

dottoranda
arch. SABRINA ACQUAVIVA
tutor
prof. arch. ANTONELLA DI LUGGO

**SISTEMI INFORMATIVI TRIDIMENSIONALI
PER LA DOCUMENTAZIONE E LA GESTIONE
DEI DATI DI RILIEVO REALITY-BASED
IN AMBITO ARCHEOLOGICO**

Negli ultimi anni gli avanzamenti nell'ambito delle discipline del rilievo e della rappresentazione dell'architettura e dell'archeologia, sono stati strettamente legati all'evolversi delle *Information and Communications Technologies* (ICT). Tali innovazioni tecnologiche hanno indotto profonde trasformazioni nei processi legati alla tutela e alla documentazione del Patrimonio Culturale, perfezionandone gli strumenti e favorendo il proliferare di nuove modalità di acquisizione, gestione e condivisione delle informazioni. La multidimensionalità del dato è al centro di un crescente sviluppo che parte dalla possibilità di acquisire il reale nelle sue tre dimensioni, ottenendo modelli digitali tridimensionali che non costituiscono soltanto un mero elemento statico di fruizione visiva della realtà, ma anche un sistema conoscitivo portatore di informazioni riguardanti l'oggetto di studio. In tale filone scientifico si inserisce la ricerca, finalizzata ad esplorare i processi di documentazione digitale per la conoscenza del Patrimonio culturale attraverso l'impiego delle metodologie di rilievo integrato ad alta risoluzione come supporto per la creazione di sistemi informativi tridimensionali in piattaforme di tipo GIS. In particolare, il lavoro di tesi si concentra sui beni di interesse archeologico e mira a costruire un workflow operativo che racchiuda in maniera organica i diversi processi di conoscenza del reale - registrazione, elaborazione e rappresentazione del dato - valutando quale metodologia sia più efficace per poter gestire e strutturare un archivio digitale tridimensionale dei manufatti indagati.

dottoranda
arch. SABRINA ACQUAVIVA
tutor
prof. arch. ANTONELLA DI LUGGO

SISTEMI INFORMATIVI TRIDIMENSIONALI
PER LA DOCUMENTAZIONE E LA GESTIONE
DEI DATI DI RILIEVO REALITY-BASED
IN AMBITO ARCHEOLOGICO



Università degli Studi di Napoli Federico II

Dottorato di Ricerca in Architettura

Settore disciplinare: Tecnologie sostenibili, recupero e rappresentazione dell'architettura e dell'ambiente
ciclo XXXV - triennio 2019-2022

Coordinatore del Dottorato di Ricerca in Architettura

Fabio Mangone

Tutor

Antonella di Luggo

Collegio dei docenti

Antonio Acierno
Roberta Amirante
Alfredo Buccaro
Massimiliano Campi
Mara Capone
Renato Capozzi
Alessandro Castagnaro
Maria Cerreta
Angela D'Agostino
Valeria D'Ambrosio
Pasquale De Toro
Antonella di Luggo
Riccardo Florio

Enrico Formato
Carlo Gasparri
Ferruccio Izzo
Giovanni Laino
Laura Lieto
Mario Losasso
Andrea Maglio
Fabio Mangone (coordinatore)
Bianca Marino
Pasquale Miano
Francesco Domenico Moccia
Giovanni Multari
Lilia Pagano
Maria Federica Palestino

Andrea Pane
Adelina Picone
Renata Picone
Maria Rita Pinto
Carmine Piscopo
Sergio Pone
Michelangelo Russo
Maria Rosaria Santangelo
Sergio Russo Ermolli
Valentina Russo
Maria Rosaria Santangelo
Paola Scala

Ringraziamenti

Desidero ringraziare tutte le persone che ho avuto modo di conoscere in questo importante periodo della mia carriera universitaria e che mi hanno aiutata a crescere sia dal punto di vista professionale che umano.

Un ringraziamento speciale va innanzitutto alla Professoressa Antonella di Luggo per i suoi preziosi consigli e in particolar modo per la pazienza, la comprensione e la disponibilità che mi ha mostrato nelle diverse fasi della mia crescita scientifica. Ringrazio anche il Professore Massimiliano Campi, la Professoressa Daniela Palomba e i miei colleghi del TIR-Lab del DiARC con i quali ho condiviso momenti di profonda collaborazione.

Ringrazio la Dott.ssa Antonella Tomeo, funzionario della Soprintendenza Archeologica Belle Arti e Paesaggio per le Province di Caserta e Benevento, per la disponibilità mostrata nel consentirmi di svolgere le attività di rilievo presso la villa di San Rocco in Francolise (Caserta). Ringrazio la dott.ssa Angela Carcaiso e i nuovi colleghi di lavoro che hanno reso l'ultimo anno particolarmente proficuo contribuendo ad arricchire il mio bagaglio scientifico e per gli innumerevoli confronti sull'archeologia. Un ringraziamento va ai miei amici di sempre e a M.M.S.F. che non mi hanno mai fatto mancare il loro supporto.

Vorrei in particolare ringraziare Alessandra, Rosina e Linda per il sostegno e l'amicizia dimostratami in questi anni. Senza i loro consigli e le loro raminzine questa tesi non sarebbe stata la stessa.

Dedico sopra ogni cosa questo lavoro a tutta la mia famiglia che mi ha sempre sostenuta in questo percorso lungo e tortuoso e ha sempre creduto in me anche quando io stessa non lo facevo!

Alla mia famiglia

Alle mie nipotine

Indice

Introduzione	11
--------------	----

PARTE PRIMA

CAPITOLO PRIMO

Il Patrimonio archeologico tra conoscenza e documentazione: obiettivi e criticità

1.1. La documentazione del patrimonio culturale	17
1.2. Il ruolo del disegno e del rilievo nella conoscenza dei contesti archeologici	20
1.3. L'informatizzazione del dato archeologico: <i>Digital Archaeology</i> . Nuove metodologie e tecnologie digitali al servizio della ricerca archeologica	25

CAPITOLO SECONDO

Metodologie e tecniche di rilievo integrato. Dall'acquisizione all'elaborazione del dato

2.1. Metodologie di acquisizione <i>reality-based</i>	34
2.1.1. Sistemi per il rilievo <i>range-based</i>	39
2.1.2. Sistemi per il rilievo <i>image-based</i>	43
2.2. Processi di integrazione del dato puntiforme per l'incremento delle informazioni: il rilievo multi-scalare e multi-sensore	48
2.3. Operazioni di post-processing e gestione dei <i>raw data</i> : dalla nuvola di punti alla restituzione grafica	51

2.3.1.	Processi di semplificazione e editing per l'ottimizzazione del dato	52
2.3.2.	La rappresentazione del dato	55
2.3.3.	Letture e interpretazione dei modelli mediante processi di classificazione e segmentazione	59

CAPITOLO TERZO

Sistemi informativi: dal dato all'informazione

3.1.	Il GIS: sistema di raccolta dati a supporto della documentazione e gestione del dato	63
3.1.1.	La struttura e le componenti dei sistemi GIS	65
3.1.2.	Il GIS in ambito archeologico	68
3.1.3.	L'Implementazione della terza dimensione: metodi e strategie per la costruzione di database 3D	72

PARTE SECONDA

CAPITOLO QUARTO

Le ville romane in Campania: catalogazione e visualizzazione dei dati

4.1.	La villa romana	80
4.2.	Il <i>database</i> delle ville romane nel territorio campano	89
4.2.1.	Dal <i>database</i> alla produzione delle informazioni tramite piattaforma GIS.	
	Mappatura delle ville romane	90

CAPITOLO QUINTO

La villa di San Rocco in Francolise: una struttura abitativa romana nel territorio casertano

5.1.	Il contesto storico e geografico: il territorio di Francolise	98
5.2.	Il contesto culturale: lo scavo archeologico e i progetti di valorizzazione	100
5.3.	La struttura architettonica della villa: cronologia e fasi di costruzione	102

PARTE TERZA

CAPITOLO SESTO

La trasposizione del reale nello spazio digitale: i rilievi *reality-based*. Acquisizione e processamento del dato

6.1.	L'acquisizione del dato: il rilievo <i>range based</i>	121
------	--	-----

6.1.1.	Processamento, editing e filtraggio della nuvola di punti.	124
6.2.	L'acquisizione del dato: i rilievi <i>image-based</i>	129
6.2.1.	Fotogrammetria integrata: aerea e terrestre	129
6.2.2.	Rilievo delle pavimentazioni musive	133
6.3.	Procedure di integrazione e confronto delle nuvole di punti	147

CAPITOLO SETTIMO

Gestione e modellazione del dato tridimensionale nello studio della villa di San Rocco

7.1.	Scelte metodologiche e individuazione del processo operativo per la costruzione di un modello informativo dell'evidenza archeologica	156
7.2.	Progettazione del <i>geo-database intra-site</i> della villa	163
7.2.1.	Editing del dato tridimensionale per la gestione in ambiente GIS	166
7.2.2.	Importazione in ambiente GIS dei modelli puntiformi e poligonali	175
7.2.3.	Gestione e analisi dei dati tridimensionali	176

Conclusione	182
-------------	-----

Bibliografia	11
Indice delle figure	11

INTRODUZIONE

Ambito di ricerca e struttura della tesi

Negli ultimi anni gli avanzamenti nell'ambito delle discipline del rilievo e della rappresentazione dell'architettura e dell'archeologia, sono stati strettamente legati all'evolversi delle *Information and Communications Technologies* (ICT). Le innovazioni tecnologiche hanno difatti indotto profonde trasformazioni nei processi legati alla tutela e alla valorizzazione del Patrimonio Culturale, perfezionandone gli strumenti e favorendo il proliferare di nuove modalità di acquisizione, gestione e condivisione delle informazioni. In particolare, tale rinnovamento, ponendosi in continuità con un consolidato sapere scientifico, ha consentito di creare prospettive di ricerca interessanti nell'ambito dell'analisi sul costruito storico, attraverso approcci interdisciplinari basati sull'azione combinata di tecniche, metodologie e specialisti di settore.

Lo studio e la conoscenza del patrimonio consente di comprendere l'evolversi di una realtà in continuo mutamento. I manufatti che permangono sono contraddistinti molto spesso da caratteristiche di unicità e irripetibilità, la cui documentazione può trarre enormi vantaggi dall'utilizzo complementare e integrato di tecniche e tecnologie del mondo digitale¹.

¹ «Digitalization describes the process of transforming analogue into digital data. For example, negative images are scanned, or transcriptions of texts are created with the aid of text processing programmes, and consequently

L'impatto della digitalizzazione ha condotto ad un mutamento delle modalità di acquisizione e registrazione della realtà e ad un miglioramento di qualità nella natura dei dati raccolti e nelle relative lavorazioni, aprendo la strada a nuove forme di indagine della realtà costruita. La multidimensionalità del dato è al centro di un crescente sviluppo che parte dalla possibilità di acquisire il reale nelle sue tre dimensioni, ottenendone modelli digitali tridimensionali - discreti, implementabili e condivisibili - che non costituiscono soltanto un mero elemento statico di fruizione visiva della realtà, ma anche un sistema conoscitivo portatore di informazioni quantitative e qualitative riguardanti l'oggetto di studio. Essi rappresentano un vero e proprio strumento dinamico di studio su cui intraprendere ricerche orientate a conoscere e valorizzare il costruito storico secondo molteplici punti di vista, dalla documentazione alla prefigurazione di strategie di conservazione.

L'introduzione delle nuvole di punti, dei modelli che ne derivano e dei software necessari per manipolarne i dati, ha cambiato il rapporto tra rilevatore e oggetto rilevato, in quanto l'azione primaria diviene la trasposizione dell'oggetto reale in un ambiente digitale, demandando ad un momento successivo la lettura e comprensione critica del manufatto indagato (Remondino F. et al., 2014; Russo M. et al., 2022). Ciò comporta una massiva raccolta di dati che necessita di essere sistematizzata secondo regole ben precise, al fine di garantirne una lettura corretta e un efficace interscambio. Diverse ricerche recenti hanno infatti focalizzato l'attenzione sulle modalità con cui costruire e gestire dei veri e propri *database* relazionali finalizzati all'archiviazione, interrogazione e visualizzazione di grandi mole di dati multidimensionali ed eterogenei. I principali studi (Janovský M., 2022; Landeschi G. et al. 2021) si interessano dell'individuazione di processi capaci di connettere la trasposizione grafica dei manufatti indagati con le informazioni anche non grafiche che li riguardano. In particolare, volendo sfruttare al meglio i prodotti tridimensionali che derivano dalle principali strumentazioni di acquisizione reality-based (laser scanner e fotogrammetria digitale), è necessario individuare procedure più idonee a gestire il dato 3D geo-morfo-metrico in coerenza con l'annotazione

stored on a computer. Digital products - the data - are of immaterial nature and can be easily copied and distributed
(Gruber - Glahn 2009).

informativa non grafica.

Tra i diversi strumenti che consentono di giungere ad una rappresentazione del reale in ambienti multidimensionali, associandovi anche dati strutturate, vi è il *Building Information Modeling* (BIM) applicato al patrimonio costruito e ai *Geographic Information System* (GIS) impiegati in ambito principalmente territoriale. Entrambe le metodologie presentano enormi vantaggi nella gestione informativa ma, al contempo, anche numerose criticità se adattati al campo del Cultural Heritage poiché la natura dei software utilizzati è orientata a contesti di nuova edificazione e le categorizzazioni negli elementi dell'architettura riconosciuti dai sistemi object-oriented non contemplano molte delle parti essenziali della costituzione di un manufatto storico.

I sistemi BIM non costituiscono soltanto una pura e semplice rappresentazione di elementi tridimensionali ma diventano il supporto visivo a cui sono digitalmente collegate tutte le informazioni relative al manufatto. Si tratta di un database grafico definito all'interno di un sistema parametrico, ove ogni modifica apportata ad un singolo elemento viene, in automatico e in tempo reale, estesa all'intero sistema ed è utilizzato principalmente per supportare e guidare la progettazione di nuova edificazione in quanto ben si presta a replicare digitalmente le forme standardizzate dell'architettura costruita oggi. Tali sistemi presentano invece ancora diverse difficoltà nell'ambito del costruito storico, sebbene diverse ricerche ne dimostrano i vantaggi (Lanzara E. et al., 2021; Banfi F., 2019). Infatti, nonostante le numerose sperimentazioni in HBIM *Heritage/ Historic Building Information Modeling*, non è possibile stabilire ancora un workflow operativo univoco per la realizzazione di tutti gli elementi appartenenti al patrimonio storico in quanto unici nel loro genere e non sempre riproducibili nella logica sottesa alla modellazione parametrica object oriented.

Allo stesso modo i sistemi GIS, nonostante siano stati introdotti nell'ambito della rappresentazione negli anni Ottanta, costituiscono ancora oggi potenti strumenti di analisi e archiviazione di dati di diversa natura, unendo la componente grafica dei sistemi CAD alla componente informativa georiferita sul territorio, fornendo un enorme supporto nella gestione e comprensione di fenomeni di diversa natura. Nonostante siano maggiormente utilizzati per le rappresentazioni bidimensionali a scala

territoriale, i sistemi GIS si sono dimostrati essere di grande supporto anche per la gestione di fenomeni che riguardano l'edilizia a scala architettonica, in quanto rispondono alla necessità di archiviazione e interrogazione dei diversi dati che costituiscono la conoscenza necessaria a comprendere un manufatto architettonico e il suo rapporto con il contesto, ai fini della manutenzione e gestione.

Per il Patrimonio Culturale, i sistemi GIS possono supportare processi di valorizzazione e comunicazione, garantendo l'univocità delle informazioni ai vari livelli di intervento. Solo recentemente però si sta sperimentando l'utilizzo di modelli 3D in stretta relazione alle piattaforme GIS per provare a superarne il limite legato alla rappresentazione bidimensionale (Demetrescu E. et al., 2021; Dell'Unto N. 2019). Alcune ricerche tendono a superare tale ostacolo traguardando una possibile interoperabilità tra sistemi BIM e GIS, sfruttando quindi le potenzialità di modellazione a scala architettonica dei primi e la possibilità di svolgere analisi spaziali dei secondi, al fine di ottenere interrogazioni più accurate e multi-scalari e di estrapolare i dati in modo semiautomatico secondo una semantica ben definita. Con la recente possibilità di aggiungere modelli tridimensionali derivanti dai rilievi digitali in entrambi i processi (BIM e GIS) si sono aperti nuovi scenari di ricerca per la modellazione parametrica su cui si fondano i processi BIM e per il perfezionamento dei risultati delle analisi dei sistemi geografici. I modelli puntiformi come i poligonali tipici e i sistemi GIS acquistano in queste piattaforme una duplice funzione, divenendo da un lato oggetti chiarificatori del reale attraverso i quali comprendere le parti e gli elementi che lo compongono e, dall'altro, di supporto per le operazioni di restituzione delle informazioni.

Sulla base di tali premesse la ricerca, oggetto della presente tesi di dottorato, rientra nell'ambito disciplinare del rilievo e della rappresentazione ed ha come obiettivo l'analisi dei processi di documentazione digitale per la conoscenza del Patrimonio culturale attraverso l'impiego delle metodologie di rilievo integrato ad alta risoluzione come supporto per la creazione di sistemi informativi tridimensionali in piattaforme di tipo GIS.

In particolare, il lavoro di tesi si concentra sui beni di interesse archeologico e mira a costruire un *workflow* operativo che racchiuda in maniera organica i diversi processi di conoscenza del reale - registrazione, elaborazione e

rappresentazione del dato -, valutando quale metodologia sia più efficace per poter gestire e strutturare un archivio digitale tridimensionale dei manufatti indagati. Di fondamentale importanza per la ricerca risulta essere la fase di definizione dell'elemento al quale collegare le informazioni che generalmente rappresentano la conoscenza di base per i manufatti archeologici, affinché queste ultime siano relazionabili e integrabili durante il procedere degli studi inerenti il bene specifico. In ambito archeologico i prodotti derivanti dalle fasi di rilievo e di rappresentazione costituiscono una base documentale fondamentale per la conoscenza e la conservazione dei reperti. Il digitale ha modificato il modo di approcciare alla documentazione archeologica ma non ha risolto del tutto la necessità di tenere assieme anche informazioni non metriche e non grafiche, indispensabili alla lettura del reperto. L'archeologia, infatti, come ogni altra disciplina porta con sé un bagaglio informativo considerevole che resta spesso archiviato e risulta di complicata lettura a causa della sua frammentarietà. La ricerca di tesi, dunque, intende strutturare un workflow che porti alla creazione di un database univoco e interoperabile.

Nello specifico, la tesi si articola in tre parti:

- La prima parte analizza il tema della documentazione digitale, esaminando le recenti sperimentazioni condotte nel campo del rilievo e della rappresentazione in ambito archeologico e soffermandosi sulle più attuali procedure riscontrate in letteratura attraverso lo studio di esperienze di ricerche nazionali ed internazionali. Di queste si sono analizzati i risultati, con particolare attenzione alla gestione in ambiente tridimensionale del dato di rilievo in associazione a dati informativi di diversa natura.

- La seconda parte circoscrive lo studio ad un particolare ambito archeologico definito dalle ville di epoca romana disseminate sul territorio campano. Per esse sono stati individuati i caratteri maggiormente significativi e indispensabili alla strutturazione di un archivio digitale, sempre implementabile, con l'obiettivo di raccogliere e sistematizzare le informazioni storiche, morfologiche, fisiche e descrittive in un unico database multidimensionale. In questa fase è stato individuato il caso studio, un manufatto rappresentativo per lo sviluppo della ricerca. La scelta è ricaduta sulla villa romana di San Rocco in Francolise sita nel territorio casertano, individuata a seguito dell'analisi incrociata dei dati raccolti a scala territoriale. La villa costituisce un caso emblematico per il

territorio, in quanto conserva molte delle caratteristiche rappresentative della specifica tipologia di manufatto. Si è conservata, ad esempio, una ricca pavimentazione musiva. La villa rappresenta una delle prime strutture ad essere stata studiata secondo il *metodo stratigrafico*, condizione che consente dunque di ricostruire le differenti fasi storiche. Lo studio della villa prende avvio con l'esecuzione di un rilievo integrato reality-based effettuato grazie all'ausilio delle moderne tecnologie digitali, quali scansioni laser e acquisizioni fotogrammetriche, utili per trasposizione in digitale di un gemello digitale del manufatto dal punto di vista metrico e fotorealistico. Mediante una lettura incrociata dei dati di rilievo con la documentazione di scavo è stato possibile comprendere la conformazione e destinazione degli spazi nonché le relazioni che intercorrono tra i diversi ambienti e, allo stesso tempo, fornire una documentazione dettagliata e aggiornata dello stato di fatto.

- Nella terza parte sono state analizzate le problematiche relative alla gestione dei modelli tridimensionali discreti e geometrici all'interno dei sistemi GIS, legate alla scala del singolo sito archeologico (intra-site), con l'obiettivo di valutare quale iter procedurale si dimostra maggiormente efficace a strutturare e gestire un archivio tridimensionale informatizzato delle evidenze archeologiche. Pertanto, in una prima fase, il modello tridimensionale generato tramite i rilievi reality based si è configurato quale fonte di informazioni capace di fornire i dati per la realizzazione e composizione del database della villa, attraverso viste bidimensionali e caratterizzazioni delle tessiture murarie. In una seconda fase, tale modello - puntiforme o poligonale -, si è prefigurato quale strumento utile per le successive analisi e sperimentazioni in ambiente spaziale tridimensionale, concentrandosi in particolare sulle possibilità di collegamento allo stesso di informazioni alfanumeriche.

CAPITOLO PRIMO

**Il Patrimonio archeologico tra conoscenza e documentazione:
obiettivi e criticità****1.1 La documentazione del Patrimonio Culturale**

*«Vero storico non è né il ricercatore che 'scova' nuovi documenti,
né il 'cronista' che affastella quelli già conosciuti,
ma colui che, basandosi sulla documentazione edita o inedita a sua disposizione,
è capace di ordinarla, di comprenderla, di narrarla...»*

Roberto de Mattei, 1948.

Nella contemporaneità la documentazione e la digitalizzazione si configurano quali operazioni strettamente connesse. In un'epoca governata da strumenti digitali sempre più performanti e nuove forme di comunicazione, i processi di documentazione si sono velocemente convertiti dall'analogico al digitale, dando luogo a sistemi particolarmente efficaci per lo studio e per la diffusione della conoscenza.

In particolare, l'ambito del *Cultural Heritage* è quello che maggiormente ha sentito il cambiamento provocato dalla digitalizzazione, poiché quest'ultima ha implicitamente influito sulle operazioni di tutela, di valorizzazione e di

gestione dei beni culturali¹.

Considerando che ogni documentazione si basa sulla comprensione e sulla conoscenza approfondita del bene indagato, sia in merito agli aspetti architettonici e storico-artistici, sia per ciò che concerne le sue specifiche peculiarità, documentare un bene culturale significa registrarne e memorizzarne le caratteristiche tangibili e intangibili che lo contraddistinguono avendo come fondamento il riconoscimento del bene stesso in quanto elemento da tutelare. Esso rappresenta la testimonianza attraverso cui si tramanda la memoria storica dell'uomo, costituita da tracce, segni ed elementi che nel tempo ne hanno comportato continue trasformazioni, dando vita a scenari sempre diversi. Ogni bene è infatti testimonianza materiale che ha valore di civiltà e nasce dall'interazione tra la sua concretezza fisica e la sua valenza simbolica, queste ultime rilette attraverso la percezione del fruitore e dunque di colui che guarda, studia e analizza. Come è evidente, il fine di ogni processo volto alla documentazione di un bene culturale è riconducibile alla sua conoscenza, alla sua valorizzazione e alla sua tutela e ciò avviene attraverso rappresentazioni e cioè attraverso la costruzione di immagini che rappresentano il simulacro del bene e che nel tempo ad esso si associano, consentendo così di memorizzarne e registrarne la storia e le conformazioni assunte nel tempo, al fine di comprenderne le radici della sua complessità e i suoi significati.

Risulta evidente, però, che la lettura e l'analisi del patrimonio costruito, di sovente caratterizzato da modifiche e stratificazioni, comporti alcune criticità documentali soprattutto in relazione alla quantità di informazioni che allo stesso bene si associano. Inoltre, molto spesso, le rappresentazioni - intese come evidenze metriche e geometriche di un bene - costituiscono l'unica testimonianza disponibile e concreta per la conoscenza. Basti pensare alle aree archeologiche di cui non vi è traccia di fonti testuali ma, per le quali, i pochi frammenti rinvenuti costituiscono gli unici elementi che è possibile leggere e analizzare. Pertanto, si necessita di differenti chiavi di lettura che a partire dall'immagine di uno stato di fatto, conducano ad indagini e interpretazioni della complessità che sottende il manufatto

1 «Sono beni culturali le cose immobili e mobili che presentano interesse artistico, storico, archeologico, etnoantropologico, archivistico e bibliografico e le altre cose individuate dalla legge o in base alla legge quali testimonianze aventi valore di civiltà» (art. 2, comma 2, del D.Lgs. 42/2004, Codice dei beni culturali).

stesso.

Oggigiorno, gli ambiti della tutela e della documentazione si avvalgono del continuo sviluppo delle *Information and Communication Technologies* (ICT) che hanno comportato l'unione tra il mondo digitale e quello della ricerca scientifica, influenzando le modalità di indagine, visualizzazione e comunicazione del Patrimonio Culturale. Se si guarda al campo della rappresentazione e del rilievo si è passati dal disegno a mano a quello digitale tramite i sistemi CAD, trasferendo l'azione del disegnare dal foglio/tecnigrafo allo spazio digitale, facilitandone e rendendo più dinamica l'operazione (Salerno R., 2012; Bezzi L. et al., 2011). Si è giunti poi alle nuove forme di modellazione tridimensionale e parametrica (Banfi F., 2020; Bosco A., 2019), coadiuvate dalle innovative modalità di rilievo e comunicazione – realtà aumentata e realtà virtuale - che hanno consentito una diversa modalità di diffusione dei risultati (Ferdani D. et al., 2022; Demetrescu E. et al., 2021).

Il proliferare di strumentazioni attraverso le quali è possibile analizzare in modo più accurato il Patrimonio e mettere in relazione dati di natura diversa, ha reso più immediata la sua documentazione e divulgazione in ambito digitale, dove il disegno e l'immagine visiva costituiscono gli elementi basilari per una comunicazione efficace. Ma se da un lato l'introduzione delle tecnologie digitali a servizio del Patrimonio Culturale ha prodotto numerosi vantaggi, d'altro lato ha comportato interrogativi sulle modalità di verifica dell'integrità e veridicità dei dati prodotti. A tal proposito, va ricordato che già nel 2009 con la Carta di Londra² si è cercato di definire una regolamentazione per quanto concerne la visualizzazione digitale per la comunicazione dei beni culturali (Brusaporci S. et al., 2013). La definizione di principi metodologici³ mira, infatti, ad ottenere un'uniformità nei processi di digitalizzazione e di documentazione “*aiutando a costruire pratiche di lavoro ben meditate*”. La disciplina che ha maggiormente

2 “*London Charter for the Use of Three-dimensional Visualization in the Research and Communication of Cultural Heritage*”. www.londoncharter.org/history.html

3 Implementazione, Scopi e metodi, Fonti della ricerca, Documentazione, Sostenibilità, Accessibilità.

recepito questi principi è quella archeologica, che ha dato luogo alla stesura della Carta di Siviglia, scritta dai membri International Forum of Virtual Archaeology, per cercare di rendere concreti i contenuti della carta di Londra, in particolare *«Any project involving the use of new technologies, linked to computer-based visualization in the field of archaeological heritage, whether for research, documentation, conservation or dissemination, must be supported by a team of professionals from different branches of knowledge»*.

Nella realtà contemporanea risulta dunque importante il concetto di *informazione* e di fonte della stessa, rendendo necessario il proliferare di attività che connettono dati finali e fonti in modo da renderne univoca la lettura. È quindi cambiato il modo di intendere la documentazione dei beni culturali, nelle modalità di registrazione delle informazioni (dal rilievo tradizionale ai rilievi reality based) e nel supporto (da cartaceo a digitale), ma anche dal punto di vista metodologico, dando luogo non più ad una raccolta di dati settorializzati ma interrelati e integrati tra loro, al fine anche di realizzare approcci multidisciplinari, basati sulla sinergia tra i diversi attori coinvolti nel processo di analisi del bene.

1.2 Il ruolo del disegno e del rilievo nella conoscenza dei contesti archeologici

Il disegno e il rilievo sono da sempre considerati elementi tanto tecnici quanto teorici che si sono sviluppati ed evoluti contemporaneamente traendo beneficio l'uno dall'altro e sfruttando le differenti potenzialità reciproche che ne hanno permesso la crescita e il continuo progresso. Queste due discipline hanno poi trovato nelle tecnologie digitali strumenti utili che ne hanno permesso un affinamento sempre maggiore. L'ambito del Cultural Heritage e della sua conoscenza e documentazione è quello che maggiormente pone le basi nei processi di rilievo e rappresentazione, in quanto costituiscono gli unici strumenti che consentono di registrare ed imprimere su di un supporto grafico la realtà storica.

Il disegno 2D delle strutture archeologiche resta ancora oggi uno dei principali strumenti utilizzati dagli archeologi durante le ricognizioni sul campo. Esso conferma la sua funzione di strumento indispensabile per narrare e raccontare, con segni e linguaggi codificati, un messaggio

informativo specifico, che però può avvalersi di nuove modalità di comunicazione dinamiche e interattive.

Come è noto, il disegno, nel suo significato più ampio, non è soltanto pratica applicativa, ma è di per sé una forma di conoscenza capace di istituire «un'analogia con la realtà fisica»⁴. È supporto visivo e chiave di lettura fondamentale per comprendere, documentare ed esplicitare i valori formali e compositivi del reale, attraverso un processo che collabora alla determinazione delle relazioni che sottendono la spazialità di un'opera. Ciascun disegno, partendo dalla scala d'insieme fino ad arrivare al dettaglio, ha una sua autonomia figurale pur essendo correlato al *corpus* complessivo degli elaborati, restituendo per ogni elemento indagato gli aspetti formali e compositivi e, allo stesso tempo, gli aspetti quantitativi e tecnico-strutturali utili alla sua documentazione e comprensione, creando un efficace ponte comunicativo tra la fase di studio e progettazione del rilievo e quella di trascrizione delle informazioni, dove il disegno svolge il ruolo di comune denominatore di tutto il processo.

