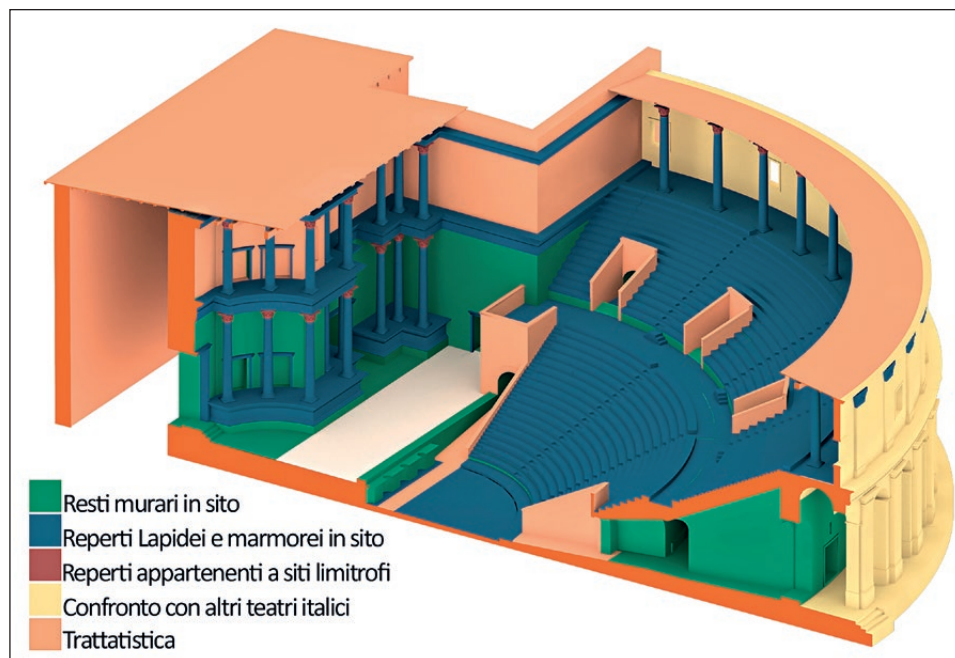


Fig. 4 – Schema del grado d’attendibilità delle fonti.

trabeazioni e cornici, grazie ai quali è stato possibile ricostruire e proporzionare i microelementi di dettaglio tramite giustapposizione e anastilosi.

Nell’ambito del processo collaborativo avviatosi, il ruolo dell’archeologo si è reso fattivo nella fase successiva ed è stato prioritariamente quello dello studio del monumento finalizzato alla ricostruzione del modello, studio che si è avvalso delle comuni metodologie di ricerca. L’analisi dei frammenti architettonici ancora *in situ*, singolarmente documentati anche con il tradizionale rilievo diretto, e il confronto con i teatri italici coevi (MODONA 1961; TOSI BACCELLE 2003; SEAR 2006) hanno infatti consentito di riproporre gli elementi oggi non più visibili. Particolarmente utile si è rilevato il confronto con le descrizioni di autori locali del XIX e XX secolo (SANTONI 1877; INGLIERI 1939), che hanno avuto la possibilità di vedere il monumento in un migliore stato di conservazione. Il modello così ricostruito è stato anche confrontato con la trattatistica antica (GROS 1997), che ha consentito di confermare o smentire alcune ipotesi ricostruttive. La scelta finale, tenuto conto dell’obiettivo generale del progetto, è stata quella di presentare la ricostruzione senza esaltare in forma eccessiva le parti ricostruite rispetto ai pochi elementi originali che sono stati invece evidenziati nell’ambito del percorso virtuale (Fig. 4).

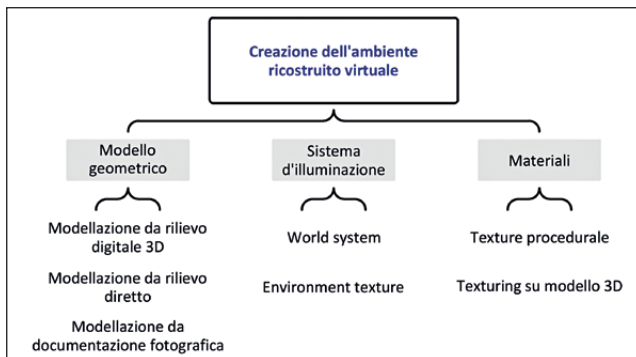


Fig. 5 – Schema generale del processo di generazione del modello ricostruttivo.

