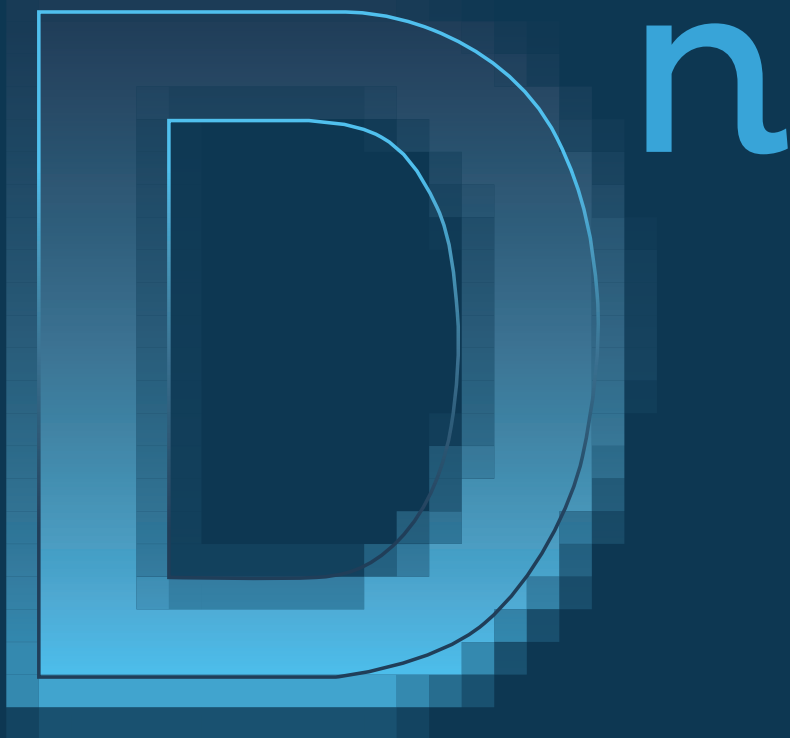
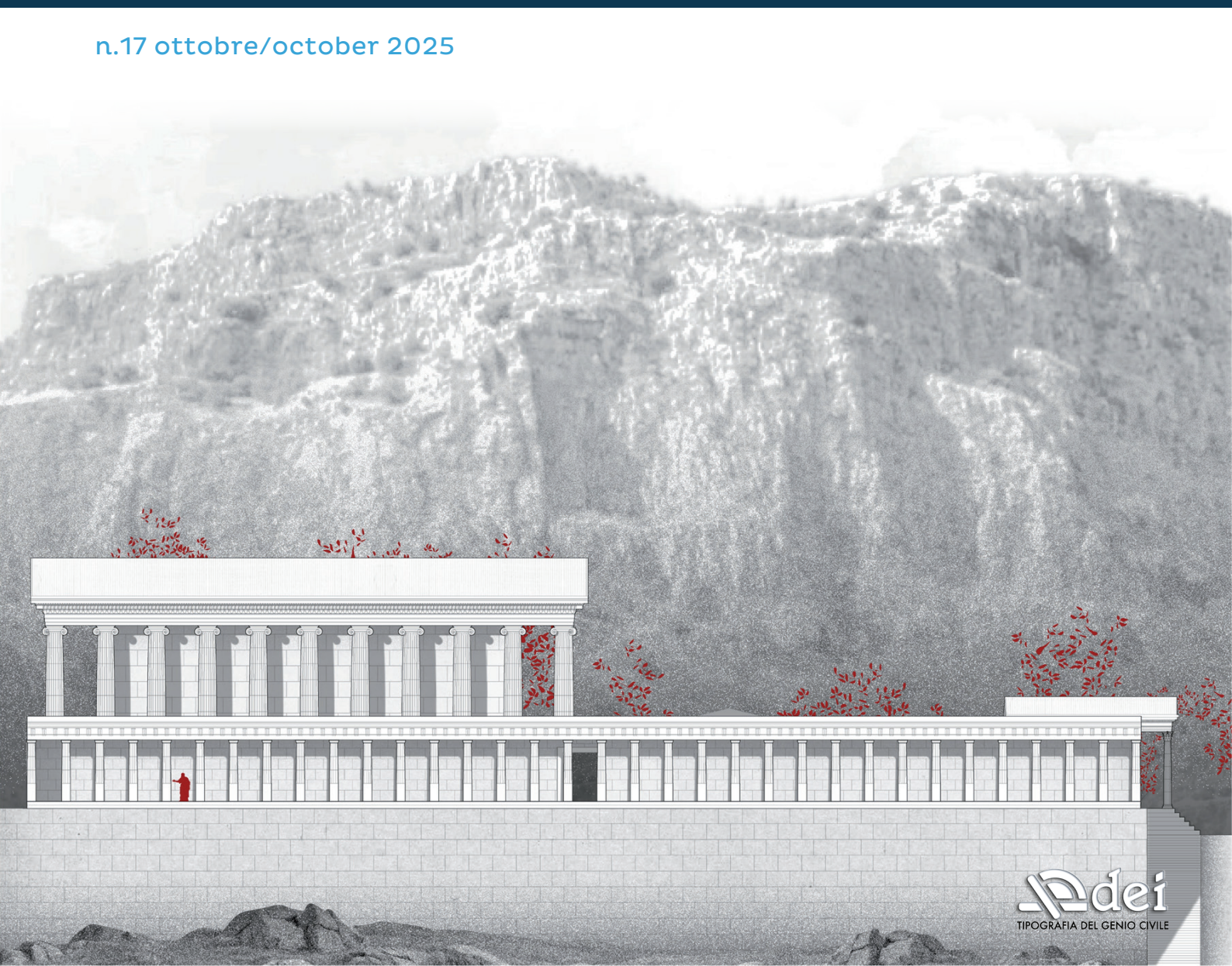




Building Information Modeling, Data & Semantics

n.17 ottobre/october 2025





INDICE/INDEX

EDITORIALE

EDITORIAL

C. Bolognesi

4

I MODELLI DEI DATI ARCHEOLOGICI NELL'HBIM

ARCHAEOLOGICAL DATA MODELS IN HBIM

T. Emler, A. Caldarone, P. Micelli

6

FORMA, FASE E FONTE: UN PARADIGMA HBIM PER LA DOCUMENTAZIONE DI SAN LORENZO IN MIRANDA

SHAPE, PHASE, AND SOURCE: AN HBIM PARADIGM FOR THE DOCUMENTATION OF SAN LORENZO IN MIRANDA

C. Bianchini, M. Griffo, F. Porfiri, G. Giuliani

28

VERSO UNO SCAVO ARCHEOLOGICO TRANSDISCIPLINARE, DIGITALE E REVERSIBILE: DAL RILIEVO ALLA
VALORIZZAZIONE DEL MODELLO VIRTUALETOWARDS A TRANSDISCIPLINARY DIGITAL WORKFLOW FOR REVERSIBLE ARCHAEOLOGICAL EXCAVATIONS:
FROM SURVEYING TO ENHANCING THE VIRTUAL MODEL*C. Luschi, M. Zerbini, N. Lecci, A. Vezzi*

43

IL MAUSOLEO DI CECILIA METELLA: RILIEVO INTEGRATO E ANALISI ARCHITETTONICHE PRELIMINARI

THE MAUSOLEUM OF CAECILIA METELLA: INTEGRATED SURVEY AND PRELIMINARY ARCHITECTURAL ANALYSES

S. Lucchetti, R. Ravesi

49

DALLO SCAVO AL RACCONTO VISIVO: METODOLOGIE PER LA VALORIZZAZIONE DEL COMPLESSO NURAGICO DI PALMAVERA

FROM EXCAVATION TO VISUAL NARRATIVE: METHODOLOGIES FOR ENHANCING THE PALMAVERA NURAGIC COMPLEX

A. Fusinetti, N. Proietti Cosimi

74

ECHOES OF ATHENA: UN APPROCCIO HBIM PER LA RICOSTRUZIONE VIRTUALE DEL TEMPIO DI ATENA POLIADE
E DELLA STOA DORICA DI PRIENEECHOES OF ATHENA: AN HBIM APPROACH FOR THE VIRTUAL RECONSTRUCTION OF THE TEMPLE OF ATHENA POLIAS
AND DORIC STOA OF PRIENE*E. C. Giovannini, L. O. Ochoa, F. Racciu*

88

Curatore del numero Editor in Chief

Cecilia Bognesi, *Politecnico di Milano, Milano, Italy*

Direzione Scientifica Associated Editors

Cecilia Bognesi, *Politecnico di Milano, Milano, Italy*
Tommaso Empler, *Sapienza Università di Roma, Roma, Italy*
Massimiliano Lo Turco, *Politecnico di Torino, Torino, Italy*

Laura Inzerillo, *Università degli Studi di Palermo, Palermo, Italy*
Sandro Parrinello, *Università degli Studi di Firenze, Firenze, Italy*
Francesco Ruperto, *Sapienza Università di Roma, Roma, Italy*

Cettina Santagati, *Università degli Studi di Catania, Catania, Italy*
Graziano Mario Valenti, *Sapienza Università di Roma, Roma, Italy*

Comitato Scientifico Scientific Committee

Pietro Baraton, *Provveditore Interregionale per le OO.PP. Lombardia ed E.Romagna*
Angelo Ciribini, *Presidente ISTE, Università di Brescia, Brescia, Italy*
Bruno Daniotti, *Project Manager InnovAnce, Politecnico di Milano, Milano, Italy*
Alberto Pavan, *Coordinatore norma UNI 11337, Responsabile Scientifico InnovAnce, Politecnico di Milano, Milano, Italy*
Gregorio Cangialosi, *BIM Manager and BIM Strategist, Studio CABE, Torino, Italy*
Anna Dell'Amico, *Università degli Studi di Pavia, Pavia, Italy*
Emmanuel di Giacomo, *EMEA BIM & AEC Ecosystem Business, France*

Graziano Lento, *Anafyo Sagl, Ticino, Switzerland*
Paolo Galli, *Implementation Consultant BIM, Milano, Italy*
Diego Minato, *BIM Manager & Technical Consultant | BIM Strategist, Treviso, Italy*
Orges Lesha, *BIM Manager, SA Architects, Sdn Bhd, Kuala Lumpur, Malaysia*
Chiara Rizzarda, *Deputy BIM Manager at Antonio Citterio Patricia Viel, Milano, Italy*
Yoseph Bausola Pagliero, *VPL and BIM expert, Roma/ Torino, Italy*
Armando Casella, *Bimfactory, Brescia, Italy*
Filippo Daniele, *Setin Roma, Italy*
Yusuf Arayici, *Hasan Kalyoncu University, Gaziantep, Turkey*

Maarten Bassier, *University of Leuven, Leuven, Belgium*
Stefano Bertocci, *Università degli Studi di Firenze, Firenze, Italy*
Carlo Bianchini, *Sapienza Università di Roma, Roma, Italy*
Maurizio Bocconcino, *Politecnico di Torino, Torino, Italy*
Frédéric Bosché, *Heriot-Watt University, Edinburgh, United Kingdom*
Stefano Brusaporci, *Università degli Studi dell'Aquila, L'Aquila, Italy*
Clark Cory, *Purdue University, Indianapolis, USA*
Livio De Luca, *MAP/CNRS, Marseilles, France*

Antonella Di Luggo, *Università degli Studi di Napoli Federico II, Napoli, Italy*
Stephen Fai, *Carleton University, Ottawa, Canada*
Pablo Lorenzo Eiroa, *Cooper Union, New York, USA*
Andrea Giordano, *Università degli Studi di Padova, Padova, Italy*
Antonio Gómez-Blanco Pontes, *Universidad de Granada, Granada, Spain*
Sorin Hermon, *Cyprus Institute, Nicosia, Cyprus*
Arto Kiviniemi, *University of Liverpool, Liverpool, United Kingdom*
Giovanna Massari, *Università degli Studi di Trento, Trento, Italy*
Maurice Murphy, *Dublin Institute of Technology, Dublin, Ireland*

Anna Osello, *Politecnico di Torino, Torino, Italy*
Giuseppe Piras, *Sapienza Università di Roma, Roma, Italy*
Francesco Livio Rossini, *Sapienza Università di Roma, Roma, Italy*
Livio Sacchi, *Università degli Studi "G. d'Annunzio", Chieti-Pescara, Italy*
Andrew Sanders, *Penn University, Philadelphia, USA*
Alberto Sdegno, *Università degli Studi di Trieste, Trieste, Italy*
Jose Pedro Sousa, *Universidade do Porto, Porto, Portugal*
Massimo Stefani, *Harpceas*
Fabio Bianconi, *Università degli Studi di Perugia, Perugia, Italy*
Alessandro Luigini, *Libera Università di Bolzano, Bolzano, Italy*

Comitato Editoriale Editorial Committee

Journal Manager:
Alexandra Fusinetti, *Università degli Studi di Sassari, Sassari, Italy*

Adriana Caldarone, *Sapienza Università di Roma, Roma, Italy*
Graziana D'Agostino, *Università degli Studi di Catania, Catania, Italy*
Anna Dell'Amico, *Università degli Studi di Pavia, Pavia, Italy*
Fausta Fiorillo, *Politecnico di Milano, Milano, Italy*

Raissa Garozzo, *Università degli Studi di Catania, Catania, Italy*
Elisabetta Caterina Giovannini, *Politecnico di Torino, Torino, Italy*
Federico Mario La Russa, *Università degli Studi di Catania, Catania, Italy*
Francesca Picchio, *Università degli Studi di Pavia, Pavia, Italy*

Maria Laura Rossi, *Sapienza Università di Roma, Roma, Italy*
Andrea Tomalini, *Politecnico di Torino, Torino, Italy*

La valutazione dei contributi pubblicati è avvenuta con la modalità del double blind review.

Papers are published under double blind review mode.