In archeologia, più che in ogni altra disciplina, il disegno costituisce ciò che consente di registrare le complesse articolazioni degli ambienti e lo stato di fatto delle strutture. «Nella tradizione di questa disciplina la restituzione di un oggetto si basa sul metodo delle proiezioni ortogonali e si distinguono fundamentalmente due tipi di rappresentazioni grafiche: la pianta e il prospetto» (Bianchini M., 2012); queste costituiscono le tecniche essenziali per rendere leggibili le varie tessiture murarie attraverso la raffigurazione della caratterizzazione. Allo stesso tempo però costituiscono strumenti divulgativi in quanto consentono di tramandare e diffondere la conoscenza di tali contesti. Ciò che si evince è il carattere fortemente comunicativo di tali strumenti grafici, in grado di rendere leggibili e comprensibili le differenti stratigrafie archeologiche, figurando non soltanto come strumenti critici ma anche elementi concreti attraverso i quali la ricerca scientifica si interseca e si intreccia alla prassi illustrativa e divulgativa (Medri M., 2003). Il disegno in ambito archeologico, pertanto, si configura quale strumento in grado di imprimere su di un supporto grafico la discontinuità della materia, somma delle differenti analisi archeologiche, e di ricomporla in un insieme organico a seguito di uno studio interpretativo e ricostruttivo

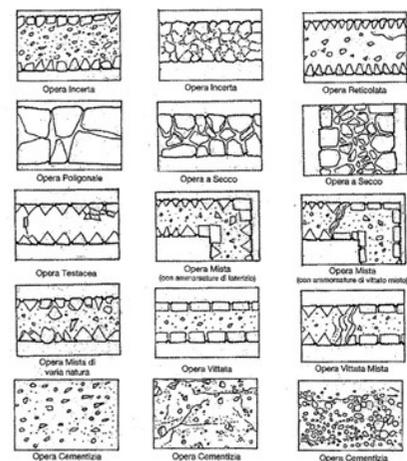


Fig. 1 _ Caratterizzazione delle tecniche edilizie.
Fonte: Medri M., Manuale di rilievo archeologico, 2003.

(Carandini M., 2000). Il disegno 2D delle strutture archeologiche resta pertanto ancora oggi uno dei principali strumenti utilizzati dagli archeologi durante le ricognizioni sul campo. Esso conferma la sua funzione di strumento indispensabile per narrare e raccontare, con segni e linguaggi codificati, un messaggio informativo specifico, che però può avvalersi di nuove modalità di comunicazione dinamiche e interattive. L'incremento e la diversificazione dei formati di rappresentazione e comunicazione digitale – mappe, immagini, video, tour virtuali, modelli 3D – hanno favorito ancor di più l'accessibilità al patrimonio attraverso l'utilizzo di piattaforme interattive o apposite *app-mobile* facilmente condivisibili e, di conseguenza, di grande contributo nella creazione di processi alternativi di valorizzazione e tutela.

Ad oggi la rappresentazione archeologica si divide tra la vettorializzazione mediante strumenti di disegno digitale automatizzato delle strutture murarie e il disegno - spesso ancora prettamente manuale - dei reperti. Queste due modalità non vanno di pari passo, al contrario il cambiamento repentino delle modalità di documentazione digitale delle unità stratigrafiche in uno scavo archeologico ha comportato una diminuzione dei tempi di analisi e rappresentazione delle stesse e un dilatazione della restituzione degli elementi di dimensioni inferiori. Ciò è dovuto principalmente ai nuovi tempi di registrazione dei dati in formato digitale notevolmente ridotti, che consentono allo stesso tempo una lettura immediata delle aree di scavo e l'opportunità di poterle visionare anche successivamente, riuscendo a documentare e *conservare* digitalmente gli strati archeologici nel tempo data la natura distruttiva di uno scavo. Al contrario dei reperti che necessitano a monte una lettura e una classificazione antecedenti alla loro documentazione e raffigurazione. In particolare, le più recenti metodologie di rilievo digitale, i cui processi risultano ad oggi ampiamente consolidati, permettono di acquisire la morfologia del manufatto⁵, le sue caratteristiche metriche e geometriche, restituendole sotto forma di nuvola di punti, ovvero di un modello 3D che costituisce un "calco" dell'oggetto reale. Il risultato della fase di acquisizione è, come è noto, una raccolta di dati *a-critica*, in quanto tali metodologie consentono di rilevare indifferentemente tutto ciò che è

5 Remondino F. et al., 2011.



Fig. 2_ Visualizzazione in ambiente tridimensionale della nuvola di punti della Villa romana di Caius Olius Ampliatus (Ponticelli, Napoli). Elaborazione di S. Acquaviva

presente nel campo visivo dello strumento impiegato e solo attraverso la successiva elaborazione e rappresentazione è possibile pervenire alla conoscenza di quanto rilevato. Pertanto, è evidente come tali tecniche, sebbene siano notevolmente speditive e in gran parte automatiche, in realtà necessitano di un controllo costante del rilevatore a cui spetta la regia dell'intero processo. Inoltre, uno dei vantaggi di queste metodologie risiede nella loro natura no-contact, in quanto consentono di rilevare le informazioni metriche e geometriche dell'oggetto in tempi rapidi evitando il contatto con le strutture e riducendo così il rischio di danneggiarle (Campi M., 2017).

È noto che i rilievi *reality based*, per quanto simili dal punto di vista procedurale, presentano delle differenze inerenti le peculiarità di ogni strumento. Infatti, seppur i rilievi *range based* e *image based* generano come *output* finale una nuvola di punti, presentano differenze in fase di acquisizione e in fase di processamento, generando inoltre risultati diversi anche in termini di accuratezza e resa fotorealistica del dato. Pertanto, è di fondamentale importanza valutare la metodologia da utilizzare rispetto all'obiettivo del rilievo, a seconda che si tratti di paesaggi, manufatti, reperti, ambienti ipogei e rupestri o siti archeologici subacquei (Remondino F., 2010; Bezzi L., 2011; Saleri R. et al., 2013; Santagati C., 2014; Beltrame C., 2018; Campi M. et al., 2019). Va segnalato che l'utilizzo sempre più massivo di queste metodologie, se da un lato ha comportato notevoli vantaggi in termini di precisione, accuratezza e velocità di acquisizione dei dati, dall'altro

ha limitato la pratica del disegno manuale e l'adozione delle tecniche di rilievo diretto, venendo a ridursi in tal modo una fase fondamentale e cioè quella del contatto diretto con i resti, operazione questa che di fatto costituisce il modo più efficace per comprendere le specificità dell'oggetto di studio nelle successive fasi di discretizzazione ed interpretazione⁶. La differenza sostanziale, che porta a prediligere le tecnologie digitali, è la possibilità di gestire i dati e avere una lettura completa dell'oggetto all'interno di uno spazio tridimensionale digitale che consente di manipolare il manufatto liberamente, senza limiti e senza ripercussioni reali. La nuvola di punti, derivante dai rilievi *reality-based*, navigabile e misurabile, rende difatti possibile estrapolare le informazioni 3D necessarie per la comprensione e l'analisi delle evidenze archeologiche come le informazioni stratigrafiche, metriche e geometriche (Fregonese L. et al., 2018). La possibilità, pertanto, di poter utilizzare le tecnologie digitali in ambito archeologico ha aperto la strada a percorsi inesplorati e ad approfondimenti specifici in tutti i campi del sapere. In particolare, tale patrimonio ha sicuramente beneficiato del fatto di potersi avvalere di sistemi di documentazione digitale anche considerando la possibilità di ricreare digitalmente il bene nella sua tridimensionalità - sia esso un edificio, un elemento scultoreo o un resto archeologico - e di poterlo rappresentare e analizzare con differenti livelli di approfondimento, diffondendone più agevolmente la conoscenza e determinando implicitamente nuovi percorsi di ricerca.

Pertanto, in questo scenario, sempre in continua evoluzione, l'utilizzo delle metodologie di rilievo *reality-based*⁷ ha rivoluzionato la modalità di documentazione e di registrazione del dato archeologico e allo stesso tempo ha reso più intuitiva la sua gestione e divulgazione negli ambiti di tutela, valorizzazione e fruizione dei contesti archeologici. Come è noto, infatti, ogni sito archeologico è caratterizzato da poche evidenze materiali frammentarie e raramente si conservano strutture integre. Inoltre, questi

6 Bianchini M., 2012.

7 Gli strumenti che rientrano nelle metodologie *reality based* vengono classificati in base al principio di funzionamento e in particolare alla tipologia di fonte luminosa che rende possibile l'acquisizione delle informazioni, e quindi a seconda che si tratti di un raggio laser o di luce naturale si parla rispettivamente di rilievi *range based* e *image based*.

stessi resti nel tempo tendono a mutare e in molti casi a scomparire quando sottoposti alla continua azione dei fenomeni naturali e/o antropici che ne peggiorano le condizioni e ne comportano la perdita dell'integrità. Tali manufatti costituiscono testimonianze di un passato molto spesso sconosciuto, un insieme di tracce e di linguaggi antichi che si sono stratificati nel corso dei secoli. Il loro studio, pertanto, rende possibile non solo di colmare la distanza temporale, ma anche di riscoprire gli eventi e le trasformazioni che ne hanno contrassegnato l'evoluzione, ampliando e diffondendo la conoscenza del bene e della sua memoria storica.

Fig. 3 _ Terme di via Terracina (sopra), Terme di Baia (centro), Anfiteatro di Pozzuoli (sotto).
Fotografie a cura dell'autrice.



1.3. L'informatizzazione del dato archeologico: *Digital Archaeology*. Nuove metodologie e tecnologie digitali al servizio della ricerca archeologica

Documentare, gestire e tutelare il patrimonio archeologico è da sempre un processo articolato che richiede approcci multidisciplinari per poter comprendere a pieno il significato dell'oggetto indagato. Alla base del processo conoscitivo *dato-informazione-conoscenza*, il dato rappresenta

l'elemento primario che ha il maggior contributo informativo nella sua forma grezza (*raw data*), oggettiva e manipolabile (D'Andrea, 2006) e che si trasforma in informazioni se studiato, analizzato e integrato con altri dati in un flusso continuo che porta alla conoscenza. La registrazione e la gestione dei record archeologici sono state influenzate dallo sviluppo delle tecnologie informatiche ICT e dalle connessioni di rete, attraverso un aggiornamento delle metodologie di rilievo – *reality based* –, apportando al tempo stesso profonde trasformazioni nella lettura del dato. Sono state introdotte nuove modalità di indagine che, pur continuando a convivere con le tradizionali tecniche, hanno condotto a risultati globali maggiormente accurati. Allo stesso tempo la documentazione grafica, sia essa cartacea o digitale, rappresenta il fondamento essenziale dell'indagine archeologica, ed è uno strumento di comprensione e comunicazione attraverso cui si attua il processo di analisi, decodifica e discretizzazione del reale. Accanto a ciò, l'espansione e il potenziamento di forme di integrazione e di interazione tra l'oggetto reale e i fruitori - siano essi specialisti o non esperti del settore - ha enfatizzato l'attenzione verso la comunicazione di tipo visuale, attraverso le possibilità offerte dalle connessioni visive tra lo spazio reale e lo spazio virtuale e/o digitale. Questa *rivoluzione digitale* ha consentito di effettuare analisi sui dati molto più complesse, di modellare e simulare in modo molto più performante l'articolato contesto dei siti archeologici e di poterne fruire sia in remoto che *in situ*, dando luogo a rinnovati approcci metodologici legati alla multidimensionalità del dato e all'interscambio di informazioni tra specialisti di più settori.

L'avvento del digitale e dell'informatica nella disciplina archeologica è avvenuto più lentamente rispetto ad altri campi⁸ e con minor fiducia in quanto si tratta di un contesto fortemente radicato e legato alle tecniche antiche e alla cultura umanistica. Le prime applicazioni che si sono inserite in contesti tradizionali sono racchiuse all'interno della cosiddetta *Digital Archaeology*⁹, un ambito applicativo

8 Aree di studio simili all'archeologia come, ad esempio, l'architettura e l'ingegneria hanno acquisito più velocemente il cambiamento apportato dall'era digitale. Con la rivoluzione informatica e digitale la potenza di calcolo aumenta, gli strumenti classici invecchiano rapidamente. L'utilizzo del computer in tutte le discipline ha condotto verso nuove forme di studio e ricerca consentendo di creare una vasta gamma di forme complesse difficilmente raggiungibili prima (Paris S., 2017).

9 «There are two distinct and ultimately contradictory views. The first view is digital

estremamente ampio che ingloba aspetti e metodi, pratici e teorici. Al suo interno si è soliti contraddistinguere due grandi specializzazioni diverse ovvero lo sviluppo di sistemi informativi per l'archeologia e lo sviluppo di processi di archeologia virtuale. Sebbene si tratti di campi del tutto indipendenti, ricerche recenti dimostrano le potenzialità di un'integrazione tra i due (Pansini R., 2022).

I sistemi informativi per l'archeologia si basano sull'impiego di strumenti di tipo GIS (*Geographic Information System*), nati e utilizzati per la gestione del territorio su larga scala¹⁰. Si tratta di sistemi informativi che ben si prestano allo studio e all'analisi delle peculiarità dei contesti archeologici poiché permettono di archiviare e rappresentare i dati, ma anche di eseguire su di essi analisi multi-scalari ed incrociate, per una migliore lettura del contesto¹¹. Nonostante le prime applicazioni GIS in ambito archeologico abbiano avuto pochi consensi, in tempi brevi hanno però trovato un largo utilizzo grazie alla possibilità di archiviare tutte le informazioni desumibili da uno scavo archeologico in appositi database relazionali (in grado di gestire la complessa articolazione delle unità stratigrafiche, l'unione tra la componente grafica e alfanumerica, la capacità dei sistemi di incrociare tali dati mediante analisi statistiche e spaziali), si è dimostrata essere di enorme supporto.

Costituiscono ad oggi una pratica ampiamente consolidata e diffusa in campo archeologico. In particolare, consentono di raccogliere in un unico

developments are essentially methodological. They provide a set of tools, similar to any other set of tools in the archaeological tool kit for solving problems that are generated by a variety of theoretical or narrative concerns. From this viewpoint, digital archaeology is no different than the myriad of dating or environmental reconstruction techniques that range from radiocarbon dating to palynology. [...] The second view is digital developments create or at least influence the creation of theory». Zubrow E. B. W., 2006.

10 I primi sistemi sono stati sviluppati tra il 1959 e il 1961 creando le prime cartografie digitali. Alla fine degli anni Settanta si potevano contare circa 300 *software* in grado di gestire i dati cartografici sviluppati da agenzie governative, servizi cartografici e militari ed enti di ricerca, tra cui ESRI (*Environmental System Research Institute*). Parallelamente allo sviluppo di software con licenza negli anni Novanta iniziarono a diffondersi i primi software liberi (*open source*) come GRASS e successivamente QGIS.

11 Un GIS archeologico è «un sistema e un modello spaziale di archiviazione ed elaborazione di dati, eventi ed attività spaziali, finalizzato all'interpretazione del paesaggio storico e archeologico, dal sito al territorio, dal costruito all'insediato, dalla micro-scala alla macro-scala». Forte M., 2002.

template la conoscenza storica, la configurazione spaziale, il rapporto con il contesto e la descrizione diacronica delle parti, per ogni singolo manufatto, (Djindjian F., 1998; D'Andrea A., 2000; Forte M., 2002; Mehrer M. W., 2002; Guermandi 2009).

I processi di archeologia virtuale, invece, rappresentano un elemento prettamente comunicativo, utile alla diffusione al pubblico di ciò che è stato studiato, analizzato e ricostruito. In particolare, si avvantaggiano della possibilità di fruire di un dato tridimensionale che, se utilizzato coerentemente e correttamente, rappresenta il mezzo più efficace per rendere fruibili, con le tecnologie a disposizione, manufatti spesso non accessibili o non più esistenti. È indubbio come la disciplina archeologica fondata su punti chiave quali registrazione, interpretazione e comunicazione del dato, trovi nell'utilizzo delle immagini tridimensionali uno strumento dal potere altamente evocativo.

Le prime sperimentazioni di *Virtual Archaeology*¹² riguardano la riproposizione di strutture archeologiche attraverso modellazioni tridimensionali statiche che imitano geometricamente e metricamente un determinato stato di fatto del manufatto indagato con alta resa fotorealistica, rievocando quel passato oramai perduto e focalizzandosi molto spesso su un singolo periodo storico. Si tratta quindi di una selezione di informazioni rese disponibili in modelli 3D derivanti da interpretazioni dello studioso che ne guida la modellazione stessa.

Con l'avanzare delle tecnologie digitali si è sviluppato un nuovo filone di sperimentazione del digitale che è stato individuato come *Cyber Archaeology*. Quest'ultima mira ad un avanzamento della *Virtual Archaeology* poiché intende simulare il reale attraverso una digitalizzazione molto più dinamica e interattiva, basata sul reale ed evitando ricostruzioni soggettive. Una delle modalità proposte dalla Cyber archaeology è quella di poter utilizzare i dati derivanti dai rilievi *reality based* e interagire con essi creando tour virtuali o applicazioni immersive attraverso cui visualizzare, in ambiente tridimensionale, siti non accessibili o ricostruzioni di aree non più esistenti.

12 L'espressione fu introdotta per la prima volta da Paul Reilly nel 1990. In Italia il primo ad occuparsene fu M. Forte soltanto nel 1996.

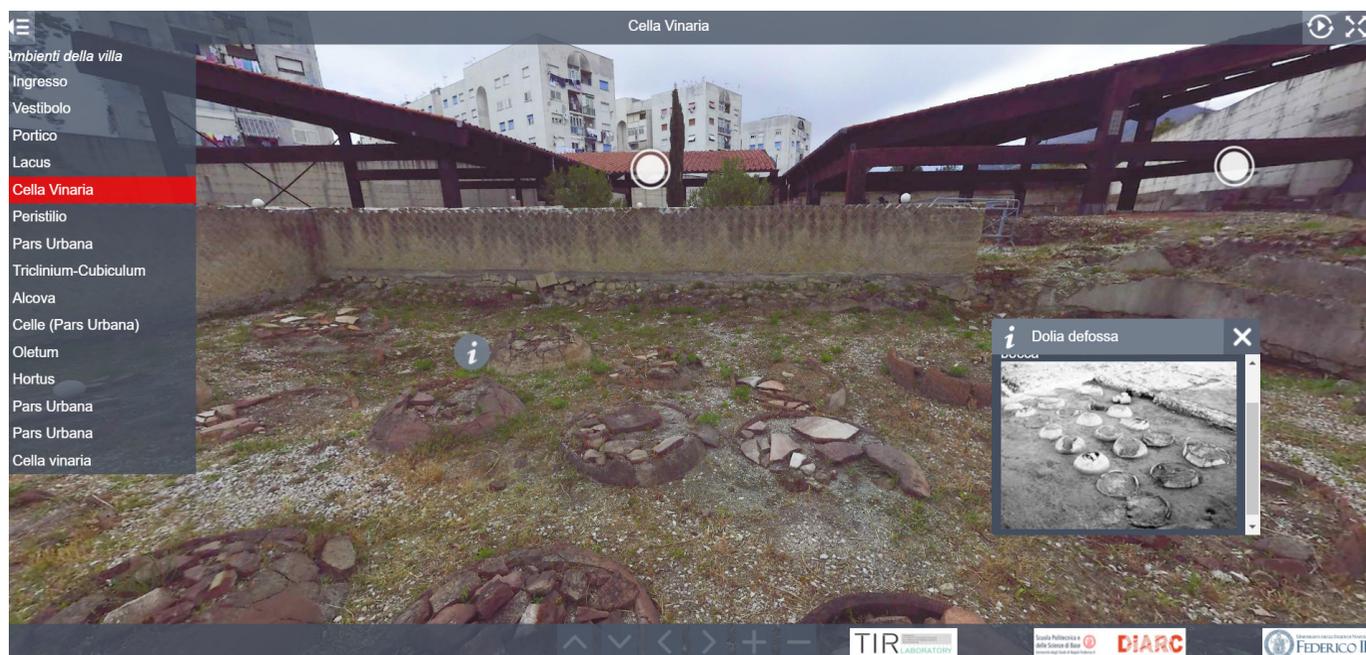


Fig. 4 a_ Tour virtuale della Villa romana di Caius Olius Ampliatus.. Elaborazione grafica S. Acquaviva

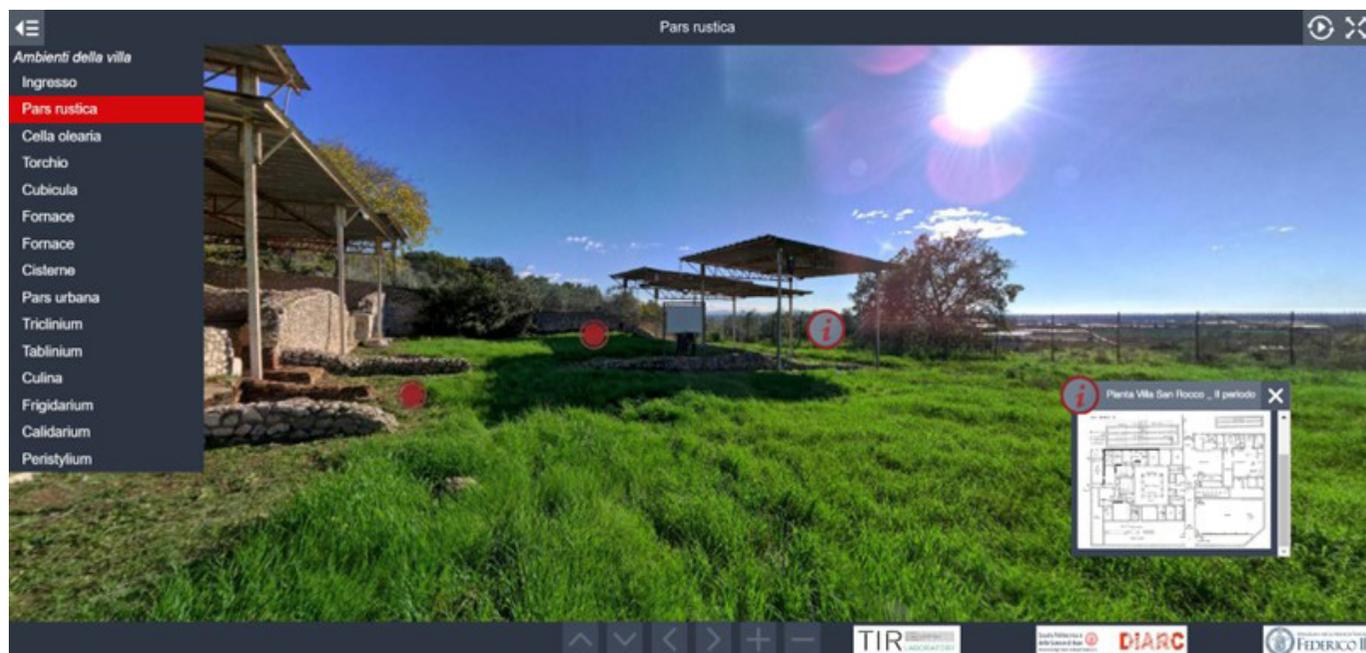
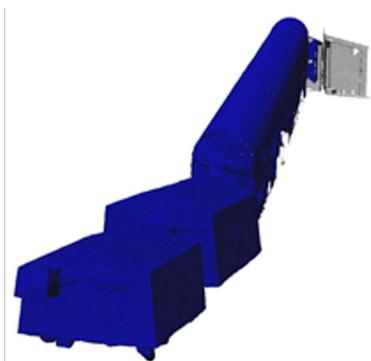


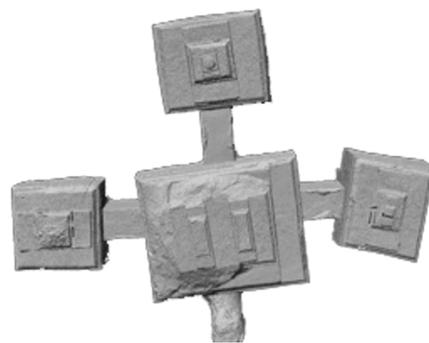
Fig. 4b _ Tour virtuale con utilizzo di immagini 360° della Villa romana di San Rocco (Francolise, Caserta). Elaborazione grafica S. Acquaviva

Fig. 5 _ Etruschi in 3D. Fonte: Remondino, F. et al. (2011). The Etruscan in 3D: from space to underground. Geoinformatics FCE CTU Journal, vol. 6, pp. 283-290, Prague, Czech Republic.

Tra i primi risultati di maggiore importanza in tal senso è da annoverare il progetto *Etruschi in 3D*¹³ nel quale sono stati realizzati tour virtuali degli ambienti interni delle tombe etrusche al fine di renderle fruibili. In particolare, è possibile evidenziare come questa tecnologia abbia aiutato e si sia diffusa ampiamente nel periodo pandemico, sfruttando tutte le occasioni rese possibili da internet e dalla tecnologia, trasportando lo spazio fisico in quello digitale.



Hanting & Fischeing Tomb



Monkey Tomb



Banditaccia necropolis (Cerveteri)



Banditaccia necropolis (Cerveteri)



Reliefs Tomb



Bettini Tomb

13 Progetto realizzato dall'unità 3D Optical Metrology della Fondazione Bruno Kessler, in collaborazione con Historia, la Soprintendenza per i Beni Archeologici dell'Etruria Meridionale, Graphitech, No Real, Art-Test e il Cineca (2009-2014).

Diverso invece è il caso della ricerca che ha come oggetto il teatro romano di Benevento dove il punto di partenza è rappresentato da nuvole di punti e modelli poligonali, su cui sono state effettuate le prime analisi morfologiche e geometriche e successivamente la ricostruzione della struttura nella sua interezza, rendendola poi fruibile attraverso l'ausilio della realtà aumentata per ampliarne l'accessibilità (Campi M., 2019).

Nelle ipotesi di integrazione tra sistemi informativi e processi di Virtual o Cyber Archaeology, l'intento è quello di raggiungere un ottimo *feedback* informativo in stretta relazione con la potenza comunicativa dei prodotti tridimensionali – di rilievo o riprodotto – fotorealistici (Scagliarini Corlàita D. et al., 2003; Frassine M., 2014; Gabellone F., 2014; Bruno F. et al, 2017; Campi M., 2019; Previtali M., 2019; Demetrescu E. et al., 2020).

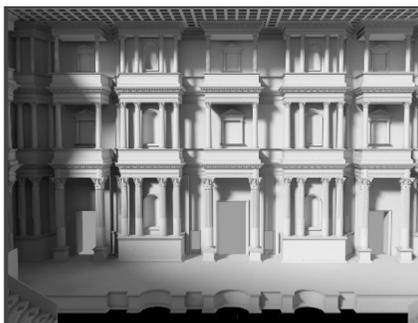
Fig. 6 _ Rilievo e ricostruzione del Teatro romano di Benevento. Fonte: Campi M. et al. (2019). Digital surveys and 3d reconstructions for augmented accessibility of archaeological heritage, in ISPRS, Volume XLII-2/W9, pp. 205-212.



Teatro di Benevento



Ricostruzione tridimensionale Teatro



Ricostruzione della Scena



CAPITOLO SECONDO

**Metodologie e tecniche di rilievo integrato.
Dall'acquisizione all'elaborazione del dato**

La disciplina del rilievo, che da sempre rappresenta il momento primo della conoscenza di un'opera¹, ha conosciuto un profondo rinnovamento grazie allo sviluppo ed incremento delle tecniche digitali e informatiche (ICT) e della *Computer Vision*, comportando un ampliamento delle metodologie a livello teorico e pratico. In questo scenario, in continua evoluzione, l'introduzione di nuove modalità di documentazione e registrazione delle caratteristiche metriche e formali, mediante l'utilizzo delle metodologie di rilievo *reality-based*², ha fortemente influenzato il campo della ricerca e della documentazione del patrimonio culturale.

La relativa facilità e rapidità che caratterizzano la fase di acquisizione e la possibilità di ottenere modelli tridimensionali che difatti si configurano quali repliche digitali perfettamente mimetiche degli oggetti reali, accurate dal punto di vista morfo-metrico, hanno confermato queste metodologie come un prezioso supporto per ampliare la conoscenza del costruito e disvelarne la sua complessità (Russo M. et al., 2011).

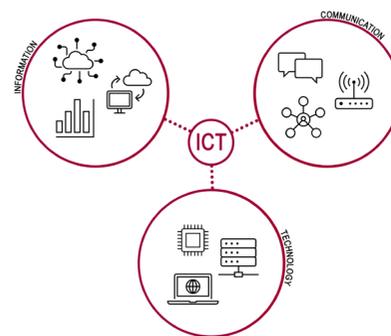


Fig. 7 _ Schema riassuntivo delle ICT. Elaborazione grafica S. Acquaviva

1 Docci & Maestri, 2004.

2 I rilievi *reality-based* racchiudono tutte quelle tecniche e metodologie che consentono di rilevare lo spazio reale con elevato grado di dettaglio creandone un'accurata copia digitale che ne ripropone forma, dimensione e colore (Russo et al., 2011).

Se è vero però che attraverso i modelli ottenibili - le nuvole di punti - è possibile documentare lo spazio rilevato con un elevato grado di dettaglio e descriverne le caratteristiche metriche, colorimetriche e spaziali, è altrettanto vero che tali processi danno luogo ad un numero di informazioni sovrabbondanti rispetto alla discretizzazione che ogni rappresentazione richiede, generando un *overflow* di dati nelle fasi di processamento e di registrazione, circostanza questa che determina tempi di elaborazione molto lunghi ed elevati gradi di complessità per la successiva lettura critica. Pertanto, la scelta della metodologia e l'individuazione della tecnologia più idonea rappresentano aspetti di fondamentale importanza per determinare il livello qualitativo del rilievo e della successiva restituzione critica.

L'iter procedurale delle tecnologie *reality based* ha cambiato le fasi tradizionalmente associate ai processi di misurazione e rilievo del reale, in quanto la conoscenza critica del costruito viene demandata ad un momento successivo, nello spazio digitale, creando una separazione tra la fase di acquisizione e la fase di decodifica e interpretazione del dato. Va segnalato però che tali tecnologie non hanno snaturato il ruolo del rilevatore ma, al contrario, hanno implicitamente confermato la sua importanza quale operatore colto, capace di governare le diverse fasi del processo, dal punto di vista tecnico-operativo ma anche per quanto riguarda l'attribuzione di un significato ad ognuna delle parti acquisite.

La corretta gestione di tutte le fasi operative di un rilievo digitale rappresenta pertanto un aspetto fondamentale per la produzione di elaborati grafici affidabili e utili alla lettura completa del manufatto, la cui redazione è sempre riconducibile ai metodi e fondamenti della rappresentazione, pur nell'ambito delle modalità operative dell'era digitale.

2.1. Metodologie di acquisizione *reality-based*

Ogni operazione volta allo studio, alla tutela e alla conservazione del Patrimonio culturale ha come obiettivo comune la conoscenza dei manufatti. Conoscenza che implica un approfondimento legato non soltanto alle caratteristiche metriche e morfologiche, ovvero a tutte quelle specificità tangibili, ma contemporaneamente anche a quelle intangibili, intrinseche dell'oggetto indagato. Tali operazioni passano attraverso l'utilizzo delle moderne tecnologie di rilievo *reality-based*. Nonostante il costo elevato,

il loro proliferare metodologico - dinamico e celere - è dovuto alla loro capacità di poter estrarre un numero considerevole di informazioni da una singola campagna di rilievo, comportando un'ottimizzazione delle procedure e un miglioramento in termini di accuratezza e velocità di acquisizione, e di conseguenza un aumento delle possibili analisi e studi da poter effettuare sui dati registrati.