Ultimato lo studio si è quindi passati alla generazione virtuale della ricostruzione, eseguita principalmente all'interno di Blender 2.83, un software open source per la modellazione tridimensionale, animazione, rendering e editing. Come già specificato, uno dei temi fondanti di questo lavoro è la ricerca di fotorealismo, perseguita mediante lo sviluppo concreto di tre elementi fondamentali: modello geometrico, sistema d'illuminazione e comparto texture (Fig. 5).

Riguardo al modello geometrico ricostruttivo, è importante sottolineare le diverse metodiche intraprese, influenzate non solo dalla ricerca di realismo, ma anche dalla tipologia di reference utilizzata. Seguendo questa logica, sono state individuate tre metodiche differenti: modellazione da rilievo digitale 3D, da rilievo diretto e da documentazione fotografica. Come primo passo, si è proceduto alla modellazione delle strutture murarie, utilizzando piante e sezioni realizzate tramite il modello prodotto da rilievo digitale. La modellazione è stata quindi eseguita manualmente tramite estrusioni e operazioni booleane. In seguito all'acquisizione di diversi reperti tramite tecnica SfM, sono stati generati modelli caratterizzati da un elevato numero di poligoni, in grado di rappresentare perfettamente l'oggetto reale, ma con parti mancanti caratterizzate dall'usura normale del tempo. Al fine di produrre un modello ricostruttivo completo, essi sono stati utilizzati come reference ottenendo modelli completi, ricostruiti per anastilosi nelle loro parti mancanti, caratterizzati anche da una tessitura geometrica meno complessa e facilmente ottimizzabile. Secondo questa metodica sono stati realizzati i capitelli corinzi del secondo ordine del porticato esterno e le modanature della trabeazione del primo ordine del colonnato appartenente al fronte scenico.

Per quanto riguarda la ricostruzione dei reperti non rilevati tridimensionalmente, sono stati utilizzati come riferimento i disegni su carta millimetrata

eseguiti in sede del rilievo diretto. In questo caso sono stati ridisegnati vettorialmente i profili rilevati, regolarizzati secondo trattatistica al fine di eliminare l'usura dovuta al tempo e in seguito estrusi al fine di ottenere un oggetto 3D. Questa metodica è stata utilizzata prevalentemente per le cornici, le trabeazioni e gli architravi lapidei appartenenti al fronte scenico.

Laddove non è stato possibile avere una reference rilevabile si è proceduto analizzando fonti fotografiche di reperti non rilevabili. Sono state estrapolate le caratteristiche geometriche caratterizzanti, modellate manualmente e infine proporzionate nel loro contesto tramite studio della manualistica e trattatistica storica. Peculiare è il caso del basamento e capitello delle colonne corinzie, elementi collocati sul fronte scenico e nel porticato interno del teatro. Infine, per la modellazione dei conci lapidei delle gradinate, non essendoci pervenuti resti riconducibili direttamente al teatro di *Ricina*, si è fatto ricorso al confronto con altri teatri, quali quello di Ostia Antica e di Fiesole. Al fine di rendere speditiva la ricostruzione, è stata eseguita una modellazione parametrica grazie all'utilizzo dell'Add-On Array tool. Come primo passo è stata definita la dimensione media del conco, in seguito esso è stato copiato, disposto con il giusto angolo, prevedendo una minima variazione random delle dimensioni e nelle caratteristiche materiche dei gruppi di conci in modo da conferire grande varietà, fondamentale al fine del fotorealismo.

Completato il modello geometrico, si è passati a definire il sistema d'illuminazione. Nello specifico è stato scelto l'utilizzo del World System, con HDRI (High Dynamic Range Image), utilizzato come environment texture, grazie al quale è possibile simulare l'esposizione reale di un luogo fisico in diverse condizioni di illuminazione.