Editore

Direttore responsabile: Giuseppe Rufo

Progetto grafico: Ottavia Menzio, Alexandra Fusinetti. Copyright DEI Tipografia del Genio Civile, numero 1/2017 Direzione, Redazione e Pubblicità tel. 06/4416371 Ufficio Abbonamenti tel. 06/44163767 - 06/4416371 Fax 06/4403307 Periodico semestrale: Abbonamento annuo (2 numeri) 30,00 €: c/cp n. 65047003 intestato a: DEI Srl Tipografia del Genio Civile, via Cavour 179/A 00184 Roma Bonifico bancario: IT 91 O 03127 050110 0000 0019585 Unipol Banca. La Redazione è grata a tutti coloro che vorranno collaborare. I manoscritti, anche se non pubblicati, non si restituiscono. Le opinioni espresse dagli Autori non impegnano la rivista. Eventuali errori o imprecisioni non comportano responsabilità della Casa Editrice e della Direzione che ha posto comunemente la massima cura nella revisione dei testi e nella realizzazione dell'opera.

www.dienne.org



I modelli dei dati archeologici nell'HBIM

Archaeological data models in HBIM

Tommaso Empler, Adriana Caldarone, Pasquale Micelli
Sapienza, Università di Roma, Dipartimento di Storia, Disegno e Restauro dell'Architettura

tommaso.empler@uniroma1.it; adriana.caldarone@uniroma1.it; pasquale.micelli@uniroma1.it

□ Abstract

Questo contributo propone un modello metodologico per la gestione della conoscenza archeologica all'interno degli attuali ecosistemi digitali della *Virtual Archaeology*. A partire dall'evoluzione della disciplina, oggi non più limitata alla visualizzazione tridimensionale ma orientata verso piattaforme integrate di analisi, documentazione, conservazione e comunicazione, la ricerca affronta il problema della strutturazione di dati eterogenei, geometrici, spaziali, temporali, documentali e interpretativi. L'obiettivo è definire un sistema informativo capace di trasformare la molteplicità dei dati acquisiti in conoscenza operativa, interrogabile e condivisibile.

L'approccio proposto si basa sulla costruzione di un modello HBIM multilivello, articolato in quattro componenti tra loro integrate: modello spaziale, modello documentale, modello stratigrafico e modello interpretativo. Il modello spaziale fornisce la base metrica tridimensionale del sito; quello documentale organizza e georeferenzia fonti, rilievi, immagini e archivi; il modello stratigrafico introduce la dimensione temporale e relazionale delle unità archeologiche, includendo anche le unità stratigrafiche virtuali; il modello interpretativo formalizza ipotesi e scenari ricostruttivi, esplicitando il grado di attendibilità tramite livelli di affidabilità.

L'integrazione dei quattro modelli in un *Common Data Environment* consente di correlare evidenze materiali, fonti storiche e interpretazioni, supportando ricerca, tutela, gestione e valorizzazione. I casi studio presentati mostrano come il sistema proposto possa costituire una piattaforma dinamica e replicabile, capace di coniugare rigore scientifico, interoperabilità dei dati e nuove forme di comunicazione del patrimonio archeologico.

□ Key Words

HBIM, Modello, *Common Data Environment*, *Virtual Archaeology*.

□ Abstract

This paper proposes a methodological model for managing archaeological knowledge within current Virtual Archaeology digital ecosystems. Starting from the evolution of the discipline, today no longer limited to three-dimensional visualization but oriented towards integrated platforms for analysis, documentation, conservation, and communication, research addresses the problem of structuring heterogeneous, geometric, spatial, temporal, documentary, and interpretative data. Goal is to define an information system capable of transforming the multiplicity of acquired data into operational, queryable, and shareable knowledge.

Proposed approach is based on constructing a multilevel HBIM model, divided into four mutually integrated components: spatial model, documentary model, stratigraphic model, and interpretative model. Spatial model provides site's three-dimensional metric base; documentary model organizes and georeferences sources, surveys, images, and archives; stratigraphic model introduces temporal and relational dimension of archaeological units, also including virtual stratigraphic units; interpretative model formalizes reconstructive hypotheses and scenarios, making degree of reliability explicit through reliability levels.

Integrating the four models in a Common Data Environment allows correlating material evidence, historical sources, and interpretations, supporting research, protection, management, and enhancement. The paper shows how the proposed system can constitute a dynamic and replicable platform, capable of combining scientific rigor, data interoperability, and new forms of communication for archaeological heritage.

□ Key Words

HBIM, Model, *Common Data Environment*, *Virtual Archaeology*

□ Introduction

In recent years, new lines of development have been emerging in so-called Virtual Archaeology. The term was first introduced

□ Introduzione

Negli ultimi anni stanno emergendo nuove linee di sviluppo nella cosiddetta *Virtual Archaeology*. Il termine fu introdotto per la prima volta da Paul Reilly (Reilly, 1990) per indicare l'uso di simulazioni basate su computer per "riscavare" virtualmente un sito archeologico e modellare processi/strutture del passato tramite supporti digitali. Il suo significato si è poi consolidato con i Principi di Siviglia (ICOMOS, 2017) che definiscono l'archeologia virtuale come una disciplina scientifica che ricerca e sviluppa modi di utilizzare visualizzazioni basate su computer per la gestione integrale del patrimonio archeologico, includendo inventari, rilievi e scavi, documentazione e ricerca, interventi di conservazione, presentazione e fruizione pubblica dei resti materiali del passato.

Le nuove frontiere della *Virtual Archaeology* si configurano oggi come un insieme integrato di approcci tecnologici e metodologici che superano la semplice visualizzazione tridimensionale per orientarsi verso sistemi complessi di produzione, gestione e interpretazione della conoscenza archeologica: le tecnologie immersive (VR, AR, XR) consentono ambienti interattivi capaci di supportare sia l'analisi scientifica sia la comunicazione pubblica; l'integrazione di intelligenza artificiale e machine learning introduce nuove possibilità di automazione, riconoscimento di pattern e ricostruzione predittiva di dati incompleti; l'adozione di modelli informativi come HBIM e digital twin permette una gestione semantica e dinamica dei contesti archeologici, favorendo l'interoperabilità dei dati e la tracciabilità delle fonti. A ciò si affiancano strategie di open data, archiviazione avanzata e piattaforme collaborative che promuovono la condivisione della conoscenza e il coinvolgimento del pubblico attraverso pratiche di *citizen science*¹ (Bonney, et al., 2016).

Nel loro insieme, queste tendenze delineano un paradigma in cui la *Virtual Archaeology* diventa un ecosistema digitale (Bianchini et al., 2019) all'interno del quale infrastrutture tecnologiche, ambienti *software*, dispositivi, comunità scientifiche, operatori del settore e fruitori interagiscono in uno spazio condiviso che tende a ridurre progressivamente la distinzione tra dimensione materiale e dimensione virtuale.

Questi ecosistemi digitali presentano una mole di dati caratterizzati da attributi geometrici, spaziali e temporali dove possono convivere dati di acquisizione, dati su unità di scavo ed unità stratigrafiche, dati antropologici e normativi. Diviene pertanto essenziale definire strategie appropriate per l'archiviazione e l'interrogazione di tali dati. In particolare, emerge l'urgenza di strutturare le informazioni archeologiche di natura eterogenea e multidisciplinare, progettando un

by Paul Reilly (Reilly, 1990) to indicate the use of computer-based simulations to virtually "re-excavate" an archaeological site and model past processes/structures through digital media. Its meaning was later consolidated with the Seville Principles (ICOMOS, 2017), which define virtual archaeology as a scientific discipline that researches and develops ways of using computer-based visualizations for comprehensive management of archaeological heritage, including inventories, surveys and excavations, documentation and research, conservation interventions, presentation, and public enjoyment of material remains of the past.

New frontiers of Virtual Archaeology are configured today as an integrated set of technological and methodological approaches that go beyond simple three-dimensional visualization to orient themselves towards complex systems for production, management, and interpretation of archaeological knowledge: immersive technologies (VR, AR, XR) enable interactive environments capable of supporting both scientific analysis and public communication; integration of artificial intelligence and machine learning introduces new possibilities for automation, pattern recognition, and predictive reconstruction of incomplete data; adoption of information models such as HBIM and digital twins allows for semantic and dynamic management of archaeological contexts, favoring data interoperability and source traceability. This is accompanied by open data strategies, advanced archiving, and collaborative platforms that promote knowledge sharing and public involvement through citizen science¹ practices (Bonney, et al., 2016).

Taken together, these trends outline a paradigm in which Virtual Archaeology becomes a digital ecosystem (Bianchini et al., 2019) within which technological infrastructures, software environments, devices, scientific communities, sector operators, and users interact in a shared space that tends to progressively reduce the distinction between material and virtual dimensions.

These digital ecosystems present a massive amount of data characterized by geometric, spatial, and temporal attributes where acquisition data, excavation unit and stratigraphic unit data, anthropological data, and normative data can coexist. It therefore becomes essential to define appropriate strategies for storing and querying such data. In particular, there is an urgent need to structure heterogeneous and multidisciplinary archaeological information by designing a data model capable of coherently integrating spatiotemporal information of sites (Hou et al., 2026).

The research analyzes a model for knowledge classification and semantization. The approach, based on constructing informed models, aims to fill information or physical-architectural gaps and absences, promoting the reconstruction of a comprehensive and coherent framework of the archaeological site under study. Model generates two main types of output: on one hand, data and associated information are useful for all stakeholders involved in

1_ La "citizen science" è definita come il coinvolgimento del pubblico in attività di ricerca scientifica nelle quali i cittadini contribuiscono attivamente, sia con sforzo intellettuale, competenze locali o strumenti, sia con la raccolta, l'elaborazione e l'interpretazione di dati scientifici.

1_ "Citizen science" is defined as public involvement in scientific research activities in which citizens actively contribute, both through intellectual effort, local expertise, or tools, and through the collection, processing, and interpretation of scientific data.

modello dati capace di integrare in maniera coerente le informazioni spazio-temporali dei siti (Hou et al., 2026).

La ricerca presentata analizza un modello per la classificazione e semantizzazione della conoscenza. L'approccio, basato sulla costruzione di modelli informati, mira a colmare lacune e assenze informative o fisico-architettoniche, favorendo la ricostruzione di un quadro complessivo e coerente di un sito archeologico oggetto di studio. Il modello genera due principali tipologie di *output*: da un lato, i dati e le informazioni associate risultano utili per tutti i soggetti coinvolti nella conservazione, gestione e tutela dell'oggetto di studio; dall'altro, alcune informazioni (come l'evoluzione storica del manufatto o la sua ricostruzione nel tempo) possono essere rese fruibili a un pubblico più ampio attraverso processi di comunicazione basati sulle *Information and Communication Technologies* (ICT).

La ricerca presenta, come casi applicativi/esemplificativi, alcuni edifici appartenenti ad aree e siti archeologici indagati negli ultimi anni dagli autori.

□ Meta-modellazione e impostazione HBIM del dato archeologico

Uno degli aspetti centrali nell'analisi di contesti fortemente stratificati, o più in generale nello studio archeologico-architettonico del patrimonio storico-culturale, riguarda la strutturazione e l'organizzazione dei dati. È ormai ampiamente riconosciuto che le informazioni acquisite durante le fasi di conoscenza di un sito archeologico costituiscono un sistema complesso, caratterizzato da dimensioni geometriche, spaziali e temporali, all'interno del quale coesistono formati e tipologie eterogenee.

Il passaggio cruciale consiste nel trasformare questa molteplicità di dati in conoscenza operativa. Tale processo non si limita alla semplice accumulazione o stratificazione dei risultati grezzi dell'analisi o dei rilievi, ma implica una costruzione attiva del sapere, finalizzata alla contestualizzazione critica di ciascun dato e alla sua integrazione in un quadro interpretativo unitario.

Questa fase interessa sia l'architettura concettuale alla base della strutturazione dei dati (e, di conseguenza, dello sviluppo del modello digitale) sia le modalità di accesso, interoperabilità e condivisione di dati e informazioni tra i diversi soggetti coinvolti nei processi di conservazione e valorizzazione. Tale struttura preliminare rappresenta il fondamento per la costruzione del modello HBIM vero e proprio.

Una piattaforma così concepita risulta pienamente coerente con i principi metodologici dell'archeologia, secondo i quali il valore scientifico del dato non risiede nell'oggetto isolato, ma nel suo contesto di rinvenimento, definito dalle relazioni spaziali, stratigrafiche e funzionali che lo legano agli altri elementi del sito (Harris, 1979; Carandini, 1996). Il dato archeologico acquisisce pertanto significato scientifico solo quando è

conservation, management, and protection of the study object ; on the other hand, some information (such as the historical evolution of the artifact or its reconstruction over time) can be made accessible to a wider audience through communication processes based on Information and Communication Technologies (ICT).

Research presents as applied/exemplary cases some buildings belonging to archaeological areas and sites investigated in recent years by the authors.

□ Meta-modeling and HBIM setup of archaeological data

One central aspect in analyzing highly stratified contexts, or more generally in archaeological-architectural study of historical-cultural heritage, concerns data structuring and organization. It is now widely recognized that information acquired during knowledge phases of an archaeological site constitutes a complex system, characterized by geometric, spatial, and temporal dimensions, within which heterogeneous formats and typologies coexist.

A crucial step consists in transforming this multiplicity of data into operational knowledge. This process is not limited to simple accumulation or stratification of raw analysis or survey results but implies an active construction of knowledge, aimed at critical contextualization of each datum and its integration into a unitary interpretative framework.

This phase involves both conceptual architecture underlying data structuring (and, consequently, digital model development) and methods of access, interoperability, and sharing of data and information among various subjects involved in conservation and enhancement processes. This preliminary structure represents the foundation for constructing the actual HBIM model.

A platform conceived in this way is fully consistent with methodological principles of archaeology, according to which the scientific value of a datum does not lie in the isolated object, but in its discovery context, defined by spatial, stratigraphic, and functional relationships that bind it to other site elements (Harris, 1979; Carandini, 1996). Archaeological data therefore acquires scientific meaning only when it is correctly georeferenced, interpreted, and organized within a coherent information system, transforming from a simple empirical record into formalized knowledge.

