

APPLICAZIONI DI PALEONTOLOGIA VIRTUALE SU RESTI FOSSILI E BLOCCHI OSSIFERI DI CAVA MONTICINO (BRISIGHELLA, RA)

Saverio Bartolini-Lucenti¹, Omar Cirilli², Luca Pandolfi¹, Marco Sami³, Giovanni Luca Dedola⁴, Lorenzo Rook¹

Riassunto

Le tecniche digitali di acquisizione di dati tridimensionali (scansioni tomografiche, fotogrammetriche o di superficie) stanno trovando applicazione sempre più ampia e diffusa sia in ambito di ricerca che museale. Ciò è dovuto ai numerosi vantaggi che i campioni 3D offrono tanto per la ricerca (acquisizione di dati su volumi interni, caratteristiche strutturali dei campioni, geometrie a tutto tondo per analisi statistiche, ecc.) quanto per i musei (divulgazione più efficace, *edutainment*, occasione per pratiche di open-science, ecc.). Anche in paleontologia, una branca di recente sviluppo, è la Paleontologia Virtuale, che si è sviluppata sempre di più negli ultimi dieci anni, soprattutto grazie alla comparsa di tecniche sempre innovative per lo studio dei fossili. Appliciamo qui delle tecniche digitali di acquisizione 3D tomografiche e tramite scanner ad alta risoluzione ai fossili di Cava Monticino, descrivendo l'uso, le possibilità, i limiti e discutendone i vantaggi sia scientifici che espositivi di tali applicazioni.

Parole chiave

Modelli tridimensionali, Tecniche digitali, Paleontologia Virtuale, Scanner 3D, TAC

Abstract

Digital techniques that allow acquiring tridimensional data (i.e., CT-scans, photogrammetric and surface scans) are more and more of use among researchers and museum of natural sciences. This is a consequence of the advantages that such methodologies grant to science (large amount of data acquisition, information on internal volumes and structural characteristics of the specimens, geometries for statistical analyses, etc.) to museum institutions (more effective dissemination, *edutainment*, practices of open-science, etc.). Even Paleontology has witnessed the arise of a new branch, Virtual Paleontology, which is becoming pervasive in the study of fossils, especially for the continuous development of innovative ways to approach, inspect and reconstruct them. Here we apply digital acquisition methodologies to the fossils of Cava Monticino (both CT and high-resolution surface scans, describing the use of such techniques, their possibilities, their limits and assessing the advantages of their application in terms of scientific research and in museum exhibition.

Keywords

3D models, Digital techniques, Virtual Paleontology, 3D scans, CT scans

Introduzione

La Paleontologia Virtuale è lo studio dei reperti fossili attraverso nuovi metodi digitali. Questo settore è relativamente recente, dato che i primi studi sono riferibili all'inizio degli anni 2000, e la sua espansione ha decisamente rivoluzionato la percezione attuale della Paleontologia. Infatti, da disciplina "polverosa e antica", la Paleontologia è diventata progressivamente

sempre più affascinante, moderna e aperta a numerose nuove tecniche di indagine e all'applicazione di nuove tecnologie (CUNNINGHAM *et alii* 2014; SUTTON, RAHMAN, GARWOOD, 2014; TAPANILA, RAHMAN 2016; PANDOLFI *et alii* 2020).

Varie metodologie consentono di acquisire dati in formato digitale, che si differenziano per risoluzione, accessibilità, tipo di formato e possibilità di archiviazione. In linea generale, queste metodologie si sud-

¹ Università degli Studi di Firenze, Dipartimento di Scienze della Terra, Via G. La Pira 4, 50121 Firenze (FI) – saverio.bartolinilucenti@unifi.it, luca.pandolfi@unifi.it, lorenzo.rook@unifi

² Dottorato Regionale in Scienze della Terra, Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Pisa, Via S. Maria 56, 56126 Pisa (PI) – omar.cirilli@phd.unipi.it

³ Museo Civico di Scienze Naturali di Faenza, Via Medaglie d'oro, 51, 48018 Faenza (RA) – marco.sami@cheapnet.it

⁴ Direttore, Struttura Operativa Complessa (SOC) Radiologia Firenze II e Struttura Operativa (SOS) Radiologia San Giovanni di Dio, Via Torregalli, 3, 50143 Firenze (FI) – giovanniluca.dedola@uslcentro.toscana.it

dividono principalmente in due categorie: immagini tomografiche, mediante tomografi sia medicali che industriali (comunemente conosciute come TAC, acronimo di tomografie assiali computerizzate, in inglese *CT-scan*), e acquisizione di superfici esterne (modelli 3D) mediante l'uso della fotogrammetria o di scanner 3D. La principale differenza tra queste due grandi "famiglie" di metodi di acquisizione dati è che mediante le TAC è possibile acquisire informazioni relative alle morfologie interne di un reperto (tipo il cervello se si tratta di un cranio), mentre con la fotogrammetria e gli scanner 3D si acquisiscono modelli digitali che rappresentano solamente la superficie esterna, in alcuni casi registrando anche il colore originale. La digitalizzazione dei campioni mediante tutte queste metodologie (indipendentemente dalla modalità di acquisizione) è "non invasiva", non arreca cioè alcun danno ai reperti, in quanto questi sono metodi di indagine che non richiedono contatto o preparazione del campione. Ottenuti con una o poche scansioni, i modelli 3D garantiscono ai paleontologi il grande vantaggio di studiare diversi aspetti paleobiologici del fossile scansionato ed eseguire varie analisi senza maneggiare direttamente il reperto.

In aggiunta agli indubbi vantaggi per la ricerca, anche i musei hanno una vasta gamma di benefici nella digitalizzazione delle proprie collezioni per le loro finalità ostensivo/didattiche e di conservazione. Difatti, l'utilizzo di metodologie digitali in contesto museale sta diventando una pratica sempre più diffusa per ogni tipo di esposizione. Numerosi autori (PAVLIDIS *et alii* 2007; WACHOWIAK, KARAS 2009; BERNDT *et alii* 2010; KĘSIK *et alii* 2017; POLLALIS *et alii* 2017, 2018; DI PAOLA, MILAZZO, SPATAFORA 2017; BASTIR *et alii* 2019; BARTOLINI-LUCENTI *et alii* 2021a, 2021b) testimoniano i metodi e l'impatto positivo che tali tecniche hanno nelle realtà museali, dall'arte, all'archeologia, alle scienze naturali. Innanzitutto, la possibilità di conservare una copia virtuale di un esemplare, di qualsiasi natura esso sia, permette di tenere traccia del suo stato di conservazione. In questo senso, gli archivi digitali dei musei consentirebbero, ad esempio, di programmare restauri per esemplari particolarmente fragili.

Se poi torniamo ai fossili, una volta digitalizzati, i loro modelli 3D consentono applicazioni di diverse e recenti tecniche di studio, direttamente applicate all'ambiente della realtà virtuale (LAUTENSCHLAGER 2016; KOGAN *et alii* 2020). Fossili schiacciati, deformati o incompleti possono essere ricostruiti utilizzando alcune tecniche di restauro digitale che consentono di superare alcuni limiti imposti dai processi di fossilizzazione. Questo consente anche ai curatori dei musei di offrire al grande pubblico ricostruzioni più realistiche e veritiere di animali estinti da tempo. I recenti

progressi nelle scienze computazionali consentono oggi l'uso di protocolli matematici per retrodeformare virtualmente un reperto deformato. In un recente studio (CIRILLI *et alii* 2020) è stato messo a punto, descritto e utilizzato un nuovo metodo (chiamato *Target Deformation*) per ripristinare la morfologia originale del cranio tipo di *Equus stenonis* (la zebra del Pleistocene inferiore, scoperta e descritta per la prima volta nel Valdarno superiore), che si presenta deformato e fortemente compresso lateralmente. Questa tecnica si basa su metodologie statistiche di morfometria geometrica utilizzando un campione non deformato usato come modello per eseguire la retrodeformazione (da qui il nome *target*), in modo che l'algoritmo rimodelli automaticamente su di esso il reperto originale deformato. Per la prima volta dopo la sua descrizione nel XIX secolo, le "vere" morfologie e proporzioni di un esemplare così prezioso possono essere finalmente mostrate a chiunque.