Ultimo passo per la realizzazione del modello è stata la creazione e applicazione dei materiali. Questo passaggio gioca un ruolo fondamentale per il raggiungimento del fotorealismo; infatti, grazie all'applicazione delle giuste

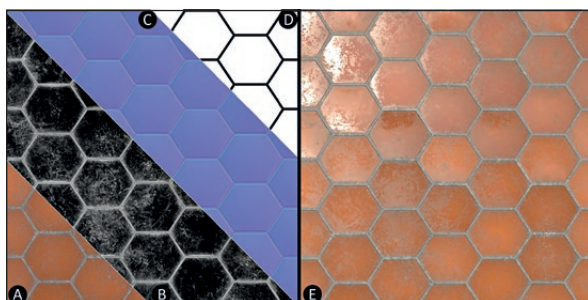


Fig. 6 – Output della generazione delle texture procedurali del marmo giallo: A) Base color map; B) Roughness map; C) Normal map; D) Height map; E) Risultato renderizzato.

texture è possibile conferire al modello tutti quei dettagli che caratterizzano gli oggetti nella realtà fisica, come l'usura lungo i bordi o le sfumature cromatiche in corrispondenza di cavità dovute allo sporco. La realizzazione delle mappe necessarie a tale scopo è stata eseguita mediante l'utilizzo di due software differenti: Substance Painter e Substance Designers. Il primo programma è stato scelto per la texturizzazione di oggetti singoli, come colonne, trabeazioni e basamenti. Nello specifico, ogni modello, eseguito l'unwrapping in Blender, è stato importato all'interno di Substance Painter. Anzitutto è stato scelto un materiale base dalla ricca libreria che il software possiede; tramite la generazione automatica di maschere di livello è stato possibile gestire direttamente sul modello i dettagli necessari al realismo, quali cavità, usura lungo i bordi e sporco. Raggiunto il risultato desiderato, sono state esportate le mappe necessarie: BaseColor, Roughness, Normal e Height map.

L'utilizzo di Substance Designer è stato invece necessario nella generazione di quei materiali legati ad oggetti 3D estesi quali paramenti murari e pavimentazioni. Si tratta infatti di un programma di texturing procedurale a nodi, ossia per la generazione di texture tramite algoritmi; ciò ha reso possibile variare in modo speditivo i dettagli dei singoli materiali, evitando l'irrealistica ripetizione della stessa immagine (Fig. 6).

5. LA PROPOSTA DI FRUIZIONE VR

Negli ultimi decenni grazie ai progressi nell'acquisizione di dati e modellazione 3D è stato possibile sviluppare, in modo sempre più speditivo e a costi inferiori, sistemi di gestione e fruizione del dato tridimensionale. In particolare, oggi siamo in grado di fornire all'utente un'esperienza completamente immersiva capace di incuriosire ed emozionare, specialmente grazie all'utilizzo delle tecnologie HMD (Head Mounted Display), ossia visori di realtà virtuale che conferiscono la capacità di esplorare e interagire fisicamente con il dato digitale. Con la finalità di creare l'esperienza più realistica e immersiva possibile, è stato scelto il dispositivo HTC Vive Pro che, grazie ad una risoluzione di 2880×1600 pixel e al suo funzionamento wireless, consente di avere un'esperienza dettagliata e libera.

L'ultima fase di lavoro ha quindi visto la realizzazione dell'applicazione di realtà virtuale tramite la Game Engine Unity 3D, un software open source multipiattaforma specifico per lo sviluppo di applicazioni come videogiochi, visualizzazioni architettoniche e animazioni 3D in tempo reale. La creazione dell'esperienza VR si è così strutturata: ottimizzazione dei modelli 3D, creazione del sistema atmosferico e ambientale, creazione delle interazioni VR.