Com'è noto tali tecnologie, i cui processi sono ampiamente consolidati e maturi (Remondino F., 2011; Campana S., 2014; Russo M., 2020), forniscono la possibilità di realizzare modelli tridimensionali descrittivi delle caratteristiche spaziali e morfologiche dei manufatti³, sfruttando la non invasività delle strumentazioni impiegate, evitando il contatto diretto con le strutture e riducendo il conseguente rischio di danneggiarle. Di contro però risultano fortemente vincolate dalle condizioni del contesto e dalle caratteristiche dei materiali che costituiscono il manufatto oggetto di indagine (Baratti G. 2012; Campi M. et al., 2017; di Luggo A. et al., 2017; Russo M., 2020). Tali strumentazioni hanno trovato terreno fertile soprattutto in tutti quegli ambiti architettonici e archeologici dove gli studi sono spinti verso il massimo dettaglio e il raggiungimento del fotorealismo (Bianconi F. & Filippucci M., 2019). Nei cantieri archeologici tali metodologie si stanno dimostrando di fondamentale importanza soprattutto rispetto alla natura distruttiva che caratterizza le fasi di indagine e scavo, riuscendo a memorizzare volta per volta e in modo rigoroso e oggettivo la sequenza di strati rimossi e consentendo, in ambiente digitale, di poterli rileggere, sovrapporre e indagare tridimensionalmente (Fregonese L. et al., 2016).

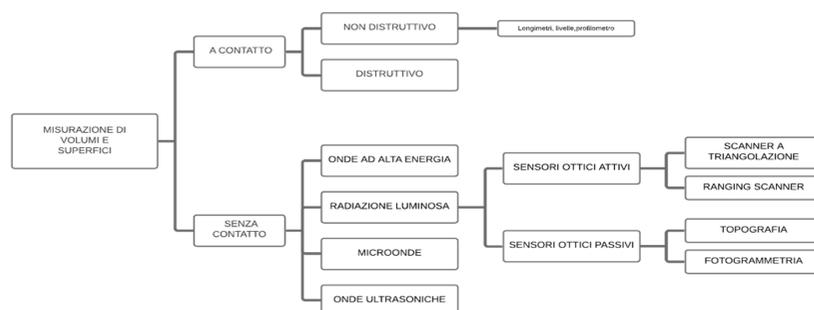


Fig. 8 _ Strumenti e tecniche per rilievi e misure 3D. Fonte: Remondino, F. (2011). 3D surveying and modelling of complex architectural sites and heritage objects. DISEGNARECON, 4(8), 90–98. Rielaborazione grafica S. Acquaviva

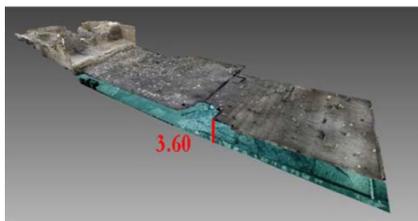


Fig. 9 _ Scavo archeologico relativo ai Cantieri della Metropolitana di Napoli (Stazione Municipio).
Fonte: Fregonese et al. (2016). 3D survey technologies: investigations on accuracy and usability in archaeology. The case study of the new “Municipio” underground station in Naples.

Qualunque sia il contesto culturale su cui si lavora (ambito architettonico - archeologico, singolo manufatto edilizio, piccolo reperto) per sua stessa natura l’oggetto di studio sarà caratterizzato da stratificazioni e frammentarietà che le tecnologie di acquisizione reality based consentono di gestire e comprendere. Di conseguenza, per una corretta gestione delle fasi operative, diviene di fondamentale importanza effettuare scelte ponderate che ricadano sia sulla scelta della metodologia più adeguata da utilizzare sia sui livelli ottimali di risoluzione dell’acquisizione⁴. Tali scelte devono essere effettuate considerando le caratteristiche geometriche del manufatto, lo stato di conservazione, l’accessibilità e le finalità stesse dell’operazione poiché possono costituire un primo ostacolo nella corretta realizzazione del progetto di rilievo (Angelini A. et al., 2013). La capacità di tali strumentazioni di risolvere determinate esigenze e problematiche nelle attività sul campo e l’introduzione di nuove modalità di acquisizione e registrazione delle informazioni geometriche e metriche, parallelamente alla creazione di nuovi algoritmi utili al processamento e all’elaborazione dei dati, hanno portato verso una forma di documentazione, la *nuvola di punti*, che non si limita specificatamente all’annotazione degli aspetti quantitativi ma prende in considerazione anche i valori formali del costruito (Puche J. M., 2015). Tale modello, fulcro di tutte le attività, rappresenta una replica digitale dell’oggetto reale, formato da una maglia di punti ontologicamente indistinti, in quanto queste strumentazioni rilevano indifferentemente tutto ciò che è presente nel loro range di azione. Soltanto a seguito delle operazioni di processamento (registrazione, allineamento, colorazione) e di un’analisi critica approfondita, è possibile esplicitare il significato di ciò che rappresentano, influenzando in tal modo il percorso interpretativo e informativo, rendendolo maggiormente oggettivo quantomeno nelle forme e nelle sembianze di ciò che replica, in quanto modello tridimensionale acquisito senza alcuna discretizzazione a priori. Chiaramente la nuvola di punti descrive e racconta soltanto la forma, l’apparenza visiva e le dimensioni delle superfici degli oggetti rilevati, senza proprietà volumetriche o semantiche. Ciò che contraddistingue ogni punto del modello discreto è la sua posizione sotto forma di coordinate

4 La scelta del parametro di risoluzione deve essere gestita in base alla finalità del rilievo. Basse risoluzioni su manufatti con peculiarità significative porterebbero in fase di processamento ad una semplificazione e una perdita di informazione; allo stesso modo parametri elevati per zone poco significative comporterebbero un aumento dei tempi di processamento.



Fig. 10_Nuvola di punti dello Scalone monumentale delle Terme di Agnano. Elaborazione S. Acquaviva

cartesiane (x, y, z) relazionate al sistema di riferimento dello strumento stesso o a un sistema di riferimento globale se il rilievo è accompagnato da un'acquisizione con GPS.

Ad ogni punto sono inoltre associati il parametro della riflettanza⁵, la normale⁶ e i parametri di colore (dati RGB).

Sebbene la nuvola di punti riproduca tridimensionalmente la realtà, il suo essere tridimensionale è notevolmente diverso rispetto alla consistenza 3D dei modelli *derivati*, ovvero di quei modelli costituiti da primitive geometriche che simulano graficamente le conformazioni geometriche del reale – sia esso esistente o immaginato -. La nuvola di punti non ricostruisce il reale interpretandone le forme ma, piuttosto, lo copia senza

5 Il parametro di riflettanza rappresenta la capacità di un materiale di riflettere la radiazione luminosa. Tale parametro è registrata principalmente dai laser scanner attraverso la registrazione dell'intensità del segnale di ritorno del raggio rilevando anche i valori di riflessività dei materiali (coefficiente radiometrico) e permette di comprendere le caratteristiche materiche dell'oggetto (Merschini et al., 2013). Alcuni strumenti però risentono del grado di riflettanza dei materiali, in quanto il raggio laser utilizzato in presenza di superfici molto lucide o nere viene riflesso debolmente e può generare errori nella costruzione della nuvola di punti.

6 La normale di un punto viene è il vettore di direzione normale che viene calcolato in base all'intorno del punto stesso, e pertanto deducendone aree piane e curve. La normale è un vettore perpendicolare alla superficie dedotta.

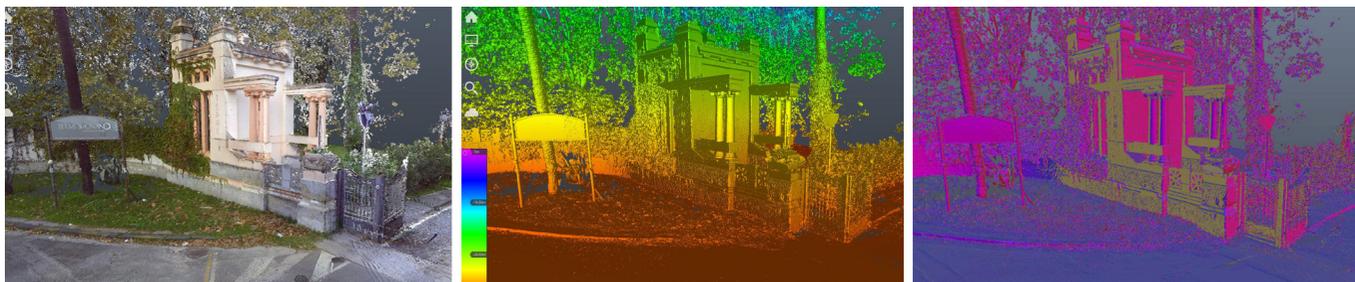


Fig. 11 _ Differenti tipologie di rappresentazione della nuvola di punti: RGB, elevazione e normali. Ingresso del Complesso Termale di Agnano. Elaborazione S. Acquaviva

Gli strumenti che consentono di ottenere una nuvola di punti vedono una prima classificazione in base alla tipologia di radiazione luminosa che viene sfruttata dai sensori necessari al processo di misurazione.

Si definiscono sistemi *range-based* o sensori ottici attivi le strumentazioni il cui funzionamento è basato sulla proiezione di una luce artificiale e codificata sull'oggetto, la quale svolge un ruolo attivo nel processo di registrazione del dato metrico (laser scanner, stazione totale, radar, ...). I sistemi *image-based* o sensori ottici passivi, invece, si avvalgono della luce naturale perché sia possibile procedere con il rilievo metrico (teodolite, tacheometri, fotogrammetria digitale, ...).



Fig. 12 _ Classificazione strumentazioni image-based e range-based. Elaborazione S. Acquaviva

2.1.1. Sistemi per il rilievo *range-based*

I sistemi *range-based*, anche conosciuti come sistemi a sensori ottici attivi, consentono di acquisire in modo sistematico e automatizzato informazioni tridimensionali relative alla forma e alla geometria dell'oggetto o della scena indagata.

Il loro principio di funzionamento si basa sulla proiezione di un raggio luminoso - luce artificiale e codificata le cui caratteristiche sono note a priori - che impatta sull'oggetto da rilevare e sulla successiva analisi del segnale di ritorno al sensore elettronico. In particolare, viene utilizzato un raggio laser⁷ per l'acquisizione della misura che deve avere le caratteristiche di monocromaticità, unidirezionalità e coerenza. Per quanto siano largamente utilizzati sono sottoposti ad alcune normative⁸ per tutelare le persone a contatto con il fascio luminoso; in particolare in base al parametro LEA (Limite di Emissione Accettabile) sono stabilite 5 classi di pericolosità di cui la Classe 1 è la più performante in termini di sicurezza⁹.

Tali sistemi hanno raggiunto livelli di affidabilità e produttività molto elevati. Sono costituiti da strumenti sempre più compatti e leggeri, con portata e velocità di acquisizione sempre maggiori, che consentono di ottimizzare le varie fasi di rilievo e allo stesso tempo di ottenere risultati

⁷ Il termine L.A.S.E.R. costituisce l'acronimo di Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation e si riferisce al principio di generazione del raggio laser. Il laser è composto da luce elettromagnetica monocromatica cioè consistente di una singola lunghezza d'onda, emessa con un raggio molto ristretto.

⁸ Normativa CEI fascicolo 1381G: "Guida per l'utilizzazione di apparati laser per laboratori di ricerca".

⁹ Classe 1: laser sicuri in quanto le radiazioni emesse sono al disotto degli standard massimi consentiti. Classe 2: la radiazione visibile emessa è nell'intervallo di lunghezza d'onda tra i 400 e 700 nm. La protezione dell'occhio è normalmente assicurata dalle reazioni di difesa. Classe 3A: laser con emissione nel visibile e una potenza in uscita fino a 5mW per i laser in continua, o 5 volte il limite di classe 2 per i laser ad impulsi ripetuti o scanning. I loro fasci non sono pericolosi se osservati direttamente in maniera non continua, mentre lo possono diventare se si utilizzano strumenti che ne amplificano e concentrano il fascio ottico. Classe 3B: Sono laser pericolosi per gli occhi se non protetti e possono essere pericolosi per la pelle. Classe 4: laser molto pericolosi ad alta potenza in grado di produrre seri danni ad occhi e pelle anche se il fascio è diffuso. Sono potenziale rischio d'incendio.

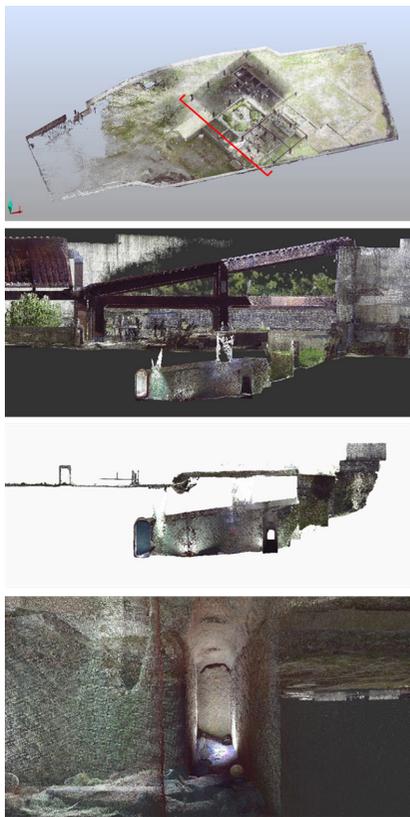


Fig. 13 _ Differenti viste della nuvola di punti dell'ambiente ipogeo della Villa romana di Ponticelli (NA). Elaborazione S. Acquaviva

metricamente accurati. Sono inoltre strumentazioni in grado di acquisire il dato metrico e geometrico anche in condizioni di scarsa illuminazione, come per esempio nel caso di ambienti ipogei.

È noto però come in presenza di aree marginali e spigoli i rilievi range-based presentino ancora delle problematiche dovute principalmente alla deviazione del raggio laser nelle zone di bordo, anche se si imposta una risoluzione elevata.

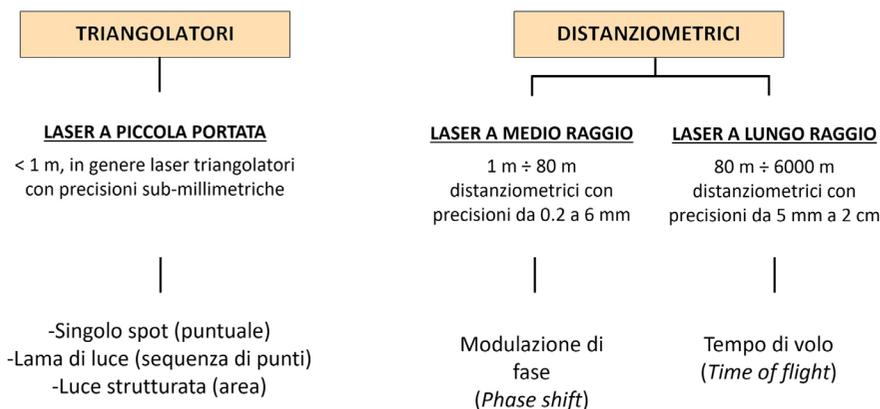
Il contenuto informativo di ogni singola scansione è costituito pertanto da un modello tridimensionale che ricrea digitalmente la superficie reale, in relazione al campo visivo dello strumento, sottoforma di un insieme elevatissimo di punti contraddistinti dalle loro coordinate spaziali, dai valori RGB estrapolati dalle immagini acquisite dalle fotocamere – integrate o solidali con lo scanner – e dai valori di riflettanza¹⁰, relativi alla tipologia di materiale (Remondino et al., 2014). Per ogni punto viene rilevata la posizione in base alla distanza e gli angoli orizzontale e verticale che forma il raggio laser rispetto alla posizione dello strumento e dello specchio.

Una prima classificazione dei sistemi laser ne distingue il principio di funzionamento, le caratteristiche dei sensori - relazionate alla posizione dell'emettitore e del ricevitore del raggio luminoso - e la portata, legata indissolubilmente alla dimensione dell'oggetto da rilevare (scala territoriale, locale o di dettaglio). Nonostante tali tecnologie¹¹ presentino peculiarità differenti, il workflow operativo¹² è analogo a prescindere dal

10 Il parametro di riflettanza rappresenta la capacità di un materiale di riflettere la radiazione luminosa. Il laser scanner attraverso la registrazione dell'intensità del segnale di ritorno del raggio rileva anche i valori di riflessività dei materiali (coefficiente radiometrico) e permette di comprendere le caratteristiche materiche dell'oggetto (Meschini et al., 2013). Alcuni strumenti però risentono del grado di riflettanza dei materiali, in quanto il raggio laser utilizzato in presenza di superfici molto lucide o nere viene riflesso debolmente e può generare errori nella costruzione della nuvola di punti.

11 Grussenmeyer et al., 2016.

12 Il workflow operativo è scandito da una serie di fasi consequenziali utili al raggiungimento di un risultato accurato e rispondente al reale. Di fondamentale importanza risulta la programmazione del numero e del passo delle scansioni in relazione al manufatto indagato e il posizionamento dei target nella scena per favorire il successivo allineamento delle singole nuvole di punti. È oltremodo necessario impostare sullo strumento i parametri di risoluzione, qualità, veloci-

CLASSIFICAZIONE LASER SCANNERFig. 14 _ Classificazione laser scanner.
Elaborazione grafica S. Acquaviva

dispositivo utilizzato. Le informazioni metriche sono acquisite attraverso l'analisi del comportamento del segnale luminoso emesso dallo strumento e successivamente riflesso dalla superficie dell'oggetto da rilevare. Nel dettaglio i laser scanner si classificano pertanto in *triangulation scanner* e *ranging scanner*.

I *triangulation scanner* basano la loro modalità di funzionamento sulle proprietà geometriche dei triangoli al fine di calcolare le distanze. In particolare, si fa ricorso al metodo della triangolazione, processo di misurazione analogo a quello topografico, in cui i vertici del triangolo che si viene a formare sono costituiti da emettitore – oggetto – ricevitore (Bornaz L., 2016). Essendo noti la distanza tra i due sensori (sorgente del raggio laser e ricevitore) e gli angoli di base è possibile rilevare l'oggetto¹³. La distanza tra i due sensori è però limitata ed è dello stesso ordine di grandezza della distanza tra strumento e oggetto da misurare; pertanto, tali scanner sono utilizzati per rilevare oggetti di piccole dimensioni, come reperti archeologici o bassorilievi.

I *ranging scanner*, o scanner distanziometrici, invece, presentano sorgente

tà di scansione e numero di fotogrammi da acquisire.

13 La modalità di acquisizione può avvenire con sistemi che utilizzano un singolo spot (puntuale), una lama di luce (sequenza di punti) o una luce strutturata (area).

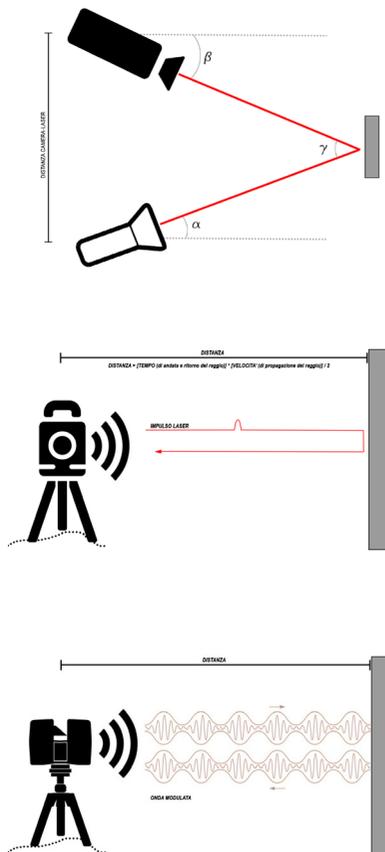


Fig. 15 _ Triangulation scanner (sopra), sistemi time of flight (centro), sistemi phase shift (sotto). Elaborazione grafica S. Acquaviva

laser e ricevitore nella medesima posizione. La distanza tra il centro dello strumento e il primo punto dell'oggetto che il raggio incontra, congiuntamente alla conoscenza dell'angolo azimutale e di inclinazione, consentono di determinare le coordinate tridimensionali del punto e pertanto la sua posizione. La luce artificiale utilizzata da questi strumenti, se da un lato riesce a raggiungere grandi distanze, dall'altro genera un'incertezza delle misurazioni che si attesta intorno ai 1-2mm per l'elevata velocità della luce, rendendoli utili per rilievi di medie e grandi dimensioni. La differenza sostanziale tra queste strumentazioni, che ne determina anche la portata, risiede nella tipologia di radiazione luminosa emessa dallo strumento, che può essere un impulso laser o un'onda sinusoidale, distinguendo rispettivamente i laser *time of flight* e i *phase shift*. In particolare, i primi rilevano la distanza calcolando il tempo che impiega l'impulso luminoso (*Pulsed Wave*) una volta emesso a ritornare al sensore dopo la riflessione sull'oggetto, essendo nota la velocità di propagazione della luce. I secondi invece emettono una un'onda modulata a frequenza nota (*Continuous Wave*) e la distanza è calcolata misurando la differenza di fase tra quella emessa e quella riflessa.

In anni recenti si sono sviluppati strumenti laser in grado di acquisire i dati metrici dell'ambiente che li circonda percorrendolo dinamicamente (*Laser scanner mobile mapping*). A differenza dell'acquisizione classica statica dove c'è una programmazione a priori delle stazioni da effettuare e della loro sovrapposizione affinché non si generino zona d'ombra, l'acquisizione dinamica consente di registrare il dato in movimento, in quanto il laser è posizionato su una piattaforma mobile (drone, aereo, automobile) e grazie all'accoppiamento del sensore di posizione GPS con un sensore inerziale IMU traccia il percorso effettuato e registra la nuvola in automatico. Da questi sistemi sono nate le tecnologie di tipo SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*) utilizzate soprattutto per ambienti interni dove non c'è copertura di segnale GPS, e che presentano accelerometri, giroscopi e sensori IMU che registrano il percorso compiuto (Di Stefano et al., 2021). Raggiungono un'elevata importanza nei rilievi di aree anguste o di piccoli ambienti con spazi di manovra limitati dove un'acquisizione statica non permetterebbe un'adeguata sovrapposizione del dato tra le differenti

scansioni¹⁴, di contro però hanno precisioni centimetriche, diversamente dai laser statici che raggiungono un valore sub-centimetrico, il che limita in parte ancora i loro contesti di utilizzo.

Le nuvole di punti che si ottengono da ognuno degli strumenti elencati sono *grezzo*, ovvero necessitano di una serie di elaborazioni e processamenti successivi affinché siano utilizzabili a pieno e secondo l'obiettivo prefissato¹⁵.

2.1.2. Sistemi per il rilievo *image-based*

Per quanto concerne i sensori passivi, la fotogrammetria digitale rappresenta ad oggi la tecnica di rilievo *image-based* maggiormente utilizzata nello studio del patrimonio culturale, per desumere le informazioni spaziali relativamente ad oggetti reali a partire da un set di fotogrammi e di ottenere una maggior consapevolezza del valore colorimetrico legato all'aspetto percettivo.

Gli elementi cardine del processo sono costituiti pertanto dai fotogrammi, i quali racchiudono tutte le informazioni, geometriche e formali, necessarie alla ricostruzione della scena (Remondino & El-hakim, 2006). Ogni singolo fotogramma viene assunto come una rappresentazione prospettica dell'oggetto inquadrato e mediante la relazione geometrica che si instaura tra le suddette immagini e la scena reale si è in grado di stimare la posizione dei punti nello spazio (*features-detection*), e pertanto estrapolare le informazioni geometriche ricercate (Russo M., 2020; Remondino F. et al., 2017).

In particolare, viene stabilita una relazione tra il centro di proiezione della fotocamera, un punto sull'immagine Q' e il corrispettivo punto Q

14 La sovrapposizione nelle acquisizioni mediante laser scanner statici consente in fase di processamento del dato un migliore allineamento tra le scansioni e un risultato più accurato.

15 Ovviamente per ogni laser è possibile settare i parametri di risoluzione e qualità che determinano la densità della nuvola stessa.

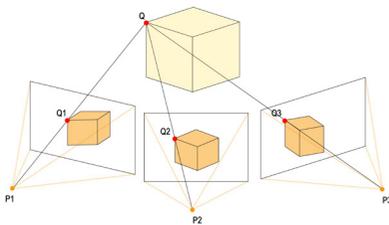


Fig. 16 _ Principio del processo structure from motion da immagini multiple. Elaborazione grafica S. Acquaviva

sull'oggetto (principio base di collinearità) che consente di passare dal reale alla sua rappresentazione fotografica. È ben noto che per poter rendere operativo l'intero processo occorre acquisire i fotogrammi relativi all'oggetto da punti di vista differenti e mantenendo una certa percentuale di sovrapposizione¹⁶.

Grazie all'avvento della *Computer Vision* e allo sviluppo delle tecnologie digitali, che hanno portato ad un affinamento delle strumentazioni fotografiche¹⁷, si è avuto un considerevole miglioramento nella prassi operativa delle acquisizioni fotogrammetriche¹⁸, che ha portato ad un'automazione dei processi, rendendo le tecniche di presa e di restituzione fotogrammetrica maggiormente speditive. Pertanto, anche in questo caso, è possibile riproporre digitalmente la realtà nelle sue tre dimensioni attraverso la costruzione di un modello digitale costituito da una nuvola di punti (Filippucci M., 2010).

La diffusione di tale processo operativo è dovuta in parte ai costi contenuti della strumentazione necessaria - se comparata con le strumentazioni *range-based* - ma, piuttosto, alla flessibilità di utilizzo. Macchine fotografiche, obiettivi e sensori di diversa dimensione permettono di destreggiarsi in differenti situazioni e contesti riuscendo ad ottenere un risultato ottimale in termini di accuratezza e resa fotorealistica in base alle finalità richieste.

Le tecnologie image-based si differenziano da quelle *range-based* soprattutto perché il dato acquisito, consistente in un set di fotografie, necessita

16 La percentuale di sovrapposizione dei fotogrammi consente ai software di processamento di riconoscere i punti omologhi. L'*overlap* è la sovrapposizione tra due fotogrammi consecutivi lungo la direzione di movimento (di volo di un drone o di spostamento di una camera terrestre). Il *sidelap* corrisponde alla sovrapposizione tra fotogrammi di strisciate adiacenti.

17 L'ampia offerta di camere digitali dotate di differenti sensori, in aggiunta alla possibilità di montare tali dispositivi su piattaforme aeree quali droni o su aste telescopiche hanno ampliato il loro campo di applicazione permettendo di acquisire le immagini con modalità, tempi e risultati prima non facilmente raggiungibili.

18 Gli algoritmi di *Structure from Motion* nascono dalla fotogrammetria tradizionale e si sono evoluti grazie all'implementazione di quelli della *Computer Vision*. Ai principi teorici di collinearità, intersezione di raggi proiettivi, calibrazione della fotocamera, si affiancano gli algoritmi tipici della visione robotica che permettono di analizzare e correlare immagini digitali in modo veloce ed automatico.

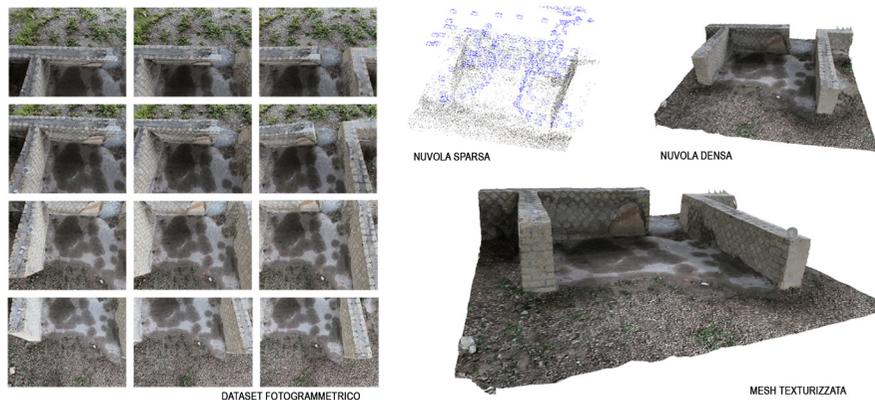
di algoritmi appositi (*structure from motion* e *dense stereo reconstruction*) che consentono di estrarre i punti significativi dell'oggetto per ricreare la geometria sottoforma di nuvola di punti. Hanno inoltre il vantaggio dell'elevata resa fotorealistica del dato di output in quanto vengono utilizzate fotocamere con elevata risoluzione che garantiscono ottime prestazioni.

Pur rispettando le note fasi previste dai software di processamento fotogrammetrico¹⁹, ciò che può generare enormi differenze nella resa del prodotto finale è la qualità dell'immagine acquisita. Una foto poco nitida e non a fuoco non consente ai software di lavorare correttamente e di estrapolare i *key points*²⁰ necessari per la costruzione della nuvola. L'accuratezza che si intende ottenere è diretta conseguenza della giusta combinazione tra diversi fattori - interni ed esterni alla fotocamera scelta - che regolano il processo. Tali fattori riguardano, ad esempio, la tipologia di fotocamera utilizzata - compatta, bridge o reflex-, le peculiarità dell'obiettivo e del sensore, la regolazione dell'esposizione e il controllo delle modalità di scatto (automatico e manuale). I fotogrammi devono inoltre inquadrare adeguatamente il soggetto del rilievo, facendo in modo da riprendere la sola area di interesse senza grandi profondità di campo, mantenendo l'oggetto di studio al centro dell'immagine per un'affidabilità maggiore nella ricerca dei punti omologhi ed evitando la creazione di

19 Il dataset fotogrammetrico acquisito deve essere processato secondo una serie di fasi consequenziali. La prima consiste nel cosiddetto allineamento in cui si estraggono i punti omologhi mediante confronti a coppie di tutte le immagini del dataset. In particolare, l'estrazione dei punti omologhi, o tie points, avviene a seguito del processo di image matching attraverso il quale c'è l'individuazione automatica di punti chiave (key points) in due o più immagini ed in seguito mediante il procedimento di bundle adjustment la ricostruzione della geometria di presa delle camere. Da ciò si deduce che foto poco nitide non permetterebbero il corretto processamento, in quanto difficile risulterebbe il riconoscimento e l'estrazione dei punti omologhi. Ogni punto estratto è caratterizzato dalla coordinata (x, y, z) e di colore (RGB). L'insieme di questi punti dà forma alla nuvola di punti sparsa. Nella seconda fase si passa alla creazione di una nuvola densa mediante operazioni di infittimento sulla base dei punti precedentemente estratti. Su questa viene successivamente costruita la superficie poligonale, in cui i vertici dei poligoni sono rappresentati dai punti della nuvola. Infine, tale modello viene texturizzato mediante la proiezione sulle facce della mesh delle immagini del dataset acquisito.