To attempt translating epistemological principles of archaeology into a formal information architecture, it is important to consider key aspects for studying data:

- *provenance: the position of an object within the site, measured via topographic coordinates or georeferencing, which allows reconstructing spatial distribution and relationships with other structures;*
- *stratigraphy: the level or stratigraphic unit in which an object is located, essential for understanding the chronological sequence and occupational phases of the site;*
- *documentation: photos, drawings, surveys, excavation notes, every data supporting future analysis and allowing verification or reinterpretation of results without altering the site.*

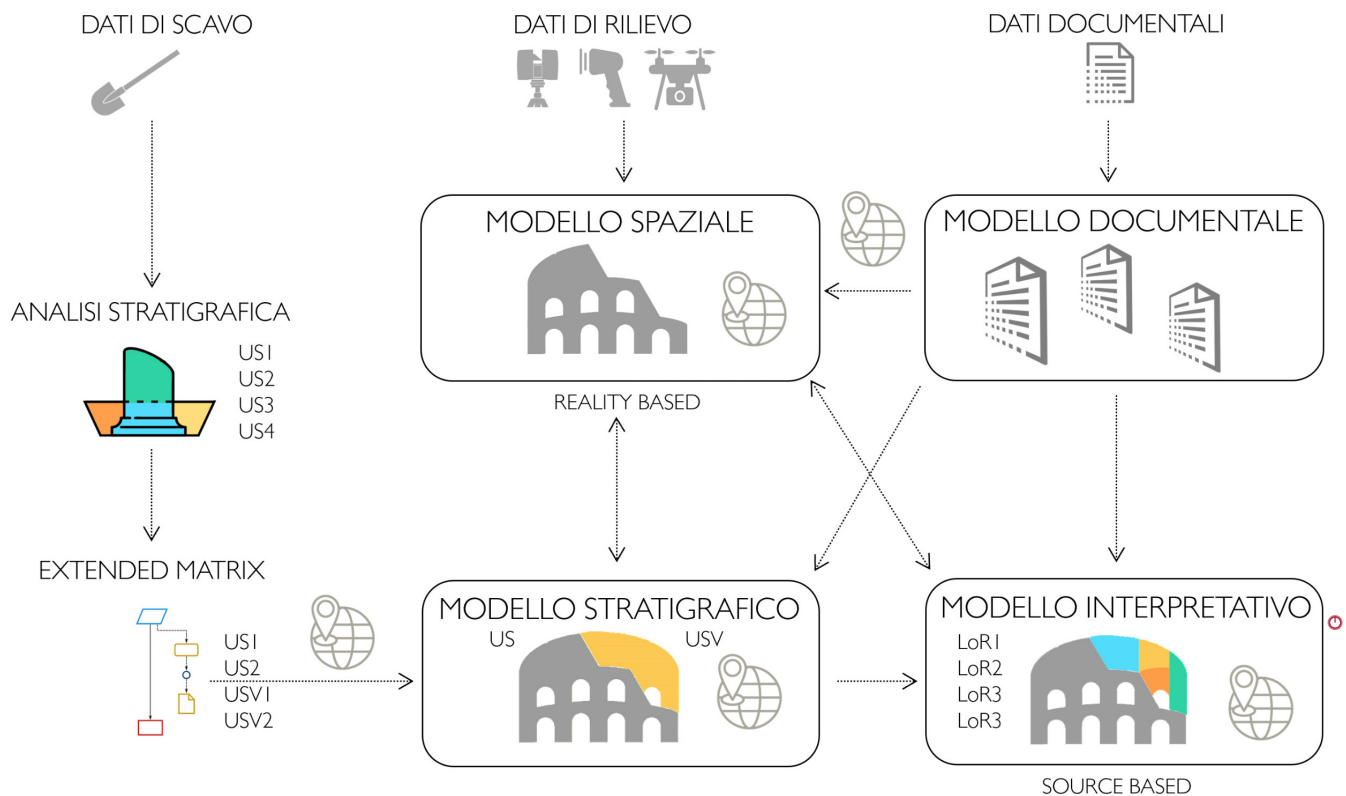


Fig. 1 - Schema esemplificativo dell'integrazione tra i diversi modelli. L'immagine mostra l'assenza di una gerarchia rigida tra i modelli, pur nel rispetto di una sequenza operativa canonica delle fasi (analisi documentale, individuazione delle aree di scavo, raccolta dei dati, ecc.).

Fig. 1 - Exemplary diagram of integration among different models. Image shows the absence of a rigid hierarchy among models, while respecting a canonical operational sequence of phases (documentary analysis, identification of excavation areas, data collection, etc.).

correttamente georeferenziato, interpretato e organizzato all'interno di un sistema informativo coerente, trasformandosi da semplice registrazione empirica in conoscenza formalizzata. Per tentare di tradurre i principi epistemologici dell'archeologia in una architettura informativa formale è importante tener conto di aspetti chiave per lo studio del dato:

- **Provenienza:** la posizione di un oggetto all'interno del sito, misurata tramite coordinate topografiche o georeferenziazione, che permette di ricostruire la distribuzione spaziale e le relazioni con altre strutture;
- **Stratigrafia:** il livello o l'unità stratigrafica in cui un oggetto è situato, essenziale per comprendere la sequenza cronologica e le fasi di occupazione del sito;
- **Documentazione:** foto, disegni, rilievi, note di scavo, ovvero dati che supportano la futura analisi e permettono di verificare o reinterpretare i risultati senza alterare il sito.

Nel campo del patrimonio architettonico costruito, sono ormai numerose le esperienze finalizzate alla strutturazione dei dati e alla loro rappresentazione all'interno di database relazionali o modelli HBIM (Attenni et al., 2025; Brusaporci et al., 2025; Rimella et al., 2024; Bolognesi et al., 2023), nei quali, accanto alla scomposizione semantica degli oggetti, viene adottata la tradizionale logica di federazione dei modelli per discipline.

In the field of built architectural heritage, there are now numerous experiences aimed at structuring data and representing it within relational databases or HBIM models (Attenni et al., 2025; Brusaporci et al., 2025; Rimella et al., 2024; Bolognesi et al., 2023), in which, alongside semantic decomposition of objects, traditional logic of federating models by discipline is adopted.

Specificity and complexity of archaeological data, however, require articulating the digital model into a federation that cannot be based on canonical disciplinary areas but must instead respond to different needs. For this reason, an alternative strategy is chosen, defining the HBIM model as the result of overlapping different methodological approaches, which translate into constructing distinct information models: documentary model, spatial model, stratigraphic model, and interpretative model (Fig. 1).

A first level is represented by the spatial model, which constitutes the metric and objective base of the entire system. Derived from survey techniques (laser scanner, photogrammetry, and topography), it provides a three-dimensional description of physical reality, guaranteeing localization of elements in an absolute reference system and reproducibility of measurements. In this sense, the spatial model represents the primary data level upon which all other knowledge construction processes are grafted.

Alongside it sits the documentary model: from an HBIM perspective, every document (photographs, records, reports, drawings),

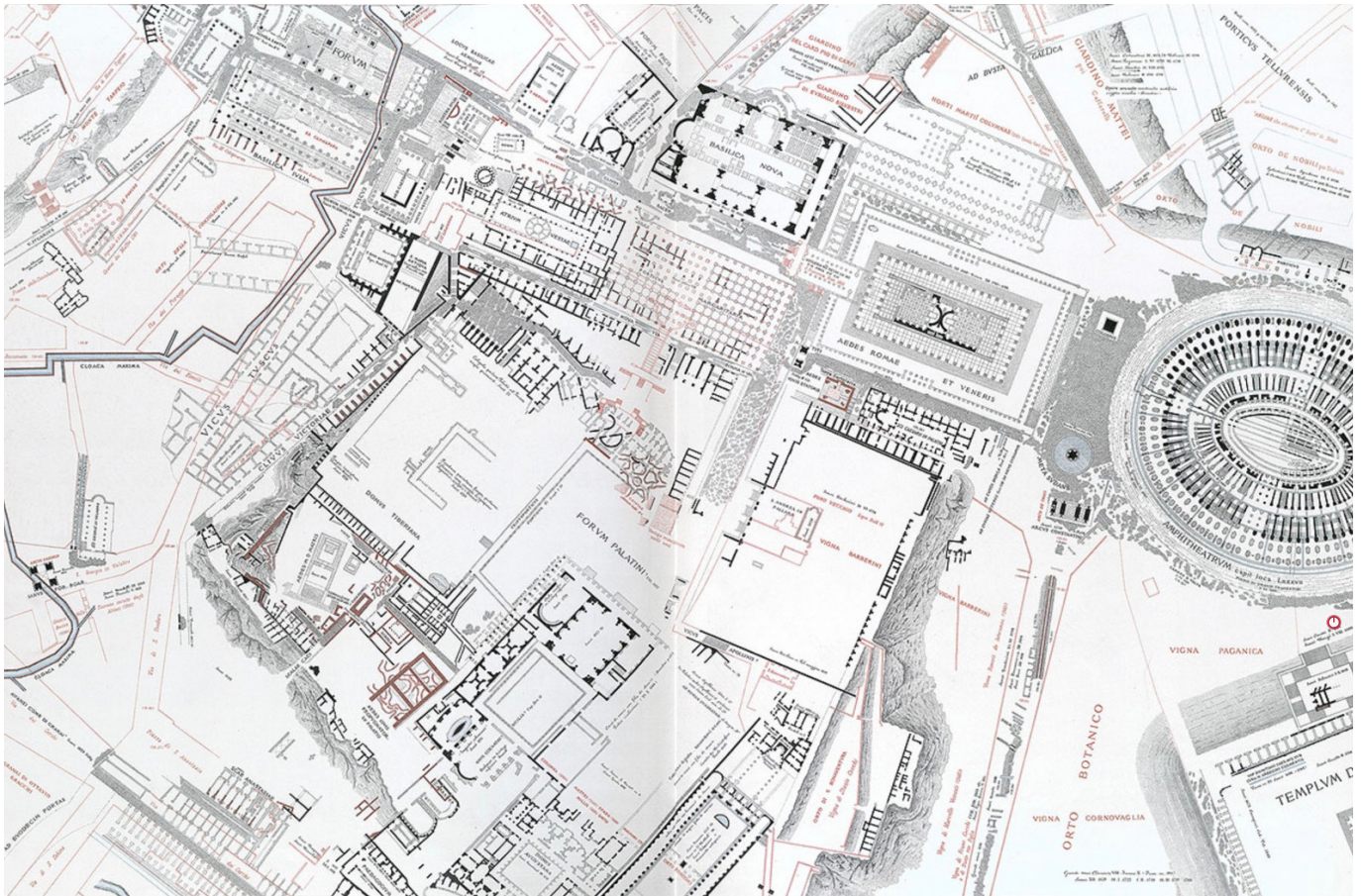


Fig. 2 - Dettaglio della "Forma Urbis Romae" di Rodolfo Lanciani del 1901.

La specificità e la complessità del dato archeologico rendono, tuttavia, necessaria un'articolazione del modello digitale in una federazione che non può basarsi su ambiti disciplinari canonici, ma deve invece rispondere a esigenze differenti. Per questo motivo si sceglie di adottare una strategia alternativa, definendo il modello HBIM come risultato della sovrapposizione di diversi approcci metodologici, che si traducono nella costruzione di distinti modelli informativi: modello documentale, modello spaziale, modello stratigrafico e modello interpretativo (Fig. 1).

Il primo livello è rappresentato dal modello spaziale, che costituisce la base metrica e oggettiva dell'intero sistema. Derivato da tecniche di rilievo (*laser scanner*, fotogrammetria e topografia) fornisce una descrizione tridimensionale della realtà fisica, garantendo la localizzazione degli elementi in un sistema di riferimento assoluto e la riproducibilità delle misurazioni. In questo senso, il modello spaziale rappresenta il livello del dato primario su cui si innestano tutti gli altri processi di costruzione della conoscenza.

Accanto si colloca il modello documentale: in un'ottica HBIM ogni documento – fotografie, schede, relazioni, disegni – viene, oltre ad essere inserito all'interno del CDE, georeferenziato nello stesso sistema di riferimento del modello spaziale, consentendo di collocare ogni fonte nel contesto tridimensionale del sito. Questo collegamento diretto tra

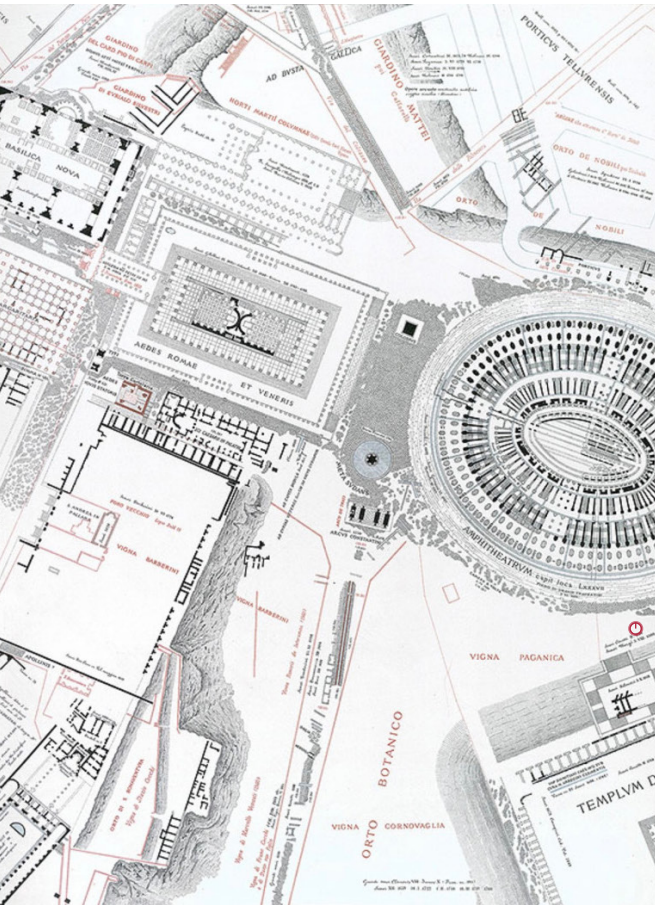


Fig. 2 - Detail of Rodolfo Lanciani's "Forma Urbis Romae" from 1901.

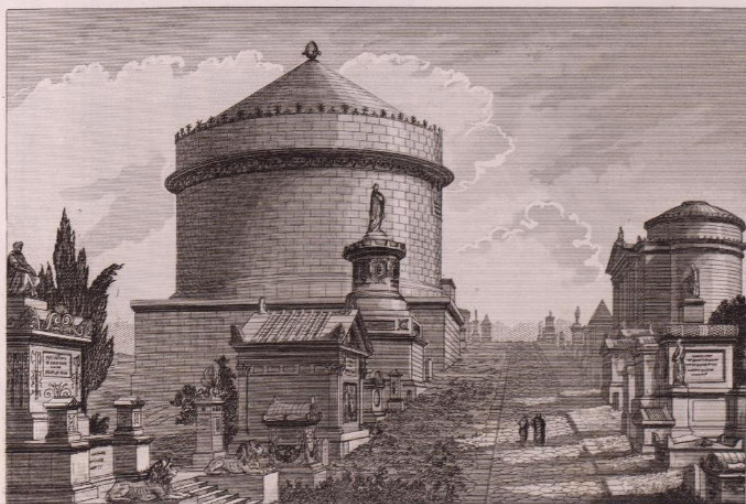
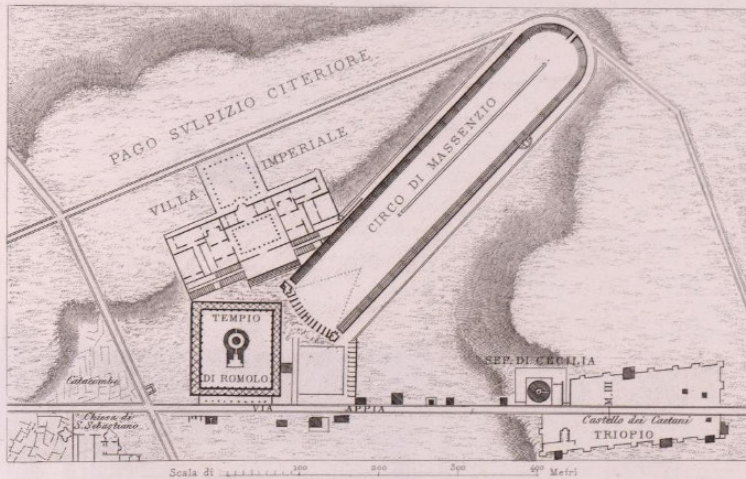
in addition to being inserted within the CDE, is georeferenced in the same reference system as the spatial model, allowing each source to be placed in the three-dimensional context of the site. This direct connection between document and space increases analytical capacity and evidence traceability. On this basis, the stratigraphic model is developed, introducing the temporal and relational dimension. Following principles of the Harris matrix (Harris, 1979), a phase is assigned to currently preserved volumes, then proceeding to organize stratigraphic units. Subsequently, so-called “virtual stratigraphic units” are modeled (Demetrescu, 2015; Demetrescu, 2021), i.e., reconstructive hypotheses referring to SUs no longer existing, allowing “representation of absence”. Data and metadata relating to materials, construction techniques, and instance parameters where the element is hypothesized are associated with each geometry, both real and virtual, integrating conservative and interpretative information.