Un altro settore in forte espansione e fortemente legato al mondo della Paleontologia Virtuale è quello della stampa 3D. Le stampanti 3D, infatti, con i relativi software e materiali (e.g., resine) stanno diventando sempre meno costosi e il loro uso in ambito museale può offrire indubbi vantaggi per diversi motivi, partendo dalle esposizioni, passando per la divulgazione e arrivando fino al marketing. Le stampe di oggetti 3D garantiscono l'opportunità di ampliare le classiche esposizioni museali (BASTIR *et alii* 2019), possono inoltre essere messe a disposizione dei visitatori per essere toccate e manipolate, consentendo alle persone con disabilità visive di godersi le collezioni di un museo grazie ad esperienze sensoriali tattili, mantenendo gli esemplari originali, magari fragili, in luoghi sicuri. Inoltre, le tecniche di imaging digitale consentono di accedere a porzioni interne di fossili (come cervello, cavità interne, camere interne di invertebrati, ecc.) e, conseguentemente, tali strutture possono essere stampate e mostrate al pubblico, promuovendo la divulgazione scientifica e la fruizione di "nuovi reperti" che normalmente non sarebbero disponibili ai visitatori. Naturalmente, i fossili digitali sono utili anche per la divulgazione scientifica e offrono ai musei l'opportunità di aumentare la visibilità e il coinvolgimento con il grande pubblico. L'attrattività delle ricostruzioni digitali è infatti un potente strumento che consente ai visitatori di vivere le collezioni museali in modo più innovativo, soprattutto se includono realtà aumentata (AR), realtà virtuale (VR) o una commistione delle due (*inter alios* POLLALIS *et alii* 2017, 2018). Questo vale anche per altri contenuti scientifici come, ad esempio, i risultati di una ricerca. BARTOLINI-LUCENTI *et alii* (2020) hanno sperimentato per la prima volta la realtà aumentata (AR) in un articolo scientifico de-

scrivendo una specie nuova per la scienza e rinvenuta nel sito paleolitico di Dmanisi nel Caucaso meridionale in Georgia. Come nel caso delle scansioni ad alta risoluzione dei fossili georgiani di Dmanisi, la realtà aumentata offre la possibilità al lettore dell'articolo, o al visitatore del museo, di accedere a una visualizzazione potenziata delle morfologie di un fossile, molto più efficace rispetto a quanto non sia la riproduzione fotografica classica. La realtà aumentata consente inoltre di eseguire confronti tra modelli digitali (ad esempio tra specie fossili e specie esistenti) o tra modelli digitali e campioni fisici. L'estensivo utilizzo di modelli 3D e di programmi di realtà aumentata/virtuale o mista aumenterebbe fortemente l'impatto della ricerca scientifica e potrebbe avere importanti risultati anche nella divulgazione scientifica.

Infine, la digitalizzazione degli esemplari fossili offre un'interessante opportunità per implementare le buone pratiche della "Open Science". Come altri tipi di file digitali, i modelli 3D di fossili possono essere scambiati facilmente (attraverso e-mail, o scaricate da portali dedicati). Questo aspetto ha un grande potenziale per l'intera comunità scientifica e, in questo caso, paleontologica. Infatti, l'uso costante e sempre più diffuso dei modelli 3D consente a ricercatori provenienti da luoghi lontani di studiare, vedere o visitare collezioni di musei senza dover affrontare viaggi e soggiorni in Musei magari lontani dal luogo di residenza o di lavoro, aiutando così ad abbattere barriere fisiche e promuovendo la collaborazione tra i ricercatori.

Applicazioni di paleontologia virtuale al materiale di Cava Monticino

I fantastici reperti e i blocchi ossiferi rinvenuti a Cava Monticino, conservati e esposti presso il Museo Civico di Scienze Naturali "Malmerendi" di Faenza sono stati digitalizzati usando diverse tecniche virtuali grazie alla strumentazione di scansione di superficie ad alta risoluzione in dotazione al Paleo[Fab]Lab del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Firenze e a tomografie assiali computerizzate effettuate presso la Struttura Operativa (SOS) Radiologia dell'Ospedale Nuovo San Giovanni di Dio (Torregalli) di Firenze, grazie alla collaborazione tra Fondazione Santa Maria Nuova di Firenze e Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Firenze.

- Scansioni 3D di superficie

Le acquisizioni digitali dei fossili di Cava Monticino hanno previsto l'utilizzo di tre scanner 3D, diversi per la conformazione, utilizzo, area scansionata e risolu-

zione. I primi due sono scanner portatili, Artec Eva e Artec Spider, che differiscono tra loro per la dimensione dell'area di scansione (in inglese *field of view* o FoV) che hanno: il primo ha un FoV che può spaziare tra un minimo di 24,4 x 14,2 cm e i 83,8 x 48,8 cm e una distanza di lavoro che deve essere compresa tra i 40 e i 100 cm (www.artec3d.com); Artec Eva può quindi scansionare oggetti che siano non più piccoli di 10-20 cm. Artec Spider ha un FoV che varia tra i 9 x 7 cm e i 18 x 14 cm e una distanza di scansione molto più ravvicinata al pezzo da digitalizzare, tra i 20 e 30 cm (www.artec3d.com). Artec Spider è usato per scansionare oggetti piccoli, fino a qualche centimetro di grandezza, o che necessitino di maggior dettaglio rispetto ad Artec Eva. Difatti, questi diversi FoV e *working distance* si riflettono in diverse risoluzioni per questi due scanner. Artec Eva ha una risoluzione tridimensionale di 0,2 mm ed un'accuratezza della mesh (cioè dell'oggetto digitale tridimensionale creato dall'elaborazione dei dati) di 0,1 mm, mentre per Artec Spider la risoluzione è di 0,1 mm e l'accuratezza è di 0,05 mm. Il terzo scanner impiegato per la digitalizzazione del materiale di Cava Monticino è Artec Micro, uno scanner desktop che, come suggerisce il nome, è adatto per la scansione di oggetti di piccole e piccolissime dimensioni. Con una precisione tridimensionale di 10 µm e una risoluzione di 29 µm rivela perciò particolarmente adatto alla scansione di fossili minuti, come ad esempio denti o piccole ossa dello scheletro postcraniale. Tutti e tre gli scanner sono in grado di acquisire sia geometrie che *texture* (colori esterni della superficie) degli oggetti scansionati. Per gli scanner portatili Artec Eva e Spider il procedimento di scansione consiste in una serie di acquisizioni 3D del reperto in più norme, inquadrando l'oggetto o una porzione di esso e avendo cura di acquisire dati tridimensionali con un discreto grado di sovrapposizione tra una passata e l'altra (fig. 1). Tale accortezza non preclude la ricostruzione finale dell'oggetto scansionato ma ne facilita e velocizza l'elaborazione. Al contrario degli altri due scanner, per i quali gli oggetti sono generalmente posti su una piattaforma rotante che permetta di scansionarli senza bisogno che l'operatore si sposti attorno al pezzo, Artec Micro dispone di un braccio basculante con testa rotante sulla cui sommità è disposto un disco che costituisce la superficie di scansione, regolabile in base alle dimensioni del reperto grazie a spessori che alzino o abbassino (se rimossi) il campione rispetto all'area di ripresa tridimensionale (fig. 2). Grazie a queste dotazioni, la scansione risulta del tutto autonoma e automatizzata grazie al software nativo Artec Studio 15 Professional, che si occupa di acquisire porzioni limitate e



Fig. 1 – Scansione di un blocco ossifero (MSF 65) tramite lo scanner 3D ad alta risoluzione Artec Eva presso i locali del Museo Civico di Scienze Naturali “Malmerendi” di Faenza.