Il primo passo ha quindi preceduto l'importazione all'interno della game engine dei due modelli precedentemente realizzati. Al fine di ottenere un funzionamento ottimale dell'applicazione finale, si è infatti reso necessario

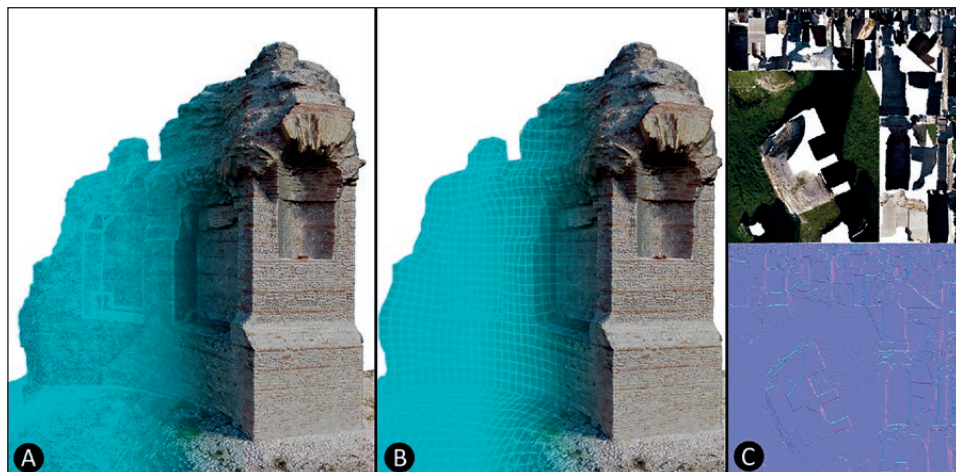


Fig. 7 – Passaggi salienti della retopology: A) Modello mesh highpoly texturizzato; B) Modello mesh lowpoly ottimizzato a mesh quadrate; C) Texture baked: diffuse e normale map.

compiere un’ottimizzazione delle loro geometrie, riducendone la complessità pur mantenendone la stessa resa visiva ricca di dettagli. Il processo di “retopology”, utilizzato prevalentemente nel mondo del gaming, permette di rimodellare un oggetto 3D complesso per ottenerne una geometria corrispondente, ma descritta da un numero minore di poligoni. Questa riduzione può essere effettuata sia eseguendo una modellazione manuale, sia tramite software o plug-in dedicati; in questo lavoro è stata eseguita tramite il software open source Instant Meshes, specifico per convertire oggetti 3D complessi in oggetti a mesh quadrate (GARCIA-LEON *et al.* 2018) (Fig. 7).

Per compensare la perdita di informazione dovuta alla riduzione dei poligoni, è stato eseguito il baking delle principali texture, una tecnica che consente di trasferire informazioni caratterizzanti di un modello ad alta risoluzione, come cavità o piccole imperfezioni, su di uno corrispondente ma a più bassa risoluzione, tramite la renderizzazione di nuove texture applicabili come materiale all’oggetto semplificato. In questo modo si è potuti passare da un modello highpoly del teatro costituito da un numero totale di 4.679.260 triangoli a uno lowpoly descritto da soli 269.989 quadrati (Fig. 8). Ultima l’ottimizzazione dell’intera scena, essa è stata quindi esportata in FBX e finalmente importata nella game engine, formato scelto poiché consente di importare ogni oggetto corredato delle sue texture, mantenendo anche la suddivisione in multimateriali.

Il primo elemento determinato in Unity 3D è stato il sistema d’illuminazione e atmosferico della scena. Grazie al lavoro di ottimizzazione eseguito,



Fig. 8 – Vista del modello ricostruttivo: il fronte scenico.

è stato possibile utilizzare un sistema di illuminazione real-time, in cui la luce diretta del sole viene simulata da una *directional light*, mentre il cielo è simulato da uno *sky box/procedural*, tramite il quale è possibile modificare le caratteristiche atmosferiche, come colore, esposizione e spessore atmosferico. Infine, per rendere la scena dinamica e realistica è stato inserito un sistema di simulazione atmosferico per l’inserimento e l’animazione delle nuvole, gestendo direzione e intensità del vento tramite *Terrain e Wind Zone*. Definito in modo completo l’ambiente virtuale, si è passati a quanto necessario per la fruizione tramite visore e controller, valutando in particolare la modalità di locomozione e le possibilità di interazione, con l’intento di creare uno spazio digitale attivo dove l’utente possa interagire, esplorare, scoprire ed essere incuriosito dal sito archeologico in cui si trova immerso.