20 I punti caratteristici che il software di processamento fotogrammetrico estrapola da ogni immagine del dataset.

Fig. 17 _ Elaborazione fotogrammetrica di una struttura archeologica (Villa romana di Ponticelli, Napoli). Elaborazione S. Acquaviva



zone d'ombra. Di fondamentale importanza, inoltre, è la condizione di luce che nella scena di interesse e la sensibilità del sensore fotografico²¹. Nelle acquisizioni fotogrammetriche questa deve essere il più possibile omogenea per evitare sovraesposizione/sottoesposizione mediante la regolazione dell'apertura del diaframma, tempo di scatto e ISO (triangolo dell'esposizione). Va ricordato che ciò che è importante non è solo la risoluzione in pixel ma la dimensione del sensore²².

A seconda dell'obiettivo, dell'accessibilità, delle dimensioni dell'oggetto e delle condizioni al contorno riscontrate nell'area da rilevare e della scala di dettaglio da raggiungere – che comporta la scelta del parametro GDS²³ - viene valutata la metodologia e la strumentazione da utilizzare, distinguendo in fotogrammetria terrestre e aerea, che si differenzia principalmente per la modalità di gestione del movimento del sensore fotografico. Di norma

21 La fotografia digitale è un procedimento per l'acquisizione di immagini statiche, proiettate attraverso un sistema ottico, su un dispositivo elettronico (sensore) sensibile alla luce, con successiva conversione in formato digitale e immagazzinamento su supporto di memoria. <https://www.treccani.it/vocabolario/fotografia/>

22 È importante tener presente che maggiore è la dimensione del pixel maggiore sarà la quantità di luce che verrà registrata e minore sarà il rumore rispetto ad un pixel più piccolo.

23 la Ground Sample Distance rappresenta la distanza tra il centro di due pixel consecutivi espressa in unità di misura territoriale. Dimensione pixel : dimensione oggetto = focale : altezza(-distanza) di presa ossia $d : D = f : H$

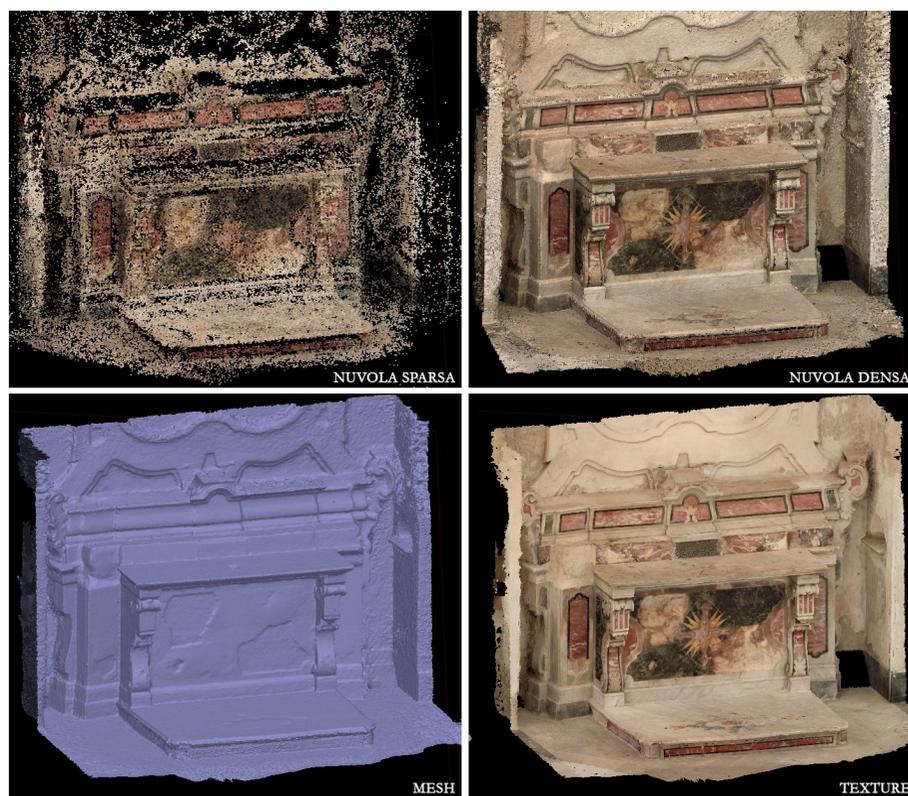


Fig. 18 _ Elaborazione fotogrammetrica di un altare. Elaborazione S. Acquaviva

l'oggetto dovrebbe essere ripreso per tutti i suoi piani dominanti, sia con tecnica ad assi paralleli che convergenti²⁴, per registrare anche il livello di profondità.

Da vari anni, per quanto riguarda la fotogrammetria aerea, si riscontra un largo uso di droni (UAV)²⁵ dispositivi che volano a bassa quota e particolarmente adatti per il rilievo in ambito archeologico.

24 Per una completa e più corretta acquisizione di una superficie una sola tecnica di ripresa non è sufficiente, ma bisogna sempre tener conto del suo grado di complessità geometrica e delle occlusioni dirette o indirette. Per tale motivo di ricorre ad acquisizioni ad assi paralleli e/o convergenti rispettivamente con asse della camera perpendicolare all'oggetto del rilievo e asse convergente verso un punto definito dell'oggetto (De Luca L., 2011).

25 Originariamente utilizzati in campo militare, negli anni hanno avuto una larga diffusione in vari ambito da quello sportivo, commerciale a quello dei Beni culturali. <https://www.enac.gov.it/la-normativa/normativa-enac/regolamenti/regolamenti-ad-hoc/regolamento-mezzi-aerei-pilottaggio-remoto>.

La realizzazione della nuvola di punti, come anticipato, segue una pipeline operativa oramai abbastanza consolidata e semiautomatica, ma la combinazione dei possibili algoritmi ha bisogno di un controllo costante dell'operatore, soprattutto nella scelta dei parametri, diversi in base al tipo di manufatto indagato.

2.2. Processi di integrazione del dato puntiforme per l'incremento delle informazioni: il rilievo multi-scalare e multi-sensore per la costruzione di modelli 3D

Le tecniche di rilievo tridimensionale analizzate presentano indubbe potenzialità nella registrazione del dato ma al tempo stesso il loro utilizzo ha evidenziato alcune difficoltà in rapporto alla complessità dei manufatti storici. Tali strutture, infatti, caratterizzate da evidenti stratificazioni - aggiunte e/o rimaneggiamenti - e nella maggior parte dei casi in evidente stato di degrado, hanno bisogno di un approccio che tenga conto non solo dell'accuratezza geometrica, della portabilità o flessibilità dello strumento ma soprattutto di un'elevata resa visiva dei dati acquisiti a differenti livelli di dettaglio.

Di conseguenza per raggiungere un risultato ottimale è fondamentale che le varie tipologie di rilievo, tradizionali e innovative, vengano utilizzate in modo complementare, ricorrendo ad un approccio multi-sensore²⁶, basato sull'integrazione in situ degli strumenti e sulla successiva fusione dei dati - nuvole di punti - al fine di mitigarne i relativi limiti e massimizzarne le potenzialità (El-Hakim et al., 2004).

L'integrazione tra i risultati ottenibili da diversi strumenti assume un ruolo di primaria importanza nelle successive operazioni analitico-interpretative, consentendo di raggiungere una conoscenza approfondita dell'oggetto e aumentandone il livello informativo metrico, geometrico e fotorealistico. Allo stesso tempo, l'unione di acquisizioni diverse consente di avere un

26 Lang Hong già nel 1999 affermava: «*The benefit in which multisensory/information fusion are used can be grouped in two major categories: information augmentation and uncertain managements*», indicando che l'unione di più sensori aumenta la conoscenza dell'oggetto e allo stesso tempo si ha una considerevole diminuzione dell'incertezza.

controllo maggiore dell'accuratezza minimizzando l'impatto degli errori che possono verificarsi a causa delle caratteristiche intrinseche degli strumenti.

È opportuno, pertanto, il controllo dell'intero processo, in quanto come è noto ogni strumentazione genera un dato con una qualità e una risoluzione differente in base alle sue caratteristiche intrinseche e alla scelta critica dell'operatore riferibile alla scala di dettaglio scelta. Non è possibile, dunque, integrare i dati senza un rigore logico di base, perché si potrebbero generare dei dati errati e non accurati.

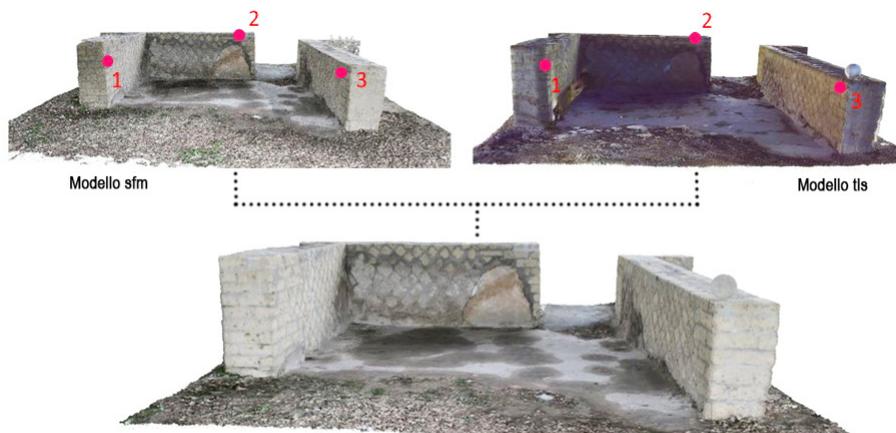
Per quanto il dato sia simile in *output*, poiché entrambe le strumentazioni attive e passive arrivano alla creazione di una nuvola di punti, viene generato da processi diversi risultando pertanto con risoluzioni, omogeneità e sistemi di riferimento differenti. Il passo della scansione laser viene scelto a priori in fase di programmazione, per il processo fotogrammetrico viene scelta la distanza di presa dall'oggetto e la risoluzione della camera ma la densità della nuvola viene invece valutata in fase di processamento del dato²⁷. Pertanto, sempre in base alle finalità del rilievo bisogna valutare la scala di dettaglio e il diverso grado di risoluzione delle nuvole inserendo un grado di ridondanza dello stesso per avere un controllo metrico maggiore finale.

Natura tecnica e metodologica, accessibilità, stato di conservazione e finalità in rapporto al livello di dettaglio - territoriale, locale o singolo reperto - guidano le scelte operative per pianificare di volta in volta la soluzione più adatta.

Molte ricerche (Pulcrano M. et al. 2021; Parrinello, S. et al., 2019) si sono dedicate al confronto tra gli *output* delle differenti acquisizioni per verificarne il grado di accuratezza. Spesso la nuvola di punti ricavata dalle scansioni laser rappresenta il supporto metrico utilizzato per stimare la discrepanza dei rilievi fotogrammetrici, scelti più per ricavare ortofoto ad alta risoluzione piuttosto che per supportare il processo di misurazione (Fassi et al. 2013; Grussenmeyer et al. 2008; Stal et al. 2012).

27 La densità di una nuvola di punti fotogrammetrica è diretta conseguenza dei parametri di processamento scelti. In base all'obbiettivo del rilievo si può scegliere tra i parametri low, medium e high a seconda se avere una nuvola meno o più fitta.

Fig. 19 _ Integrazione della nuvola di punti laser scanner e fotogrammetrica mediante la scelta di control point.. Elaborazione S. Acquaviva



Considerando il continuo sviluppo della *Computer Vision*, che ha permesso un affinamento delle tecniche image-based, le ricerche si concentrano sull'utilizzo della nuvola di punti ottenuta dai rilievi *range based* come base metrica, su cui successivamente applicare la texture generata dall'elaborazione del dataset fotogrammetrico, al fine di avere un dato metricamente accurato e una resa fotorealistica ottimale (Farella E. et al., 2016; di Luggo A. et al., 2021). Ad oggi, la resa metrica del processo fotogrammetrico è notevolmente vicina ai risultati laser se si parla di ambienti a scala architettonica.

Altre ricerche (Giandebiaggi P. et al., 2015) vedono l'integrazione diretta tra i risultati ottenuti dalle due tecniche, ottenendo un risultato multi-scalare supportato dalla creazione di una rete topografica, locale o globale²⁸, grazie all'ausilio della stazione totale e del GPS. In questi casi, i punti battuti topograficamente diventano il dato comune alle diverse procedure di rilievo, in modo da avere un controllo puntuale su ogni azione e sugli errori che possono verificarsi nelle diverse fasi.

Alla scala territoriale la tecnologia LIDAR, posizionata su piattaforma aerea²⁹ (ALS-airborne laser scanning) e dotata di GPS, è utilizzata per

²⁸ La creazione di una rete topografica locale consiste nel creare un sistema di riferimento arbitrario scelto dall'operatore; in quella globale invece alcuni vertici della rete creata corrispondono ai caposaldi della rete topografica nazionale.

²⁹ Tali sistemi vengono denominati Mobile Mapping System (MMS). Sono piattaforme mobili, aeree o terrestri, che hanno il compito di acquisire la posizione della piattaforma e i dati metrici 3D. Dal punto di vista tecnologico, un MMS è costituito dall'integrazione di tre principali

analizzare i territori ove, per esempio, si riscontrano evidenze di tipo archeologico o rilevare grandi aree urbane. In alcuni casi il LIDAR è sostituito dall'impiego di droni (UAV)³⁰ che, volando, riescono a coprire vaste aree in tempi brevi, restituendo risultati soddisfacenti.

Facendo riferimento alle tecnologie integrate, anche il rilievo del dettaglio può avvalersi di processi complementari come, ad esempio, l'uso di *triangulation scanner* congiuntamente alla fotogrammetria terrestre per un'accuratezza sub-millimetrica.

Tali integrazioni sono rese possibili anche grazie allo sviluppo di *software* ed algoritmi che permettono di unire e di integrare i modelli derivanti dalle due metodologie di rilievo secondo un sistema di riferimento comune (CloudCompare, RealityCapture e Zephyr Aerial), con modalità differenti a seconda ovviamente dell'applicativo utilizzato.

L'enorme quantità di dati generata da tali operazioni consente di avere un dato quanto più completo possibile, limitando la presenza di zone d'ombra, ma allo stesso tempo necessita di procedure informatiche, manuali o automatiche, per giungere ad un modello tridimensionale gestibile, omogeneo e accurato in ogni sua parte.

Pertanto, sia per le strumentazioni image based quanto per quelle range based c'è bisogno di un controllo costante di tutti i processi, dalla fase di campagna a quella di elaborazione. Ovviamente tali dati sono di per sé privi del significato di ciò che rappresentano. Si presentano come una massa indistinta di punti che, per simulando il reale, hanno bisogno di essere analizzati criticamente per ottenere gli elaborati richiesti.

2.3. Operazioni di post-processing e gestione dei *raw data*: dalla nuvola di punti alla restituzione grafica

Il dato discreto – la nuvola di punti – costituisce il dato finale del processo

componenti hardware: sensori ottici (laser scanner e/o fotocamere digitali), sensori di navigazione/posizionamento (IMU/GNSS) e un'unità di controllo e sincronizzazione. Tali sistemi possono essere divisi in outdoor e indoor. Hanno un minimo utilizzo in ambito archeologico, se si esclude il lidar su piattaforma aerea, in quanto presentano un'accuratezza minore rispetto ad altre tipologie di laser terrestri. (Remondino et al. 2015).

30 UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), o SAPR (*Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto*).

di acquisizione ma, allo stesso tempo, è il dato iniziale nelle operazioni di rilievo intese come analisi critica e comprensione del manufatto indagato secondo specifici obiettivi. Le nuvole di punti infatti contengono tutta una serie di dati che possono essere estrapolati a seguito di letture critiche e analisi approfondite, costituendo in tal modo un archivio ricco di informazioni, che necessita però di essere letto ed interpretato dai diversi attori del processo conoscitivo.

Ad oggi numerose ricerche si servono degli output dei rilievi *reality based* per condurre numerose sperimentazioni di diversa entità in diversi ambiti del patrimonio culturale, per finalità di rappresentazione, divulgazione e gestione di tali beni.

2.3.1. Processi di semplificazione e editing per l'ottimizzazione del dato

Le nuvole di punti, *image-based* e *range-based*, per quanto simili nella struttura sono costituite da accuratezza, omogeneità e sistemi di riferimento differenti e nella maggior parte dei casi risultano difficilmente manipolabili dagli *hardware* per la loro elevata dimensione.

Pertanto, tali metodologie seppur consentano di raggiungere elevati livelli di dettaglio in grado di riprodurre tutte le peculiarità dei manufatti storici, allo stesso tempo possono trovare ostacoli nella fase di processamento, in termini di velocità di elaborazione e gestione del dato.

Le sperimentazioni condotte in questo campo, oltre ad occuparsi dell'integrazione delle nuvole di punti e dei modelli poligonali, si concentrano sulle operazioni di gestione dei dati grezzi (*raw data*). Le operazioni di decimazione e correzione delle geometrie su tali modelli tridimensionali devono essere valutate in modo puntuale per non condizionare il risultato finale e produrre un dato non coerente con l'oggetto reale³¹. La corretta gestione della fase di *post processing* e di *editing* diventa l'elemento chiave per la costruzione di modelli tridimensionali caratterizzati dalla facilità di gestione per le successive operazioni di divulgazione e ricerca.

Una delle fasi più critiche è costituita dal filtraggio della nuvola di punti, che consente di eliminare i punti ridondanti e gli elementi estranei dalla



Fig. 20 _ Classificazione dei processi di editing sui modelli reality-based. Elaborazione grafica S. Acquaviva

31 Bonora V., 2005; Ausunio E. et al., 2018.

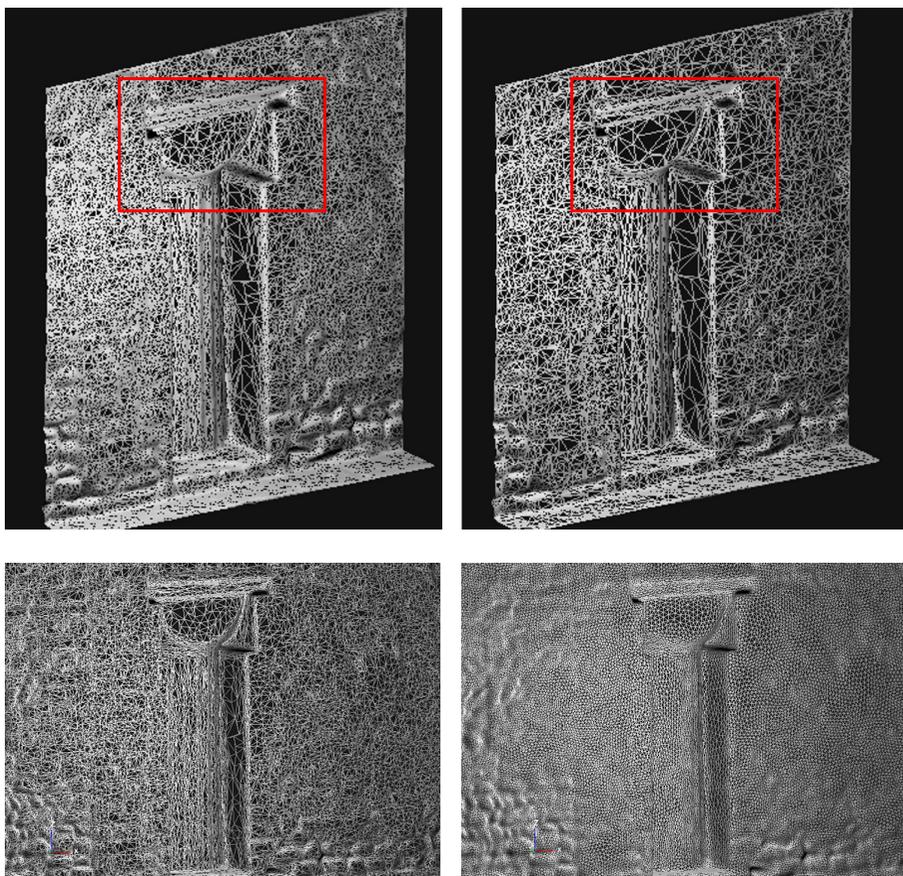


Fig. 21_ Decimazione modello mesh. Elaborazione S. Acquaviva

Fig. 22 _ Operazione di remeshing applicato al modello poligonale. Elaborazione S. Acquaviva

fase computazionale successiva; si tratta spesso di elementi non previsti o di difficile rimozione nella fase in situ (macchine, persone, alberi...). Tale processo, condotto in modo errato e senza una valutazione critica degli elementi superflui, potrebbe portare ad un'eliminazione dei punti significativi e ad una lettura inesatta del modello, correndo il rischio di falsare la successiva fase di rappresentazione.

Le stesse problematiche si possono presentare nella fase di costruzione e editing della *mesh*³². Le mesh – o modelli poligonali - sono superfici

32 Vengono create attraverso algoritmi basati su formule geometriche come il diagramma di Voronoi o la triangolazione di Delaunay (Guidi et al., 2010).

Fig. 23 _ Operazioni di semplificazione del modello poligonale. Fonte: S. Acquaviva et al., Reality-based model and 3d information systems: a gis 3d to mapping the crack panel of the church of Santa Maria degli angeli in Pizzofalcone in Naples, 2022.



composte da una rete di poligoni interconnessi che hanno per vertici i punti della rispettiva nuvola. Pertanto, un buon risultato di rilievo comporta una mesh altamente rappresentativa delle superfici del reale³³. Tale elemento descrive più approfonditamente il continuum della materia perché da un dato discreto e puntiforme giunge ad una superficie geometrica continua, caratterizzata da vertici, valori colorimetrici e topologia. Ha inoltre il vantaggio di poter rendere il dato maggiormente fotorealistico a seguito del processo di texturizzazione, ovvero attraverso la proiezione sulle superfici della texture ricavata dall'acquisizione fotografica, chiaramente dipendente dalla qualità delle immagini acquisite. Per i modelli poligonali texturizzati ricavati da laser scanner che montano fotocamere integrate la qualità è nettamente inferiore³⁴ rispetto ad una texture generata da rilievo fotogrammetrico, proprio perché il sensore fotografico ha una capacità di acquisizione diversa. Infatti, come descritto nel paragrafo precedente, si tende a integrare il dato metrico estrapolato dalle scansioni *range-based* proiettandovi poi la texture fotogrammetrica.

Il modello poligonale, in base all'infittimento delle singole maglie e dunque all'accuratezza rispetto alle geometrie reali, può produrre un file digitale con notevoli problemi di gestione poiché si tratta di superfici complesse rispetto ai singoli punti di una nuvola e pertanto pesanti da elaborare e leggere con hardware classici. Inoltre, è molto frequente la presenza di

³³ A seconda dello strumento utilizzato e pertanto se si ottiene come risultato una nuvola strutturata o non strutturata si ottengono differenti conformazioni dei poligoni della mesh

³⁴ Le informazioni ricavate dalle immagini in un rilievo laser scanner vengono applicate ai punti della nuvola attraverso il cosiddetto color per vertex. Successivamente viene effettuata una media tra il colore dei 3 punti del poligono e estesa alla faccia triangolare.

buchi (*holes*) o aree *ruvide* causate da errori nel calcolo delle superfici o da un non attento filtraggio della nuvola nelle fasi precedenti. Si ricorre pertanto a processi di ottimizzazione e filtri di *smoothing* e *remeshing* che, pur mantenendo una certa affidabilità, riducono il numero di facce, levigano e rendono più fluido l'andamento della superficie poligonale.

La chiusura delle lacune, dovute alla mancanza di dati nelle eventuali zone d'ombra, o la riduzione del numero dei poligoni di una mesh, sono operazioni che migliorano rispettivamente la visualizzazione e la gestione del modello ma allo stesso tempo possono comprometterne la veridicità. Tutte queste operazioni, pertanto, devono essere valutate attentamente per salvaguardare il più possibile le specifiche proprietà del dato di partenza, soprattutto per il patrimonio storico dove le peculiarità delle superfici come bordi e angoli, soluzioni di continuità devono necessariamente essere conservate.

2.3.2. La rappresentazione del dato

I modelli – puntiformi e poligonali – che costituiscono l'esito di ogni rilievo digitale 3D consentono di poter analizzare l'oggetto di studio all'interno di un ambiente digitale unico, capace di restituire al tempo stesso una visione di insieme e un approfondimento dei dettagli.

Tale possibilità consente di tradurre il dato in differenti tipologie di restituzioni grafiche a diversi livelli di approfondimento in termini di scala metrica della rappresentazione. Le procedure per la traduzione del dato sono numerose poiché diversi applicativi software si sono dedicati ad automatizzare gran parte delle operazioni.

Pur partendo da un dato 3D³⁵, infatti, nella maggior parte dei casi ancora oggi si riconosce un valore altamente chiarificatore nelle tradizionali rappresentazioni bidimensionali. In tale ottica, le procedure più comuni

35 La trascrizione si inverte. Ad una discretizzazione del reale mediante la realizzazione di elaborati bidimensionali attraverso i quali si perveniva ad un'analisi morfologica, metrica e percettiva e poi soltanto alla fine si giungeva alla riproposizione della tridimensionalità dell'oggetto di studio (in assonometria e/o prospettiva), si contrappone in primis un modello tridimensionale, discreto o continuo, elemento cardine che consente di traslare le modalità di lettura e di discretizzazione del reale in un secondo momento a seguito del processamento del dato.

prendono avvio dall'estrazione di ortofoto, ricavate attraverso l'ausilio di piani di sezione scelti dall'operatore in modo che intersechino la nuvola o la mesh in punti significativi. Le ortofoto, estratte sottoforma di immagine, rappresentano una proiezione ortografica dell'oggetto di studio e costituiscono un supporto per il disegno bidimensionale in proiezione ortogonale e, eventualmente, fungono da dato di riferimento per una ricostruzione tridimensionale volumetrica del manufatto se si sceglie di ricorrere a modelli geometrici.

Seguendo questa pipeline, il dato tridimensionale finale viene costruito secondo un iter di tipo 3D → 2D → 3D, ovvero nuvola di punti → rappresentazioni bidimensionali → modellazione per primitive geometriche, in una sorta di percorso filologico che porta alla riproposizione delle classiche letture del rilievo tradizionale. Ciò che varia nell'espressione è il reale e la sua *misurazione* che avviene in uno spazio digitale. Sebbene sia un iter ancor oggi in uso, va sottolineato che in questo percorso c'è implicita una perdita di dato dettata anzitutto dalla scelta dei pochi piani di sezione che non riescono a contenere la cospicua informazione insita nei modelli *reality-based*, ma anche dalle operazioni di ridisegno che impongono una selezione dettata dalla scelta della scala grafica e dalla risoluzione dell'ortofoto.

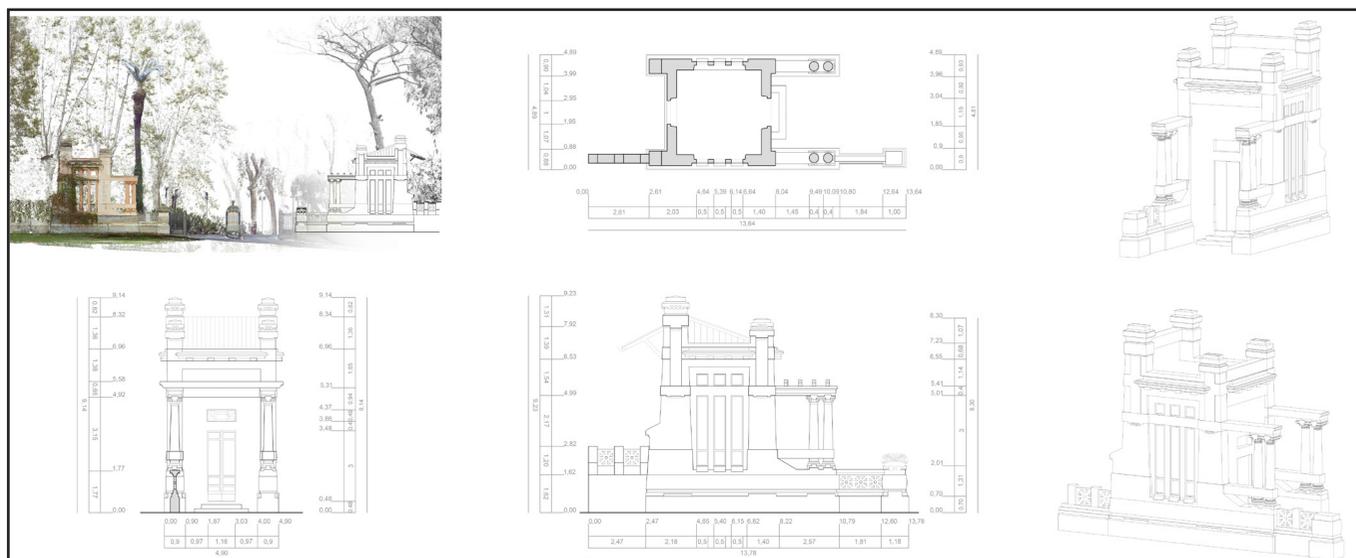


Fig. 24 _ Rappresentazione bidimensionale delle strutture di ingresso del Complesso Termale di Agnano. Elaborazione S. Acquaviva

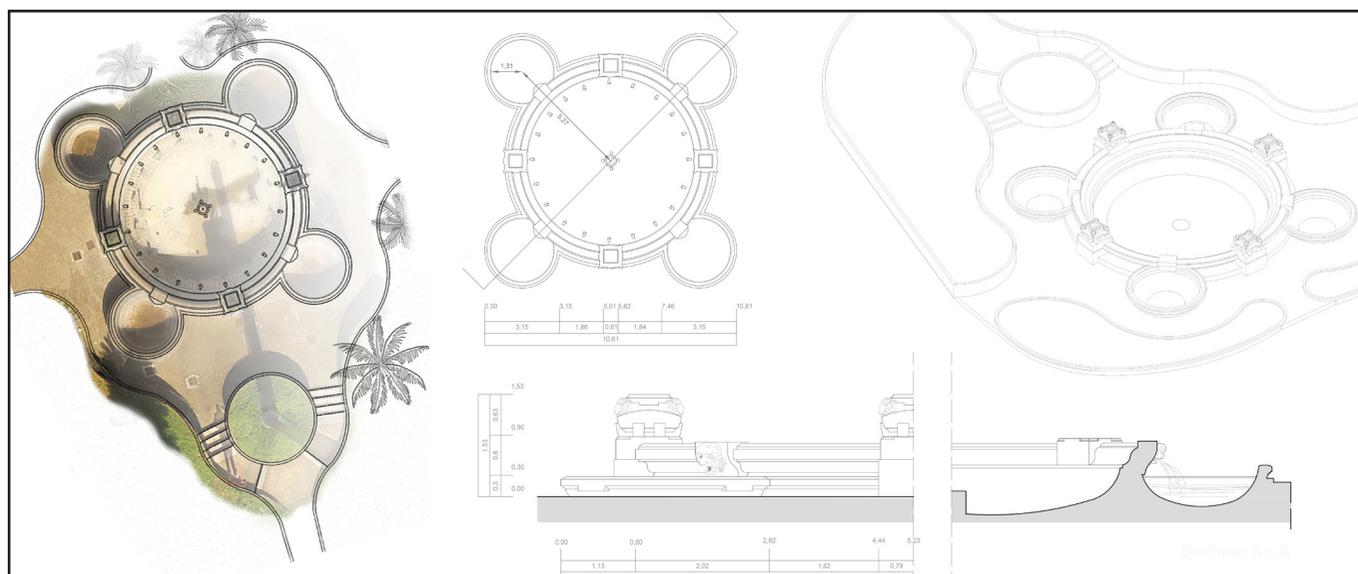


Fig. 25 _ Rappresentazione bidimensionale della fontana del Complesso Termale di Agnano. Elaborazione S. Acquaviva

Parallelamente, l'uso delle tecnologie digitali 3D nel tempo ha comportato lo sviluppo di nuove modalità di rappresentazione e comunicazione delle informazioni, virando dalle rappresentazioni statiche a quelle dinamiche e interattive, fino ad arrivare alle attuali tecnologie di Realtà aumentata³⁶ e Realtà Virtuale³⁷ (Forte M., 2011). Le novità apportate da questi due sistemi hanno comportato un cambiamento, anche se non del tutto costante, nella modalità tradizionale di rappresentare il dato non più legato soltanto al semplice spazio bidimensionale ma trasposto nella terza dimensione. Tali sistemi sfruttano il potere evocativo e comunicativo delle figurazioni, che coniugano restituzione tecnica del dato e resa fotorealistica, costituendo ad oggi il sistema più accurato per poter gestire e divulgare le informazioni

36 La Realtà Aumentata (*Augmented Reality*) è una tecnologia che permette di amplificare la conoscenza del mondo reale attraverso la sovrapposizione di contenuti digitali. Attraverso l'utilizzo di una semplice fotocamera, di uno smartphone o di un tablet, è possibile sovrapporre all'ambiente reale, in modo interattivo, vari livelli informativi inquadrando un target o un elemento della scena reale.