Finally, interpretative model is created, addressing the dimension of uncertainty by formalizing alternative hypotheses and scenarios to avoid crystallizing contingent reconstructions. In this context, the Level of Reliability allows associating a reliability index to each element, stratigraphic unit, or georeferenced document, distinguishing between certain data, plausible hypotheses, and more speculative reconstructions. Thus, federated models integrate spatial, stratigraphic, and documentary information, providing a coherent digital tool for critical analysis and archaeological knowledge management.

TAV. XIX.



VEDUTA DELLO STATO ATTUALE DEL SEPOLCRO DI CECILIA METELLA



ESPOSIZIONE DEI MONUMENTI ESISTENTI LUNGO LA VIA APPIA
DA VICINO AL SEPOLCRO DI CECILIA METELLA

Fig. 3 - Tav. XIX de' "Gli Edifizj antichi dei contorni di Roma, cogniti per alcune reliquie, descritti e dimostrati nella loro intera architettura", Volume VI, Luigi Canina 1856. Canina oltre ad effettuare i rilievi e documentare lo stato delle aree archeologiche ipotizza una loro ricostruzione.

Fig. 3- Plate XIX of "Gli Edifizj antichi dei contorni di Roma, cogniti per alcune reliquie, descritti e dimostrati nella loro intera architettura", Volume VI, Luigi Canina 1856. In addition to conducting surveys and documenting the state of archaeological areas, Canina hypothesizes their reconstruction.

documento e spazio aumenta la capacità di analisi e la tracciabilità delle evidenze.

Su questa base si sviluppa il modello stratigrafico, che introduce la dimensione temporale e relazionale. Seguendo i principi della matrice di Harris (Harris, 1979), ai volumi attualmente conservati viene assegnata una fase, procedendo poi all'organizzazione delle unità stratigrafiche. Successivamente si modellano le cosiddette "unità stratigrafiche virtuali" (Demetrescu, 2015; Demetrescu, 2021), ovvero ipotesi ricostruttive riferite a US non più esistenti, consentendo la "rappresentazione dell'assenza". A ciascuna geometria, sia reale sia virtuale, vengono associati dati e metadati relativi a materiali, tecniche costruttive e parametri di istanza laddove l'elemento sia ipotizzato, integrando informazioni conservative e interpretative.

Infine, si crea il modello interpretativo che affronta la dimensione dell'incertezza, formalizzando ipotesi e scenari alternativi per evitare di cristallizzare ricostruzioni contingenti. In questo contesto, il *Level of Reliability* permette di associare a ciascun elemento, unità stratigrafica o documento georeferenziato, un indice di attendibilità che distingue tra dati certi, ipotesi plausibili e ricostruzioni più speculative. Così, i modelli federati integrano informazioni spaziali, stratigrafiche e documentarie, fornendo uno strumento digitale coerente per l'analisi critica e la gestione della conoscenza archeologica.

□ Modello documentale

Tra i livelli che concorrono alla costruzione del sistema informativo archeologico, il "modello documentale" riveste un ruolo centrale, poiché costituisce il dispositivo attraverso cui l'insieme delle fonti eterogenee prodotte nel corso della ricerca viene organizzato, correlato e reso interrogabile all'interno di una struttura coerente. Se il modello spaziale fornisce la base metrica e geometrica del sito, il modello documentale consente di ancorare a tale base l'intero patrimonio di informazioni descrittive, interpretative e testimoniali che accompagna ogni processo di conoscenza archeologica.

Fotografie, schede di unità stratigrafica, relazioni di scavo, elaborati grafici, registri, mappe storiche (Fig. 2), immagini da archivio (Fig. 3), documentazione diagnostica, fonti bibliografiche (Fig. 4) e riferimenti normativi concorrono infatti alla definizione del contesto interpretativo entro cui i resti materiali acquistano significato. Il valore della documentazione risiede non solo nel suo contenuto informativo immediato, ma anche nella sua capacità di attestare il processo conoscitivo, rendendo trasparente la genesi delle interpretazioni e verificabile la costruzione del sapere archeologico.

Per questa ragione, il modello documentale deve essere inteso non come un mero archivio digitale di allegati, ma come parte della "struttura informativa semantica", capace di mettere in relazione ogni documento con gli oggetti, gli spazi, le unità stratigrafiche, le fasi cronologiche e le ipotesi

□ Documentary model

Among levels contributing to the construction of the archaeological information system, the "documentary model" plays a central role, as it constitutes the device through which the set of heterogeneous sources produced during research is organized, correlated, and made queryable within a coherent structure. If the spatial model provides the site's metric and geometric base, the documentary model allows anchoring to this base the entire heritage of descriptive, interpretative, and testimonial information accompanying every archaeological knowledge process.

Photographs, stratigraphic unit records, excavation reports, graphic elaborations, registers, historical maps (Fig. 2), archival images (Fig. 3), diagnostic documentation, bibliographic sources (Fig. 4), and normative references indeed contribute to defining the interpretative context within which material remains acquire meaning. The value of documentation lies not only in its immediate informative content but also in its ability to attest to the cognitive process, making genesis of interpretations transparent and construction of archaeological knowledge verifiable.

For this reason, the documentary model must be understood not as a mere digital archive of attachments, but as part of the "semantic information structure", capable of relating each document to objects, spaces, stratigraphic units, chronological phases, and interpretative hypotheses it refers to. In this perspective, the document ceases to be an autonomous and isolated entity and becomes an active node in a network of relationships linking material evidence, historical sources, and interpretative processes. In an advanced information environment, the document assumes the role of structured data, equipped with its own attributes, metadata, relationships, and reliability levels.

This implies that each documentary resource is described according to a series of parameters useful for its classification and management: nature of document, author or scientific manager, dating, reference scale, production technique, format, archival provenance, update status, degree of reliability, and relationship with a specific spatial context or a particular stratigraphic unit. Introducing such metadata allows transforming a heterogeneous documentary collection into an ordered and queryable corpus, facilitating not only information retrieval but also its critical validation.

In this sense, documentary model is configured as an essential tool for tracing the cognitive process. Every interpretation contained in the HBIM model can indeed be traced back to supporting sources, making explicit the relationship between observed data, consulted documents, and formulated hypotheses. This aspect is particularly important in archaeology, a discipline where the interpretative margin is often high and methodological transparency represents a fundamental condition of scientificity.

□ Spatial model

Within the proposed information architecture, a "spatial model" constitutes the fundamental level of digital representation of the archaeological site, as it defines the metric and geometric structure

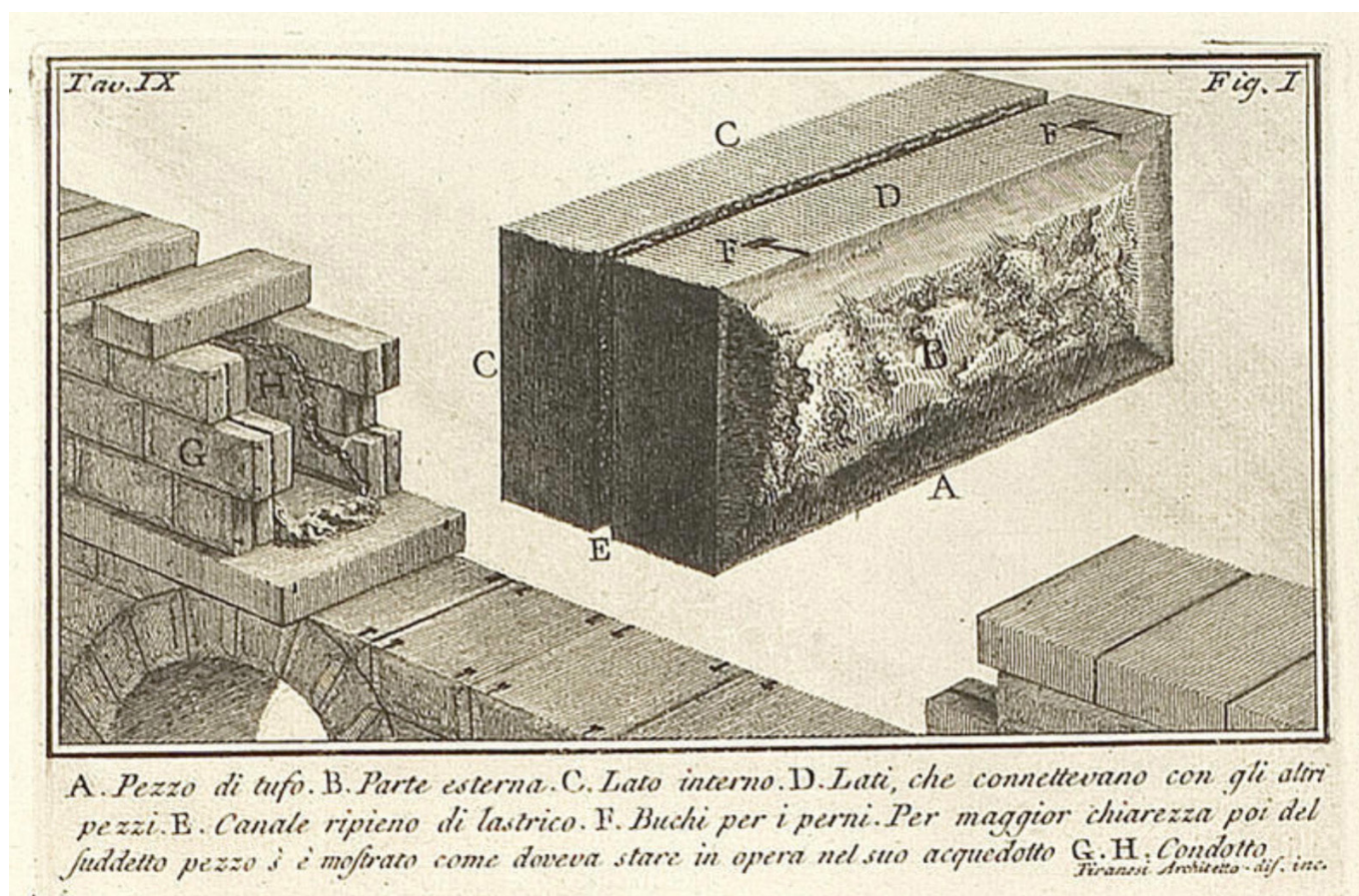


Fig. 4 - Tav. IX de' "Le Antichità Romane: Divisa In Quattro Tomi (Band 1): Gli avanzi degli antichi Edifici di Roma" di Giovanni Battista Piranesi del 1784. Piranesi, negli studi sulle architetture romane, realizza dei dettagli tecnologici sulla tecnologia utilizzata per realizzare le diverse opere.

Fig. 4 - Plate IX of "Le Antichità Romane: Divisa In Quattro Tomi (Band 1): Gli avanzi degli antichi Edifici di Roma" by Giovanni Battista Piranesi from 1784. Piranesi, in his studies on Roman architectures, creates technological details on technology used to build various works.

interpretative cui esso si riferisce. In questa prospettiva, il documento cessa di essere un'entità autonoma e isolata e diviene un nodo attivo di una rete di relazioni che lega evidenze materiali, fonti storiche e processi interpretativi.

In un ambiente informativo avanzato, il documento assume il ruolo di dato strutturato, dotato di attributi propri, metadati, relazioni e livelli di attendibilità.

Ciò implica che ciascuna risorsa documentale venga descritta secondo una serie di parametri utili alla sua classificazione e gestione: natura del documento, autore o responsabile scientifico, datazione, scala di riferimento, tecnica di produzione, formato, provenienza archivistica, stato di aggiornamento, grado di affidabilità, relazione con uno specifico contesto spaziale o con una determinata unità stratigrafica. L'introduzione di tali metadati consente di trasformare una raccolta documentaria eterogenea in un corpus ordinato e interrogabile, facilitando non soltanto il reperimento delle informazioni, ma anche la loro validazione critica.

In questo senso, il modello documentale si configura come uno strumento essenziale per la tracciabilità del processo conoscitivo. Ogni interpretazione contenuta nel modello HBIM può infatti essere ricondotta alle fonti che la

within which all other information levels are placed. It represents the starting point for constructing the HBIM system, configuring itself as the objective base upon which documentary, stratigraphic, and interpretative components are subsequently grafted.