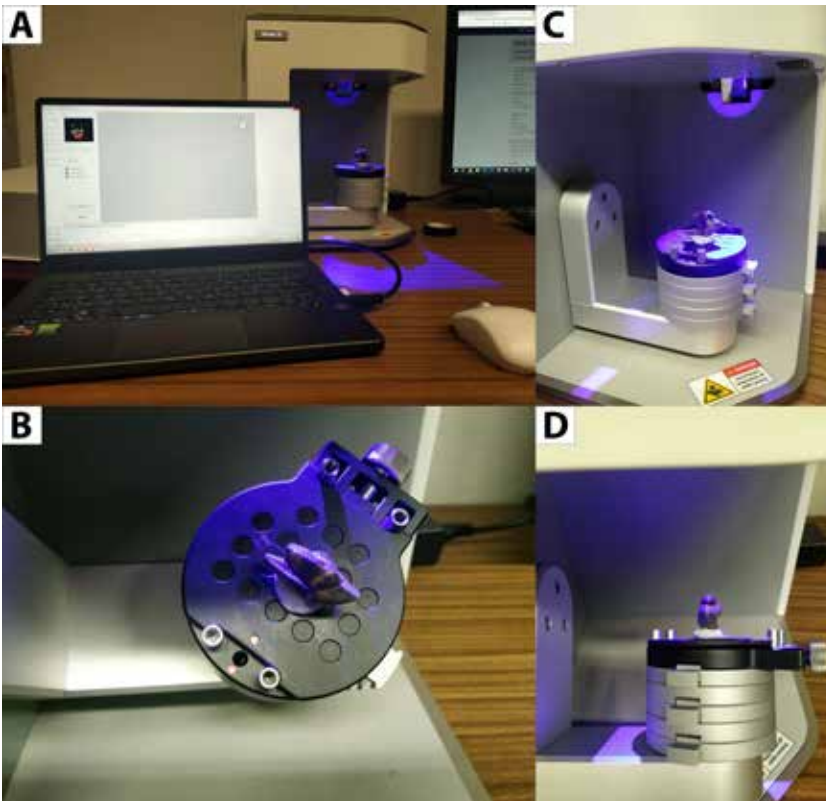


Fig. 2 – Set-up (A) e realizzazione della scansione ad alta risoluzione con lo scanner Artec Micro (B-D) di un dente di *Eucyon monticinensis*.

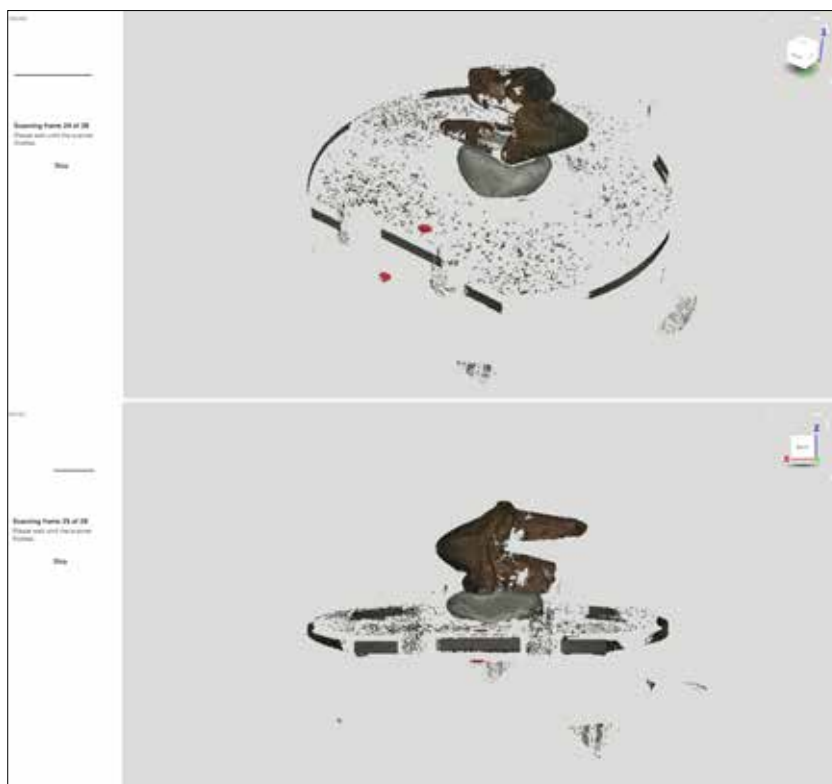


Fig. 3 – Acquisizione di singole scansioni sul un dente di *Lycyaena* da Cava Monticino che vengono acquisite ed elaborate in diretta dal programma Artec Studio 15 Professional.

con ampia sovrapposizione del campione da digitalizzare attraverso diversi percorsi di scansione (cioè combinazioni di movimenti del braccio basculante e rotazioni della testa che orientano l'oggetto in modo sempre diverso per ogni frame acquisito) preimpostati nel programma o personalizzabili dall'operatore (fig. 3). Indipendentemente dallo scanner usato, i dati grezzi sono registrati e elaborati in Artec Studio 15 Professional: il programma permette di realizzare tutti i passaggi della ricostruzione digitale, dalla cattura delle superfici tridimensionali, alla modifica e editing delle acquisizioni, dall'allineamento e costruzione della mesh, fino all'aggiunta della texture sull'oggetto tridimensionale e la sua esportazione nei file tridimensionali più comuni (.obj, .stl, .ply) (fig. 4) e (fig.5), sia che questi siano stati acquisiti con Artec Eva, Artec Spider o Artec Micro.

I risultati sono ottimi in ogni condizione di scansione nonostante la colorazione scura di alcuni campioni, che avrebbe potuto inficiare la ricostruzione tridimensionale (fig. 6). Si possono anche apprezzare i risultati della scansione in realtà aumentata scansionando il QR-code e poi il marker in fig. 7.

- Tomografie Computerizzate

I due blocchi ossiferi più rilevanti (MSF 62 e MSF 89) particolarmente ricchi di ossa sono stati anche sottoposti ad analisi tomografica, per indagare la presenza di eventuali fossili contenuti all'interno del sedimento

e non affioranti sulla superficie del blocco. La scansione tomografica è stata effettuata presso il reparto di Radiologia Medica (SOS Radiologia) dell'Ospedale S. Giovanni di Dio (Firenze) usando uno scanner Siemens Somatom Definition AS.