37 La Realtà virtuale (*Virtual Reality*) rappresenta una tecnologia capace di creare un ambiente digitale che simula il mondo reale. L'esperienza in questo caso è di tipo immersivo e interattivo, inoltre grazie all'utilizzo di particolari visori e/o altri dispositivi si può interagire con l'ambiente stesso.

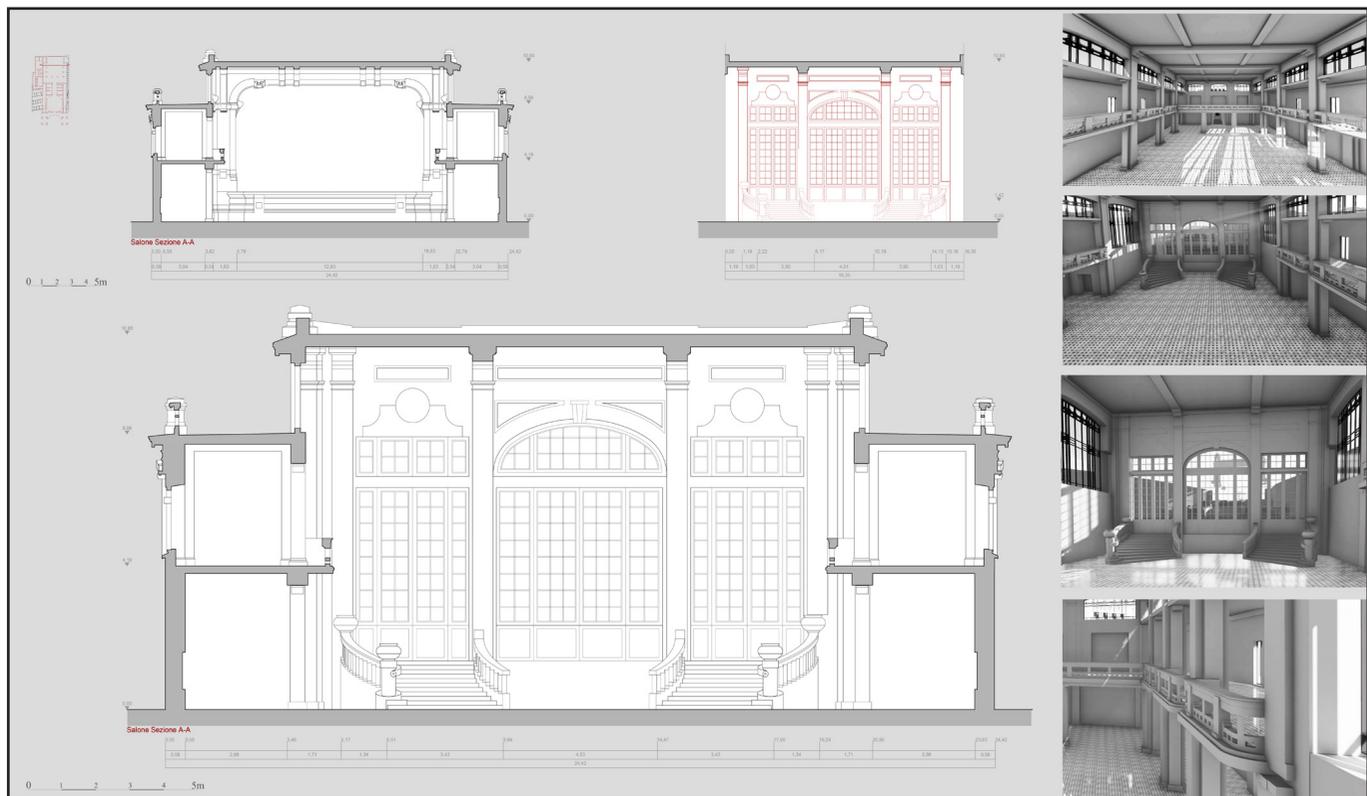


Fig. 26 _ Rappresentazione bidimensionale e ricostruzione del salone centrale del Complesso Termale di Agnano. Elaborazione S. Acquaviva

inerenti i beni culturali ed accrescerne la conoscenza, all'interno dello spazio digitale.

Le ricerche più recenti spingono infine verso una traduzione del dato che consenta di ottenere una modellazione di tipo informativo. In questi casi il modello è pensato tridimensionale e object-oriented ma, soprattutto, contiene al suo interno le informazioni che lo identificano quale entità fisica perfettamente corrispondente al reale, di cui ne descrive la struttura, la forma e le proprietà. La nuvola di punti diviene qui la componente principale per configurare e ricreare geometricamente gli elementi digitali che rappresentano le componenti reali del manufatto, poiché è possibile costruirle in aderenza ad essa, al fine di ottenere un modello finale sufficientemente rispondente al reale. Questi processi sono riconosciuti come Scan-to-BIM e vedono ai prodotti reality based come un dato al servizio della modellazione parametrica e informativa (Bianchini et al., 2016; Trizio et al., 2018; Scandurra et al., 2019).

2.3.3. Lettura e interpretazione dei modelli mediante processi di classificazione e segmentazione

La ricerca di settore si sta concentrando particolarmente sul concetto di modello *multidimensionale informatizzato* nell'ottica di costruire un database del manufatto indagato il più possibile completo e vicino al reale. Alcuni studi (Pierdicca R. et al., 2021; Grilli E. et al., 2018) guardano al processo che consente di ottenere dalla nuvola di punti un eventuale modello informatizzato, interrogandosi su quanto sia realmente necessario riproporre un modello derivato nonostante si abbia a disposizione una nuvola di punti capace di replicare già in 3D e fedelmente la realtà – dal punto di vista metrico e nelle apparenze visive. Il quesito porta a chiedersi dunque come rendere informatizzate o informatizzabili le nuvole di punti, completandole con quella parte di dati che di per sé non posseggono e che i modelli derivati sembra ci consentano di gestire con maggiore facilità. A tal proposito alcune delle sperimentazioni più recenti stanno indagando le modalità di classificazione e segmentazione automatica delle nuvole di punti, al fine di raggrupparne le porzioni in sottoinsiemi simili dal punto di vista semantico e fornire dei modelli che facilitano la conoscenza e comprensione delle strutture anche nei casi in cui siano particolarmente complesse.

Tale approccio, che si basa sull'utilizzo dei sistemi *machine learning* e *deep learning*, consente di effettuare operazioni oggettive e replicabili mediante l'utilizzo di algoritmi capaci di elaborare delle previsioni tramite dati di *training* (Grilli E., 2020; Matrone F., 2021).

L'iter procedurale è costituito da una prima fase di annotazione manuale in cui si prepara un training set, ovvero si individuano manualmente le porzioni di nuvola che si intende associare ad uno specifico concetto semantico, riconoscendone gli elementi caratteristici e ripetitivi nel manufatto; in tal modo a partire dal riconoscimento delle *features* geometriche, mediante l'utilizzo di algoritmi (RandomForest, PointCNN) si riconoscono tutti gli altri elementi attribuibili allo stesso concetto semantico, estendendo la segmentazione semantica all'intera nuvola di punti.

Attraverso l'annotazione semantica delle nuvole o dei modelli poligonali si crea un più facile riconoscimento delle parti che compongono i manufatti e allo stesso tempo una solida base per le successive operazioni di

Fig. 27 _ Nuvola di punti con individuazione delle geometrie costruttive degli ovali di pianta e sezione. Fonte: S. Scandurra et al., Sistemi voltati nei processi cloud to BIM - Vaulted systems in cloud to BIM procedures, in 3D modeling e BIM

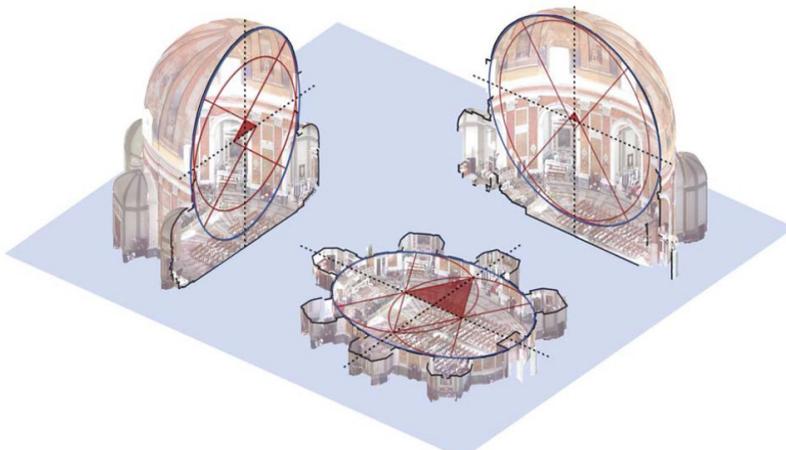
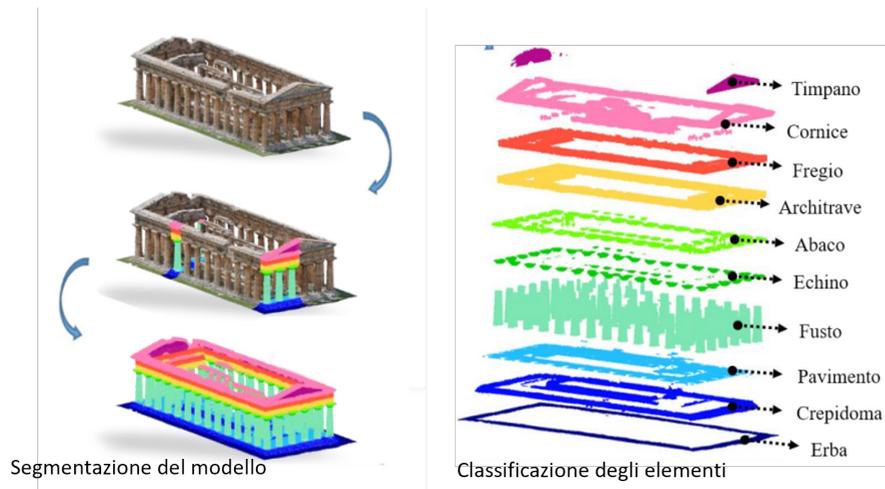


Fig. 28 _ Segmentazione e classificazione delle nuvole di punti. Fonte: Grilli E. et al. (2018). From 2d to 3d supervised segmentation and classification for Cultural Heritage applications in ISPRS, Vol. XLII-2, pp. 399–406.



rappresentazione. La scomposizione in parti ed elementi che costituiscono il costruito e la lettura delle relazioni gerarchiche tra gli stessi, consente di effettuare analisi approfondite - globali e puntuali - ed estrarre informazioni utili e di supporto per le successive operazioni di rappresentazione e documentazione del manufatto.

Ad oggi tali tecniche sono ancora poco performanti nei confronti dell'architettura storica e ancor meno dell'archeologia. In questi casi si ricorre ad una segmentazione in gran parte manuale che, se da un lato comporta un aumento notevole dei tempi di gestione, dall'altro lato consente un controllo costante del processo di classificazione.

Metodologie e tecniche di rilievo integrato. Dall'acquisizione all'elaborazione del dato



Fig. 29 _ Segmentazione e classificazione dei modelli reality-based della Chiesa di Santa Maria degli Angeli a Pizzofalcone (Napoli). Fonte: S. Acquaviva et al., Reality-based model and 3d information systems: a gis 3d to mapping the crack panel of the church of Santa Maria degli Angeli in pizzofalcone in naples, 2022.

CAPITOLO TERZO

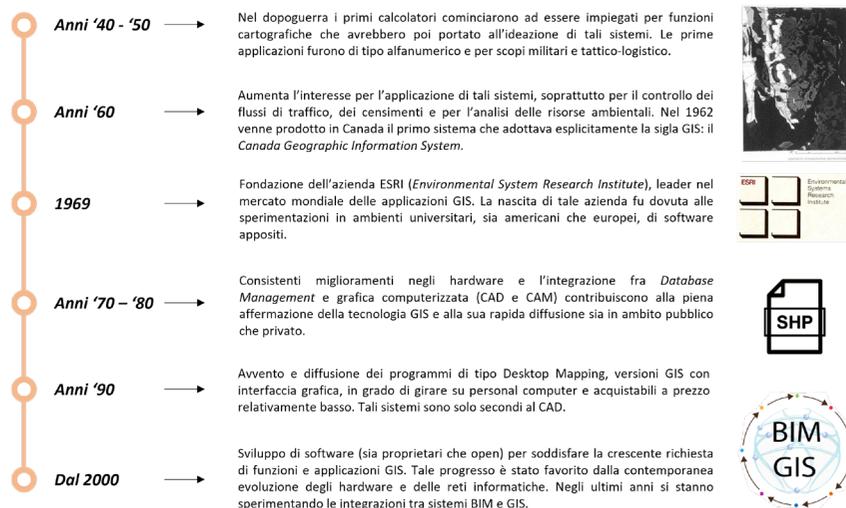
Sistemi informativi: dal dato all'informazione

3.1. Il GIS: sistema di raccolta dati a supporto della documentazione e gestione del dato

I sistemi GIS (*Geographic Information System*), nati e utilizzati per la gestione del territorio su larga scala, sono sistemi informativi che ben si prestano allo studio e all'analisi delle peculiarità del Patrimonio Culturale poiché permettono non solo di archiviare e rappresentare la moltitudine di dati che lo caratterizzano, ma anche di eseguire su di essi analisi multi-scalari ed incrociate, per una migliore interpretazione e lettura del bene indagato. In particolare, tali sistemi consentono la registrazione, la gestione, l'elaborazione e la rappresentazione di dati archiviati in appositi database collegandoli alla loro corretta posizione geografica.

Il loro sviluppo avvenuto intorno agli anni '60 è legato alla proliferazione dell'utilizzo dei computer e alla geografia computazionale. Tra le differenti sperimentazioni avvenute in quegli anni, è possibile ricordare la realizzazione del *Canada Geographic Information System* per la gestione delle risorse naturali del territorio nazionale e la progettazione dei primi software per la mappatura delle informazioni mediante computer, come il SYMAP creato da Howard Fisher, membro del *Laboratory for Computer Graphics* presso l'università di Harvard. È proprio da questo laboratorio che nascono le prime idee per la realizzazione futura dei sistemi GIS, come sono conosciuti oggi. Ed è in quello stesso luogo che viene fondata

Fig. 30 _ Fasi dell'evoluzione dei sistemi GIS: dall'ideazione alla realizzazione. Elaborazione grafica S. Acquaviva



la maggior casa produttrice di software GIS, ancora in auge, ESRI (*Environmental Systems Research Institute*) che è stata capace di racchiudere in un unico sistema la mappatura computerizzata e l'analisi spaziale dei dati, per aiutare i pianificatori dell'uso del suolo e i gestori delle risorse territoriali nei processi decisionali.

I primi sistemi sono stati sviluppati tra il 1959 e il 1961 con la realizzazione delle prime cartografie digitali collegate a database. Alla fine degli anni Settanta si contavano circa 300 software in grado di gestire i dati cartografici sviluppati da agenzie governative, servizi cartografici e militari ed enti di ricerca. Consistenti miglioramenti si sono ottenuti grazie all'integrazione della grafica vettoriale (CAD e CAM) in ambiente GIS, che ha consentito di rappresentare gli oggetti del mondo reale attraverso le primitive geometriche (punto linea e poligono) collegate ai dati contenuti nel database. Il passaggio dall'immagine raster, fino ad allora utilizzata, ad un oggetto vettoriale, ha agevolato le operazioni di modifica ed aggiornamento dei dati.

Tali sistemi oggi risultano largamente diffusi grazie al loro continuo aggiornamento, alla possibilità di essere gestiti da hardware di uso comune, e dalla disponibilità di diversi software sia proprietari che *open source*¹, sviluppatasi dagli anni '90 grazie alla liberalizzazione del codice sorgente

1 Tra I più conosciuti è possibile elencare Grass e QGIS.

del tipo di file più utilizzato, lo *shapefile*².

La filosofia alla base di questi sistemi consiste nella possibilità di associare ad oggetti del mondo reale, rappresentati mediante grafica vettoriale e collegati ad un sistema di riferimento globale, dati gestiti attraverso i geodatabase e poter effettuare su di essi analisi spaziali utili all'identificazione e alla programmazione di strategie di *governance* dei territori. Le potenzialità offerte dai GIS, ormai ampiamente riconosciute, trovano largo impiego in molteplici settori (scienze ambientali, urbanistica, medicina, servizi per la gestione di infrastrutture, protezione civile, architettura, archeologia, gestione del patrimonio monumentale e culturale), sia da parte degli enti pubblici che di privati.

Le applicazioni condotte con l'uso del GIS, nell'ambito della rappresentazione, hanno come risultato finale la creazione di carte tematiche che rappresentano forme visuali di figurazione del dato. Dalla loro lettura è possibile cogliere, analizzare, risolvere situazioni di criticità di carattere ambientale, architettonico, sociale, economico, antropico ecc., ovvero ambiti che implicano valutazioni, controllo e gestione di territori piuttosto che di manufatti architettonici. In particolare, nel campo dei Beni Culturali questi sistemi hanno trovato largo utilizzo, sia per quanto concerne l'archiviazione e la visualizzazione dei dati su base geografica (ad esempio censimenti di centri storici o analisi tipologiche su contesti urbani), sia per la possibilità di poter rappresentare graficamente fenomeni legati a singoli oggetti edilizi ed effettuare analisi spaziali e ipotesi di intervento e decisionali su tali contesti fortemente stratificati (come ad esempio rappresentazione bidimensionale e mappatura tematica dei fenomeni di degrado collegati ai relativi interventi di manutenzione).

3.1.1. La struttura e le componenti dei sistemi GIS

I sistemi GIS vengono definiti da Burrough come un “*insieme di strumenti in grado di acquisire, immagazzinare, recuperare, trasformare, analizzare e riprodurre dati spaziali riferiti al territorio*”³ configurandosi come strumento metodologico

2 Formato nativo del software ArcGIS della ESRI. La sua liberalizzazione ha concesso un maggior interscambio di dati.

3 Burrough, P.A., Principles of Geographic Information Systems for Land Resource



Fig. 31 _ Workflow operativo per i progetti strutturati in ambiente GIS. Elaborazione grafica S. Acquaviva

composto da hardware, software, dati ed utenti.

In particolare, analizzandolo nel dettaglio, esso è un sistema (*system*) composto da una serie di entità, indipendenti e/o in interazione tra loro, che svolgono differenti compiti. Allo stesso tempo è un sistema che consente, attraverso differenti operazioni, di generare informazioni (*information*) e collegarle alla loro corretta posizione geografica (*geographic*). La struttura operativa della piattaforma sfrutta la capacità di interazione e interrogazione (*query*) tra i differenti dati che è possibile inserire nel sistema (spaziali, geografici e tabellari), generando in questo modo sempre nuove informazioni che arricchiscono la conoscenza dei manufatti, non esaurendo il loro potenziale informativo alla singola ricerca (D'Andrea A., 2006).

La definizione del modello dei dati geografici del GIS avviene a partire dalla cartografia numerica (mappa), sulla quale vengono rappresentati gli oggetti relativi ad una determinata tematica. La rappresentazione grafica avviene attraverso l'utilizzo delle cosiddette primitive geometriche (punto, linea e poligono), collegate ad appositi archivi, denominati geo-database, e pertanto relazionati sia al sistema di riferimento cartografico scelto, che alle informazioni descrittive alfanumeriche. Quindi non costituiscono più soltanto una semplice ri-presentazione delle forme su di una mappa, ma tali sistemi possono essere considerati come l'evoluzione dei sistemi CAD ampliati dalla possibilità di attribuzione del significato del fenomeno indagato, mediante una connessione con le sue caratteristiche reali (dati alfanumerici denominati attributi), e di analisi dei dati ad esso correlati.

I sistemi GIS consentono pertanto di: organizzare un elevato numero di dati eterogenei (spaziali e alfanumerici); visualizzare le informazioni ricavate mediante carte tematiche che concretizzano, secondo una sintesi coerente, le situazioni complesse della realtà; interrogare i database per estrapolare le informazioni necessarie (spaziali, topologiche e per attributi); combinare dati provenienti da fonti differenti; analizzare i fenomeni reali attraverso gli strumenti statistici e di modellazione; elaborare previsioni su scenari futuri (pianificazione urbanistica, analisi ambientale, carte del potenziale archeologico). Il vantaggio principale consiste nella possibilità di compiere anche simultaneamente tali operazioni.

Il cuore del sistema è definito dal database spaziale in grado di registrare e consentire interrogazioni incrociando i dati vettoriali e i relativi attributi. Questi ultimi sono organizzati in tabelle secondo uno schema di righe e di colonne, dove ogni riga, o record, rappresenta un singolo oggetto (caratterizzato o meno da geometria) e ogni colonna, o campo, contiene una particolare informazione sull'oggetto.

Questi elementi, inoltre, possono essere correlati tra loro e attraverso una serie di *tools* aggiuntivi presenti nei sistemi e sottoposti ad una serie di operazioni di analisi grafiche (buffer, intersezione, unione) i cui risultati sono restituiti anch'essi sottoforma di elementi vettoriali.

La scelta di realizzare questa tipologia di struttura di dati spaziali nasce dalla volontà di rappresentare graficamente gli oggetti reali che difficilmente possono essere descritti da semplici dati tabellari. Restituire e rappresentare un fenomeno, sottoforma di mappe e carte tematiche ne consente di rendere più immediata la sua conoscenza.

Il progressivo sviluppo degli strumenti di *Web Communication* ha permesso, inoltre, di implementare le peculiarità dei sistemi informativi attraverso la creazione dei cosiddetti WebGIS, piattaforme fruibili online, che rendono queste banche dati maggiormente condivisibili (Serlorenzi, 2018). La consultazione e l'interazione con questi sistemi è assegnata spesso a diversi utenti, anche simultaneamente, stabilendo a priori determinati gradi di accessibilità secondo le diverse finalità di utilizzo. La scelta delle autorizzazioni rende fruibili le informazioni settorialmente in modo tale da limitare l'accesso di determinati dati al solo uso specialistico. La possibilità di accedere a specifici dataset rientra nella politica degli *open data*⁴ che hanno l'obiettivo di consentire il libero accesso alle informazioni spaziali a tutti gli utenti con lo scopo di creare vere e proprie infrastrutture di dati geografici e specialistici.

Gli elementi che distinguono i sistemi GIS dai classici database sono i dati vettoriali e raster che costituiscono gli elementi grafici a cui associare i dati alfanumerici e tabellari (Bogdani J., 2018).

4 Impostazione della gestione dei contenuti improntata alla circolazione degli stessi secondo modelli di condivisione e trasparenza, per una maggior condivisione della conoscenza.

In particolare, i dati vettoriali sono composti da primitive geometriche quali punto, linea e poligono e utilizzano punti o vertici sequenziali per la rappresentazione dei fenomeni, mediante le coordinate (x,y). Confini amministrativi, limiti degli edifici e strade sono alcuni esempi di dati vettoriali. Questi elementi, che costituiscono i classici elementi grafici della rappresentazione in ambiente CAD, sono più gestibili a livello di dimensione dei file rispetto ai dati raster e possono essere manipolati e modificati più facilmente, ed hanno una maggiore efficacia visiva nella restituzione delle informazioni. I dati raster invece hanno una struttura formata da una maglia regolare di celle, denominate pixel, a cui è associato un valore RGB, o nel caso di un DTM⁵ (*digital terrain model*) la quota sul livello del mare. Le informazioni contenute nei pixel vengono usate dalla piattaforma per le analisi successive. Entrambi gli elementi hanno differenti potenzialità e il workflow operativo maggiormente efficace consiste nel loro utilizzo integrato. Pertanto, rispetto ad una rappresentazione puramente geometrica degli oggetti presenti nella realtà, il sistema GIS consente di mantenere e gestire tutte le informazioni che riguardano le mutue relazioni spaziali tra i diversi elementi, consentendo di strutturare i dati definendone anche la topologia. Oltre a questi due aspetti, geometrico e topologico, il modello dei dati, per essere efficace, deve prevedere l'inserimento al suo interno dei contenuti descrittivi dei singoli oggetti reali, gli attributi. Questi tre elementi (geometria, topologia, attributi) costituiscono il database, il fulcro attorno al quale ruota il sistema, caratterizzato da uno specifico modello fisico di tipo relazionale.

3.1.2 Il GIS in ambito archeologico

Ogni attività condotta su un bene culturale – sia essa una azione di conservazione, manutenzione piuttosto che di valorizzazione – parte dalla necessità di conoscere la sua storia, le sue trasformazioni e, pertanto, comporta la consultazione e la raccolta di differenti dati (testuali, grafici, numerici, fotografici). Si tratta di informazioni intrinsecamente legate all'oggetto studiato ma che costituiscono tra loro entità separate, archiviate

5 È la rappresentazione della distribuzione delle quote del terreno privo di elementi antropici. Si differenzia dal modello digitale delle superfici (DSM) che invece rappresenta la quota di tutti gli elementi che si trovano sul terreno.

spesso in contesti differenti. La loro consultazione diviene pertanto un'azione non sempre facile in quanto, sebbene siano archiviati secondo codici specifici, risultano tra loro non relazionati.

L'opportunità di sistematizzare tali output, scientifici e tecnici, attraverso la creazione di banche dati, ha fatto sì che i sistemi GIS (*Geographic Information System*) divenissero di fondamentale ausilio per i lavori di ricerca in ambito archeologico⁶. Questi sistemi permettono di digitalizzare e rappresentare graficamente in un ambiente georeferenziato le strutture archeologiche e di associarvi, in modo semi-automatico, dati alfanumerici raccolti in forma tabellare, redatti in appositi database relazionali (DBMS, DataBase Management System) e secondo standard ben precisi.

Lo sviluppo delle nuove tecnologie digitali ha potenziato tali sistemi, offrendo la possibilità di far interagire dinamicamente e mettere in relazione un'ampia tipologia di dati, agevolando il dialogo tra le diverse metodologie di indagine. Sono note le potenzialità determinate dall'integrazione degli output ottenuti dal processamento dei dataset acquisiti tramite fotogrammetria e/o laser scanner – ortofoto georeferenziate - all'interno delle piattaforme GIS (Malinverni S., 2019). Ciò ha permesso di ottenere un dato accurato non solo dal punto di vista metrico e visivo ma anche spaziale, archiviato direttamente nel sistema, sempre interrogabile e soggetto a possibili nuove interpretazioni, soprattutto in quelle situazioni in cui rappresentano gli unici dati disponibili (D'Andrea A. et al., 2019). È noto però che se da un lato tali sistemi GIS riescono a gestire e ad ottimizzare i dati bidimensionali, dall'altro presentano alcune lacune per quanto concerne le analisi spaziali su dati di natura tridimensionale.

Le sperimentazioni condotte inizialmente su questi sistemi mostrano un utilizzo prettamente archivistico attraverso cui memorizzare i record archeologici. Soltanto successivamente si è delineata una metodologia ben precisa per sfruttare pienamente sia la capacità di mettere a sistema i dati cartacei esistenti e successivi dataset di studio, che la possibilità di compiere analisi predittive e preventive.

I sistemi GIS vengono spesso adoperati per sistematizzare tutta la documentazione pregressa di un sito e aggiornarla. In particolare, il suo utilizzo permette di censire e catalogare i frammenti rinvenuti collegandoli

6 Un GIS archeologico è «un sistema e un modello spaziale di archiviazione ed elaborazione di dati, eventi ed attività spaziali, finalizzato all'interpretazione del paesaggio storico e archeologico, dal sito al territorio, dal costruito all'insediato, dalla micro-scala alla macro-scala». Forte M., 2002.

alla corretta posizione di rinvenimento, e rappresentare le unità stratigrafiche associandovi le informazioni delle schede US e USM (unità stratigrafiche murarie) ottenendo così una conoscenza integrata di tutti gli elementi e strutturare uno strumento per le successive ricostruzioni.