In the context of digital archaeology, spatial dimension assumes primary epistemological value. As highlighted by the methodological tradition of the discipline, scientific meaning of archaeological evidence derives largely from its position and spatial relationships it establishes with the surrounding context. Three-dimensional localization of elements, in fact, allows understanding not only the physical configuration of the site but also dynamics of occupation, transformation, and use of spaces over time. In this sense, the spatial model does not merely represent a geometric restitution of reality but constitutes a cognitive device making explicit relationships between material elements, architectural structures, and stratigraphic contexts (Fig. 5). From an operational perspective, the spatial model derives from integrating different three-dimensional survey techniques, such as terrestrial laser scanning, digital photogrammetry, and topographic survey, which allow acquiring high-precision geometric information and reconstructing the site's morphological configuration with a high level of detail. Data acquired through these technologies are processed via registration, alignment, and fusion

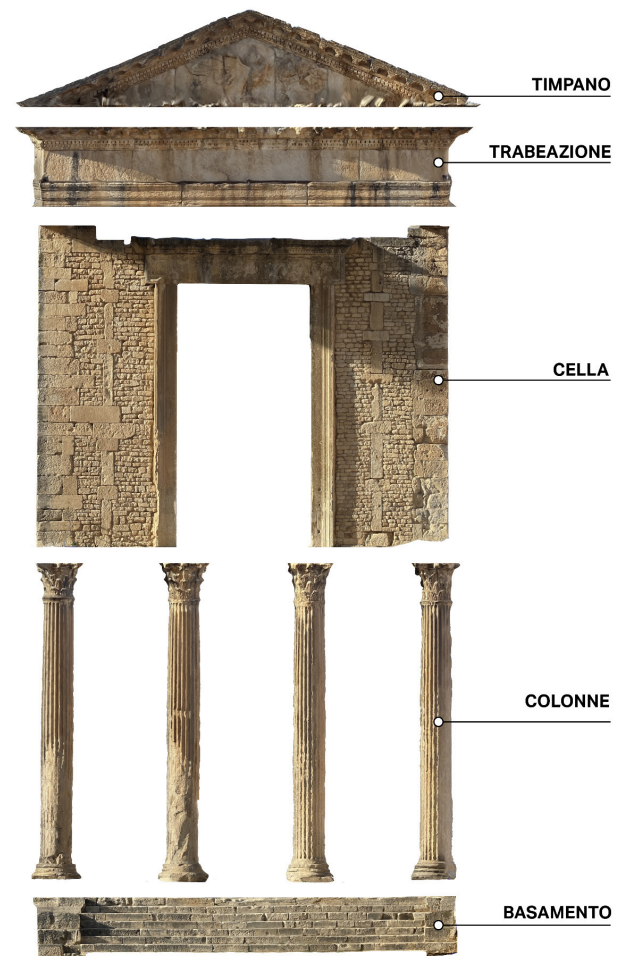


Fig. 5 - Il modello spaziale costituisce un dispositivo conoscitivo che rende esplicite le relazioni tra elementi materiali, strutture architettoniche e contesti stratigrafici. Fronte del Capitulum di Dougga (elaborazione autori).

Fig. 5 - Spatial model constitutes a cognitive device making explicit relationships between material elements, architectural structures, and stratigraphic contexts. Front of the Capitulum of Dougga (authors' elaboration).

supportano, rendendo esplicito il rapporto tra dato osservato, documento consultato e ipotesi formulata. Tale aspetto è particolarmente importante in archeologia, disciplina nella quale il margine interpretativo è spesso elevato e la trasparenza metodologica rappresenta una condizione fondamentale della scientificità.

□ Il modello spaziale

All'interno dell'architettura informativa proposta, il "modello spaziale" costituisce il livello fondamentale della rappresentazione digitale del sito archeologico, poiché definisce la struttura metrica e geometrica entro la quale si collocano tutti gli altri livelli di informazione. Esso rappresenta il punto di partenza per la costruzione del sistema HBIM, configurandosi come la base oggettiva sulla quale vengono successivamente innestate le componenti documentali, stratigrafiche e interpretative.

Nel contesto dell'archeologia digitale, la dimensione spaziale assume un valore epistemologico primario. Come evidenziato dalla tradizione metodologica della disciplina, il significato scientifico delle evidenze archeologiche deriva in

procedures of various scans to obtain a coherent point cloud georeferenced within a shared reference system (Fig. 6).

Point cloud represents the first level of representation of archaeological space. It consists of a set of three-dimensional coordinates describing the position of surveyed surfaces with a high degree of metric accuracy. This dataset constitutes the level closest to real acquired data and guarantees reproducibility of measurements and subsequent analyses. However, the point cloud, despite being extremely precise from a metric point of view, does not inherently possess a semantic structure, making it difficult to interpret and query in terms of information.

Next step consists in constructing the parametric model, in which surveyed surfaces are discretized and reinterpreted as information objects endowed with specific attributes. In this phase, the spatial model assumes an organized structure, wherein architectural elements such as walls, pillars, vaults, pavements, or accessory structures are modeled as parametric components within the HBIM environment. Transforming metric data into information objects allows associating geometric, material, construction, and stratigraphic properties to each element, making the model not only representative but also queryable.



Fig. 6 - Rilievo integrato, TLS + fotogrammetria da drone. Vista del retro del Capitolium di Uthina (elaborazione autori).

Fig. 6 - Integrated survey, TLS + drone photogrammetry. View of the rear of the Capitolium of Uthina (authors' elaboration).

larga misura dalla loro posizione e dalle relazioni spaziali che esse instaurano con il contesto circostante. La localizzazione tridimensionale degli elementi, infatti, consente di comprendere non soltanto la configurazione fisica del sito, ma anche le dinamiche di occupazione, trasformazione e uso degli spazi nel corso del tempo. In questo senso, il modello spaziale non rappresenta semplicemente una restituzione geometrica della realtà, ma costituisce un dispositivo conoscitivo che rende esplicite le relazioni tra elementi materiali, strutture architettoniche e contesti stratigrafici (Fig. 5).

Dal punto di vista operativo, il modello spaziale deriva dall'integrazione di diverse tecniche di rilievo tridimensionale, quali *laser scanning* terrestre, fotogrammetria digitale e rilievo topografico, che permettono di acquisire informazioni geometriche ad alta accuratezza e di ricostruire la configurazione morfologica del sito con un elevato livello di dettaglio. I dati acquisiti mediante tali tecnologie vengono elaborati attraverso procedure di registrazione, allineamento e fusione delle diverse scansioni, al fine di ottenere una nuvola di punti tridimensionale coerente e georeferenziata all'interno di un sistema di riferimento condiviso (Fig. 6).

La nuvola di punti rappresenta il primo livello di rappresentazione dello spazio archeologico. Essa consiste in un insieme di coordinate tridimensionali che descrivono la posizione delle superfici rilevate con un elevato grado di accuratezza metrica. Questo dataset costituisce il livello più vicino al dato reale acquisito e garantisce la riproducibilità delle

In this perspective, the spatial model serves a dual function. On one hand, it constitutes the metric and geometric base of the information system, ensuring correct localization of all site elements within a coherent and georeferenced three-dimensional space. On the other hand, it represents the relational framework within which other information models are grafted: documentary model, which associates sources and archival materials to site elements; stratigraphic model, which introduces temporal dimension and relationships between stratigraphic units; and interpretative model, which makes explicit hypotheses and reliability levels of reconstructions.

A particularly relevant aspect of the spatial model concerns its capacity to support advanced geometric and morphological analyses. Through comparison between three-dimensional models acquired at different times or between real data and ideal models, it is possible to identify deformations, structural settlements, misalignments, or degradation phenomena. Furthermore, availability of an accurate three-dimensional model allows performing accurate measurements, volumetric simulations, visibility analyses, and geometric verifications contributing to enriching the site's cognitive framework (Fig. 7).

Spatial model also plays a fundamental role in heritage communication and enhancement processes. Presence of accurate three-dimensional representation allows creating immersive visualizations, virtual reconstructions, and augmented or virtual reality applications, allowing a more complete and comprehensible perception of archaeological contexts to be returned to the public. In this sense, the spatial model represents the bridge between the scientific dimension

GLOBAL ANALYSIS

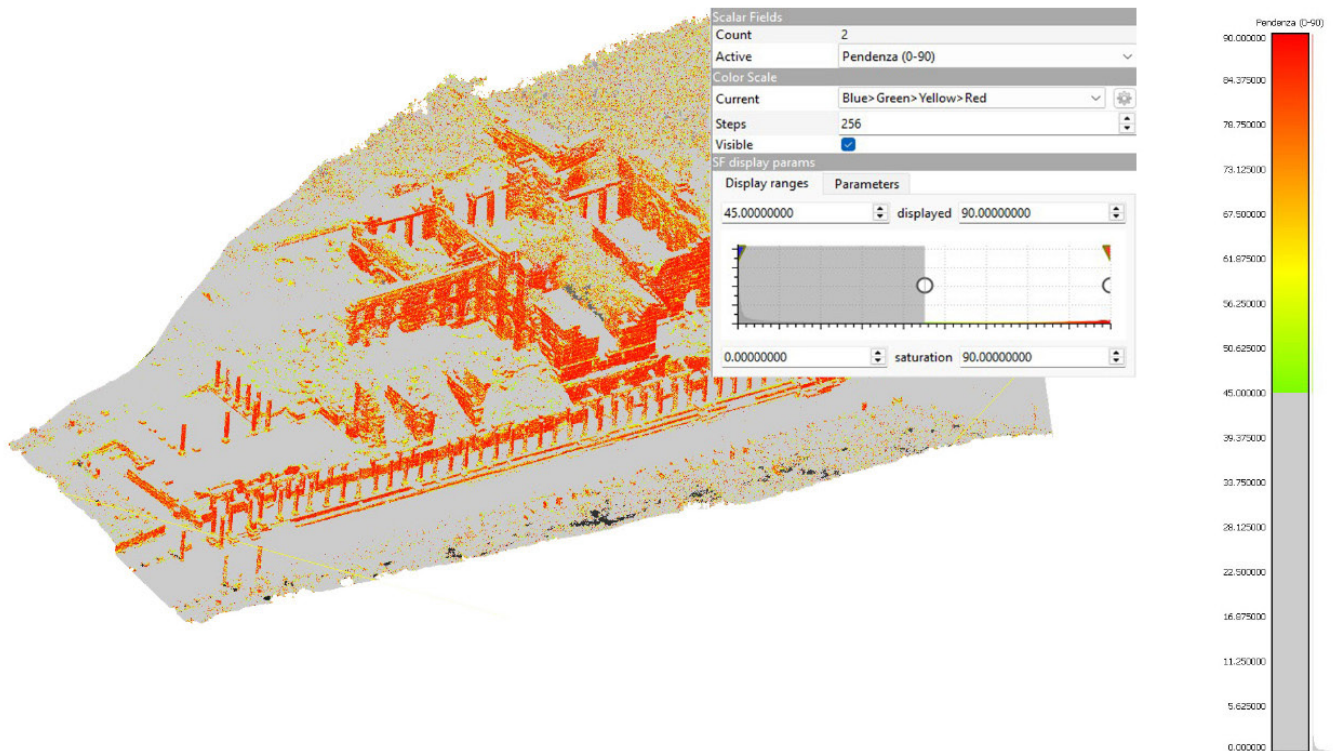


Fig. 7 - Verifica della perpendicolarità delle superfici verticali su un impianto termale di una provincia romana (elaborazione E. Pompeo).

Fig. 7 - Verification of perpendicularity of vertical surfaces on a thermal plant in a Roman province (elaboration E. Pompeo).

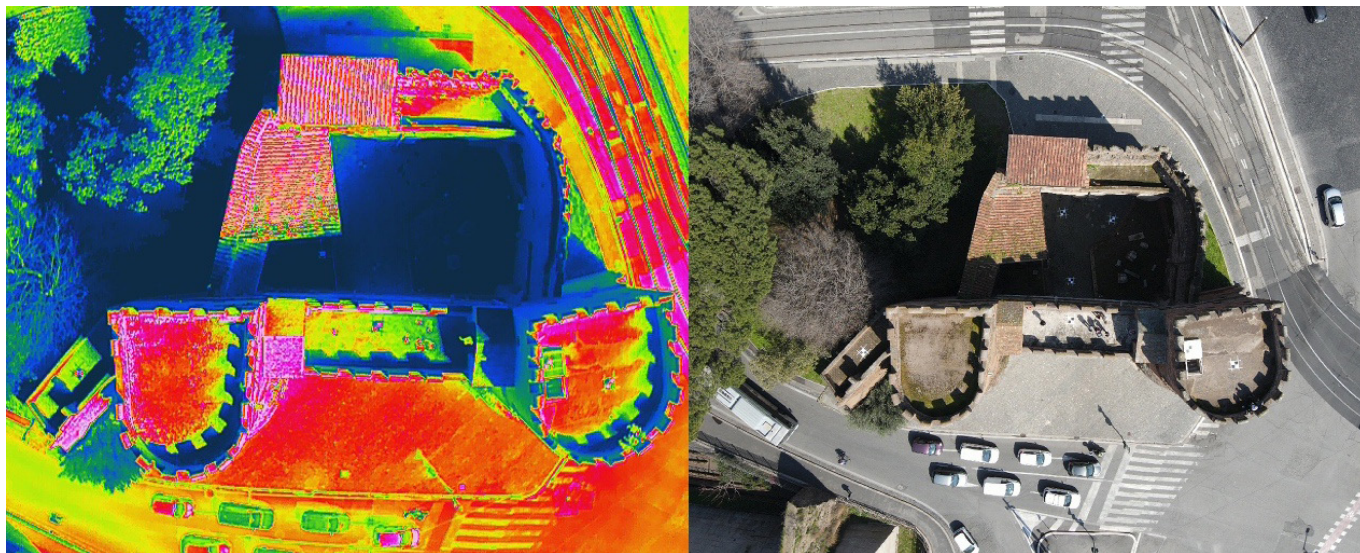


Fig. 8 - Immagine termografica accostata alla corrispondente immagine fotografica di Porta San Paolo a Roma.

Fig. 8 - Thermographic image juxtaposed with corresponding photographic image of Porta San Paolo in Rome.

misurazioni e delle analisi successive. Tuttavia, la nuvola di punti, pur essendo estremamente precisa dal punto di vista metrico, non possiede di per sé una struttura semantica, risultando pertanto difficile da interpretare e interrogare in termini informativi.

Il passaggio successivo consiste nella costruzione del modello parametrico, nel quale le superfici rilevate vengono discretizzate e reinterpretate come oggetti informativi dotati di attributi specifici. In questa fase il modello spaziale assume una struttura organizzata, nella quale elementi architettonici quali murature, pilastri, volte, pavimentazioni o strutture accessorie vengono modellati come componenti parametrici all'interno dell'ambiente HBIM. La trasformazione del dato metrico in oggetti informativi consente di associare a ciascun elemento proprietà geometriche, materiche, costruttive e stratigrafiche, rendendo il modello non solo rappresentativo ma anche interrogabile.

In questa prospettiva, il modello spaziale svolge una duplice funzione. Da un lato, esso costituisce la base metrica e geometrica del sistema informativo, garantendo la corretta localizzazione di tutti gli elementi del sito all'interno di uno spazio tridimensionale coerente e georeferenziato. Dall'altro lato, esso rappresenta il framework relazionale entro il quale si innestano gli altri modelli informativi: il modello documentale, che associa fonti e materiali archivistici agli elementi del sito; il modello stratigrafico, che introduce la dimensione temporale e le relazioni tra le unità stratigrafiche; e il modello interpretativo, che esplicita ipotesi e livelli di affidabilità delle ricostruzioni.