Riguardo al sistema di locomozione, è stata conferita all’utente la possibilità di muoversi liberamente nello spazio camminando; ciò è reso possibile dalle caratteristiche hardware del visore scelto, poiché ogni spostamento del visore nell’ambiente reale, essendo tracciato spazialmente da due camere, viene riportato nell’ambiente virtuale, simulando il movimento. In aggiunta a questa modalità, è stata inserita la possibilità di muovere la propria posizione tramite un puntatore, grazie al quale l’utente è teletrasportato nel punto indicato. Al fine di evitare che l’utente finisca a ridosso di muri o all’esterno del teatro, è stata eseguita una lista di target, individuati tramite tag, sui quali è consentito effettuare questo teletrasporto.

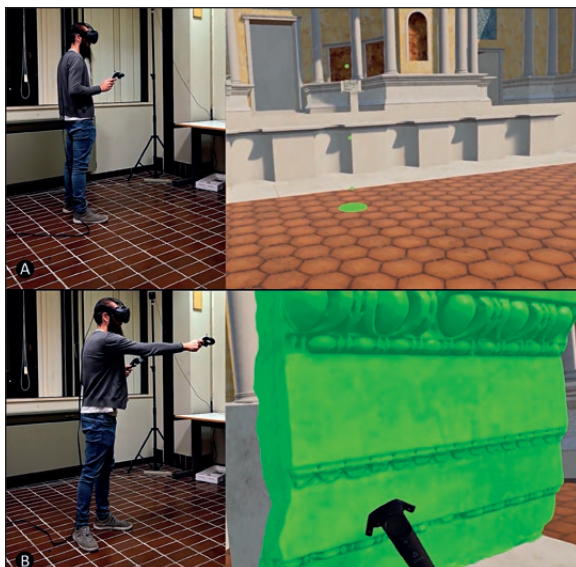


Fig. 9 – Funzionamento dell'applicazione VR: A) Funzionamento del sistema di teletrasporto a parabola; B) Interazione con oggetto reperto archeologico.

Per quanto riguarda l'interazione, si è reso possibile manipolare tramite controller alcuni oggetti 3D inseriti nella scena virtuale. Avvicinando il controller all'oggetto, l'utente potrà vincolarlo ad esso e quindi spostarlo, farlo ruotare, osservarne da vicino i dettagli e ascoltarne una descrizione. Questa interazione è stata concepita con l'intento di sperimentare un prototipo di Virtual Museum, dove il teatro funge da contenitore e i reperti archeologici digitalizzati giocano il ruolo di contenuto (Fig. 9).

Nella definizione dell'esperienza virtuale è poi fondamentale la generazione di un collegamento diretto tra ricostruzione virtuale e stato di fatto. Si è così voluto rendere possibile all'utente tramite l'utilizzo dei controller di passare dalla visualizzazione della ricostruzione a quella dei resti archeologici oggi visibili, permettendo un confronto diretto tra i due modelli.

6. CONCLUSIONI

La lettura dei ruderi archeologici è un'operazione non immediata, che richiede l'applicazione di categorie interpretative specifiche, fatto che rende estremamente complessi i processi di valorizzazione del patrimonio edilizio archeologico. Obiettivo della ricerca è stato dunque anche quello di definire e proporre un processo di lavoro, volto alla individuazione di nuovi e più

efficaci metodi per documentare, rappresentare e fruire il patrimonio culturale e archeologico. Il processo coinvolge ambiti scientifici, conoscenze e competenze diversi che devono essere necessariamente collegati in forma collaborativa. Nello specifico, il rilievo digitale integrato ha permesso di ottenere dati precisi e accurati, producendo una perfetta copia digitale dei resti del teatro, fornendo dati essenziali per lo studio di natura archeologica e architettonica prima e per la creazione dell'ambiente virtuale ricostruttivo dopo.