Per evitare eccessiva manipolazione dei campioni più fragili, la loro scansione è avvenuta all'interno dell'imballaggio usato per il trasporto in sicurezza degli stessi (fig. 8), mentre quelli meglio preservati sono stati esposti direttamente alla scansione (fig. 9). Sono stati usati differenti settaggi preimpostati del programma di scansione a seconda delle dimensioni dei campioni scansionati, in modo da raggiungere una risoluzione ottimale per ognuno di questi. La scansione ha prodotto 1392 immagini per il blocco ossifero MSF 89 e 758 per il blocco MSF 62, ognuna con una dimensione di 512x512 pixel, uno spessore di 0,6 mm e un passo di 0,4 mm. I campioni sono stati scansionati due volte con settaggi leggermente diversi: in particolare cambiando il parametro "kernel" (la matrice di convoluzione), ottenendo due dataset grezzi di ogni pezzo con sfocatura e affilatura diversa (fig. 10). I dati ottenuti con le scansioni sono stati analizzati con i software freeware MicroDicom viewer 3.9.5 e Blender 2.93 e il software Amira 5.4.5. I risultati ottenuti con il processo di scansione e le successive elaborazioni mostrano la presenza di un gran numero di ossa all'interno dei blocchi (fig. 10). Tuttavia, le elaborazioni di estrazione digitale di queste dalla matrice o dagli altri clasti che circondano le ossa dei blocchi MSF 62 e MSF 89 risul-

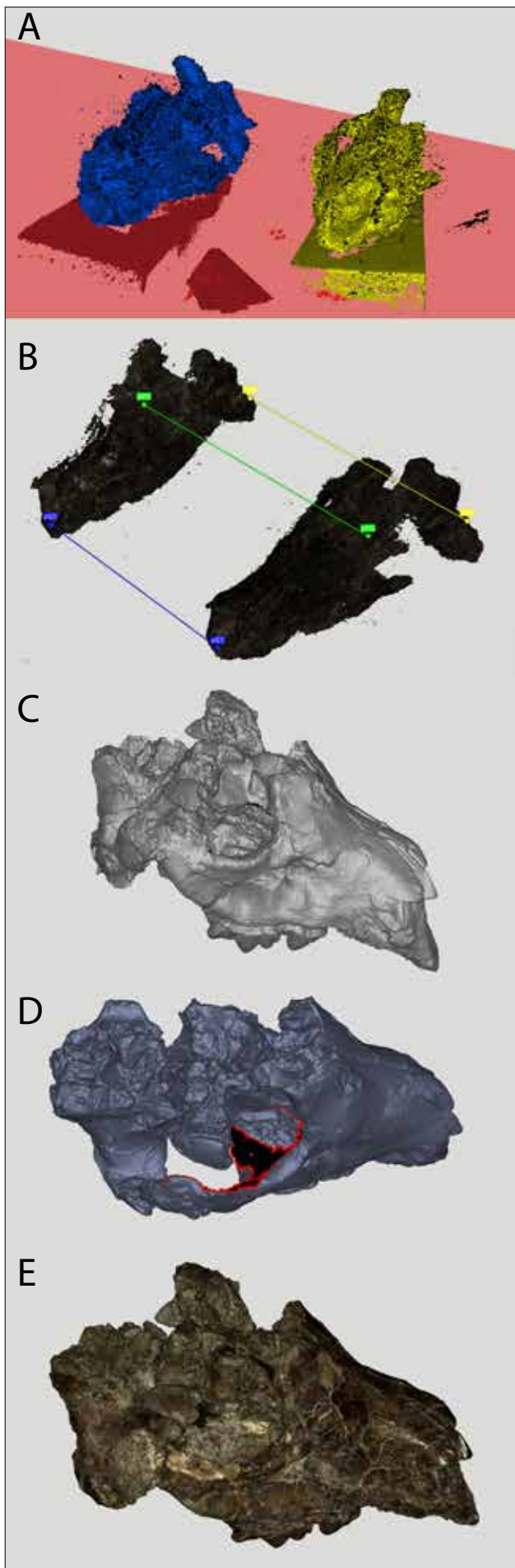
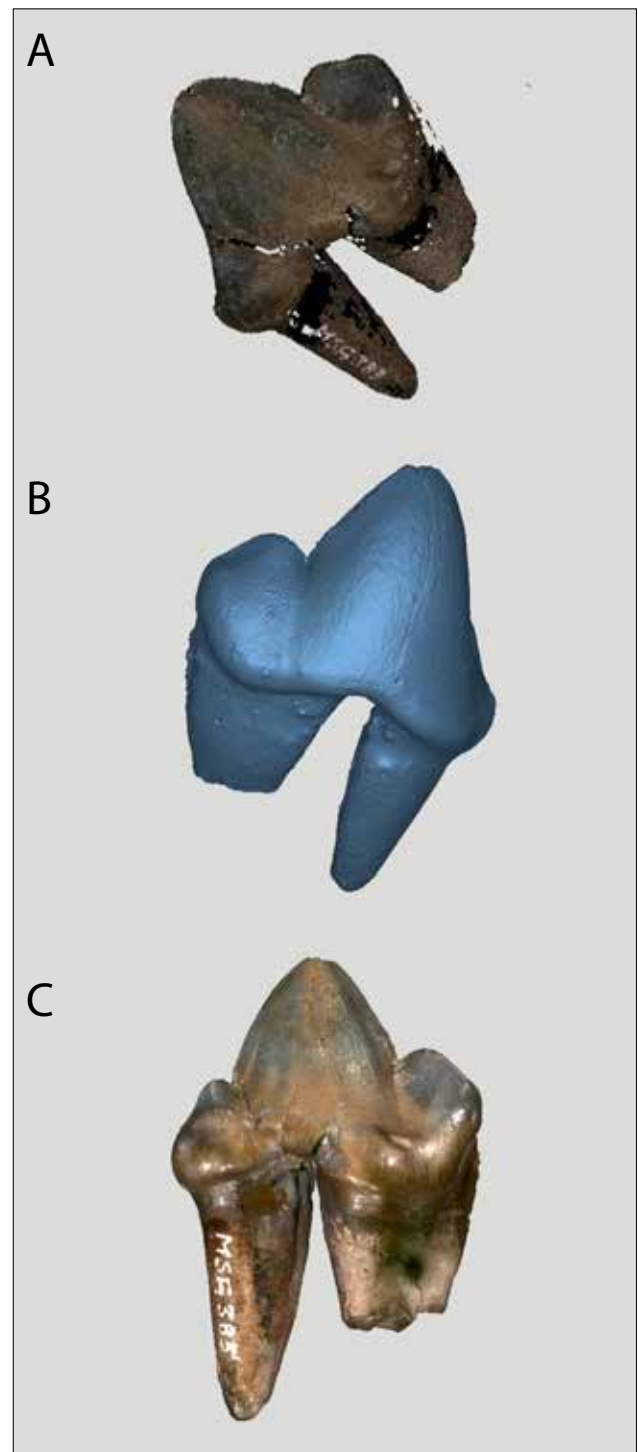


Fig. 4 (a sinistra) – Elaborazioni delle scansioni ottenute con gli scanner Artec Eva e Artec Spider. A, rimozione della base di scansione. B, allineamento delle due serie di scansioni. C, creazione della mesh tridimensionale. D, riempimento buchi. E, applicazione della texture sulla mesh ottenuta dalle elaborazioni.

Fig. 5 (in basso) – Elaborazioni delle scansioni ottenute con gli scanner Artec Micro. A, registrazione globale delle scansioni acquisite. B, creazione della mesh tridimensionale. C, applicazione della texture sulla mesh ottenuta dalle elaborazioni.