Un aspetto particolarmente rilevante del modello spaziale riguarda la sua capacità di supportare analisi geometriche e morfologiche avanzate. Attraverso il confronto tra modelli tridimensionali acquisiti in momenti diversi o tra dati reali e

of research and the disseminative dimension of cultural enjoyment. Finally, within the overall information system, the spatial model constitutes operational support for integrated data management. All contents produced during research (documents, diagnostic data as in fig. 8, stratigraphic records, material information, and historical interpretations) are in fact referred to specific elements of the three-dimensional model. This allows querying the system according to spatial, stratigraphic, or functional logics, facilitating comprehension of relationships between different information levels.

In this framework, the spatial model should not be interpreted as a simple geometric representation of the site, but as a true cognitive infrastructure, capable of integrating data of different natures and supporting both scientific research activities and archaeological heritage conservation, management, and enhancement processes.

□ Stratigraphic model

"Stratigraphic model" introduces the temporal and relational dimension of the archaeological context. While the spatial model defines the site's three-dimensional configuration and the documentary model organizes heritage of sources and scientific documentation, the stratigraphic model allows representing and interpreting formation and transformation processes that affected the site over time.

In archaeology, comprehension of a context cannot be separated from stratigraphic reading of material evidence. As highlighted by methodological tradition inaugurated by Harris (1979) and subsequently developed in archaeology of architecture (Carandini, 1996; Brogiolo, 1988), every construction element or archaeological deposit is part of a sequence of events including phases of construction (Fig. 9), use, transformation, reuse (Fig. 10), and destruction. Stratigraphy therefore represents the main interpretative tool through which to reconstruct the material history of a site.

In this framework, stratigraphic model developed in the research aims to translate principles of archaeological stratigraphy into a



Fig. 9 - Tracciato per la realizzazione di un passaggio, in periodo romano, nel basamento del Capitolium di Uthina.

Fig. 9 - Layout for creating a passage, in Roman period, in base of the Capitolium of Uthina.

modelli ideali, è possibile individuare deformazioni, cedimenti strutturali, disallineamenti o fenomeni di degrado. Inoltre, la disponibilità di un modello tridimensionale accurato permette di effettuare misurazioni accurate, simulazioni volumetriche, analisi di visibilità e verifiche geometriche che contribuiscono ad arricchire il quadro conoscitivo del sito (Fig. 7).

Il modello spaziale svolge anche un ruolo fondamentale nei processi di comunicazione e valorizzazione del patrimonio. La presenza di una rappresentazione tridimensionale accurata consente infatti la realizzazione di visualizzazioni immersive, ricostruzioni virtuali e applicazioni di realtà aumentata o virtuale, che permettono di restituire al pubblico una percezione più completa e comprensibile dei contesti archeologici. In questo senso, il modello spaziale rappresenta il ponte tra la dimensione scientifica della ricerca e quella divulgativa della fruizione culturale.

Infine, all'interno del sistema informativo complessivo, il modello spaziale costituisce il supporto operativo per la gestione integrata dei dati. Tutti i contenuti prodotti nel corso della ricerca (documenti, dati diagnostici come in fig. 8, schede stratigrafiche, informazioni materiche e interpretazioni storiche) vengono infatti riferiti a elementi specifici del modello tridimensionale. Ciò consente di interrogare il

formalized information structure capable of being integrated within the HBIM environment and the Common Data Environment. Goal is not only to represent stratigraphic units identified during investigation but also to make explicit temporal and functional relationships between different evidence, maintaining interpretative logic inherent to archaeology within the digital model.

Starting point of the stratigraphic model is represented by identification of stratigraphic units (SU), which constitute the smallest recognizable entities of an archaeological formation process. A stratigraphic unit can correspond, for example, to a deposit, wall structure, fill layer, or construction intervention. Each unit represents the outcome of a single historical event and can be analyzed in relation to other units present on site.

In a specific case of historical and archaeological architecture, particular relevance is given to wall stratigraphic units (WSU), representing portions of masonry attributable to a specific construction phase or building intervention. Identification of WSUs allows reading the built environment as a sequence of technical operations and structural transformations, making it possible to reconstruct different building phases of an edifice or archaeological complex.

Within digital model, each SU or WSU is associated with a specific portion of the site's three-dimensional geometry (Fig. 10). In this way, stratigraphic reading is not confined to textual or graphic documentation but is directly integrated into the three-dimensional space of the HBIM model.

A central element of stratigraphic model is represented by defining stratigraphic relationships between different units. These relationships describe temporal correlation between events generating stratigraphic units and allow reconstructing the chronological sequence of site transformations. According to the method proposed by Harris, main stratigraphic relationships can be summarized in a few fundamental categories, including:

- relations of anteriority and posteriority, indicating whether one unit precedes or follows another;
- cutting relations, occurring when a unit interrupts or modifies a pre-existing unit;
- covering relations, established when a deposit or structure overlays another;
- relations of contemporaneity, indicating units belonging to the same activity phase.

These relationships are traditionally represented through the Harris matrix, a graphical tool allowing visualization of stratigraphic sequence and connections between different units. In the proposed model, the stratigraphic matrix is not treated as an element separate from three-dimensional modeling, but is integrated into the information system, connecting each stratigraphic unit to corresponding objects in the HBIM model.

One of the most innovative aspects of stratigraphic modeling in digital environments concerns the possibility of representing not only preserved material evidence but also missing or vanished parts of the archaeological context. In many cases, indeed,



Fig. 10 - Cisterna romana trasformata in una struttura difensiva della 2 Guerra Mondiale nell'area archeologica di Uthina.

sistema secondo logiche spaziali, stratigrafiche o funzionali, facilitando la comprensione delle relazioni tra i diversi livelli di informazione.

In questo quadro, il modello spaziale non deve essere interpretato come una semplice rappresentazione geometrica del sito, ma come una vera e propria infrastruttura conoscitiva, capace di integrare dati di natura diversa e di sostenere sia le attività di ricerca scientifica sia i processi di conservazione, gestione e valorizzazione del patrimonio archeologico.

□ Modello stratigrafico

Il “modello stratigrafico” introduce la dimensione temporale e relazionale del contesto archeologico. Se il modello spaziale definisce infatti la configurazione tridimensionale del sito e il modello documentale organizza il patrimonio delle fonti e della documentazione scientifica, il modello stratigrafico consente di rappresentare e interpretare i processi di formazione e trasformazione che hanno interessato il sito nel corso del tempo.

Nel campo dell'archeologia, la comprensione di un contesto non può prescindere dalla lettura stratigrafica delle evidenze materiali. Come evidenziato dalla tradizione metodologica inaugurata da Harris (1979) e successivamente sviluppata nell'archeologia dell'architettura (Carandini, 1996; Brogiolo, 1988), ogni elemento costruttivo o deposito archeologico è parte di una sequenza di eventi che comprendono fasi di costruzione (Fig. 9), uso, trasformazione, riuso (Fig. 10) e distruzione. La stratigrafia rappresenta quindi il principale strumento interpretativo attraverso cui ricostruire la storia materiale di un sito.

In questo quadro, il modello stratigrafico sviluppato nella ricerca mira a tradurre i principi della stratigrafia archeologica in una struttura informativa formalizzata, capace di essere integrata all'interno dell'ambiente HBIM e del *Common Data Environment*. L'obiettivo non è soltanto quello di



Fig. 10 - Roman cistern transformed into a defensive structure of World War 2 in the archaeological area of Uthina.

stratigraphic reading allows deducing existence of structures or architectural elements no longer physically present but reconstructable through analysis of residual traces.

To address this problem, the stratigraphic model includes definition of so-called virtual stratigraphic units, namely reconstructive entities representing elements no longer existing but inferable based on available evidence. This concept, introduced by Demetrescu (2015; 2021), allows representing within the digital model also the dimension of absence, making reconstructive hypotheses explicit without confusing them with material evidence. In the HBIM model, virtual stratigraphic units are generally represented through distinct geometries or specific attributes indicating their hypothetical nature. In this way, the system maintains clear distinction between observed data and interpretative reconstructions.

□ Interpretative model

Within proposed information architecture, interpretative model represents the level in which archaeological knowledge is explicitly formalized and made operational within the digital system. The interpretative model introduces the critical dimension of archaeological research, making hypotheses, reconstructions, and reliability levels of information explicit. Interpretative nature of archaeological data constitutes an intrinsic characteristic of the discipline. Archaeological contexts are often characterized by partial conservation of structures and fragmentary documentation, making it necessary to resort to inferential processes to reconstruct original configurations of spaces and architectures. In this sense, every archaeological reconstruction represents the result of an interpretative process combining material evidence, stratigraphic analyses, typological comparisons, and documentary sources. Interpretative model thus arises from the need to make this interpretative process explicit and traceable within the digital model, avoiding three-dimensional representation of the site from being perceived as objective and definitive restitution of historical reality. In an HBIM environment, modeling must not in fact be



Fig. 11 - Unità Stratigrafica Muraria dell'Arco trionfale presente nel Circo di Massenzio a Roma.

Fig. 11 - Wall Stratigraphic Unit of the triumphal Arch present in Circus of Maxentius in Rome.

rappresentare le unità stratigrafiche individuate nel corso dell'indagine, ma anche di esplicitare le relazioni temporali e funzionali tra le diverse evidenze, mantenendo all'interno del modello digitale la logica interpretativa propria dell'archeologia.

Il punto di partenza del modello stratigrafico è rappresentato dall'identificazione delle unità stratigrafiche (US), che costituiscono le più piccole entità riconoscibili di un processo di formazione archeologica. Una unità stratigrafica può corrispondere, ad esempio, a un deposito, a una struttura muraria, a uno strato di riempimento o a un intervento costruttivo. Ogni unità rappresenta l'esito di un singolo evento storico e può essere analizzata in relazione alle altre unità presenti nel sito.

Nel caso specifico dell'architettura storica e archeologica, particolare rilievo assumono le unità stratigrafiche murarie (USM), che rappresentano le porzioni di muratura riconducibili a una specifica fase costruttiva o a un determinato intervento edilizio. L'identificazione delle USM consente di leggere il costruito come una sequenza di operazioni tecniche e trasformazioni strutturali, rendendo possibile la ricostruzione delle diverse fasi edilizie di un edificio o di un complesso archeologico.

All'interno del modello digitale, ciascuna US o USM viene associata a una porzione specifica della geometria

limited to geometric reproduction of preserved structures but must be capable of clearly distinguishing between observed data, interpreted data, and hypothetical reconstructions. One primary function of the interpretative model consists in formalizing reconstructive hypotheses relating to missing or incomplete parts of the archaeological site. In many cases, indeed, preserved material evidence represents only a limited portion of original structures. Through stratigraphic analysis, study of construction techniques, and comparison with other archaeological contexts, it is possible to propose plausible reconstructions of original architectural configurations. In the digital model, these reconstructions are represented as distinct elements from actually preserved structures. This distinction can be achieved through different representation strategies, for example using specific informative attributes, different transparency levels of geometries, or association of metadata describing degree of reliability of the hypothesis. In this way, the model maintains clear separation between material evidence and interpretative reconstruction. A central aspect of the interpretative model concerns uncertainty management, constituting an inevitable component of archaeological research. To address this problem, the information system integrates a specific parameter defined as Level of Reliability (LoR) (Fig. 12), allowing elements of the model to be classified based on degree of reliability of available information. Through this system, each element of the model can be associated with a specific interpretative level, distinguishing between:

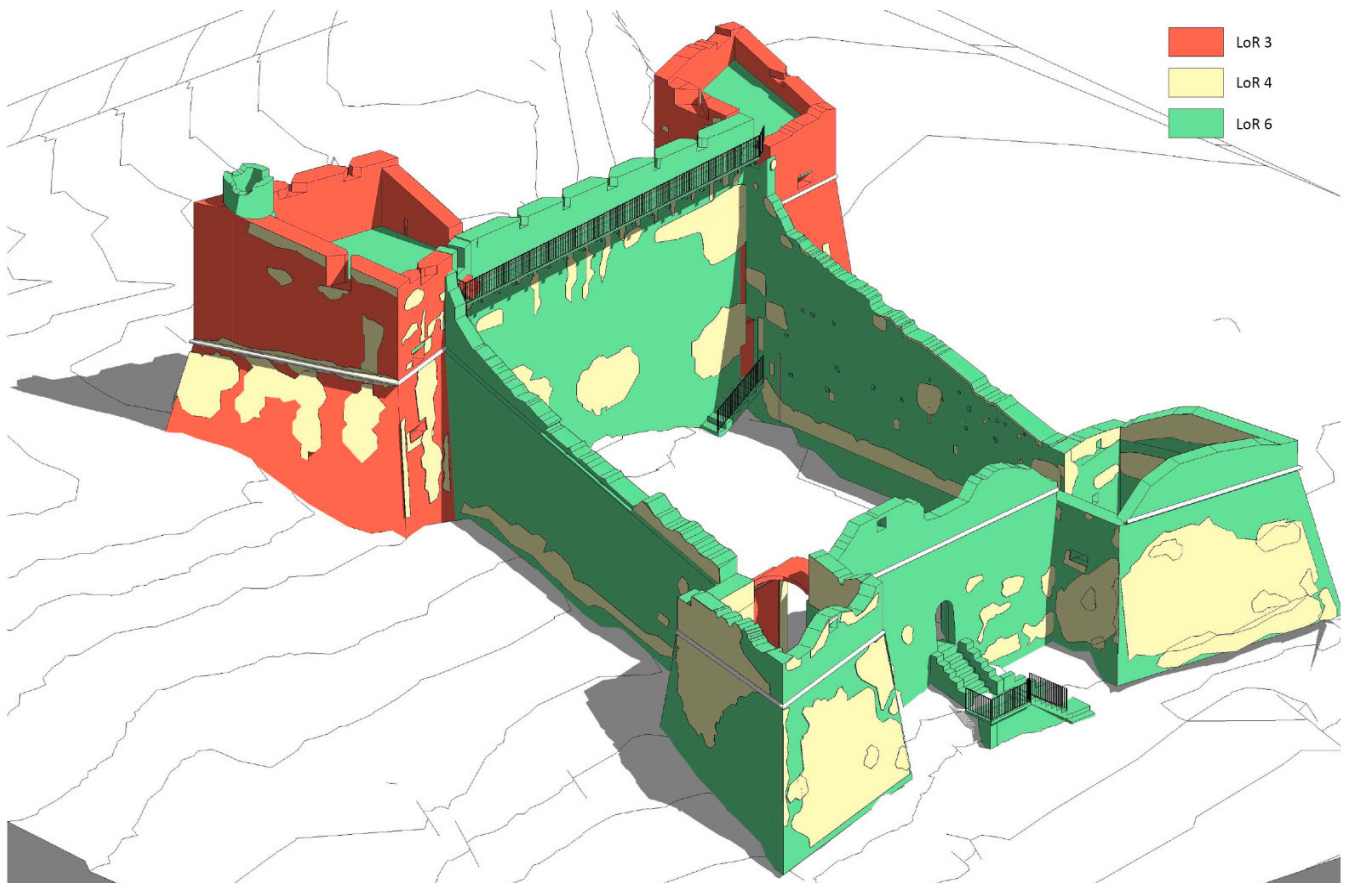


Fig. 12- Valutazione del Level of Reliability, con cui viene valutato il livello di affidabilità delle informazioni disponibili. Fortezza di Marciana.