Di pari importanza è stata la modellazione 3D. Grazie ad una metodica iterativa, è stato possibile usufruire di un vero e proprio strumento di ricerca collaborativo, finalizzato ad ottenere un prodotto finale il più possibile completo, realistico e soprattutto corretto dal punto di vista scientifico. Infine, lo sviluppo dell'applicazione di VR ha permesso di divulgare, in maniera coinvolgente, il lavoro scientifico svolto. L'attenzione al fotorealismo ha fatto sì che l'utente fosse immerso nell'ambiente virtuale in modo completo, suscitando un coinvolgimento emotivo in grado di stimolare curiosità e volontà di conoscenza.

Per quanto riguarda gli sviluppi futuri, numerose sono le linee di ricerca che si sono aperte: la prima riguarda la necessità di continuare lo sviluppo di quest'applicazione mediante l'introduzione di nuove interazioni e nuovi contenuti multimediali, come audio e video in grado di descrivere al meglio l'iter ricostruttivo oltre che la storia del teatro, andando a creare un più complesso e completo Virtual Museum VR. In secondo luogo, vanno sperimentate le possibilità di utilizzare e integrare il modello con altre informazioni, relative ad esempio allo stato di conservazione del bene, ai fini del monitoraggio dei processi di gestione dell'area archeologica attraverso le ICT. Se la lettura del patrimonio archeologico allo stato di rudere è un processo complesso, la sfida è anche quella di inserire il singolo oggetto nel paesaggio antico archeologicamente ricostruito, e non solo in quello urbano secondo modelli comuni e diffusi, ma nel più ampio contesto territoriale (PERNA 2019).

Un altro nodo cruciale legato alle implementazioni future riguarda infine lo sviluppo di uno studio sull'esperienza utente per comprendere in maniera rigorosa come il visitatore si rapporta con queste tecnologie, sia al fine di migliorare le interfacce e le interazioni, sia per comprendere come queste tecnologie influiscono dal punto di vista cognitivo.

PAOLO CLINI, RENATO ANGELONI, MIRCO D'ALESSIO

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura
Università Politecnica delle Marche

p.clini@univpm.it, r.angeloni@staff.univpm.it, m.dalessio@pm.univpm.it

ROBERTO PERNA, DAVID SFORZINI

Dipartimento di Studi Umanistici – Lingue, Mediazione, Storia, Lettere, Filosofia
Università degli Studi di Macerata