Una delle piattaforme più conosciute è costituita dal SITAR⁷, *Sistema Informativo Territoriale Archeologico di Roma*, che rappresenta uno strumento di gestione dell'informazione archeologica, condiviso *online* e consultabile sia da utenti interni che esterni, secondo l'idea base degli *open data*. Nato per creare un sistema di gestione di un territorio complesso e ricco di siti archeologici, organizza una quantità notevole di dati scientifici e amministrativi. Il sistema offre la possibilità di filtrare i temi archeologici secondo un criterio cronologico, funzionale e conservativo. Ogni evidenza archeologica, precedentemente vettorializzata, è interrogabile e collegata ad una serie di informazioni descrittive e di archivio, il tutto consultabile via *web*. Un'altra piattaforma simile è stata realizzata nell'ambito del *MAPPA project*⁸. Anch'esso è stato creato con l'obiettivo di realizzare un *WebGIS* dell'area urbana di Pisa, raccogliendo tutti i dati archeologici, geologici e geomorfologici attraverso i quali è possibile generare una Carta del Potenziale Archeologico⁹ dell'area. Entrambi i progetti sono stati creati secondo la filosofia degli *open data*, per mettere in luce anche tutte quelle informazioni ricavate dalle differenti ricerche archeologiche che molto

7 Si tratta di un progetto avviato nel 2008 dalla Soprintendenza Speciale per i Beni Archeologici di Roma in collaborazione con un Gruppo di lavoro costituito da professionisti nel settore archeologico, geo-topografico ed informatico in collaborazione con il personale tecnico e scientifico della SSBAR. Carafa P., 2015; Serlorenzi M. et al., 2011. <https://webais.archeositar-project.it/#>

8 Progetto finanziato dalla Regione Toscana e dall'Università di Pisa.

9 La "Carta di potenziale archeologico" rappresenta una mappa che, partendo dalla Carta Archeologica, unisce informazioni di carattere storico-archeologico a dati desumibili da indagini e prospezioni geologiche e geofisiche, da ricostruzioni geomorfologiche, da cartografie e catastri storici, dati toponomastici, analisi delle componenti di edilizia urbana. Elaborazioni successive, effettuate secondo modelli interpretativi codificati, consentono di formulare ipotesi sulla maggiore o minore probabilità che vi siano resti archeologici in zone per le quali ad oggi non si dispone di alcuna informazione. Si tratta, in altre parole, di una carta predittiva, in cui la valutazione della possibilità che determinate aree nascondano resti archeologici di cui non si ha alcuna notizia viene fatta proiettando su di esse le conoscenze relative alle aree limitrofe, con un grado di approssimazione che varia a seconda della quantità e della qualità dei dati a disposizione. Anichini F. et al., 2011.

spesso restano relegate nella cosiddetta letteratura grigia e non accessibili. Oggigiorno queste tipologie di sistemi vedono l'integrazione nei database non soltanto di tutti i dati bidimensionali ma anche dei modelli tridimensionali *reality-based*. L'inserimento all'interno delle piattaforme avviene utilizzando file PDF3D¹⁰, che ad oggi rappresenta uno dei formati di interscambio e di visualizzazione delle informazioni comunemente più usato, o in alternativa inserendo il modello 3D su una piattaforma web¹¹, acquisendo la denominazione rispettivamente di GIS3D e WebGIS3D. Questi però risultano essere esclusivamente visualizzatori che permettono di eseguire poche e semplici interazioni con l'oggetto, come rotazioni e ingrandimenti, e di aggiungere piccole descrizioni testuali. Pertanto, non permettono una piena gestione del dato tridimensionale. Inoltre questa importazione è soltanto apparente in quanto il file viene collegato al database mediante un hyperlink e consultabile in un'altra piattaforma.

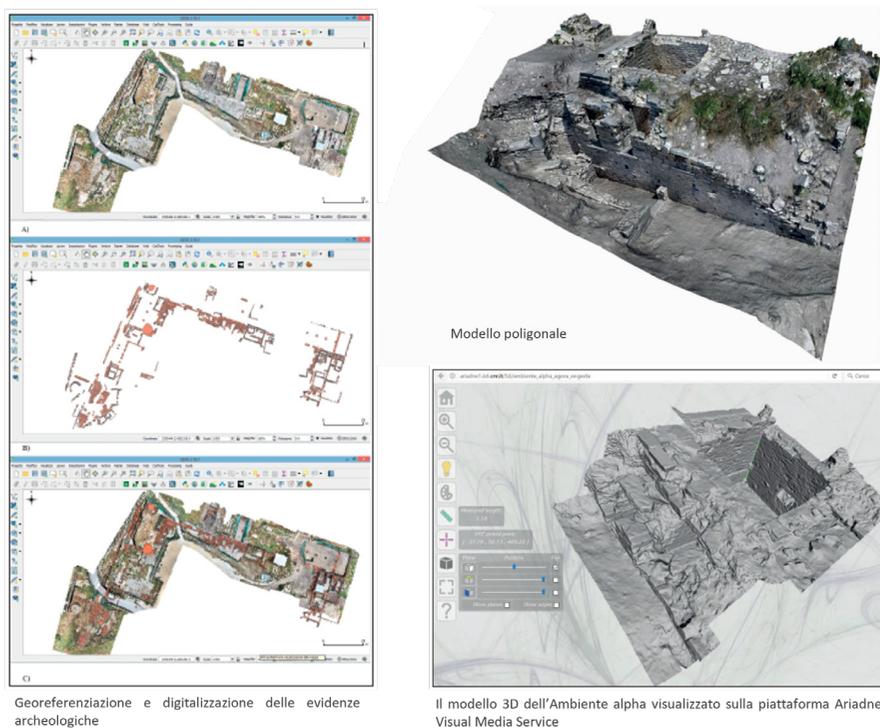
In questo scenario è possibile percepire come il rilievo e la rappresentazione, che costituiscono il primo passo da compiere nell'interpretazione di un manufatto permettendo la sua documentazione¹² - sia delle peculiarità intrinseche che estrinseche attraverso un processo di sintesi del reale e mediante rappresentazioni realizzate nel rispetto di convenzioni specifiche e codificate - costituiscano elementi fondamentali nella metodologia dei sistemi informativi.

10 Fiorini A. et al., 2013.

11 Sono piattaforme che consentono la realizzazione di presentazioni web multimediali di beni culturali digitalizzati. Tra le piattaforme più conosciute si annoverano Sketchfab e 3Dhop realizzata dal CNR di Pisa.

12 «Records of monuments, groups of buildings and sites may include tangible as well as intangible evidence and constitute a part of the documentation that can contribute to an understanding of the heritage and its related Values», ICOMOS, Principles for the Recording of Monuments, Groups of Buildings and Sites, Sofia, 1996.

Fig. 32 _ GIS del sito archeologia di Segesta. Fonte: Taccola E. et al. (2017). Segesta. Agora. Dal rilievo fotogrammetrico 3D alla creazione di un GIS su piattaforma Open Source in Annali della Scuola Normale Superiore di Pisa, serie 5, supplemento.



3.1.3. L'implementazione della terza dimensione: metodi e strategie per la costruzione di database 3D

Per quanto gli strumenti GIS rappresentino una realtà ampiamente consolidata, presentano ancora numerose criticità nella gestione del dato tridimensionale, in quanto non consentono un controllo globale della terza dimensione (z), consentendo di rappresentare tale dato soltanto come un attributo numerico dell'oggetto bidimensionale. Si parla infatti di sistemi GIS 2.5D, rappresentati principalmente dai modelli di elevazione del terreno (DTM). Ad oggi soltanto un numero limitato di piattaforme (ArcGIS Pro, Civil 3D) consente l'importazione, la visualizzazione e l'interrogazione dei modelli 3D. Ancora più problematica è la modellazione geometrica a scala architettonica, in quanto le attuali piattaforme consentono limitati strumenti di modellazione quali l'estrusione o la sottrazione volumetrica. Per sopperire a questa mancanza si demanda ad altri applicativi (CAD, BIM) la replica della realtà (Ferdani D. et al. 2020). Le sperimentazioni più

recenti puntano all'integrazione dei sistemi BIM-GIS, ad una metodologia che permetta di far dialogare gli strumenti di modellazione informativa (HBIM) e i sistemi informativi territoriali (GIS3D) (Garagnani S. et al., 2020; Scianna et al. 2020; Matrone et al. 2019; Brusaporci et al. 2018). Tali sperimentazioni concentrano le loro risorse sull'utilizzo del GIS come mero strumento legato al solo dato bidimensionale, principalmente per la rappresentazione del territorio o dei contesti architettonici a grande scala, mentre la rappresentazione a scala architettonica è demandata all'applicativo BIM.

Le problematiche principali di questo approccio risiedono nei differenti formati di interscambio dei due sistemi, CityGML¹³ per i Geographic information system e IFC¹⁴ per il Building Information Modeling. Seppur siano stati compiuti dei passi avanti in campo edilizio per la creazione di un modello unificato, la loro integrazione pone dei problemi per quanto riguarda l'aspetto semantico e il livello di dettaglio. In particolare, entrambi i sistemi presentano i cosiddetti LOD, ma mentre per i sistemi informativi essi costituiscono ciò che esplicita il *level of detail*¹⁵ del fenomeno indagato, per il BIM si parla di *level of development*¹⁶, ossia il parametro che indica lo sviluppo minimo che i singoli componenti di un edificio dovranno raggiungere e pertanto il grado di affidabilità delle informazioni associate al modello.

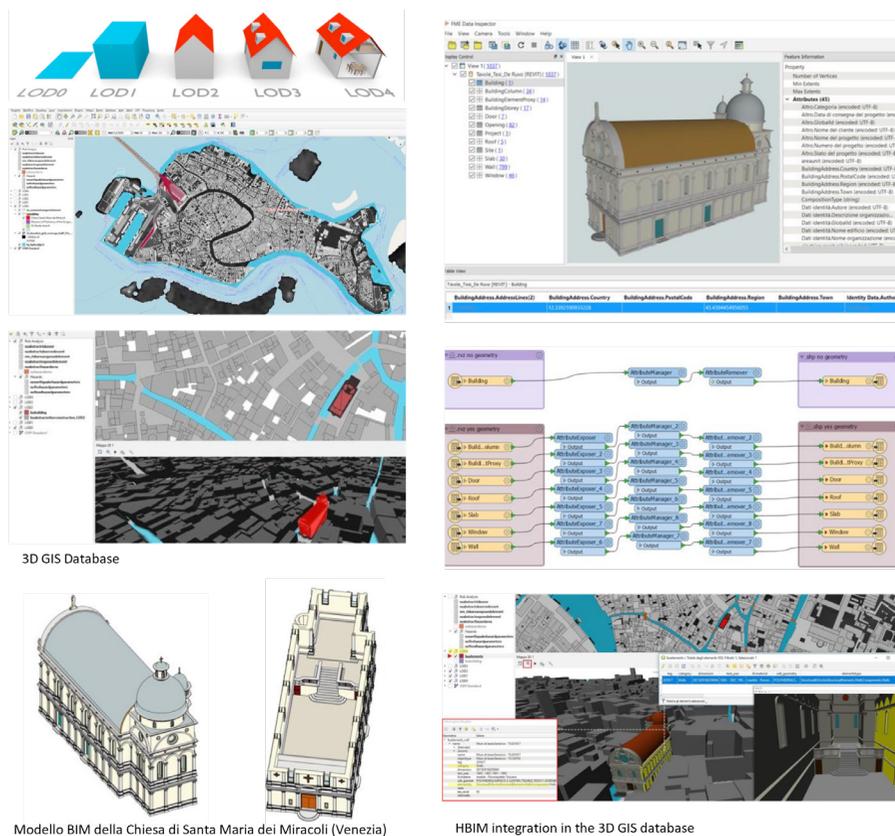
13 CityGML è un modello di dati standardizzato aperto e un formato di scambio per archiviare modelli 3D digitali di città e paesaggi. Definisce i modi per descrivere la maggior parte delle caratteristiche e degli oggetti 3D comuni trovati nelle città (come edifici, strade, fiumi, ponti, vegetazione e arredi urbani) e le relazioni tra di loro.

14 L'IFC è uno dei formati aperti sviluppati nel framework del BIM, nonché l'elemento principale dell'intero schema di scambio delle informazioni. Ha una struttura che permette la standardizzazione e la codifica univoca secondo livelli gerarchici delle componenti di un modello BIM (semantica, attributi e relazioni).

15 il LOD0 descrive il contesto regionale e paesaggistico, il LOD1 quello della città, il LOD2 il livello del blocco o isolato edilizio, il LOD3 presenta il modello esterno dell'edificio, e infine il LOD4 anche il modello interno, pur non raggiungendo il dettaglio del corrispondente BIM.

16 Il LOD si compone di 2 elementi: la geometria o rappresentazione visiva di un progetto – LOG (Level of Geometry) e i dati allegati agli oggetti del modello BIM – LOI (Level of Information). In Italia si utilizza la caratterizzazione che va dal LOD A (oggetto simbolico), LOD B (oggetto generico), LOD C (oggetto definito), LOD D (oggetto dettagliato), LOD E (oggetto specifico), LOD F (oggetto eseguito), LOD G (oggetto aggiornato).

Fig. 33 _ Integrazione Sistemi GIS 3D e BIM.
 Fonte: Matrone F., Colucci E., De Ruvo V., Lingua A., Spanò A., 2019. HBIM in a semantic 3d GIS database, in Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLII-2/W11, pp. 857–865.



Le ricerche più recenti stanno sperimentando sistemi in grado di gestire modelli puntiformi e poligonali all'interno di contesti geospaziali, connettendoli con la documentazione storica e d'archivio. L'implementazione di software e la creazione di piattaforme ad hoc in grado di gestire il dato 3D ha permesso la sperimentazione di nuovi approcci metodologici, come ad esempio l'analisi delle diverse unità stratigrafiche murarie in aderenza alla mesh fotogrammetrica (Trizio I. et al. 2019). In tal modo il modello diviene un elemento al quale associare informazioni e sul quale compiere analisi complesse.

La possibilità di costruire un GIS 3D consente non solo di avere un database dei dati eterogenei riferiti al patrimonio archeologico ma soprattutto di gestire e conservare il dato geometrico (*reality-based*), creando una rete di connessioni informative tra la documentazione tradizionale ed i nuovi linguaggi digitali che può ampliare la comprensione e l'interpretazione

della complessità delle evidenze archeologiche.

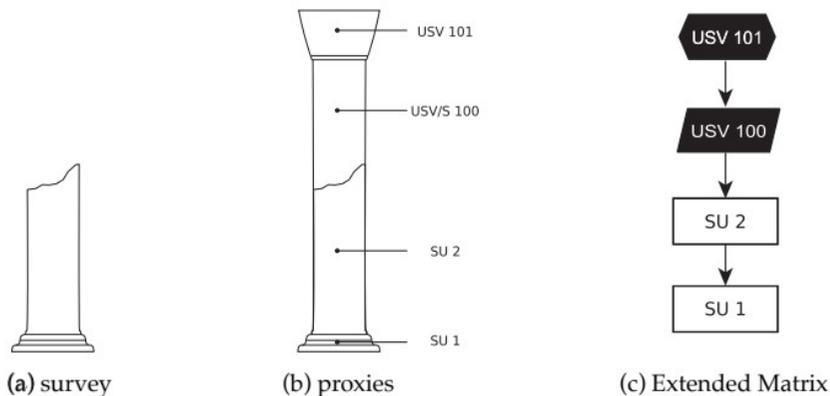
Con l'impiego delle moderne tecniche di rilievo, infatti, si stanno producendo in modo molto più veloce, in quantità maggiore e con caratteristiche differenti (Laney, 2001), dati che necessitano di essere strutturati, archiviati e catalogati al fine di consentire un controllo - generale e di dettaglio - sui beni oggetto di studio e sulle attività svolte. Se da un lato queste procedure hanno portato ad un affinamento e una maggior diffusione dei risultati, al tempo stesso hanno comportato un'acquisizione massiva e acritica dei beni indagati. Si rende quindi necessaria la distinzione tra ciò che realmente è necessario e cosa in realtà diviene superfluo. Quindi diviene di fondamentale importanza poter governare tutti i dati prodotti e, rispettando le loro proprietà e interrelazioni, creare una rete di connessione tra gli stessi per farli convivere e per rappresentarli in uno stesso spazio virtuale. La scelta più critica è rappresentata dall'individuazione dell'ambiente digitale in cui inserirli e che permetta di gestirli e analizzarli, non relegandoli quindi a semplici strumenti di visualizzazione. Ciò che cambia quindi è il modo di rappresentare i dati, il supporto grafico a cui associarli, non restando semplicemente informazioni registrate su livelli bidimensionali distinti ma il tutto diviene parte di una struttura fatta di livelli integrati tra loro, interrogabili e leggibili a seconda dell'analisi compiuta.

Le attuali sperimentazioni mirano alla definizione di sistemi informativi tridimensionali aventi come obiettivo una ricomposizione omogenea dei differenti dati discontinui, successivamente relazionati al modello tridimensionale (numerico e/o geometrico). In tale ottica il modello costituisce un *digital repository* in cui ogni elemento, semanticamente interpretato, è relazionato agli altri secondo rapporti gerarchici ben definiti. Di conseguenza esso diviene elemento chiarificatore e di sintesi coerente dell'oggetto reale (Previtali M., 2019).

In particolare, in questo campo, rilevante è la creazione e sperimentazione dell'Extended Matrix, un linguaggio formale che consente di tenere traccia dei processi di ricostruzione virtuale. Il processo alla base di tale studio ha inizio con la realizzazione del rilievo tridimensionale e la lettura dei modelli, attraverso i quali risalire alle unità stratigrafiche che compongono la struttura e a seguito della stesura del Matrix di Harris¹⁷ e

17 Il matrix di Harris o diagramma stratigrafico è un diagramma utilizzato per rappresentare in maniera astratta la successione temporale della formazione degli strati di suolo, dell'uso delle superfici, della costruzione delle murature e della loro distruzione all'interno di un sito archeologico o di un monumento architettonico.

Fig. 34 _ Extended Matrix. Fonte: Demetrescu et al. From Field Archaeology to Virtual Reconstruction: A Five Steps Method Using the Extended Matrix In Appl. Sci. 2021, 11(11), 5206



all'assegnazione di tali unità al modello 3D, ricostruire poi a ritroso le unità stratigrafiche mancanti (extended matrix) fornendo la base teorica per possibili ricostruzioni (Demetrescu E. et al., 2021). Il modello in questo caso non rappresenta soltanto un oggetto di studio ma un ambiente in cui portare avanti le ricerche scientifiche, uno spazio interattivo e dinamico di simulazione delle ipotesi ricostruttive.

Ampio spazio pertanto viene dato alla costruzione degli archivi digitali, all'interno dei quali il dato perde il suo valore statico - legato alla singola analisi - relazionandosi agli altri mediante verifiche incrociate, in un processo in continuo divenire, ottenendo sempre nuove informazioni che ampliano di volta in volta il portato conoscitivo della ricerca. Le sperimentazioni legate al GIS 3D, inteso come sistema in grado non solo di visualizzare ma gestire il dato tridimensionale, sono di recente condotte dalla Lund University che sta puntando ad una integrazione vera e propria tra i rilievi *reality-based* e i sistemi informativi. L'obiettivo è di effettuare analisi sui dati molto più complesse, di modellare e simulare in modo molto più performante l'articolato contesto dei beni culturali e di fruirne sia da remoto che in situ, dando luogo a rinnovati approcci metodologici legati alla multidisciplinarietà e all'interscambio di informazioni tra specialisti di differenti settori.

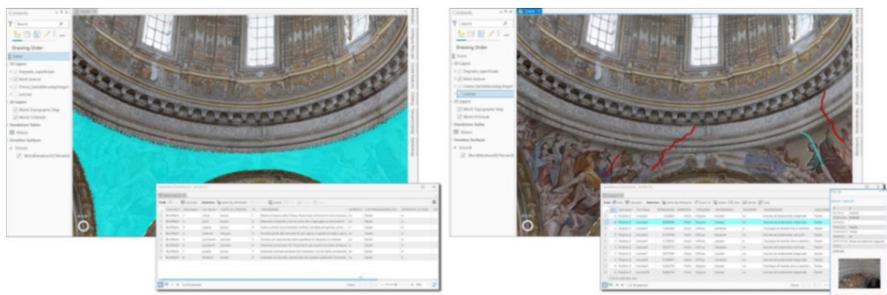


Fig. 35 _ Mappatura dei fenomeni di degrado in aderenza al modello poligonale. Fonte: : S. Acquaviva et al., Reality-based model and 3d information systems: a gis 3d to mapping the crack panel of the church of Santa Maria degli Angeli in pizzofalcone in naples, 2022.

CAPITOLO QUARTO

**Le ville romane in Campania:
catalogazione e visualizzazione dei dati**

Lo studio condotto si pone tra gli obiettivi quello di realizzare un sistema informativo delle evidenze archeologiche riferite ad una specifica tipologia edilizia, nell'ambito della quale è stato individuato il caso studio oggetto di un successivo approfondimento, la villa romana. Gli obiettivi di divulgazione e disseminazione di tali contesti archeologici campani hanno fatto emergere interrogativi sulle modalità di fruizione del database da realizzare. Ad oggi esistono differenti metodologie e strumenti che consentono di strutturare progetti di comunicazione e rappresentazione. In questo caso specifico, gli obiettivi legati alla realizzazione di un applicativo che non necessita di particolari dispositivi di supporto, ma fruibile da diversi utenti, hanno spinto verso la costruzione di mappe tematiche mediante sistemi GIS 2D per esplicitare in forma visiva i concetti nascosti e archiviati nel database. Pertanto, questa prima parte della ricerca ha avuto l'obiettivo di costruire un quadro conoscitivo di tali strutture presenti sul territorio campano al fine di realizzare un database di stampo archeologico utile sia come archivio digitale che come base per la successiva sperimentazione in ambiente GIS 3D.

La catalogazione dei beni archeologici, se effettuata con regole precise tali da renderla maggiormente condivisibile, permette di aumentarne l'accessibilità e di conseguenza di raggiungerne una conoscenza più approfondita. Pertanto, in funzione del database e della struttura abitativa archeologica scelta è stata creata a priori una scheda informativa basata

sugli standard di catalogazione oggi maggiormente in uso, dove sono confluiti tutti i dati acquisiti durante le ricerche.

La ricognizione è stata effettuata seguendo i confini del territorio campano, ricco di storia e di siti archeologici di inestimabile valore. Tale scelta è stata dettata dalla possibilità di condurre analisi su strutture note integrandole e confrontandole con siti meno conosciuti e spesso fortemente degradati. Le notizie e le informazioni acquisite sono caratterizzate da una forte disomogeneità dovuta alle differenti modalità di scavo e di studio che si sono susseguite negli anni e che hanno condotto molto spesso ad una frammentarietà delle informazioni.

4.1. La villa romana

Le ville romane costituiscono la struttura architettonica che più di ogni altra rispecchia e racconta la vita abitativa romana. Il termine villa, a seguito di un'analisi della bibliografia edita, conduce spesso ad un duplice significato. Indica una dimora isolata ubicata nella campagna e allo stesso tempo una casa lussuosa fuori dalle mura cittadine contrapposta alla domus urbana¹. In entrambi i casi ci si riferisce ad ogni edificio a carattere residenziale in ambito extraurbano.

Come per ogni altra struttura archeologica ciò che risulta noto delle ville romane è dovuto principalmente alla lettura dei testi degli scrittori antichi e alle campagne di scavo che si sono succedute nel corso del tempo. Ovviamente, in base al periodo storico² in cui sono avvenuti i rinvenimenti, si assiste a diversi modi di relazionarsi con le *rovine*. In particolare, se oggi si considerano beni da tutelare e ogni rinvenimento costituisce un manufatto prezioso, in passato si puntava principalmente a recuperare qualsiasi elemento di pregio – decorazioni, mosaici, pietre preziose - tra le strutture ancora visibili, per trarne vantaggi economici, senza alcuna finalità filologica o di conoscenza dell'antico. Le ville, purtroppo, sono

1 Varrone De re rustica, II libro.

2 Si inizia dal Quattrocento in poi ad avere una certa predilezione per le rovine antiche, tenendone traccia attraverso i metodi della rappresentazione, fino poi ad arrivare tra il Settecento e l'Ottocento dove si sviluppa il cosiddetto fascino per le rovine che costituivano uno dei temi principali della pittura vedutistica.

state nei secoli luoghi da *spoliare*³ per poter abbellire e arricchire le abitazioni dei collezionisti e dei nobili. Molte ville risultano oggi distrutte a causa della continua speculazione edilizia o inglobate in strutture rurali. Inoltre, dal momento che in passato non esisteva un vero e proprio metodo di registrazione dei dati, spesso la documentazione risulta scarna. Oggi invece lo studio e la documentazione di un sito archeologico, effettuata con i metodi stratigrafici, è condotto con l'obiettivo di conservare e registrare con rigore scientifico tutto nel minimo dettaglio.

Le ville romane, di cui ci è giunta notizia, corredate da una buona documentazione d'archivio, hanno permesso di delineare un quadro d'insieme delle principali forme architettoniche di queste strutture. Esse si differenziano dalle abitazioni urbane, le *domus*, in quanto possiedono un'articolazione planimetrica libera, a differenza delle prime che sono vincolate all'impianto urbanistico delle città e quindi legate allo sviluppo delle *insulae*.

Nonostante la grande varietà architettonica di queste strutture, risulta ancora oggi complicato risalire a regole univoche che governano la loro costruzione, a differenza per esempio dei teatri o templi dove gli elementi si ripetono seguendo i principi di simmetria e proporzione. Non è possibile quindi individuare una conformazione tipologica utilizzata come riferimento. Al contrario tali strutture sono il risultato di una serie di commistioni di gusti di epoche differenti che le portano ad essere ognuna un unico nel palinsesto degli edifici abitativi. Costruite in ambienti totalmente aperti, immersi nel paesaggio, si caratterizzano per la pianta aperta e libera che, in alcuni casi, è pensata proprio per adattarsi al territorio su cui insiste. Non potendole inquadrare in tipologie specifiche vengono classificate principalmente in due categorie legate alla destinazione d'uso che ne caratterizza anche l'architettura e l'apparato decorativo: le ville rustiche e le ville d'*otium*. Le prime erano residenze di campagna caratterizzate da ambienti connessi alle attività agricole, mentre nelle seconde si godeva del riposo dalla vita sociale e pubblica (Mielsch H., 1990).

3 Con la scoperta di Pompei (1748) ed Ercolano (1738) gli ingegneri borbonici ispezionavano attraverso cunicoli le differenti aree vesuviane alla ricerca di opere d'arte da esportare, distruggendo ciò che non era considerato degno. Stessa sorte toccò alle ville di Diomede e Cicerone. Le ville sono poi state sempre rinterrate ma rilevate con massima precisione (Romizzi L., 2006).

Fig. 36 _ Villa rustica Di Caius Olius Ampliatus, pars rustica. Ripresa aerea (Google earth).
Foto S. Acquaviva

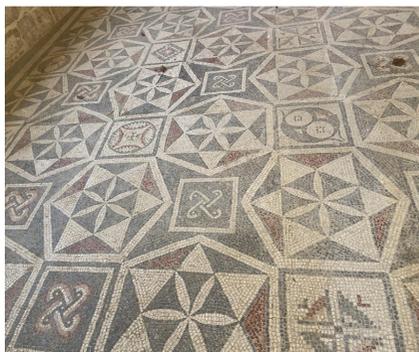


Le ville rustiche si diffondono intorno al IV sec. a.C.⁴ e devono la loro origine alle abitazioni di campagna denominate fattorie. Tali strutture erano disseminate nei territori spesso privi di centri cittadini, e che il *dominus*, o proprietario, amministrava personalmente e utilizzava come luogo di riposo dai compiti della vita pubblica. Erano quindi strutture destinate alla vita lavorativa e con uno sfruttamento agricolo dei terreni. La villa era composta principalmente da una fabbrica dedita alla produzione di beni agricoli, principale fonte di sostentamento economico che avveniva attraverso la coltivazione del *fundus* (terreno). Molta importanza veniva data alla cosiddetta *pars rustica* – che occupava la maggior parte della struttura – e che accoglieva gli ambienti dediti alla produzione e alla lavorazione agricola. In essa rientravano anche la cucina, gli ambienti per il fattore, per gli schiavi e i depositi. Gli alloggi del *dominus* erano di dimensioni modeste, dal momento che vi soggiornava per brevi periodi. Infatti, la vita di campagna veniva tollerata solo se si traduceva in fonte di produzione e guadagno. In alcuni casi la villa era dotata anche della cosiddetta *pars fructuaria* comprendente gli ambienti destinati alla conservazione dei prodotti (Ortalli J., 2006).

Dal II secolo a. C., grazie ai cambiamenti economici e politici legati all'egemonia di Roma sul Mediterraneo, ci fu un'evoluzione della villa romana. Non era più importante possedere ville agricole ma si cominciarono a costruire, su tutto il territorio italiano, le prime residenze extraurbane dedite all'*otium* e allo svago. Possedere una tale villa sul litorale campano

4 Tra il V e il IV sec. a.C. si svilupparono sempre di più le ville rustiche conseguenza dell'estendersi della proprietà privata del suolo. (Rosati). È possibile trovarne traccia nei testi antichi di autori romani quali il *De agri cultura* di Catone (234-149 a.C.), il *De re rustica* di Varrone (167-27 a.C.) e il *de re rustica* di Columella (I sec. d.c.). La stesura di questi testi in periodi diversi e consequenziali dimostra come le ville rustiche e tutte le attività ad esse connesse costituiscono un punto fermo nell'economia romana.

o flegreo era una delle massime aspirazioni della classe dirigente romana. L'influenza ellenistica, quindi, capovolge l'idea di villa che dall'utilizzo agricolo passa ad essere luogo per la vita meditativa, per il ritiro spirituale e per l'*otium* letterario. Nel corso del tempo queste residenze aumentano di dimensione e si arricchiscono di apparati decorativi e mosaici - opere di pregevole valore, influenzate anch'esse dall'arte ellenistica - divenendo il simbolo della ricchezza e grandezza del proprietario e della rispettiva classe politica.



Spesso un proprietario ne possedeva più di una con caratteri diversi, ville di campagna e di piacere collocate in diverse zone. Le ville d'*otium*, quindi, rappresentavano per i romani il luogo del godimento della vita spirituale. Si assiste quindi alla predilezione per la *pars urbana* che acquista sempre maggior valore e dimensione a discapito della *pars rustica*, che resta relegata alle attività lavorative. Le pavimentazioni divennero vere e proprie opere

Fig. 37 _ Mosaici delle sale per gli ospiti, IV sec. d. C., mosaico, Villa del Casale di Piazza Armerina, < <https://www.villaromanadelcasale.it/portfolio/appartamenti-privati-per-gli-ospiti> >

d'arte, mosaici dall'elevata raffinatezza adornano le sale di rappresentanza, relegando il semplice terreno battuto agli ambienti di servizio (Romizzi L., 2001).

Ma fu con il I sec. a.C. che cominciò la smaniosa costruzione di ville lussuose e monumentali adornate di atrii, ninfei, terme, templi, parchi, vere e proprie dimore sfarzose e ostentatrici della grandezza di Roma. Da questa tipologia traeva origine anche la villa marittima costruita lungo le coste e degradante verso il mare, dotata di ampie peschiere (*vivaria*) per l'allevamento della fauna ittica, utilizzate più per ostentare il lusso che per l'attività produttiva.

Ciò che cambia è anche l'assetto architettonico, non più ville dalle forme chiuse e incentrate sul nucleo privato da cui si diramavano tutti gli ambienti ma strutture aperte verso l'esterno e verso la natura circostante adattandosi al terreno e ai declivi. Da forme chiuse e compatte si giunse ad armonizzare alla struttura originaria elementi che potevano essere aggiunti in fasi successive quali stanze, portici, criptoportici, *balnea* (Mielsh, 1999).