Fig. 12 - Evaluation of Level of Reliability, assessing the reliability level of available information. Fortress of Marciana.

tridimensionale del sito (Fig. 10). In questo modo, la lettura stratigrafica non rimane confinata nella documentazione testuale o grafica, ma viene direttamente integrata nello spazio tridimensionale del modello HBIM.

Un elemento centrale del modello stratigrafico è rappresentato dalla definizione delle relazioni stratigrafiche tra le diverse unità. Tali relazioni descrivono il rapporto temporale tra gli eventi che hanno generato le unità stratigrafiche e consentono di ricostruire la sequenza cronologica delle trasformazioni del sito.

Secondo il metodo proposto da Harris, le principali relazioni stratigrafiche possono essere sintetizzate in alcune categorie fondamentali, tra cui:

- relazioni di anteriorità e posteriorità, che indicano se un'unità è precedente o successiva a un'altra;
- relazioni di taglio, che si verificano quando un'unità interrompe o modifica un'unità preesistente;
- relazioni di copertura, che si instaurano quando un deposito o una struttura si sovrappone a un'altra;
- relazioni di contemporaneità, che indicano unità appartenenti alla stessa fase di attività.

Queste relazioni vengono tradizionalmente rappresentate attraverso la matrice di Harris, uno strumento grafico che consente di visualizzare la sequenza stratigrafica e le

- *observed data, deriving directly from three-dimensional survey and preserved material evidence;*
- *interpreted data, based on stratigraphic analysis and archaeological interpretation of structures;*
- *hypothetical reconstructions, founded on typological comparisons or indirect evidence;*
- *speculative reconstructions, used mainly for communicative or disseminative purposes.*

Introduction of Level of Reliability allows maintaining clear distinction between different knowledge levels within the digital model, avoiding hypothetical reconstructions from being perceived as certain data. At the same time, this approach makes it possible to update the model over time, integrating new evidence or reinterpreting existing data. A further aspect of the interpretative model concerns possibility of representing evolutionary scenarios of the site, i.e., different spatial and architectural configurations that succeeded one another throughout history. Thanks to integration with the stratigraphic model, it is indeed possible to associate a specific chronological phase to each element of the model, allowing site transformations to be reconstructed through temporal sequences. This approach allows generating three-dimensional models referring to different historical phases, usable both for scientific purposes and heritage communication and enhancement applications. Possibility of visualizing the site in different phases of its

connessioni tra le diverse unità. Nel modello proposto, la matrice stratigrafica non viene trattata come un elemento separato dalla modellazione tridimensionale, ma viene integrata nel sistema informativo, collegando ogni unità stratigrafica agli oggetti corrispondenti del modello HBIM.

Uno degli aspetti più innovativi della modellazione stratigrafica in ambiente digitale riguarda la possibilità di rappresentare non solo le evidenze materiali conservate, ma anche le parti mancanti o scomparse del contesto archeologico. In molti casi, infatti, la lettura stratigrafica consente di dedurre l'esistenza di strutture o elementi architettonici che non sono più fisicamente presenti ma che possono essere ricostruiti attraverso l'analisi delle tracce residue.

Per affrontare questo problema, il modello stratigrafico include la definizione delle cosiddette unità stratigrafiche virtuali, ossia entità ricostruttive che rappresentano elementi non più esistenti ma inferibili sulla base delle evidenze disponibili. Questo concetto, introdotto da Demetrescu (2015; 2021), consente di rappresentare all'interno del modello digitale anche la dimensione dell'assenza, rendendo esplicite le ipotesi ricostruttive senza confonderle con le evidenze materiali.

Nel modello HBIM, le unità stratigrafiche virtuali vengono generalmente rappresentate attraverso geometrie distinte o attributi specifici che ne indicano la natura ipotetica. In questo modo, il sistema mantiene una chiara distinzione tra dati osservati e ricostruzioni interpretative.

□ Modello interpretativo

All'interno dell'architettura informativa proposta, il modello interpretativo rappresenta il livello nel quale la conoscenza archeologica viene esplicitamente formalizzata e resa operativa all'interno del sistema digitale. Il modello interpretativo introduce la dimensione critica della ricerca archeologica, rendendo esplicite le ipotesi, le ricostruzioni e i livelli di affidabilità delle informazioni.

La natura interpretativa del dato archeologico costituisce infatti una caratteristica intrinseca della disciplina. I contesti archeologici sono spesso caratterizzati da una conservazione parziale delle strutture e da una documentazione frammentaria, il che rende necessario ricorrere a processi inferenziali per ricostruire le configurazioni originarie degli spazi e delle architetture. In questo senso, ogni ricostruzione archeologica rappresenta il risultato di un processo interpretativo che combina evidenze materiali, analisi stratigrafiche, confronti tipologici e fonti documentarie.

Il modello interpretativo nasce quindi dall'esigenza di rendere esplicito e tracciabile questo processo interpretativo all'interno del modello digitale, evitando che la rappresentazione tridimensionale del sito venga percepita come una restituzione oggettiva e definitiva della realtà storica. In un ambiente HBIM, la modellazione non deve infatti limitarsi

evolution represents one of the most effective tools for comprehending historical and architectural processes determining its formation. In the context of Virtual Archaeology, the interpretative model assumes a particularly significant role. Virtual reconstructions of archaeological sites are often used to communicate to the public spatial and architectural configurations no longer visible in physical reality. However, such reconstructions must always be accompanied by clear explication of reliability degree of information used. Through integrating the interpretative model in the HBIM system, it is possible to maintain epistemological transparency within virtual reconstructions, allowing distinction between evidence, interpretation, and hypothesis. This approach contributes to transforming the digital model into a rigorous scientific tool capable of supporting not only visualization of archaeological heritage but also production and sharing of knowledge.

□ Integration of data and models (CDE and federation)

Four described models, spatial, documentary, stratigraphic, and interpretative, must not be understood as autonomous systems but as interdependent components of a single information architecture aimed at constructing and managing archaeological knowledge. As seen, each model responds to a specific dimension of data: documentary model organizes and contextualizes heritage of sources and documentation produced during research; spatial model defines metric and geometric structure of the site; stratigraphic model introduces temporal and relational dimension of archaeological evidence; finally, interpretative model allows formalizing hypotheses, reconstructive scenarios, and information reliability levels.

Their integration occurs within the HBIM environment, also thanks to georeferencing which allows data to be superimposed and visualized, according to a phased system, and queried relationally. Finally, Common Data Environment (CDE) constitutes the digital infrastructure within which different information levels are organized, correlated, and made queryable. In this system, the spatial model acts as load-bearing structure, providing necessary three-dimensional reference to place and relate all other data. Documentary model connects sources and informative materials to this structure, making explicit relationship between material evidence and documentary testimony. Stratigraphic model, in turn, organizes chronological and functional relationships among site elements, allowing sequences of formation and transformation of the archaeological context to be reconstructed. The interpretative model, lastly, introduces a critical dimension, making the degree of reliability of reconstructions explicit and maintaining open possibility of updating the system in light of new evidence. This multilevel articulation allows addressing complexity of archaeological data avoiding reductive simplifications. Resulting information system is not limited to representing current site configuration but becomes a dynamic tool capable of integrating material evidence,

alla riproduzione geometrica delle strutture conservate, ma deve essere in grado di distinguere chiaramente tra dati osservati, dati interpretati e ricostruzioni ipotetiche.

Una delle funzioni principali del modello interpretativo consiste nella formalizzazione delle ipotesi ricostruttive relative alle parti mancanti o incomplete del sito archeologico. In molti casi, infatti, le evidenze materiali conservate rappresentano soltanto una porzione limitata delle strutture originarie. Attraverso l'analisi stratigrafica, lo studio delle tecniche costruttive e il confronto con altri contesti archeologici, è possibile proporre ricostruzioni plausibili delle configurazioni architettoniche originarie.

Nel modello digitale queste ricostruzioni vengono rappresentate come elementi distinti dalle strutture realmente conservate. Tale distinzione può essere realizzata attraverso differenti strategie di rappresentazione, ad esempio mediante l'utilizzo di attributi informativi specifici, differenti livelli di trasparenza delle geometrie o l'associazione di metadati che descrivono il grado di attendibilità dell'ipotesi. In questo modo il modello mantiene una chiara separazione tra evidenza materiale e ricostruzione interpretativa.

Un aspetto centrale del modello interpretativo riguarda la gestione dell'incertezza, che costituisce una componente inevitabile della ricerca archeologica. Per affrontare questo problema, il sistema informativo integra un parametro specifico definito *Level of Reliability* (LoR) (Fig. 12), che consente di classificare gli elementi del modello in base al grado di affidabilità delle informazioni disponibili.

Attraverso questo sistema, ogni elemento del modello può essere associato a un determinato livello interpretativo, che distingue tra:

- dati osservati, derivanti direttamente dal rilievo tridimensionale e dalle evidenze materiali conservate;
- dati interpretati, basati sull'analisi stratigrafica e sull'interpretazione archeologica delle strutture;
- ricostruzioni ipotetiche, fondate su confronti tipologici o su evidenze indirette;
- ricostruzioni speculative, utilizzate principalmente per finalità comunicative o divulgative.

L'introduzione del *Level of Reliability* consente di mantenere all'interno del modello digitale una chiara distinzione tra i diversi livelli di conoscenza, evitando che le ricostruzioni ipotetiche vengano percepite come dati certi. Allo stesso tempo, questo approccio rende possibile aggiornare il modello nel tempo, integrando nuove evidenze o reinterpretando i dati esistenti.

Un ulteriore aspetto del modello interpretativo riguarda la possibilità di rappresentare scenari evolutivi del sito, cioè le diverse configurazioni spaziali e architettoniche che si sono succedute nel corso della storia. Grazie all'integrazione con il modello stratigrafico, è infatti possibile associare a ciascun elemento del modello una specifica fase cronologica,

historical documentation, analytical data, and interpretative hypotheses into a coherent framework. In this way, the digital model assumes function of cognitive infrastructure capable of simultaneously supporting research, conservation, management, and heritage enhancement activities.

In this perspective, proposed approach inserts itself into the broader paradigm of digital archaeology, where informed three-dimensional models do not merely represent visualization tools but genuine systems for organizing and producing knowledge. Federation of different information models indeed allows preserving complexity of the interpretative process, maintaining explicit relationships between empirical data, scientific documentation, and hypothetical reconstructions.

□ Conclusions

Research explores potential of integrating Virtual Archaeology, HBIM information modeling, and digital data management systems for constructing a structured archaeological knowledge management system. The proposed approach is founded on the idea that digital models should not be considered exclusively as three-dimensional representation tools but as information infrastructures capable of organizing, correlating, and interpreting heterogeneous data relating to archaeological heritage.

Main contribution of the study consists in defining a multilevel information model divided into four main components: spatial model, documentary model, stratigraphic model, and interpretative model. This articulation allows addressing complexity of archaeological data preserving different dimensions characterizing it: geometric and metric dimension of site, documentary dimension of sources, temporal dimension of stratigraphic relationships, and critical dimension of scientific interpretation.

"Spatial model" constitutes the metric and geometric base of the system, derived from integration of digital survey techniques such as laser scanning and photogrammetry. It guarantees three-dimensional localization of site elements and represents support upon which information relating to other models is organized.

"Documentary model" instead allows structuring and georeferencing the set of sources and documentation produced during research, making evidence traceability and verification of scientific interpretations possible.

"Stratigraphic model" introduces temporal dimension of the archaeological context, allowing representation of relationships between different stratigraphic units and reconstruction of formation and transformation sequences of the site. Possibility of integrating virtual stratigraphic units into the digital model also allows representing missing or vanished parts of the archaeological context, maintaining explicit distinction between material evidence and hypothetical reconstructions.

"Interpretative model", finally, allows formalizing reconstructive hypotheses and managing degree of uncertainty associated with archaeological data. By introducing parameters such as *Level of Reliability*, the information system permits distinction among

permettendo di ricostruire le trasformazioni del sito attraverso sequenze temporali.

Questo approccio consente di generare modelli tridimensionali riferiti a diverse fasi storiche, che possono essere utilizzati sia per finalità scientifiche sia per applicazioni di comunicazione e valorizzazione del patrimonio. La possibilità di visualizzare il sito nelle diverse fasi della sua evoluzione rappresenta infatti uno degli strumenti più efficaci per comprendere i processi storici e architettonici che ne hanno determinato la formazione.

Nel contesto della *Virtual Archaeology*, il modello interpretativo assume un ruolo particolarmente significativo. Le ricostruzioni virtuali dei siti archeologici, infatti, sono spesso utilizzate per comunicare al pubblico configurazioni spaziali e architettoniche che non sono più visibili nella realtà fisica. Tuttavia, tali ricostruzioni devono essere sempre accompagnate da una chiara esplicitazione del grado di affidabilità delle informazioni utilizzate.

Attraverso l'integrazione del modello interpretativo nel sistema HBIM, è possibile mantenere all'interno delle ricostruzioni virtuali una trasparenza epistemologica, che consente di distinguere tra evidenza, interpretazione e ipotesi. Questo approccio contribuisce a trasformare il modello digitale in uno strumento scientifico rigoroso, capace di supportare non solo la visualizzazione del patrimonio archeologico, ma anche la produzione e la condivisione della conoscenza.

□ Integrazione dei dati e dei modelli (CDE e federazione)

I quattro modelli descritti, spaziale, documentale, stratigrafico e interpretativo, non devono essere intesi come sistemi autonomi, ma come componenti interdipendenti di un'unica architettura informativa finalizzata alla costruzione e alla gestione della conoscenza archeologica. Come visto ciascun modello risponde infatti a una specifica dimensione del dato: il modello documentale organizza e contestualizza il patrimonio delle fonti e della documentazione prodotta nel corso della ricerca; il modello spaziale definisce la struttura metrica e geometrica del sito; il modello stratigrafico introduce la dimensione temporale e relazionale delle evidenze archeologiche; infine, il modello interpretativo consente di formalizzare ipotesi, scenari ricostruttivi e livelli di affidabilità delle informazioni.