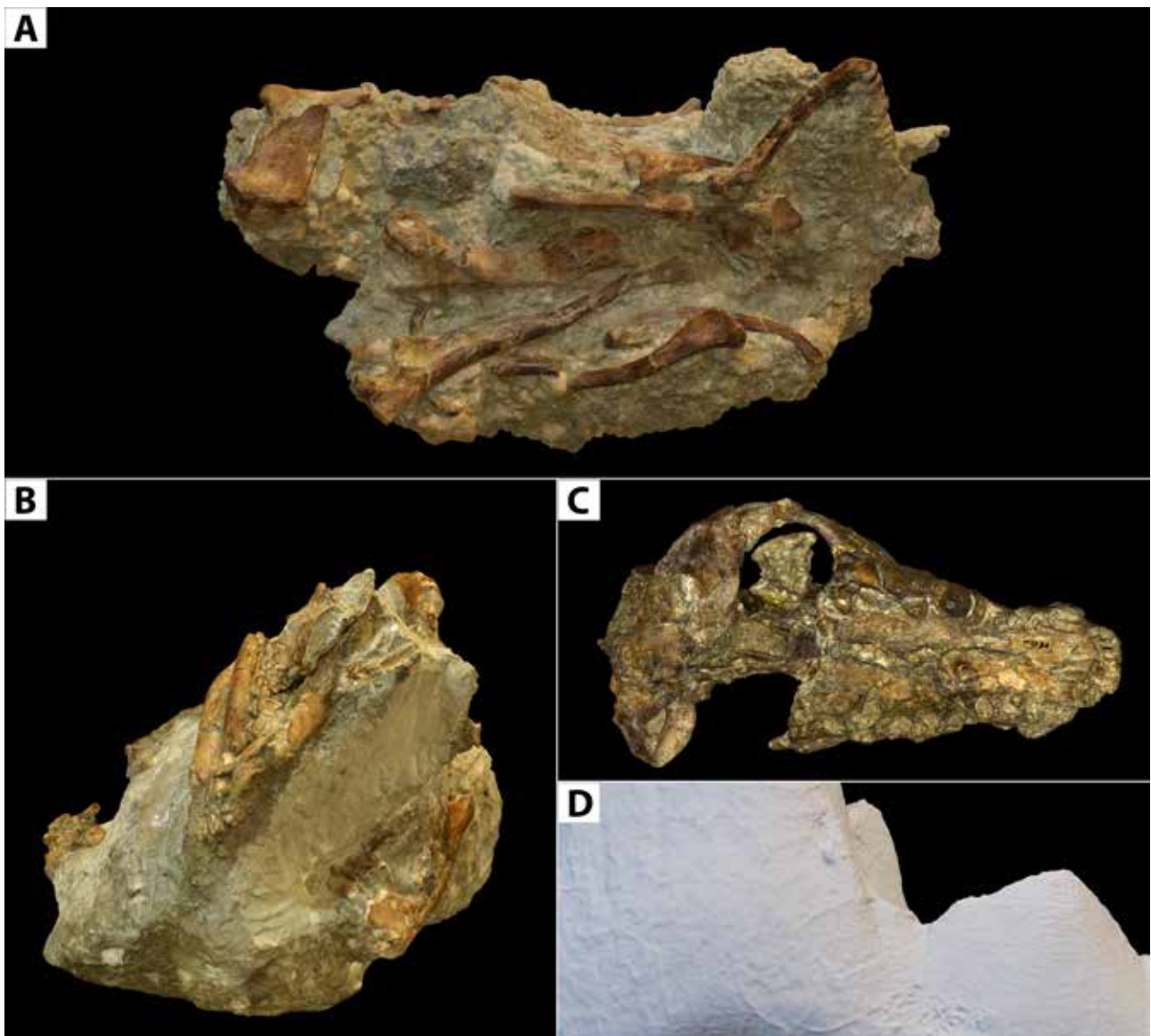


Fig. 6 – Risultati delle scansioni di superficie di fossili di Cava Monticino. A, blocco ossifero MSF 89 con numerose ossa postcraniali. B, blocco ossifero MSF 62. C, cranio di *Lycyaena* cf. *chaeretis*, MSF 84, in norma ventrale. D, dettaglio della mesh ottenuta dalla scansione di un dente di *Eucyon monticinensis*. Campioni non in scala.

tano particolarmente complesse. La densità dell'osso fossilizzato è sia incredibilmente simile a quella del sedimento (come nel caso di MSF 62) che ai clasti che costituiscono il microconglomerato del blocco MSF 89 (fig. 10). Neppure applicando kernel diversi (fig. 10) la qualità delle immagini per la ricostruzione migliora in quanto ad alti valori delle matrici di convoluzione (fig. 10A, C) la correzione della nitidezza applicata dal programma di scansione genera delle “interferenze” che disturbano sia in fase di visualizzazione che in fase di elaborazione, mentre per bassi valori (fig. 10B, D) risulta difficile apprezzare i contorni delle varie ossa, essendo essi meno definiti e marcati rispetto al sedimento circostante. Nonostante queste difficoltà, almeno nel caso di MSF 62, è stato possibile ottenere i modelli tridimensionali delle nu-

merose ossa contenute all'interno del blocco (fig. 11). La maggior parte di queste sono costituite da ossa postcraniali, principalmente vertebre caudali e metapodi, di un carnivoro di piccole dimensioni, presumibilmente *Plioviverrops*, e di uno di dimensioni medio-grandi, come ad esempio *Lycyaena*. Nel caso di fossili come MSF 89 dove la differenza di densità tra ossa, clasti e sedimento inglobante è veramente ridotta, l'estrazione del materiale postcraniale rimane comunque possibile ma considerevolmente lunga e complessa. Nonostante ciò, l'indagine tomografica ha permesso di mostrare, per la prima volta e in totale sicurezza per i campioni, che il contenuto fossilifero di questi blocchi è più abbondante e perfino più interessante di quanto ci si aspettasse ad un esame esterno.