roberto.perna@unimc.it, sforzinidavid@gmail.com

BIBLIOGRAFIA

- BIANCONI F., FILIPPUCCI 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., ZERBONI A., DEGLI ESPOSTI M., MARIANI G.S., LISCHI S. 2020, *SfM-photogrammetry for fast recording of archaeological features in remote areas*, in G. BAGNASCO GIANNI, S. BORTOLOTTO, 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>).
- BROUCKE P., FORTE M., SILIOTTI A., BOMMELAER J.F. 1999, *Virtual Archaeology: Re-creating ancient worlds*, «American Journal of Archaeology» (<https://doi.org/10.2307/506978>).
- BRUSAPORCI S., TRIZIO I. 2013, *La 'Carta di Londra' e il patrimonio architettonico: riflessioni circa una possibile implementazione*, «SCIRES-IT - SCientific RESearch and Information Technology», 3, 2, 55-68 (<https://doi.org/10.2423/i22394303v3n2p55>).
- CALZA G. 1927, *Il teatro romano di Ostia*, Roma, Società Editrice d'Arte Illustrata.
- CARD S.K., MACKINLAY J.D. 1999, *Readings in Information Visualization: Using Vision to Think*, Durham, Morgan Kaufmann (<https://www.researchgate.net/publication/220691172>).
- CLINI P., QUATTRINI R., ANGELONI R., D'ALESSIO M., CAPPUCCI R. 2020, *Realtà virtuale e potenzialità dei facsimili digitali per i musei. Il caso dello Studiolo del duca di Urbino*, «Disegnare Idee Immagini», 61, 56-67.
- D'EREDITÀ A. 2020, *Il rilievo fotogrammetrico di Doclea*, «Archeologia e Calcolatori», 31.1, 213-230 (<https://doi.org/10.19282/ac.31.1.2020.10>).
- 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>).
- FORTE M., PESCARIN S., PIETRONI E., RUFA C. 2006, *Multiuser interaction in an archaeological landscape: The Flaminia Project*, in S. CAMPANA, M. FORTE (eds.), *From Space to Place, Proceedings of the 2nd International Conference on Remote Sensing in Archaeology (Roma 2006)*, Oxford, BAR International Series 1568, Archaeopress, 189-196. (https://www.ark.lu.se/media/utbildning/dokument/kurser/ARKN06/20102/archaeological_landscape_flaminia.pdf).
- GABELLONE F., FERRARI I., GIURI F. 2017, *A new contribution for the reconstructive study of the theatre of Taormina*, in IMEKO International Conference on Metrology for Archaeology. *Proceedings of the International Conference (Lecce 2017)*, Red Hook, Curran Associates, 595-600 (<https://www.researchgate.net/publication/320651265>).
- GARCÍA-LEÓN J., SÁNCHEZ-ALLEGUE P., PEÑA-VELASCO C., CIPRIANI L., FANTINI F. 2018, *Interactive dissemination of the 3D model of a baroque altarpiece: A pipeline from digital survey to game engines*, «SCIRES-IT», 8, 2, 59-76 (<https://doi.org/10.2423/i22394303v8n2p59>).
- 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>).
- GRECO G., BATTISTELLI P. 2002, *Lo sviluppo architettonico del complesso del teatro di Ostia alla luce delle recenti indagini nell'edificio scenico*, «Mélanges de l'École française de Rome: Antiquité», 114.1, 391-420 (<http://digital.casalini.it/10.1400/13533>).
- GROS P. 1997, *Vitruvio de Architectura*, Torino, Einaudi.
- GUIDI G., FRISCHER B., LUCENTI I. 2007, *Rome Reborn. Virtualizing the ancient imperial Rome*, in F. REMONDINO, S. EL-HAKIM (eds.), *3D-ARCH 2007, Atti del Convegno Internazionale Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures (Zurigo 2007)*, ISPRS Archives-XXXVI-5/W47 (https://www.isprs.org/proceedings/xxxvi/5-W47/pdf/guidi_etal.pdf).