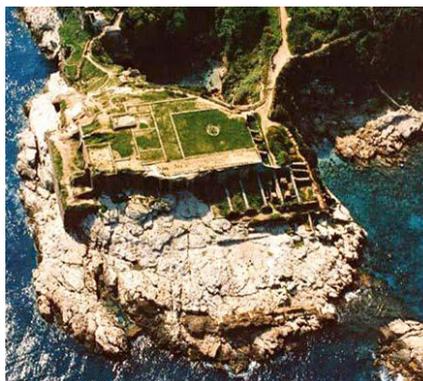


Fig. 38 _ Villa d'otium di Oplontis (Villa di Poppea). Foto S. Acquaviva. Ripresa aerea (Google earth).

Fig. 39 _ Villa marittima di Pollio Felice (Sorrento, Napoli). Vista aerea e strutture murarie degli ambienti della villa. Fonte: <https://www.romanoimpero.com/2018/02/villa-pollio-felice-sorrento-campania.html>

Che si trattasse di villa d'*otium* o rustica queste erano immerse nella natura e costruite nei pressi delle strade di comunicazione principale che permettevano di raggiungere Roma in poco tempo. Per lo più erano costruite su terreni collinari, con esposizione ottimale e nei pressi di sorgenti, fiumi e terreni coltivabili. Di fondamentale importanza era il rapporto con il paesaggio. Ciò avveniva anche con la costruzione di giardini e peristili, attraverso i quali gli architetti romani trasportavano il paesaggio all'interno dell'abitazione, spesso creando anche scorci prospettici grazie al sapiente studio dell'articolazione degli spazi. Invece le ville marittime venivano costruite lungo la costa adagiandosi perfettamente su di essa, con l'uso di terrazzamenti e ambienti voltati. La costruzione terminava con piccole strutture portuali che creavano il collegamento con il mare. Le ville venivano inoltre costruite seguendo l'orientamento della centuriazione⁵, aprendosi con vedute e terrazzamenti verso il mare, come la Villa dei Misteri (a Pompei), realizzata fuori dalle mura della città e aperta verso il golfo e la penisola sorrentina. Le ville si articolavano sempre attorno ad un fulcro centrale, che inizialmente era costituito da una corte o un cortile, per poi trasformarsi in un vero e proprio atrio⁶ che costituiva l'elemento di accoglienza posto subito dopo l'ingresso principale della casa e su cui prospettavano gli ambienti residenziali. Questo poi perde la sua funzione per essere sostituito dal peristilio⁷ oppure usato in unione ad esso. Questi elementi si ripetevano, cambiavano di posizione ma erano sempre presenti nell'articolazione planimetrica di tali strutture.

In base a questi elementi considerati ricorrenti, alle dimensioni delle strutture e alle decorazioni presenti è possibile effettuare una piccola classificazione. Per quanto concerne le ville rustiche si possono dividere in tre categorie tutte con pianta quadrangolare (Cascella, 2014). Le prime si aggiravano attorno ai 500-1000 mq e erano caratterizzate da una struttura assiale, con pochi ambienti destinati alla vita agricola, mentre manca del

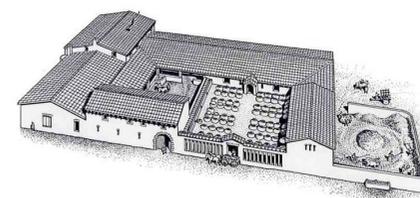
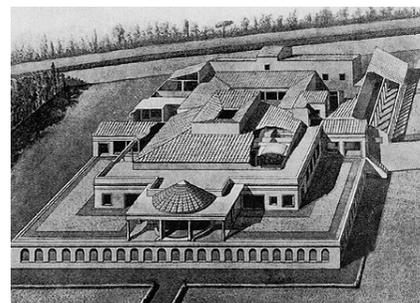


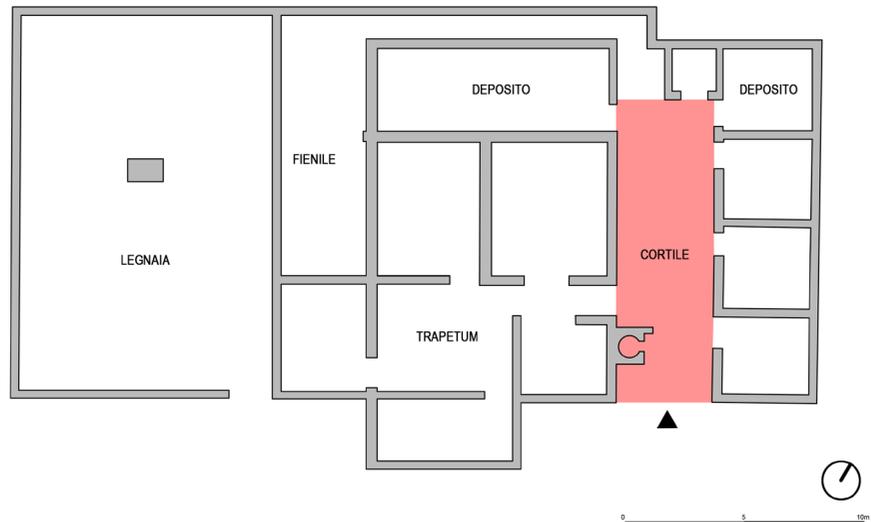
Fig. 40 _ Ricostruzione Villa della Pisanello a Boscoreale (villa rustica). Ricostruzione Villa dei Misteri (villa d'*otium*). Fonte: Russo D., Sulla classificazione delle Ville Romane del Rostovzev, Sylva Mala II, Bollettino del Centro Studi Archeologici di Boscoreale, Boscotrecase e Trecase, 1981, p.7; Mielsch H., La villa romana, 1990, pag.37.

5 Sistema con cui i romani organizzavano il territorio agricolo, basato sullo schema che già adottavano nei *Castra* e nella fondazione di nuove città. Si caratterizzava per la regolare disposizione, secondo un reticolo ortogonale, di strade, canali e appezzamenti agricoli destinati all'assegnazione a nuovi coloni (Libertini G., 1999).

6 Cortile interno della villa, era uno spazio aperto circondato su tre o tutti i lati da portici e dotato di copertura a impluvio e compluvio intorno al cavedio.

7 Il peristilio, nell'architettura romana, era il portico che cingeva il giardino o cortile interno posto al centro della casa, ornato solitamente da alberi da frutto, giochi d'acqua e piccole piscine (Dizionario di architettura, N. Pevsner, J. Fleming, H. Honour, 2005).

Fig. 41 _ Villa romana del Fondo Brancaccio in Contrada Civita Giuliana a Pompei. Rielaborazione grafica a cura dell'autrice



tutto la *pars urbana*. Un esempio è la villa romana del Fondo Brancaccio in Contrada Civita Giuliana a Pompei. Questa si articolava su pianta rettangolare con un andamento est-ovest e aveva l'ingresso posto a sud su cui si affacciava il cortile centrale. Gli ambienti caratterizzati da una pavimentazione in terra battuta avevano dimensioni modeste ed erano coperti da tetti a spiovente.

La seconda tipologia si attestava attorno ai 1000-1500 mq con una pianta ad andamento sempre longitudinale ma sviluppata attorno ad un portico con due bracci articolati ad 'L'. Il peristilio risultava chiuso su due lati da colonne mentre sugli altri due da alte mura di recinzione, al centro era ospitata la cella vinaria caratterizzata da un numero cospicuo di *dolia*. Uno degli esempi rappresentativi di questa tipologia è la villa di L. *Caecilius Lucundus* (I sec. a.C.), detta anche villa della Pisanella a Boscoreale, oggi rinterrata. La villa era costituita da un quartiere relativo alla *pars urbana* – a differenza della precedente - e da un quartiere servile e rustico destinato invece alla produzione agricola e all'alloggio della manodopera.

La terza tipologia si attestava attorno ai 2000 mq con una notevole *pars urbana* riccamente decorata; tale caratteristica spesso portava a non distinguerla da una villa d'*otium*. Il peristilio aveva una pianta ad U su cui prospettavano tutti gli ambienti. La villa di *Caius Olius Ampliatus* nel

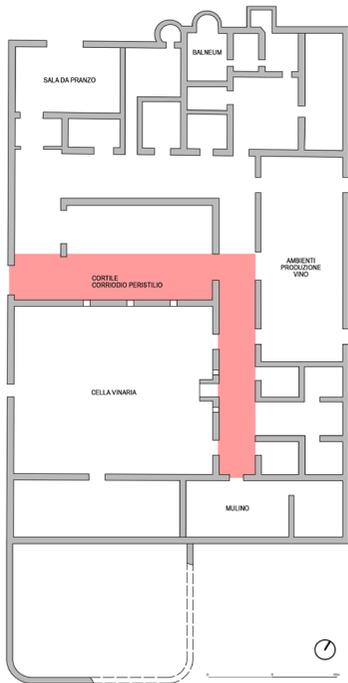
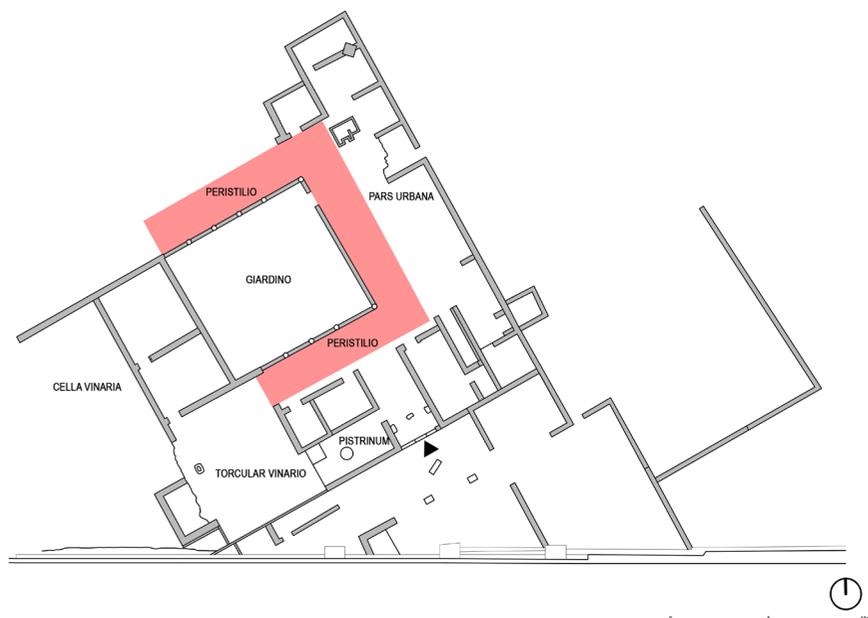


Fig. 42 _ Villa della Pisanella (Boscoreale). Rielaborazione grafica a cura dell'autrice

Fig. 43 _ Villa di Ponticelli (Napoli). Rielaborazione grafica a cura dell'autrice

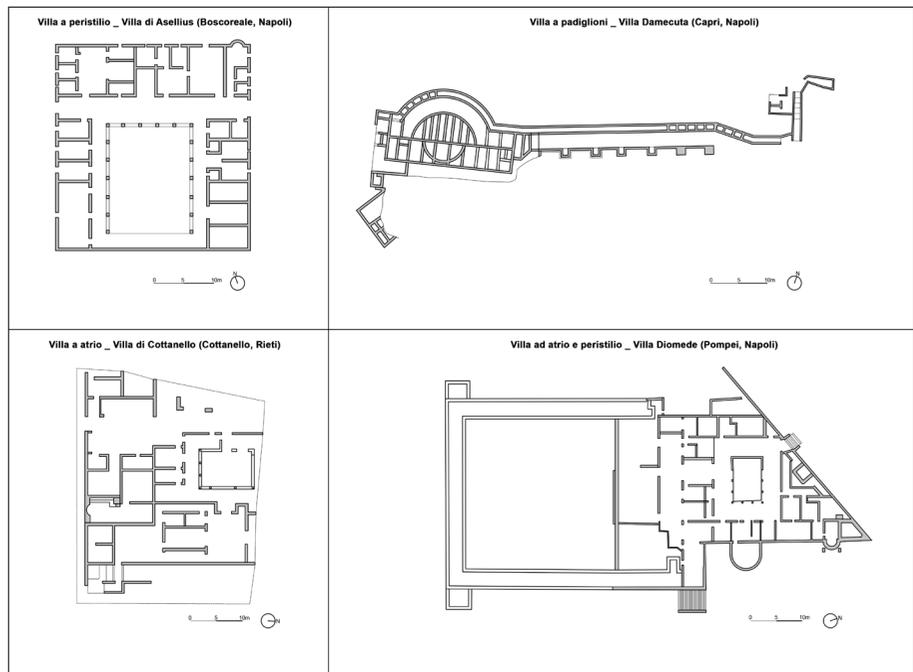


quartiere Ponticelli (Napoli) rispecchia tali canoni. Si sviluppava attorno ad un piccolo peristilio centrale su cui si affacciavano i vari ambienti, divisi in *pars urbana* e *pars rustica*. La prima destinata ad accogliere il proprietario durante le ispezioni del *fundus*, mentre la seconda, gestita dal *vilicus*, dedicata alla lavorazione dell'olio e del vino, circostanza confermata anche dalla presenza di un numero cospicuo di *dolia* e da un ambiente destinato al *torcular vinario*.

Per le ville d'*otium* risulta più difficoltoso operare una classificazione, come per le ville rustiche descritte in precedenza. Seppur sia possibile ritrovare degli elementi comuni e ricorrenti come *peristilio*, *tablinum*, *triclinum* – relativi agli ambienti di rappresentanza della villa - questi erano inseriti all'interno dell'articolazione planimetrica delle ville con modalità sempre differenti, dettate molto spesso dal gusto dell'epoca e/o del committente. Inoltre, una stessa villa nel corso del tempo poteva avere differenti proprietari e pertanto erano nella maggior parte dei casi sottoposte a numerose modifiche e ristrutturazioni che ne alteravano la composizione spaziale iniziale.

In particolare, differenti studi condotti in tale ambito (Romizzi L. 2001; Mielh H. 1990; Mansuelli G.A., 1958; Swoboda K.M., 1924) hanno

Fig. 44 _ Ville d'otium: Villa di Asellius (Boscoreale, Napoli), Villa Damecuta (Capri, Napoli), Villa di Cottanello (Rieti), Villa Diomede (Pompei, Napoli). Rielaborazione grafica a cura dell'autrice



condotto all'evidenziazione di alcune tipologie caratterizzate dalla forte presenza di alcuni elementi architettonici che ne influenzano l'articolazione planimetrica e su cui poi si articolano liberamente tutti i restanti ambienti: la villa a peristilio, a padiglioni, ad atrio, ad atrio e peristilio.

La *villa a peristilio*, di influenza ellenistica, era caratterizzata dagli ambienti di rappresentanza prospettanti su di un peristilio centrale, ossia un cortile circondato da colonne che costituiva il fulcro dell'abitazione. In alcuni casi questo era aperto solo su tre lati mentre il restante è chiuso con semicolonne addossate alla parete. In questa tipologia il peristilio si trova in asse con il triclinum⁸, l'ambiente più importante di ogni villa, e con l'ingresso principale. Tutta la composizione risultava racchiusa in una pianta quadrangolare. È possibile riscontrare questa tipologia anche nella pars urbana di alcune ville rustiche (es. Villa di Ponticelli).

La *villa a padiglione*, o a nuclei, era una tipologia molto utilizzata per le abitazioni

⁸ La sala da pranzo dei romani che prende il nome dal complesso dei letti che venivano disposti lungo le tre pareti opposte all'ingresso.

poste sulle isole e assumevano una dimensione elevata. Erano costituite da differenti nuclei edilizi dislocati su terrazze ognuno caratterizzato da una differente soluzione planimetrica andando a richiamare tipi edilizi già noti (a peristilio, ad atrio...). Di norma erano composte da un edificio più importante che accoglieva gli ambienti di rappresentanza circondato da una serie di nuclei minori con funzioni di residenze private o ninfei e belvedere. La *villa ad atrio* derivavano dalla disposizione planimetrica della domus romana ed aveva il suo fulcro proprio attorno a questo ambiente su cui prospettavano gli altri. Di solito in successione, posti in asse, era possibile ritrovare un secondo atrio (uno tetrastilo e uno tuscanico) o un *bortus*.

Erano poi presenti le *ville a peristilio e atrio* racchiusi in un impianto planimetrico di tipo rettangolare e posti in asse e in successione l'uno all'altro secondo la sequenza vestibolo-fauces-atrio-tablinum-peristilio-esedra-loggia. In alcuni casi questa tipologia nasceva da una ristrutturazione di una precedente struttura dotata di atrio. L'articolazione degli ambienti aveva un andamento longitudinale prospettando sui due elementi principali, in particolare gli spazi di rappresentanza sull'atrio mentre quelli privati sul peristilio.

4.2. Il *database* delle ville romane nel territorio campano

Lo studio procede analizzando e catalogando le ville romane rinvenute nel territorio campano, luogo dall'antica storia, e caratterizzato da una conformazione e da risorse naturali che hanno favorito la nascita, nei secoli, di numerosi insediamenti. Pertanto, a partire da una schedatura delle ville romane, condotta attraverso una lettura critica delle peculiarità di tali palinsesti, sono state realizzate mappature simboliche di tali manufatti attraverso l'utilizzo di una simbologia codificata al fine di leggerne anche il legame con il contesto. Tali mappe informative si prefigurano come strumenti interattivi in grado di riunire i dati estrapolati dalle operazioni di conoscenza e lettura dei paesaggi archeologici, restituendoli mediante una modalità diversa di rappresentazione tematica e virtuale.

4.2.1. Dal database alla produzione delle informazioni tramite piattaforma GIS. Mappatura delle ville romane

La prima fase della costruzione del database delle ville romane in territorio campano ha visto la predisposizione preliminare dell'idea di ciò che si voleva realizzare e raccontare mediante questo strumento, definendo quindi gli obiettivi che doveva soddisfare, il criterio di archiviazione e documentazione. La catalogazione di tale patrimonio costituisce un passaggio nodale per la sua conoscenza e gestione. Pertanto, a seguito di un primo approfondimento legato alla tipologia architettonica della villa, nella sua genesi costruttiva e storica, sono stati eseguiti differenti sopralluoghi che hanno permesso di constatare, per alcune strutture, lo stato dei luoghi.

La fase di censimento ha visto la predisposizione di una scheda informativa contenente tutti quegli elementi storici, architettonici e tipologici necessari all'individuazione delle caratteristiche indispensabili per una dettagliata descrizione del caso. La schedatura ha lo scopo di individuare e organizzare in modo organico le notizie relative a ciascun sito archeologico, per poi riversarle più facilmente nel database.

In particolare, i criteri per la definizione della scheda sono stati scelti in modo tale da avere una compilazione lineare e semplice, e che racchiudesse le informazioni più importanti utili alla strutturazione di un database conoscitivo. Pertanto, in prima battuta si sono approfondite le regole e gli standard per i beni archeologici disposti dall'Istituto Centrale per il Catalogo e la Documentazione⁹, che governa e predispone la schedatura delle opere più importanti dei territori, dalla quale sono state attinte le voci principali che popolano la scheda. La fase di annotazione dei dati ha visto la realizzazione di una ricerca presso gli istituti della soprintendenza e le biblioteche universitarie, includendo anche le risorse online¹⁰ a disposizione. Come primo dato è stato associato un codice univoco di archiviazione,

⁹ In accordo con le amministrazioni regionali, ha il compito di elaborare metodologie e procedure standard per la catalogazione del patrimonio archeologico, architettonico, storico artistico, etnoantropologico, scientifico e tecnologico.

¹⁰ In particolare, la fase di catalogazione è avvenuta ad inizio 2020 nel periodo di lockdown causato dalla grave situazione pandemica e pertanto le prime fonti disponibili per lo studio sono state quelle disponibili online. Di fondamentale importanza è stato il sito del Centro Regionale Beni Culturali di Napoli (CRBC).

Le ville romane in Campania: catalogazione e visualizzazione dei dati

INFORMAZIONI GENERALI

ID	<input type="text" value="Nuovo"/>	EPOCA	<input type="text"/>
DENOMINAZIONE	<input type="text"/>	ANNO DI SCAVO	<input type="text"/>
TIPO SCHEDA (eccd)	<input type="text"/>	DESTINAZIONE ATTUALE	<input type="text"/>
ENTE COMPETENTE	<input type="text"/>	STATO DI CONSERVAZIONE	<input type="text"/>
CODICE REGIONALE	<input type="text"/>	ACCESSIBILITA	<input type="text"/>
TIPOLOGIA	<input type="text"/>	TECNICA COSTRUTTIVA	<input type="text"/>
CATEGORIA DI APPARTENENZA	<input type="text"/>	STRUTTURE IPOGEE	<input type="text"/>
FUNZIONE	<input type="text"/>	ELEMENTI DI PREGIO	<input type="text"/>
PROVINCIA	<input type="text"/>	RINVENIMENTI	<input type="text"/>
COMUNE	<input type="text"/>	BIBLIOGRAFIA	<input type="text"/>
LOCALITA	<input type="text"/>	SITOGRAFIA	<input type="text"/>
INDIRIZZO	<input type="text"/>	DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA	<input type="text"/>
LATITUDINE	<input type="text"/>	DOCUMENTAZIONE GRAFICA	<input type="text"/>
LONGITUDINE	<input type="text"/>	NOTE	<input type="text"/>

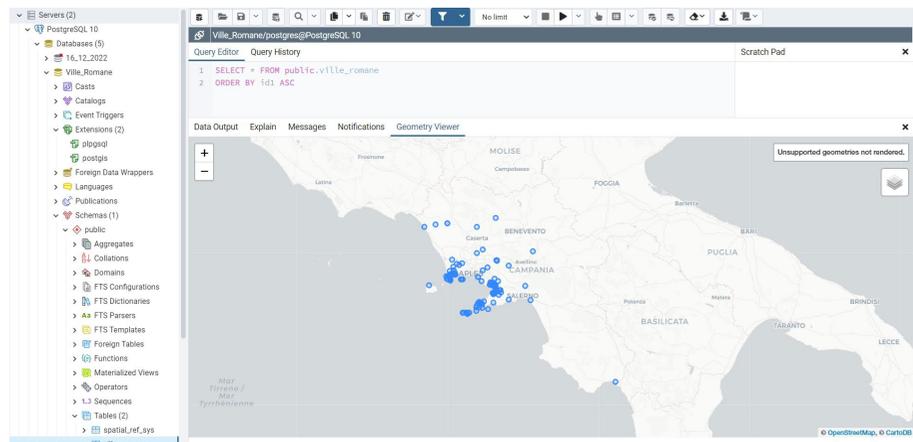
Fig. 44 _ Scheda informativa. Elaborazione S. Acquaviva

Fig. 45 _ Tabella delle ville romane generata nel database postgresQL. Elaborazione S. Acquaviva

id	geom	denominazi	codice mg	tipologia	qualifica
4	0101000020E1000000CE7003E3FFC2C40D0DEE0089394440	Villa di Arianna	15	Villa	D'otium
5	0101000020E1000000CC7A319413F02C40B610E4A08494440	Villa del Pastore	15	Villa	D'otium
6	0101000020E1000000F2F5283CFF2C40CBA14586F3594440	Villa san Marco	15	Villa	D'otium
7	0101000020E10000009672A3285F42C404F39E374604440	Villa dei Misteri	15	Villa	D'otium
8	0101000020E100000029303385F02C40509505FF22C504440	Villa di Giulia Felice	15	Villa	D'otium
9	0101000020E100000029F6F7803C2C40479818D31364440	Villa di Cicerone	15	Villa	D'otium
10	0101000020E10000009224E39AC6E2C40B7A2409F39474440	Villa di Poppaea	15	Villa	D'otium
11	0101000020E1000000A08189E5E642C40B7A2409F39474440	Villa di Gradiva	15	Villa	Marittima
12	0101000020E10000009F5A10E8A58642C40B8A4E232D95474440	Villa Dancusa	15	Villa	Marittima
13	0101000020E1000000255810CEFC2A2C405204F116364440	Villa (rest)	15	Villa	Marittima
14	0101000020E10000008ED42799162C4079E9263108684440	Villa di Servilio Vatia	15	Villa	Marittima
15	0101000020E1000000641EF98381772C40D18750A566474440	Villa di Augusto	15	Villa	Marittima
16	0101000020E1000000E08A7055F2C40A8E331039564440	Villa Paestlypon	15	Villa	Marittima
17	0101000020E1000000319413ED2A842C40A6A779CA2232514440	Villa di Pollio Felice	15	Villa	Marittima
18	0101000020E10000008F795AF0A28F2C40E4839ECDA634440	Villa Sora	15	Villa	Marittima
19	0101000020E100000074D2F80A071E2C40929183BDA764440	Villa (rest)	15	Villa	ND
20	0101000020E1000000E16653F82C40E42739046624440	Villa di P. Fannius Synstor	15	Villa	Rustica
21	0101000020E1000000E1EACD078F12C405AFA0A2AF20614440	Villa Regina	15	Villa	Rustica

grazie al quale i materiali raccolti corrispondono univocamente ad un unico elemento del database e che funge da base per la successiva sperimentazione in ambiente GIS 3D. Successivamente è possibile ritrovare la denominazione della villa – che nella maggior parte dei casi coincide con il nome del luogo di ritrovamento - seguita dall'epoca di costruzione e dall'ubicazione. Si trovano, poi, i campi relativi alla tipologia (villa rustica, d'otium e marittima) ed alla sua utilizzazione. Seguono l'individuazione territoriale, e la documentazione fotografica che esplicita le condizioni attuali del sito. La scheda è fondamentalmente di tipo qualitativo, con

Fig. 47 _ Visualizzazione grafica della tabella delle ville romane generata nel database postgresQL. Elaborazione S. Acquaviva



pochi elementi quantitativi. Inoltre, si è cercato di renderla facilmente gestibile e modificabile, utilizzando campi con descrizioni sintetiche per fornire un'adeguata conoscenza dell'opera e che possa essere facilmente aggiornata nel tempo.

Raggiunto un grado di sviluppo abbastanza avanzato, un primo collaudo del sistema è stato effettuato con l'immissione dei dati raccolti nel database, con lo scopo di individuare e correggere eventuali difetti.

Nella scelta è stato importante valutare quale tra quelli disponibili fornisce una base ottimale per archiviare tutti i dati, fosse di semplice e immediato utilizzo, multiutente, gestisse i dati in modo univoco e permettesse la rappresentazione geografica degli stessi. La scelta è ricaduta sul *database* postgresQL, *open source*, basato sul modello *object-relational* e su linguaggio SQL per eseguire query sui dati, con integrazione dell'estensione PostGIS per la gestione dei dati geospaziali. Nel dettaglio l'inserimento dei dati ha seguito la struttura della tabella, collegando a questi anche i campi relativi alla posizione spaziale, in quanto l'estensione PostGIS consente di rappresentarli mediante un elemento grafico vettoriale; si è scelto in questo caso l'elemento vettoriale puntuale, che in uno studio a larga scala e dedito a strutture non sempre visibili risulta più efficace visivamente.

Tutti i dati, alfanumerici e geospaziali, sono stati raccolti nella tabella strutturata all'interno del database postgresQL, raggruppando il dato vettoriale in un'unica colonna di tipo *Geometrycollection*.

La seconda fase invece ha visto l'integrazione di questi dati in ambiente GIS per rendere il sistema maggiormente condivisibile e tradurre i dati e le relative informazioni rappresentandoli su una mappa. L'utilizzo di un

database come PostgreSQL, che può essere connesso a differenti sistemi GIS, ha reso la fase di importazione molto più fluida e immediata. Il poter utilizzare qualsiasi tipo di software consente di comprendere come la struttura realizzata abbia la possibilità di essere condivisa con più utenti differenti.

Si è scelto di gestire il processo attraverso il software ArcGIS Pro di ESRI in grado di archiviare, gestire e rappresentare dati spaziali. Per il caso studio sono stati impiegati strumenti grafici denominati vettori che permettono di rappresentare bidimensionalmente i diversi elementi prescelti, in questo caso le ville, all'interno del workspace. Ogni vettore, quindi, importato dal database PostgreSQL, delinea la posizione di ciò che si vuole evidenziare sulla cartografia. L'elemento vettoriale scelto, anche in questo sistema, per rappresentare graficamente le emergenze, è il punto, che maggiormente si presta ad evidenziare la posizione di ogni singolo edificio sulla mappa.

Il procedimento potrebbe apparire non diverso dal classico disegno bidimensionale in ambiente CAD ma, in realtà a differenza di quest'ultimo, gli applicativi GIS permettono di assegnare delle informazioni grazie alla possibilità di interazione di elementi alfanumerici e grafici. In questo modo è stato possibile importare la relativa tabella attributi, esportata dal database, con tutte le informazioni generali e di archivio ricavate dalle indagini storico-archivistiche.

Gli attributi inseriti non perdono la loro struttura costruita nel database ma confluiscono direttamente nel sistema sottoforma tabellare dove ad ogni riga corrisponde un edificio che ha un proprio numero identificativo, nelle colonne invece sono gestite le loro singole caratteristiche. La scheda informativa, realizzata nel corso della ricerca, può essere per la stessa natura dell'applicativo GIS ulteriormente modificata ed implementata in momenti successivi e da operatori ed utenti vari, in modo tale da raggiungere livelli di lettura differenti. L'archivio così formato è stato poi corredato da allegati fotografici e documentari. Inoltre, grazie alla politica degli open data che si fonda sulla possibilità di consultare determinate informazioni e di poterne usufruire liberamente ha fatto sì che fossero importati all'interno del sistema informazioni altre quali le mappe IGM (1:25000), informazioni sulla viabilità romana, la centuriazione romana, etc.