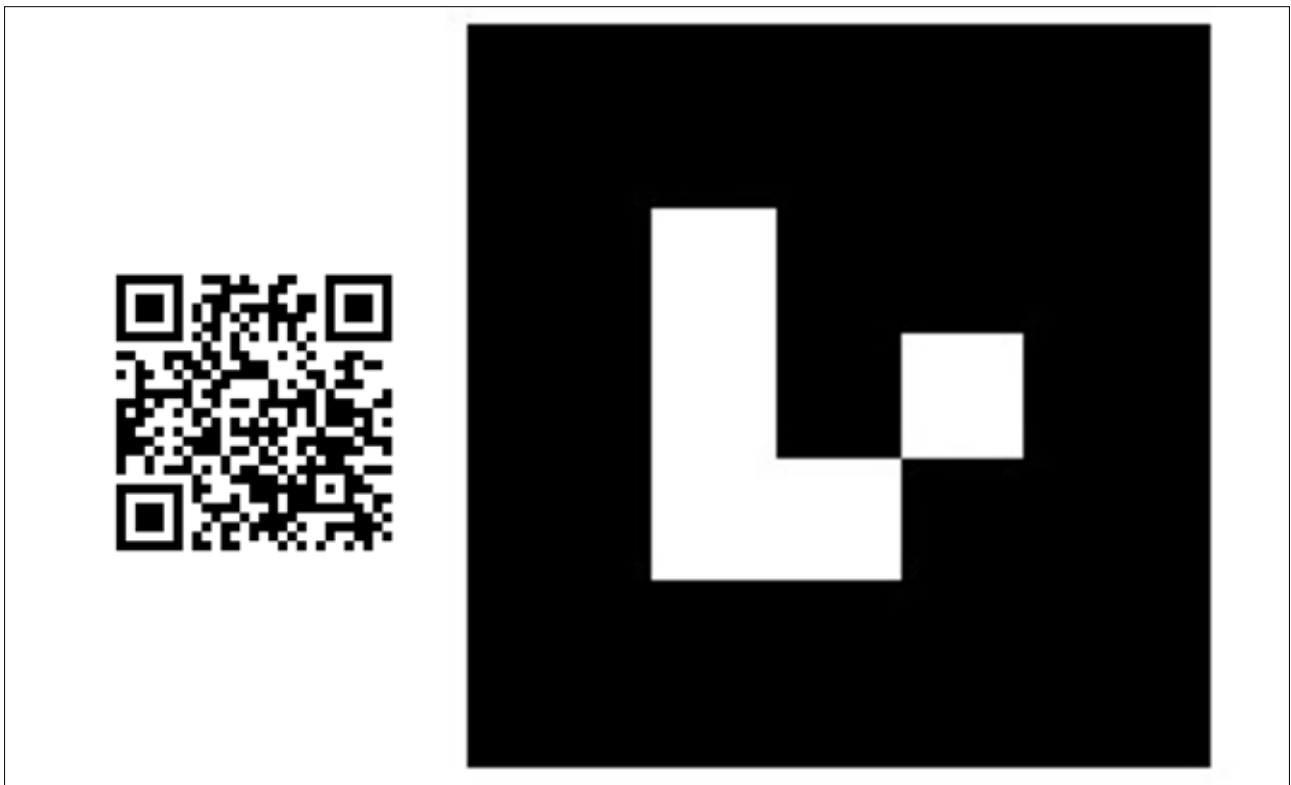


Fig. 7 – Applicazione web di realtà aumentata che permette di visualizzare il modello 3D del blocco MSF 62. Istruzioni come in BARTOLINI-LUCENTI *et alii* (2020): Scansionare con il proprio dispositivo mobile il codice QR sulla sinistra; aprire il link sul browser permettendo all'applicazione di accedere alla fotocamera del proprio dispositivo; puntare la fotocamera verso il marker (sulla destra); aspettare che il modello carichi (fino a 10 secondi). È possibile muovere il dispositivo intorno al marker (o muovere il marker) per vedere le diverse porzioni del modello 3D. Si veda l'Appendice per i problemi più comuni.

Conclusioni e Prospettive

L'uso di tecnologie per la ricostruzione digitale di reperti museali, non solo in contesto paleontologico, è diventato sempre più frequente, specialmente negli ultimi 10 anni. Grazie a queste applicazioni di paleontologia virtuale, ricercatori e curatori di collezioni hanno accesso ad una grande quantità di dati che permettono loro di studiare e divulgare più efficacemente e in dettaglio maggiore i fossili in studio. Questo vale anche per la ricca e interessante documentazione fossile di Cava Monticino. In particolare, nel caso dei blocchi ossiferi, come MSF 62 e MSF 89, l'indagine tomografica è andata ad aggiungersi a quella di superficie rivelando numerose ossa fossili celate all'interno del sedimento e inframmezzate ai clasti, come visibile nelle (fig. 10) e (fig. 11).

Come ricordato anche nei paragrafi precedenti, questi fossili digitali provenienti da scansioni tridimensionali di superficie o da analisi tomografiche, hanno un'alta attrattiva e permettono, con un dettaglio molto maggiore delle semplici fotografie bidimensionali, al pubblico che visita un'esposizione o semplicemente legge un articolo scientifico di



Fig. 8 – Scansione tomografica del blocco ossifero MSF 89 presso l'Ospedale San Giovanni di Dio di Firenze, contenuto all'interno dell'imballaggio usato per il trasporto e la manipolazione in sicurezza.



Fig. 9 – Scansione tomografica del blocco MSF 62 contenente diversi resti di *Plioviverrops faventinus*, realizzata presso l'Ospedale San Giovanni di Dio di Firenze.

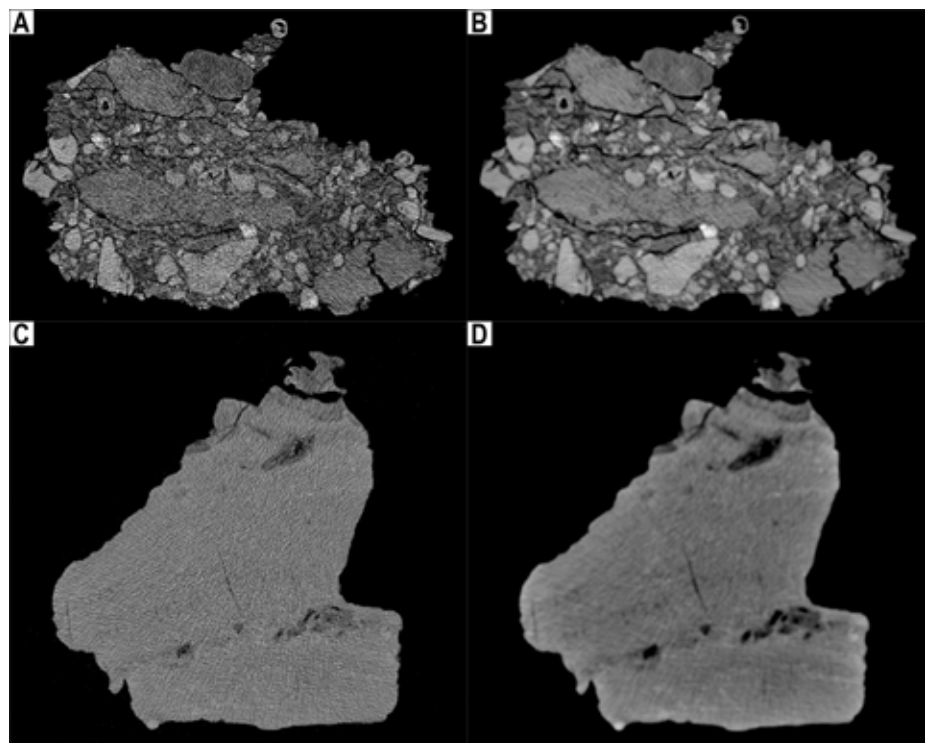


Fig. 10 – Dati grezzi delle scansioni dei blocchi MSF 89 (A-B) e MSF 62 (C-D) diversi per i parametri di kernel. A e C hanno parametri più elevati (che implicano una maggiore nitidezza delle immagini delle scansioni) mentre B e D hanno parametri delle matrici di convoluzione più bassi (che danno nitidezza minore alle immagini). Come si vede, i diversi parametri influenzano profondamente la capacità di discernere tra ossa, matrice inglobante e eventuali clasti.