- INGLIERI R.U. 1939, *Il teatro romano di Ricina*, Siracusa, Società Tip. di Siracusa.
- LIAROKAPIS F., KOUŘIL P., AGRAFIOTIS P., DEMESTICHA S., CHMELÍK J., SKARLATOS D. 2017, *3D modelling and mapping for virtual exploration of underwater archaeology assets*, in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 425-431 (<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-425-2017>).
- MALFITANA D., GABELLONE F., CACCIAGUERRA G., FERRARI I., GIURI F., PANTELLARO C. 2016, *Critical reading of surviving structures starting from old studies for new reconstructive proposal of the Roman theatre of Catania*, in J.L. LERMA, M. CABRELLES (eds.), *ARQUEOLÓGICA 2.0, Proceedings of the the 8th International Congress on Archaeology, Computer Graphics, Cultural Heritage and Innovation (Valencia 2016)*, València, Editorial Universitat Politècnica de València, 155-161 (<https://doi.org/10.4995/arqueologica8.2016.3556>).
- MANZETTI M.C., PAPADOPOULOS N.T. 2021, *Being a spectator in a Roman theatre: A VR APP*, in A. BELLIA (ed.), *From Digitalisation and Virtual Reconstruction of Ancient Musical Instruments to Sound Heritage Simulation and Preservation*, «Archeologia e Calcolatori», 32.1, 457-468 (<https://doi.org/10.19282/ac.32.1.2021.25>).
- MODONA A.N. 1961, *Gli edifici teatrali greci e romani*, Firenze, L. Olschki Editore.
- NICCOLUCCI F., BEACHAM R., DENARD H. 2006, *An introduction to the London Charter*, in M. IOANNIDES, D.B. ARNOLD, F. NICOLUCCI, K. MANIA (eds.), *The E-volution of ICTechnology in Cultural Heritage: Where Hi-Tech Touches the Past: Risks and Challenges for the 21st century, Proceedings of the Joint Event CIPA/VAST/EG/EuroMed Event (Cipro 2006)*, Budapest, Archeolingua (https://www.academia.edu/1229183/An_introduction_to_the_london_charter?auto=citations&from=cover_page).
- PALOMBINI A., FANINI B. 2019, *Il museo virtuale della Valle del Calore*, in P. GROSSI, A. CARAVALE, P. BASSO (eds.), *ArcheoFOSS. Free, Libre and Open Source Software e Open Format nei processi di ricerca archeologica, Atti del XII Workshop (Roma 2018)*, «Archeologia e Calcolatori», 30, 487-490 (<https://doi.org/10.19282/ac.30.2019.36>).
- PERNA R. 2018, *Problemi di viabilità romana nelle valli del Potenza e del Chienti: per un approccio pluridisciplinare*, «Agri Centuriati: An International Journal of Landscape Archaeology», 15, 83-98.
- PERNA R. 2019, *Comunicare il paesaggio archeologico: dallo studio del territorio al plastico virtuale interattivo per la ricostruzione del catasto della città romana di Urbs Salvia*, in A. ANDREOLI (ed.), *Ambiente e società antica. Temi e problemi di geografia storica padano-adriatica. Atti della giornata di studi in ricordo di Nereo Alfieri (Ferrara 2015)*, Ferrara, Edizioni Cartografica, 171-198.
- REILLY P. 1991, *Towards a Virtual Archaeology*, in CAA90. *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology 1990*, BAR International Series 565, Oxford, Tempus Reparatum, 132-139.
- SANTONI M. 1877, *Il teatro dell'antica Recina*, Camerino, Borgarelli.
- SEAR F. 2006, *Roman Theatres: An Architectural Study*, Oxford, University Press.
- STONE R.J. 1999, *Virtual Heritage*, «UNESCO's World Heritage Magazine», 18-20.
- TACCOLA E., ROSSELLI L., ALBERTINI N., MARTINO M. 2021, *Etruscan hypogea in 3D: A proposal for an immersive and interactive visualization of Volterra's funerary contexts*, in V. BALDONI (ed.), *From Pottery to Context. Archaeology and Virtual Modelling*, «Archeologia e Calcolatori», 32.2, 135-152 (<https://doi.org/10.19282/ac.32.2.2021.12>).
- TOSI G., BACCELLE L. 2003, *Gli edifici per spettacoli nell'Italia romana*, Roma, Quasar.
- VERMEULEN F., VAN LIMBERGEN D., MONSIEUR P., TAELEMAN D. 2017, *The Potenza Valley Survey (Marche, Italy): Settlement Dynamics and Changing Material Culture in an Adriatic Valley between Iron Age and Late Antiquity*, Roma, ESS Editorial Service System Srl.
- WARE C. 2012, *Information Visualization, Third Edition: Perception for Design*, Durham, Morgan Kaufmann.

ABSTRACT

This paper presents a workflow developed thanks to the collaboration between archaeologists and engineers, aimed at the documentation, representation and virtual fruition of an archaeological site. The purpose is to exploit the data acquired through digital solutions and the consequent elaboration of a reality 3D model to support archaeological studies and to effectively disseminate their results. The presented case study is the Roman Theatre of *Ricina* (Villa Potenza, MC). The building has preserved much of its masonry, but it is very different from that which could be appreciated by the audience of theatrical performances in Roman times. The work has been developed according to three steps: 1) digital documentation of the site and elaboration of a reality-based 3D model; 2) study of the archaeological finds thanks to the reality-based 3D model and design of a possible reconstruction, represented through a second 3D model elaborated by anastylosis; 3) development of a Virtual Reality environment for the fruition and the interaction with the two 3D models. The final output is therefore an immersive VR application that offers the possibility to access to the theatre both in its current form and in the original one. An experience that is not limited to a simple visualization rather presenting itself as a guided tour across the centuries.