La loro integrazione avviene all'interno dell'ambiente HBIM, anche grazie alla georeferenziazione che permette di sovrapporre e visualizzare i dati, secondo un sistema per fasi, e di interrogarli in modo relazionale. Infine il *Common Data Environment* (CDE) costituisce l'infrastruttura digitale entro cui i diversi livelli informativi vengono organizzati, correlati e resi interrogabili. In questo sistema, il modello spaziale funge da struttura portante, poiché fornisce il riferimento tridimensionale necessario per collocare e mettere in relazione

observed data, interpreted data, and hypothetical reconstructions, guaranteeing greater epistemological transparency in construction of digital representations of archaeological heritage.

Integrating these models within a "Common Data Environment" represents a further element of methodological relevance. CDE indeed allows organizing and managing in a coordinated manner the set of data produced during research, facilitating multidisciplinary collaboration among archaeologists, architects, restorers, and other specialists involved in study and conservation of cultural heritage. In this way, the digital model is configured not only as a final product of research but as a dynamic and updatable platform capable of accompanying analysis, conservation, and enhancement activities of the site over time. Research results highlight how adoption of an integrated information approach can contribute to overcoming some main criticalities in archaeological data management, including information fragmentation, difficulty correlating data from different disciplines, and poor traceability of interpretative processes. The proposed model demonstrates how combination of digital survey technologies, HBIM modeling, and data management systems can generate a digital ecosystem of archaeological heritage capable of simultaneously supporting scientific research, conservation, and cultural communication activities. At the same time, research highlights some challenges still open. Among these are need to develop shared standards for representing stratigraphic information in HBIM models, more advanced integration between BIM systems and GIS platforms, as well as adoption of ontologies and controlled vocabularies favoring data interoperability among different information systems. A further development area concerns integrating artificial intelligence and predictive analysis techniques, which could contribute to improving archaeological data management and supporting interpretation of complex contexts. In perspective, the proposed methodological approach may be further developed through integration with immersive technologies like Virtual Reality and Augmented Reality, allowing information models to be transformed into tools for communicating and enhancing cultural heritage. In this sense, the digital model does not merely represent a scientific analysis device but also a platform capable of favoring new forms of public enjoyment and participation.

In conclusion, the presented work demonstrates how integrating Virtual Archaeology and information modeling can contribute to defining new tools for archaeological knowledge management. The proposed multilevel model represents a replicable approach in other archaeological contexts, offering methodology capable of integrating spatial, documentary, and interpretative data into a coherent and dynamic information system. In this perspective, digitizing archaeological heritage must not be understood solely as a process of technological representation but as an opportunity to develop new paradigms for researching, conserving, and enhancing cultural heritage.

tutti gli altri dati. Il modello documentale collega a tale struttura le fonti e i materiali informativi, rendendo esplicito il rapporto tra evidenza materiale e testimonianza documentaria. Il modello stratigrafico, a sua volta, organizza le relazioni cronologiche e funzionali tra gli elementi del sito, permettendo di ricostruire le sequenze di formazione e trasformazione del contesto archeologico. Il modello interpretativo, infine, introduce una dimensione critica, esplicitando il grado di attendibilità delle ricostruzioni e mantenendo aperta la possibilità di aggiornare il sistema alla luce di nuove evidenze.

Questa articolazione multilivello consente di affrontare la complessità del dato archeologico evitando semplificazioni riduttive. Il sistema informativo risultante non si limita a rappresentare la configurazione attuale del sito, ma diventa uno strumento dinamico capace di integrare evidenze materiali, documentazione storica, dati analitici e ipotesi interpretative in un quadro coerente. In tal modo, il modello digitale assume la funzione di infrastruttura conoscitiva, capace di supportare simultaneamente attività di ricerca, conservazione, gestione e valorizzazione del patrimonio.

In questa prospettiva, l'approccio proposto si inserisce nel più ampio paradigma della *digital archaeology*, nel quale i modelli tridimensionali informati non rappresentano soltanto strumenti di visualizzazione, ma veri e propri sistemi di organizzazione e produzione della conoscenza. La federazione dei diversi modelli informativi consente infatti di preservare la complessità del processo interpretativo, mantenendo esplicite le relazioni tra dati empirici, documentazione scientifica e ricostruzioni ipotetiche.

□ Conclusioni

La ricerca esplora le potenzialità dell'integrazione tra *Virtual Archaeology*, modellazione informativa HBIM e sistemi di gestione dei dati digitali per la costruzione di un sistema strutturato di gestione della conoscenza archeologica. L'approccio proposto si fonda sull'idea che i modelli digitali non debbano essere considerati esclusivamente come strumenti di rappresentazione tridimensionale, ma come infrastrutture informative capaci di organizzare, correlare e interpretare dati eterogenei relativi al patrimonio archeologico.

Il contributo principale dello studio consiste nella definizione di un modello informativo multilivello, articolato in quattro componenti principali: modello spaziale, modello documentale, modello stratigrafico e modello interpretativo. Questa articolazione consente di affrontare la complessità del dato archeologico preservando le diverse dimensioni che lo caratterizzano: la dimensione geometrica e metrica del sito, la dimensione documentaria delle fonti, la dimensione temporale delle relazioni stratigrafiche e la dimensione critica dell'interpretazione scientifica.

Il "modello spaziale" costituisce la base metrica e geometrica del sistema, derivata dall'integrazione di tecniche di

□ Credits

The paper is the result of a joint work of the authors. In particular, Tommaso Empler is responsible for sections 1, 2, and 3; Adriana Caldarone for sections 5, 6, and 8; and Pasquale Micelli for sections 4 and 7.

rilievo digitale quali *laser scanning* e fotogrammetria. Esso garantisce la localizzazione tridimensionale degli elementi del sito e rappresenta il supporto su cui vengono organizzate le informazioni relative agli altri modelli. Il “modello documentale” consente invece di strutturare e georeferenziare l’insieme delle fonti e della documentazione prodotta nel corso della ricerca, rendendo possibile la tracciabilità delle evidenze e la verifica delle interpretazioni scientifiche.

Il “modello stratigrafico” introduce la dimensione temporale del contesto archeologico, permettendo di rappresentare le relazioni tra le diverse unità stratigrafiche e di ricostruire le sequenze di formazione e trasformazione del sito. La possibilità di integrare nel modello digitale anche unità stratigrafiche virtuali consente inoltre di rappresentare le parti mancanti o scomparse del contesto archeologico, mantenendo esplicita la distinzione tra evidenze materiali e ricostruzioni ipotetiche.

Il “modello interpretativo”, infine, consente di formalizzare le ipotesi ricostruttive e di gestire il grado di incertezza associato ai dati archeologici. Attraverso l’introduzione di parametri quali il *Level of Reliability*, il sistema informativo permette di distinguere tra dati osservati, dati interpretati e ricostruzioni ipotetiche, garantendo una maggiore trasparenza epistemologica nella costruzione delle rappresentazioni digitali del patrimonio archeologico.

L’integrazione di questi modelli all’interno di un *Common Data Environment* rappresenta un ulteriore elemento di rilevanza metodologica. Il CDE consente infatti di organizzare e gestire in maniera coordinata l’insieme dei dati prodotti nel corso della ricerca, facilitando la collaborazione multidisciplinare tra archeologi, architetti, restauratori e altri specialisti coinvolti nello studio e nella conservazione del patrimonio culturale. In questo modo il modello digitale non si configura soltanto come un prodotto finale della ricerca, ma come una piattaforma dinamica e aggiornabile, capace di accompagnare nel tempo le attività di analisi, conservazione e valorizzazione del sito.

I risultati della ricerca evidenziano come l’adozione di un approccio informativo integrato possa contribuire a superare alcune delle principali criticità nella gestione dei dati archeologici, tra cui la frammentazione delle informazioni, la difficoltà di correlare dati provenienti da discipline diverse e la scarsa tracciabilità dei processi interpretativi. Il modello proposto dimostra come la combinazione tra tecnologie di rilievo digitale, modellazione HBIM e sistemi di gestione dei dati possa generare un ecosistema digitale del patrimonio archeologico, capace di supportare simultaneamente attività di ricerca scientifica, conservazione e comunicazione culturale.

Allo stesso tempo, la ricerca evidenzia alcune sfide ancora aperte. Tra queste si possono ricordare la necessità di sviluppare standard condivisi per la rappresentazione delle informazioni stratigrafiche nei modelli HBIM, l’integrazione più

avanzata tra sistemi BIM e piattaforme GIS, nonché l’adozione di ontologie e vocabolari controllati che favoriscano l’interoperabilità dei dati tra diversi sistemi informativi. Un ulteriore ambito di sviluppo riguarda l’integrazione di tecniche di intelligenza artificiale e analisi predittiva, che potrebbero contribuire a migliorare la gestione dei dati archeologici e a supportare l’interpretazione dei contesti complessi.

In prospettiva, l’approccio metodologico proposto potrà essere ulteriormente sviluppato attraverso l’integrazione con tecnologie immersive come *Virtual Reality* e *Augmented Reality*, che permettono di trasformare i modelli informativi in strumenti di comunicazione e valorizzazione del patrimonio culturale. In questo senso, il modello digitale non rappresenta soltanto un dispositivo di analisi scientifica, ma anche una piattaforma capace di favorire nuove forme di fruizione e partecipazione pubblica.

In conclusione, il lavoro presentato dimostra come l’integrazione tra *Virtual Archaeology* e modellazione informativa possa contribuire alla definizione di nuovi strumenti per la gestione della conoscenza archeologica. Il modello multilivello proposto rappresenta un approccio replicabile in altri contesti archeologici, offrendo una metodologia capace di integrare dati spaziali, documentali e interpretativi in un sistema informativo coerente e dinamico. In questa prospettiva, la digitalizzazione del patrimonio archeologico non deve essere intesa soltanto come un processo di rappresentazione tecnologica, ma come un’opportunità per sviluppare nuovi paradigmi di ricerca, conservazione e valorizzazione del patrimonio culturale.

Crediti

Il documento è frutto del lavoro congiunto degli autori, in particolare: Tommaso Empler si è occupato dei paragrafi 1,2,3; Adriana Caldarone dei paragrafi 5,6,8; Pasquale Micelli dei paragrafi 4 e 7.

□ Bibliografia / References

- Attenni, M., Bianchini, C., Caldarone, A., Griffo, M., Paris, L., Senatore L. J., Rossi, M. L. (2025). Integrating Building Information Modeling for Enhanced Efficiency and Sustainability in Public Construction: The Sapienza University Protocol. In *Heritage* 8(4), 114. DOI: <https://doi.org/10.3390/heritage8040114>.
- Bianchini, C., Casale, A., Empler, T., Esposito, D., Inglesse, C., Ippoliti, E. and Viscogliosi, A. (2019). Ecosistemi digitali e risorse culturali. Digital ecosystems and cultural resources, In *Paesaggio Urbano*, 1, pp. 41–51.
- Bolognesi, C., Demo, V., Bovi, M. (2025). HBIM for a Coordinated Renovation of Historical Assets at Risk. In *Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLVIII-M-9-2025. pp. 165–170. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-9-2025-165-2025>.
- Brusaporci, S., Maiezza, P., Pecilli, D., Vespasiano, L. (2025). Strategie di modellazione HBIM: il caso studio della Chiesa di San Sebastiano a Canistro (AQ). In C. Palestini, S. Brusaporci, G. Caffio, A. Basso (a cura di) *ReUso 2025, Territori Marginali_Patrimonio a Rischio*. Documentazione, Restauro, Rigenerazione, Sostenibilità. Atti del XIII edizione del Convegno ReUso, 29-31 Ottobre 2025. Alghe-ro: Publica, pp. 353-363.
- Bonney, R., Cooper, C. & Ballard, H. (2016) The theory and practice of *citizen science*: launching a new journal, *Citizen Science*. In *Theory and Practice*, 1(1). DOI: <https://doi.org/10.5334/cstp.65>
- Brouquier-Reddé, V., Aounallah, S., Golvin, J.C. (2016). *Dougga, études d'architecture religieuse 2, Les sanctuaires du forum, du centre de l'agglomération et de la grande rue courbe 2*. Bordeaux : Ausonius Éditions.
- Brogiolo, G.P. (1988). *Archeologia dell'edilizia storica*. Como: Edizioni New Press.
- Carandini, A. (1996). *Storie dalla terra. Manuale di scavo archeologico*. Bari: Laterza.
- Demetrescu, E. (2015). Archaeological stratigraphy as a formal language for virtual reconstruction. Theory and practice. In *Journal of Archaeological Science*, 57. pp. 42-55. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jas.2015.02.004>.
- Demetrescu, E., Ferdani, D. (2021), From field archaeology to virtual reconstruction: A five steps method using the Extended Matrix. In *Applied Sciences*, 11. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11115206>.
- Golfetto, A. (1961). *Dougga die Geschichte einer Stadt im Schatten Karthagos*. Basel : Raggi Verlag.
- Harris, E.C. (1979). *Principles of Archaeological Stratigraphy*. London: Academic Press.
- Hou, T., Li, Y., Hu, D., Shi, J. & Lü, G. (2026). A data model for the spatialized integration of archaeological excavation information from prehistoric sites. In *npj Heritage Science*, 14. DOI: <https://doi.org/10.1038/s40494-026-02316-x>
- ICOMOS (2017). The Seville Principles. International Principles of *Virtual Archaeology*. ICOMOS International Scientific Committee on Interpretation and Presentation (ICIP), Siviglia.
- Khanoussi, M. (1998). *Ancient Dougga*. Tunis: Ministère de la culture, Agence nationale d'exploitation et de mise en valeur du patrimoine archéologique et historique.
- Poinssot, C. (1983). *Les ruines de Dougga*. Tunis: Ministère des affaires culturelles.
- Reilly, P. (1991). Towards a *Virtual Archaeology*. In: Lockyear, K. and Rahtz, S. (eds.) *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology 1990*. Oxford: Tempus Reparatum (BAR International Series 565), pp. 132–139.
- Rimella, N., Osello, A., Ozturk, H. B., Del Giudice, M. (2024). Semantic HBIM approach for digital inclusion. In *Disegnarecon*, 17 (32). DOI: <https://doi.org/10.20365/disegnarecon.32.2024.9>.
- Saint-Amans, S. (2004). *Topographie religieuse de Thugga (Dougga) ville romaine d'Afrique proconsulaire (Tunisie)*. Pessac-Bordeaux: Ausonius.