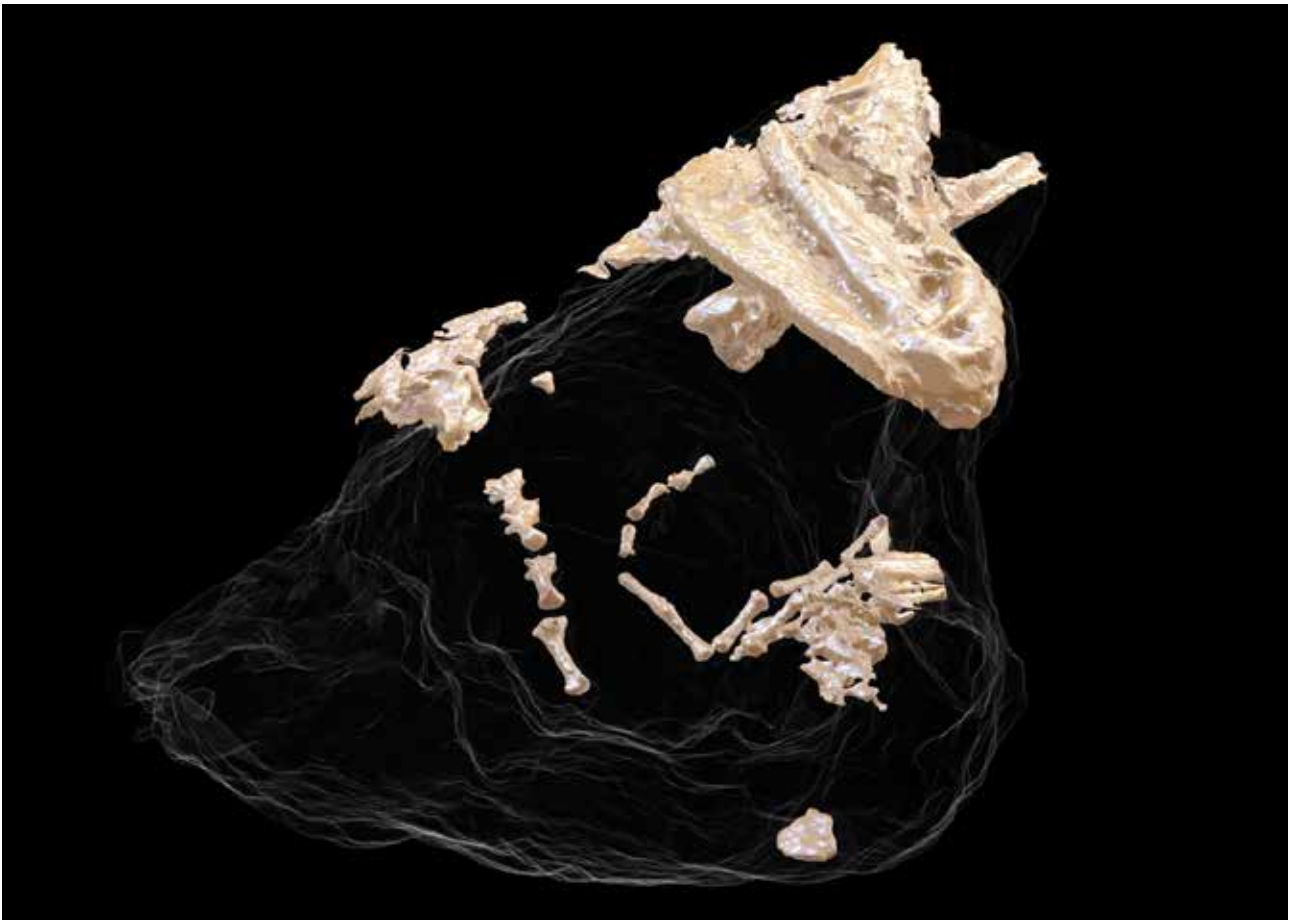


Fig. 11– Fossili preservati all'interno del blocco MSF 62 evidenziati dall'analisi tomografica e messi in evidenza grazie al processo di segmentazione.

apprezzare le morfologie, le diverse proporzioni tra le parti e le caratteristiche li contraddistinguono; inoltre, nel caso di immagini tomografiche, è possibile mostrare porzioni del reperto che altrimenti non sarebbero accessibili, quali le sue cavità interne (ad esempio l'endocranio in caso di vertebrati), o ancora di evidenziare elementi contenuti all'interno di blocchi, come mostrato prima sul reperto di Cava Monticino MSF 62 (fig. 11). L'alta attrattività dei questi contenuti educativi (che insieme ad altri sistemi che hanno lo scopo di educare intrattenendo il pubblico ricadono nella definizione inglese di *edutainment*) deriva dal fatto che i fossili 3D e le tecnologie di imaging digitale permettono al pubblico di interagire direttamente con il contenuto 3D in vari modi come applicazioni di realtà aumentata (si veda il caso di fig. 7 e BARTOLINI-LUCENTI *et alii* 2020), realtà virtuale, oppure anche semplicemente su schermi e apposite postazioni all'interno dei percorsi espositivi. La sperimentazione diretta porta il visitatore a comprendere ciò che osserva ad un livello più "intuitivo" rispetto alla semplice lettura, visione di una fotografia o di un resto al di là di una vetrina.

Se a questo aggiungiamo anche esperienze tattili, ad esempio stampando in 3D elementi altrimenti non accessibili di un fossile, ecco che la divulgazione risulterà più efficace e immediata.

Bibliografia

- S. BARTOLINI-LUCENTI, M. BUKHSIANIDZE, B. MARTÍNEZ-NAVARRO, D. LORDKIPANIDZE 2020, *The Wolf from Dmanisi and Augmented Reality: Review, Implications, and Opportunities*, "Frontiers in Earth Science" 8, pp.131.
- S. BARTOLINI-LUCENTI, G. DIONISIO, F. BIGONI, L. ROOK 2021a, *Of bears and boats: first digitalization of Ainu artifacts of the Anthropology and Ethnology Museum of Florence*, "Archivio per l'Antropologia e la Etnologia" CL, pp. 159-169.
- S. BARTOLINI-LUCENTI, G. DIONISIO, L. ROOK, F. BIGONI 2021b, *3D Digitalization of selected specimens of the Anthropology and Ethnology Museum of Florence with Artec Spider*, "Museologia Scientifica Memorie" Giugno 2021, pp. 123-127.

- M. BASTIR, D. GARCÍA-MARTÍNEZ, N. TORRES-TAMAYO, C. PALANCAR, F.J. FERNÁNDEZ-PÉREZ, A. RIESCO-LÓPEZ, P. OSBORNE-MÁRQUEZ, M. ÁVILA, P. LÓPEZ-GALLO 2019, *Workflows in a Virtual Morphology Lab: 3D scanning, measuring, and printing*, "Journal of Anthropological Sciences" 97, pp. 107-134.
- R. BERNDT, G. BUCHGRABER, S. HAVEMANN, V. SETTGAST, D. W. FELLNER 2010, *A publishing workflow for cultural heritage artifacts from 3d-reconstruction to internet presentation*, In M. Ioannides, D. Fellner, A. Georgopoulos, D. Hadjimitsis (a cura di) *Digital Heritage: Third International Euro-Mediterranean Conference* (EuroMed 2010, Lemessos, Cyprus, November 8-13, 2010. Proceedings Vol. 6436). Springer Science & Business Media, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 166-178.
- O. CIRILLI, M. MELCHIONNA, C. SERIO, R.L. BERNOR, M. BUKHSIANIDZE, D. LORDKIPANIDZE, L. ROOK, A. PROFICO, P. RAIA 2020, *Target deformation of the Equus stenonis holotype skull: A virtual reconstruction*, "Frontiers in Earth Science" 8, pp. 247.
- J.A. CUNNINGHAM, I.A. RAHMAN, S. LAUTENSCHLAGER, E.J. RAYFIELD, P.C.J. DONOGHUE 2014, *A virtual world of paleontology*, "Trends in Ecology and Evolution" 29(6), pp. 347-357.
- F. DI PAOLA, G. MILAZZO, F. SPATAFORA 2017, *Computer aided restoration tools to assist the conservation of an ancient sculpture: the colossal statue of Zeus enthroned*, "International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences" 42, pp. 177-183.
- J. KĘSIK, J. MONTUSIEWICZ, R. KAYUMOV 2017, *An approach to computer-aided reconstruction of museum exhibits*, "Advances in Science and Technology Research Journal" 11, pp. 87-94.
- I. KOGAN, M. RUCKI, M. JÄHNE, D.E. PASSOS, T. CVJETKOVIC, S. SCHMIDT 2020, *One Head, many Approaches. Comparing 3D Models of a Fossil Skull*. In: T. LUHMANN, C. SCHUMACHER (a cura di) *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messung Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2020*, Wichmann Verlag, Berlin, pp. 22-31.
- S. LAUTENSCHLAGER 2016, *Reconstructing the past: methods and techniques for the digital restoration of fossils*, "Royal Society Open Science" 3(10), 160342.
- L. PANDOLFI, J. FORTUNY, P. RAIA, L. ROOK (a cura di) 2020, *Evolving Virtual and Computational Palaeontology*, "Frontiers in Earth Science" 8, <https://www.frontiersin.org/research-topics/10737/>
- G. PAVLIDIS, A. KOUTSOUDIS, F. ARNAOUTOGLU, V. TSIUKAS 2007, *Methods for 3D Digitization of Cultural Heritage*, "Journal of Cultural Heritage" 8, pp. 93-98.
- C. POLLALIS W. FAHNBULLEH, J. TYNES, O. SHAER 2017, *HoloMuse: Enhancing engagement with archaeological artifacts through gesture-based interaction with holograms*. In J. Steimle, M. Inakage, E. Yi-Luen, O. Shaer, K. Kunze, R.L. Peiris (a cura di) *Proceedings of the Eleventh International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, ACM, pp. 565-570.
- C. POLLALIS, E.J. MINOR, L. WESTENDORF, W. FAHNBULLEH, I. VIRGILIO, A.L. KUN, O. SHAER 2018, *Evaluating learning with tangible and virtual representations of archaeological artifacts*. In: Y. FERNAEUS, D. MCMILLAN, M. JONSSON (a cura di) *TEI '18: Twelfth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction* (Stockholm, Sweden, March 2018. Association for Computing Machinery), New York, pp. 626-637.
- M. SUTTON, I. RAHMAN, R. GARWOOD 2014, *Techniques for virtual palaeontology*. John Wiley & Sons.
- L. TAPANILA, I.A. RAHMAN (a cura di) 2016, *Virtual Paleontology*, "The Paleontological Society Papers", volume 22, pp. 209.
- M.J. WACHOWIAK, B.V. KARAS 2009, *3D scanning and replication for museum and cultural heritage applications*, "Journal of the American Institute for Conservation" 48(2), pp. 141-158.

Ringraziamenti

Per la disponibilità e l'accesso alle strutture si ringraziano sentitamente Dr. Paolo Marchese Morello (Direttore Generale, Azienda Toscana centro), Dr. Giancarlo Landini (Fondazione Santa Maria Nuova), Dr. Stefano Michelagnoli (Direttore di Dipartimento Specialistiche Chirurgiche, Azienda Toscana Centro). Per la disponibilità e l'assistenza tecnica nell'esecuzione delle TAC di questi "vecchi pazienti" si ringrazia inoltre il personale tecnico sanitario di Radiologia Medica (SOS Radiologia) dell'Ospedale San Giovanni di Dio (Firenze). Un grazie a TBNET SOLUZIONI 3D (Arezzo) per il supporto tecnico, a Enzo Bagnaresi (Gruppo Speleologico Faentino) per l'accesso alle collezioni, e a Antonio ("Tonino") Benericetti per la sua passione e dedizione alla paleontologia del Monticino.

Visualizzazione e problemi più comuni nella fruizione del contenuto AR della fig. 7*

Un esempio di una corretta visualizzazione del contenuto digitale tramite la web-app di realtà aumentata è illustrato in fig. 12.

Guida all'uso della web-app di realtà aumentata

Innanzitutto, scansionare il QR-code sulla sinistra. Per farlo basterà utilizzare una qualsiasi app gratuita che trovate nell'App Store/Huawei AppGallery/PlayStore. N.B. Numerosi smartphone e tablet hanno già la funzione "scansione QR-code" all'interno della fotocamera.

Le migliori performance di visualizzazione dell'oggetto digitale si hanno con marker stampati, piuttosto che a schermo (su monitor di pc o altri dispositivi). Inoltre, stampe opache, che riducano i riflessi della luce, rappresentano le condizioni ottimali per una visualizzazione fluida e continua del contenuto AR.

Dispositivi iOS

Per visualizzare la web-app di realtà aumentata:

1. Concedere il permesso di accesso a Safari per aprire la fotocamera dell'iPhone o dell'iPad: ad esempio, selezionare Impostazioni > Safari > impostare il selettore "Accesso a Camera & Microfono", o dizioni simili, su attivo nel sottomenù "Privacy & Sicurezza".
2. Scansionare il QR-Code.
3. Aprire il link in Safari (N.B. l'applicazione ha qualche problema su Chrome per iOS o altri browsers, per cui non è garantita la corretta visualizzazione su tali applicazioni)
4. Se comparisse una notifica, confermare l'uso della fotocamera da parte di Safari (o del browser).
5. Puntare la fotocamera al marker, e attendere che il modello si carichi.

Per meglio visualizzare l'oggetto digitale è possibile cambiare l'orientamento del telefono portandolo da modalità portrait (verticale) a landscape (orizzontale) Se il modello dovesse scomparire dalla visualizzazione una volta passati alla vista landscape, sebbene fosse visibile in modalità portrait, ricaricare la pagina web.

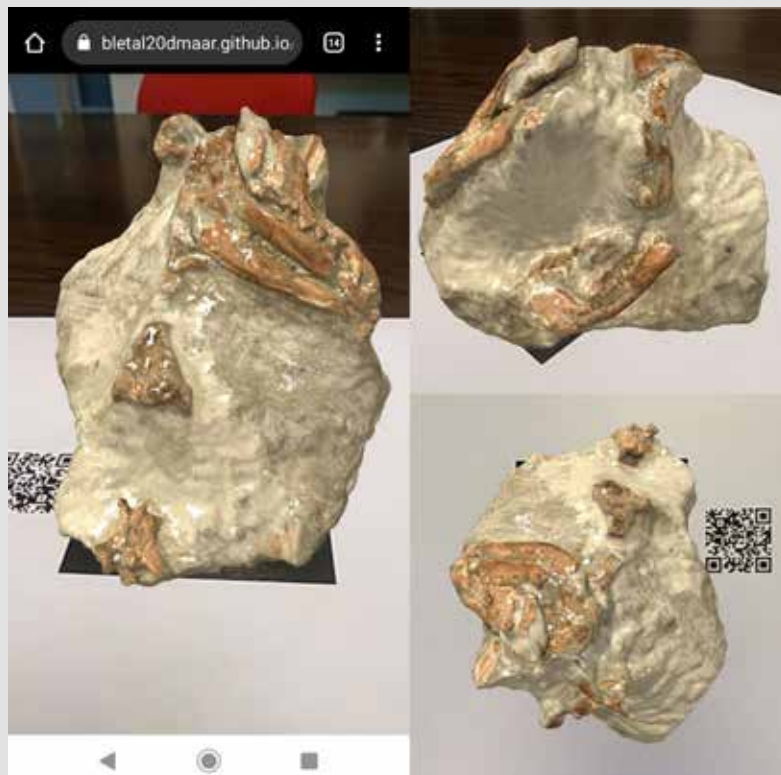
Dispositivi Android

Per visualizzare il QR-code: scegliere una qualsiasi app gratuita dall'App Store (controllare sempre che la fotocamera non abbia la funzione "scansione QR-code" integrata).

Per visualizzare la web-app di realtà aumentata:

1. Scansionare il QR-Code.
2. Aprire il link con il proprio browser (meglio con Chrome). Attenzione: alcune app per scansione di QR-code simulano i browser ma non permetteranno di visualizzare il contenuto digitale. Assicurarsi di copiare il link web e incollarlo nella propria app browser (Chrome, Firefox, ecc.).
3. Se comparisse una notifica, confermare l'uso della fotocamera da parte del browser.
4. Puntare la fotocamera al marker, e attendere che il modello si carichi.

Per meglio visualizzare l'oggetto digitale è possibile cambiare l'orientamento del telefono portandolo da modalità portrait (verticale) a landscape (orizzontale) Se il modello dovesse scomparire dalla visualizzazione una volta passati alla vista landscape, sebbene fosse visibile in modalità portrait, ricaricare la pagina web.



*(riferirsi anche a BARTOLINI-LUCENTI *et alii* 2020)

Fig. 12 – Esempio di corretta visualizzazione del contenuto digitale tramite la web-app di realtà aumentata.