Il sistema così creato, sempre implementabile, costituisce il fondamento delle mappe, fornendo un apporto conoscitivo non solo delle caratteristiche dei singoli manufatti, ma anche delle peculiarità storiche e geografiche. La fase di creazione dell'archivio digitale delle ville romane con la possibilità di georeferenziarle ha consentito non solo di comprendere come queste si integrino con il territorio circostante, ma anche di selezionare quelle

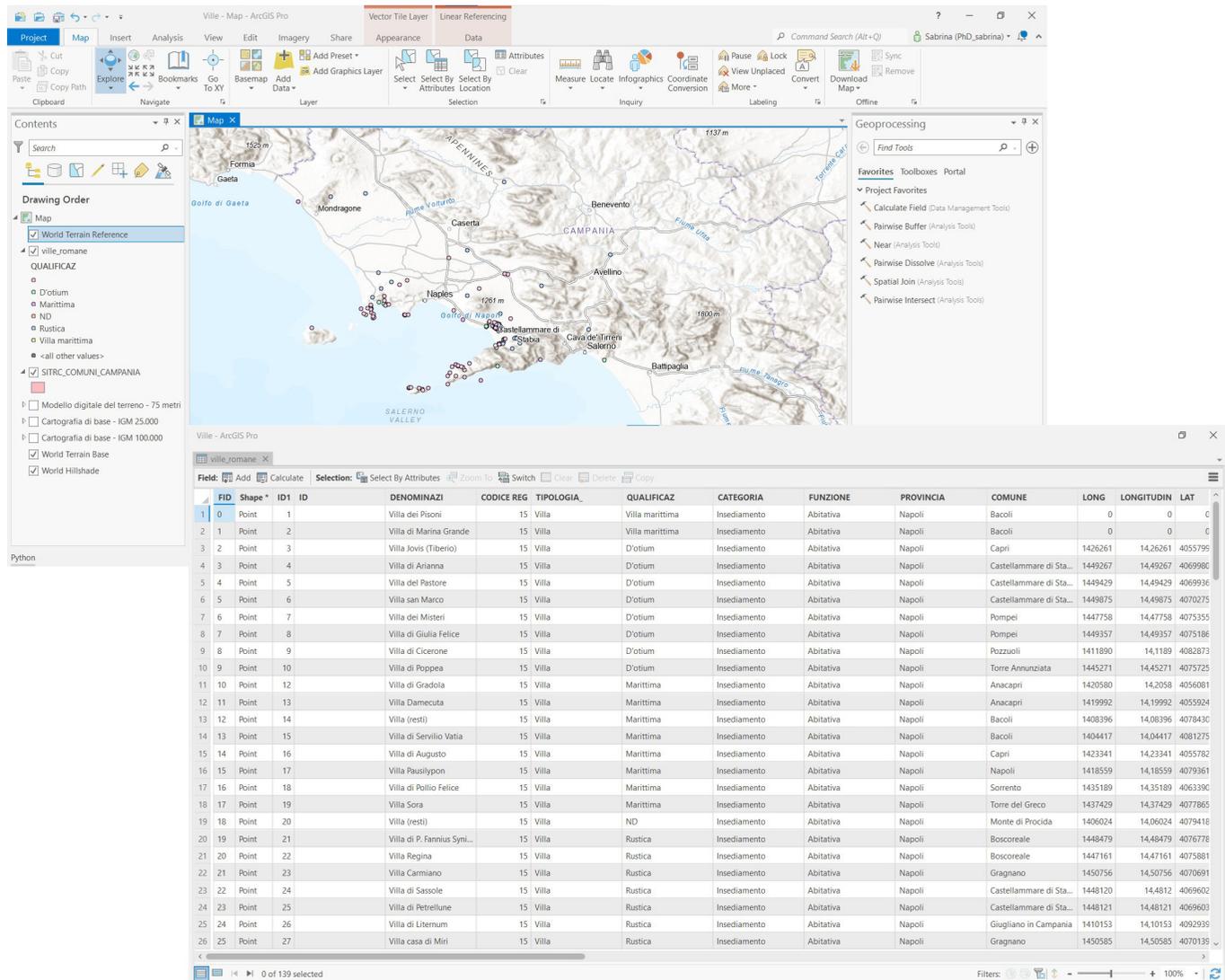
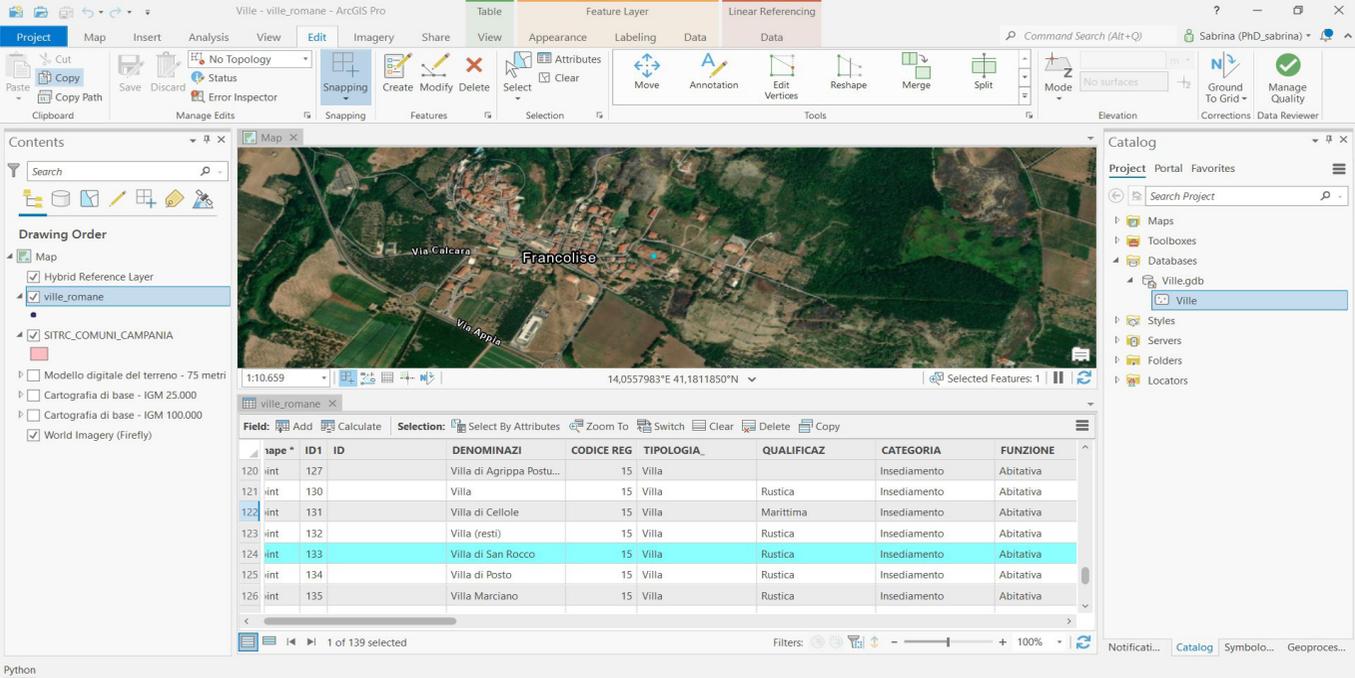


Fig. 48 _ Tabella attributi del database Ville_Romane. Elaborazione S. Acquaviva



The screenshot displays the ArcGIS Pro interface. The main map shows an aerial view of Francolise, Italy, with several villas marked. The 'Catalog' pane on the right shows the project structure, including the 'ville_romane' dataset. The 'Table' view is open, showing the following data:

shape	ID1	ID	DENOMINAZI	CODICE REG	TIPOLOGIA_	QUALIFICAZ	CATEGORIA	FUNZIONE
120	int	127	Villa di Agrippa Postu...	15	Villa		Insedimento	Abitativa
121	int	130	Villa	15	Villa	Rustica	Insedimento	Abitativa
122	int	131	Villa di Cellole	15	Villa	Marittima	Insedimento	Abitativa
123	int	132	Villa (resti)	15	Villa	Rustica	Insedimento	Abitativa
124	int	133	Villa di San Rocco	15	Villa	Rustica	Insedimento	Abitativa
125	int	134	Villa di Posto	15	Villa	Rustica	Insedimento	Abitativa
126	int	135	Villa Marciano	15	Villa	Rustica	Insedimento	Abitativa

Fig. 49 _ Visualizzazione della Villa di San Rocco (Francolise). Tabella attributi. Elaborazione S. Acquaviva

maggiormente interessanti, portando alla scelta del caso studio per la creazione del GIS 3D, scelta ricaduta sulla villa romana di San Rocco in Francolise (CE).

CAPITOLO QUINTO

**La villa romana di San Rocco in Francolise:
una struttura abitativa romana nel territorio casertano**

A seguito dell'analisi e dell'interrogazione del database delle Ville Romane presenti sul territorio Campano, in cui sono confluiti i dati della ricognizione bibliografica e d'archivio, sono state estrapolate un numero di strutture che presentano caratteristiche ideali (accessibilità, dimensione, elementi decorativi...) per la prosecuzione della ricerca ed effettuare le successive fasi di rilievo digitale (cfr. Cap. 4). I numerosi sopralluoghi svolti hanno portato a identificare il caso studio nella Villa Romana di San Rocco nel comune di Francolise. La villa è stata scelta per le buone condizioni del contesto, per l'accessibilità, ma anche per la buona leggibilità degli elementi murari, la presenza di numerosi elementi decorativi pavimentali e per le differenti trasformazioni avvenute in diverse epoche storiche.



Fig. 50 _ Localizzazione della Villa San Rocco all'interno dei confini cittadini

Fig. 51 _ Villa San Rocco (Francolise).
Foto S. Acquaviva



Queste caratteristiche sono state ritenute efficaci per lo sviluppo della successiva sperimentazione di un GIS intra-site della villa.

5.1. Il contesto storico e geografico: il territorio di Francolise



Fig. 52 _ Localizzazione del comune di Francolise all'interno dei confini provinciali. Elaborazione grafica S. Acquaviva

Il sito archeologico di San Rocco si trova all'interno del Comune di Francolise, su un rilievo calcareo del versante occidentale del Monte Maggiore, nel territorio dell'alto casertano, nei pressi delle città di Calvi Risorta, Teano e Capua. Il sito è parte dell'antica città di Cales, territorio degli Ausoni, che tra il III e il II sec. a. C. fu conquistata dai romani, divenendone una colonia. È possibile, infatti, riscontrare sul territorio la presenza di molte strutture di origine romana, come l'anfiteatro, le terme e le mura. Quest'area della Campania settentrionale è stata, sin dall'epoca romana, identificata come terra di lavoro e di produzione, in quanto caratterizzata da un territorio fertile e dalle elevate qualità delle risorse naturali, dovute alla presenza del fiume Volturno e ad un clima mite favorevole alla produzione di diversi prodotti agricoli. Già in epoca romana si documentano infatti grandi aree coltivate e frutteti, come riportato da Plinio nel *Naturalis Historiae*, che identifica la zona come la *Campania Felix*

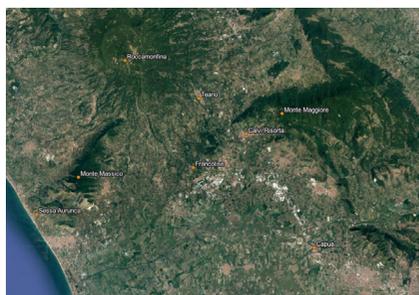


Fig. 53 _ Il paesaggio e i rilievi montuosi dell'area nord di Caserta. Elaborazione grafica S. Acquaviva

La conformazione del luogo è strettamente legata alla sua storia millenaria ed è caratterizzata dalla forte presenza del vulcano di Roccamonfina, che ne ha disegnato la morfologia - consentendo parallelamente di poter estrarre pietra calcarea e tufo, ottimi materiali da costruzione - e dalle vicissitudini che si sono susseguite nel corso dei secoli.

In particolare, dal punto di vista logistico l'area dell'alto casertano, nella quale ricade quella di Francolise, possedeva in epoca romana una posizione difensiva strategica in quanto protetta a nord dal monte Massico

La villa romana di San Rocco in Francolise: una struttura abitativa romana nel territorio casertano



Fig. 54 _ M. De Laurentiis, Universae Campaniae Felicis Antiquitates, 1826.

Fig. 55 _ Terra di Lavoro Olim Campania felix. Magini G., 1642



e dal promontorio di Roccamonfina, a est dalla catena montuosa del monte Maggiore e a sud dall'impraticabilità del fiume Volturno e ad ovest dal mare. I romani, al momento della conquista e dell'espansione, oltre ad impossessarsi delle città già esistenti come Cales, Capua, Teanum, fondarono anche numerose colonie, come Sinuessa e Suessa Aurunca – presenti ancora oggi -, con la finalità di creare dei distaccamenti della città di Roma in territorio Campano. Inoltre, con la costruzione della Via Appia nel 332 a.C. che collegava Roma al sud dell'Italia queste divennero anche centri mercantili di notevole importanza. Il periodo romano fu quello di massimo splendore per l'area - denominata *Ager Falernus* - periodo in cui vennero edificate numerose ville rustiche circondate da ulivi e viti, famosi ancora oggi (Cirillo, 2013)

È su questo territorio fortemente legato all'influenza romana che sorge la villa di San Rocco, che prende il suo nome dall'omonima cappella situata nei pressi della struttura. La villa è stata riscoperta soltanto negli anni 60 del novecento per cause edilizie, come la maggior parte delle scoperte archeologiche avvenute in quegli anni.

5.2 Il contesto culturale: lo scavo archeologico e i progetti di valorizzazione

Il sito archeologico di San Rocco è stato portato alla luce negli anni '60 del Novecento a seguito di operazioni di scavo condotte grazie alla sinergia tra il comune di Francolise, enti locali, la Soprintendenza alle antichità della Campania e importanti enti di ricerca internazionali, tra cui si annoverano la British School di Roma e la Fine Arts University di New York.

I primi resti della villa furono scoperti già nel 1938 a seguito di lavori di spianamento dell'area per la realizzazione delle fondazioni di un sanatorio. In quell'occasione piccole porzioni di lacerti murari affiorarono da una coltre di terreno ricoperto di vegetazione e rovi (Cotton, 1985). I lavori di spianamento proseguirono però senza interruzioni fino a quando non entrarono in contatto con una delle cisterne della villa e le istituzioni, di concerto con le Autorità locali, bloccarono il progetto edilizio per limitare i danni già consistenti provocati dalle demolizioni. A seguito dello scoppio della Seconda guerra mondiale e a causa della limitazione dei rapporti tra i vari enti preposti alla tutela della villa, le azioni che

concorrevano alla protezione del sito subirono una battuta di arresto e, purtroppo, contestualmente, la villa subì ulteriori danni bellici causati dalla realizzazione di pozzi di scarico dei rifiuti delle forze alleate.

Fortunatamente il progetto, previsto nel 1950, di realizzare nell'area un complesso di case popolari non fu mai portato a compimento consentendo in tal modo di preservare ciò che restava della villa e della sua ricca pavimentazione musiva.

Le operazioni di scavo iniziarono soltanto nel 1962 sotto la guida dei direttori di scavo, il prof. Peter von Blanckenhagen e il Dott. John W. Perkins, e del direttore dei lavori sul campo, la Dott.ssa M. Aylwin Cotton:

I lavori furono finanziati dalla Bachelor Foundation Fund dell'Università di New York. Le operazioni comprendevano le attività di scavo e una ricognizione archeologica dell'area dell'antico *Ager Falernus*.

La scelta di effettuare scavi e studi in tale area nasceva da una duplice volontà: riscoprire e studiare le strutture abitative del periodo romano tardo-repubblicano presenti nelle aree interne della Campania – ricche di testimonianze scritte, ma con poche evidenze materiali archeologiche – e di indagare anche altri ambiti oltre i luoghi di rilevante interesse quali Cuma, Pozzuoli o Pompei. Durante i primi sopralluoghi effettuati nell'intera area, furono individuati piccoli frammenti di muri costruiti in *opus incertum* e resti di cisterne di grandi dimensioni, in grado di contenere migliaia di litri di acqua. Per tale motivo la dott.ssa Cotton e la sua equipe evidenziarono la presenza di ben cinque ville nell'area di Francolise di cui purtroppo, tramite i resti ritrovati, non fu possibile definirne le dimensioni esatte (Blanckenhagen et al. 1965).

Al momento dello scavo la situazione della villa risultava in parte compromessa dalle attività edilizie precedenti. Il muro di contenimento del terrazzamento sud-ovest era stato gravemente danneggiato per la costruzione della scala di accesso al nosocomio, tutt'ora in sede. Parte della struttura della cisterna posta ad ovest, che serviva la *pars urbana*, era stata rovinata dai lavori di spianamento, come anche quella ad est attualmente non accessibile a causa delle passate estrazioni dalle cave di tufo limitrofe.

Tali interventi provocarono non pochi problemi alla lettura archeologica, condotta attraverso il metodo dello scavo stratigrafico

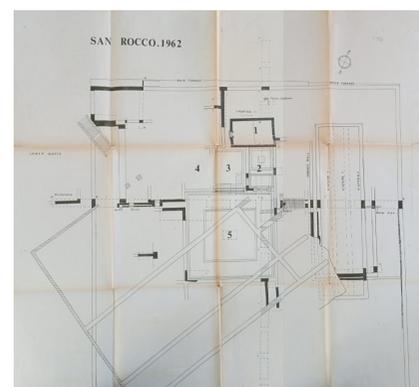
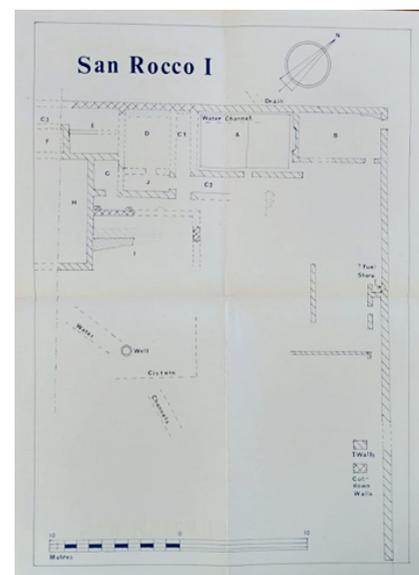


Fig. 56 _ Planimetrie della Villa San Rocco I e II, 1962. Archivio della Soprintendenza archeologia, belle arti e paesaggio per le province di Caserta e Benevento.

. La nuova metodologia di indagine entrava proprio in quegli anni nelle prassi operative archeologiche, in sostituzione dei classici scavi caratterizzati da una rimozione arbitraria del terreno a scapito della stratigrafia. Con tale lettura, infatti, gli *strati* di terreno e di strutture vengono rimossi seguendo la sequenza inversa a quella della loro formazione. Grazie a ciò fu possibile indagare non solo le strutture visibili, ma anche tutti quegli ambienti che erano stati semplicemente coperti nel tempo e non modificati, riuscendo ad individuare così le diverse fasi costruttive e storiche della villa. I lavori di scavo, che a causa della scarsità di fondi furono portati avanti solo fino al 1966, portarono alla luce, oltre alle strutture architettoniche, anche pavimenti musivi di elevato pregio e con caratteristiche configurative diverse. Furono inoltre realizzate coperture metalliche a protezione delle strutture lasciate a vista e di alcuni mosaici che erano stati consolidati mentre gli altri protetti attraverso il loro insabbiamento. I reperti ritrovati in loco, come monete, anfore e laterizi furono consegnati alla Soprintendenza archeologica della Campania.

Attualmente il sito archeologico è gestito dalla Soprintendenza Archeologia Belle Arti e Paesaggio per le Province di Caserta e Benevento ed è visitabile grazie alla sinergia tra enti pubblici e associazioni.

Nel 2007 è stato realizzato un progetto di restauro dedicato in particolar modo ai pavimenti musivi, interessati da differenti fenomeni di degrado provocati dalle avverse condizioni climatiche (patina biologica, efflorescenze saline, umidità, deposito superficiale) che ne stavano provocando il danneggiamento e il distaccamento con la perdita della soluzione di continuità tra le tessere. Nel settembre 2011 è stato invece realizzato un progetto di valorizzazione degli spazi “la villa romana di Francolise apre il suo percorso ai diversamente abili” rendendo in tal modo inclusive le visite al sito (Carcaiso et al., 2012).

5.3 La struttura architettonica della villa: cronologia e fasi di costruzione

Dagli studi effettuati la datazione della villa si attesta intorno ai primi anni del I sec. a.C. Nata come piccola fattoria di modeste dimensioni, utile al sostentamento personale dei proprietari, nel corso del secolo la villa è soggetta ad un ampliamento che porta a triplicare le sue dimensioni,

grazie probabilmente ai proventi del lavoro agricolo (Cotton, 1978).

La villa sembra rispondere esattamente ai criteri tipologici individuati da M.P. Catone (*De agri coltura*) e Columella (*De re rustica*) [*“si poteris, sub radice montis siet, in meridiem spectet, loco salubri...”* (catone I,3); *“Haec igitur est medii collis optima positio...”* Columella I,4]. È infatti posizionata sul basso versante del monte Telefono¹, nel territorio dell’antica Cales, segue un orientamento nord-est/sud-ovest ed è nelle vicinanze dei centri abitati romani più conosciuti - Teanum e Capua – e della Via Appia. Si apre, inoltre, con i suoi terrazzamenti naturali, scavati su pendii, a sud verso la piana del Volturno e il mare, creando pertanto scorci scenografici, caratteristici della maggior parte delle ville romane. Infatti, indipendentemente dalla vocazione – marittime, rustiche o d’otium – esse venivano realizzate in determinanti punti strategici – costieri o dell’entroterra – al fine di offrire quanti più scorci paesaggistici possibili. La struttura infatti va a adagiarsi perfettamente sul fianco della collina attraverso la realizzazione di ampi terrazzamenti e muri di contenimento in pietra calcarea, materiale da costruzione che contraddistingue l’area. A seguito dei lavori di studio e di scavo effettuati negli anni ’60 si constatò che la villa fu attiva dal 100 a.C. fino al 200 d.C., periodo in cui subì un progressivo abbandono. Le fasi costruttive possono essere identificate in due periodi di grandi trasformazioni e due periodi in cui vennero effettuate modifiche di minore entità.

PERIODO I. La prima struttura della villa di San Rocco risale al I secolo a.C. (100-90 a.C.). Dagli studi effettuati² e dalle poche tracce rinvenute essa si presenta come una villa rustica caratterizzata dalla presenza di ambienti di piccole dimensioni destinati ad uso residenziale e per la produzione agricola, utili per il sostentamento di una singola famiglia.

La villa fu costruita su un terreno disabitato, a diretto contatto con la pietra calcarea caratterizzante l’area, adagiandosi perfettamente alla pendenza

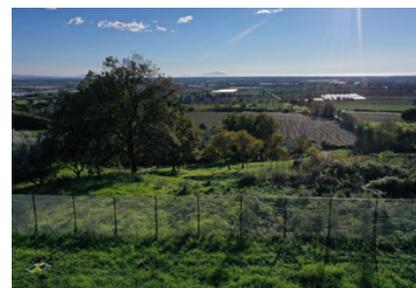
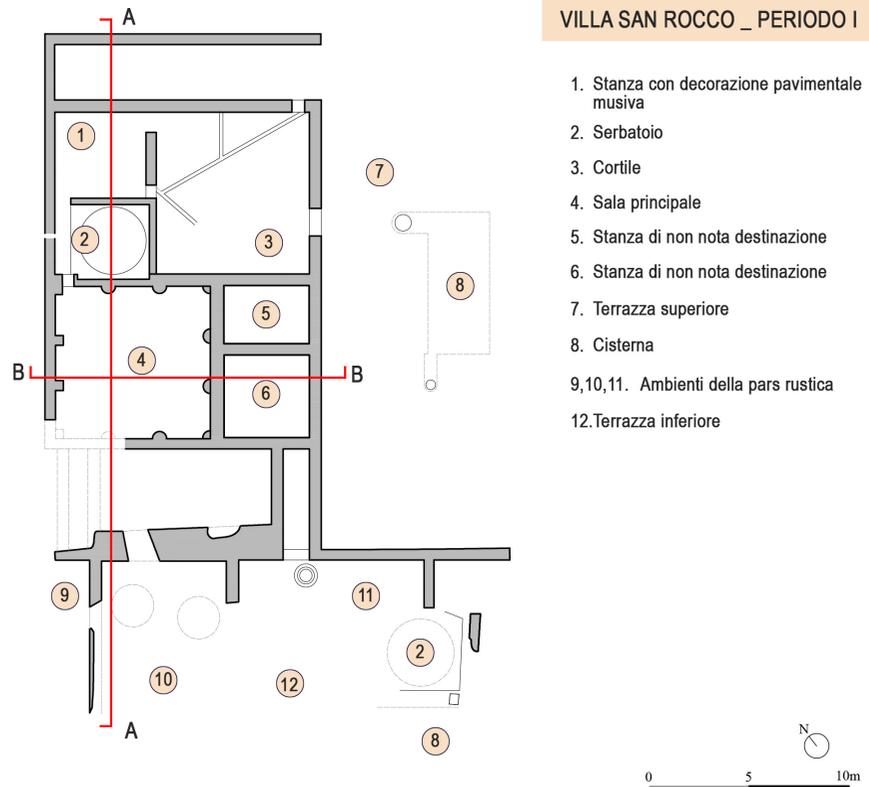


Fig. 57 – Veduta verso la piana del Volturno e il mare. Foto S. Acquaviva

1 Ultima propaggine del Monte Massico

2 Non è stato possibile risalire alla conoscenza della configurazione spaziale nella sua interezza, in quanto parte degli apparati architettonici sono stati demoliti o riutilizzati per la sua rifunzionalizzazione nelle fasi successive.

Fig. 58 _ Villa di San Rocco. Periodo I.
Elaborazione grafica S. Acquaviva



del versante occidentale del Monte Telefono³, articolandosi così su due terrazze: la prima, posizionata più in alto, dedicata alla *domus*, mentre l'altra, più in basso, all'area della *pars rustica*. Tale articolazione, poco utilizzata nelle costruzioni romane, è rintracciabile in alcuni esempi in contesti vesuviani, dove si adottava per la creazione di più punti di vista panoramici o per sfruttare al meglio la pendenza dei terreni (Cotton, 1978).

Dall'analisi delle diverse operazioni di scavo si era evinto che l'impianto della villa aveva una conformazione quadrangolare, con gli ambienti residenziali che gravitavano attorno ad un cortile centrale (3). La stanza (1), quadrangolare, era caratterizzata da basse fondazioni a diretto contatto con la pietra calcarea, e collegata sia al cortile che alla stanza provvista di

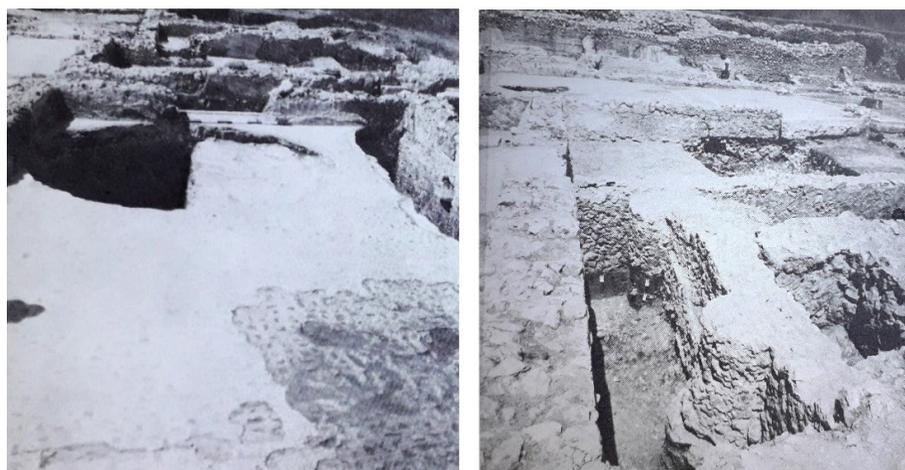
³ Costituiva l'ultima parte occidentale del Monte Massico.

La villa romana di San Rocco in Francolise: una struttura abitativa romana nel territorio casertano



Fig. 59 _ Sezione longitudinale e trasversale della villa. Elaborazione grafica S. Acquaviva

Fig. 60 _ Pavimentazione ambiente 1 e serbatoio (sinistra). Particolare delle basi dei contrafforti dell'ambiente 4 (destra)



serbatoio (2). Un mosaico in *opus scutulatum*⁴, conservato anche in epoche

4 Pavimenti caratterizzati da frammenti di marmo o pietra colorata inseriti in uno strato di cocciopesto o posizionati tra tessere di minori dimensioni.

successive, ne decora la pavimentazione. La sala (4) doveva costituire la sala più raffinata della casa. Questa, dimensionalmente maggiore rispetto alle altre, era caratterizzata da un impianto architettonico diverso. Lo scavo ha dimostrato che esistevano due contrafforti interni impostati su ogni parete in aggiunta a quattro angolari, a sezione rettangolare e semicircolare. Delle stanze (5) e (6) si è ricostruito poco se non la configurazione dell'impianto. Lo scavo stratigrafico aveva permesso di mettere in luce, soltanto in alcuni punti, porzioni di strutture senza danneggiare le altre.

Per quanto concerne l'area a sud della villa, destinata a terrazza e alla *pars rustica*, all'epoca dello scavo non è stato possibile raggiungere una quota adatta in quanto le costruzioni successive ne hanno occultato la vista. Tra i differenti ritrovamenti in quest'area si ricordano il rinvenimento di un *dolium*, al di sotto delle strutture del secondo periodo della villa, e nella stanza (10) pavimentata con *opus signinum*, due aree circolari di circa 2 metri di diametro, rialzate rispetto al pavimento, e utilizzate, probabilmente, per la trebbiatura del grano.

La tecnica edilizia utilizzata per la realizzazione delle opere murarie era l'*opus incertum*⁵ - caratterizzato dall'uso di pietre calcaree di differenti dimensioni legate tra loro mediante una malta di colore grigio con minor percentuale di sabbia - che costituiva il paramento esterno a protezione dell'*opus caementicium*, che a sua volta ne costituiva il riempimento. La solidità di tali strutture ne consentì lo sfruttamento anche nelle epoche successive. Al di sotto dell'attuale piano di calpestio, nella terrazza settentrionale, fu rilevata la presenza di una grande cisterna in tufo grigio napoletano - coperta probabilmente con volta a botte⁶ - in cui veniva conservata l'acqua potabile, in aggiunta a due grandi serbatoi circolari impermeabilizzati ma aperti per la raccolta dell'acqua di servizio per le attività lavorative. L'approvvigionamento dell'acqua era studiato per garantire la sua continua disponibilità e consentire le attività della villa. Non si hanno notizie dell'originario sistema di copertura ricostruito in occasioni di modificazioni successive.

5 Paramento murario posto a protezione dell'*opus caementicium* e coerente con esso, composto da elementi di differenti dimensioni di forma irregolare che nell'insieme formano una trama irregolare

6 Cotton et al. 1978.

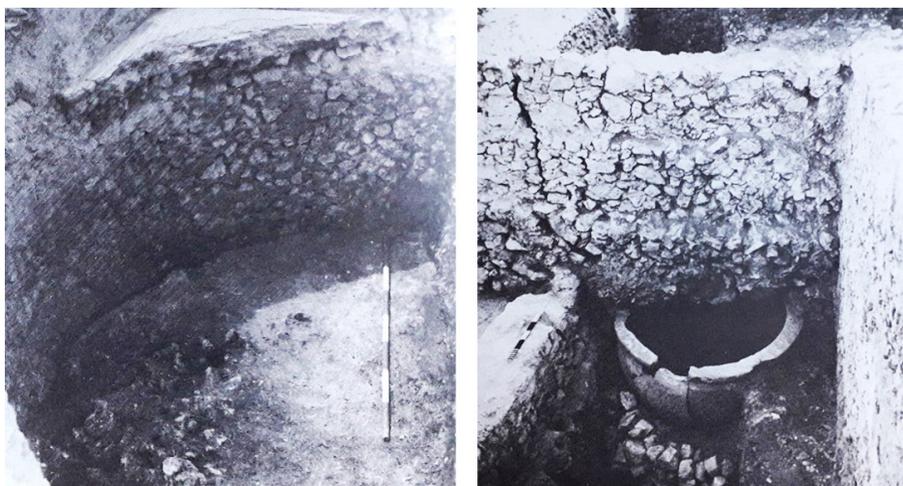


Fig. 61 _ Serbatoio a pianta circolare dell'ambiente 1 (sinistra) e Dolium (destra) del Periodo I (Cotton, 1978)

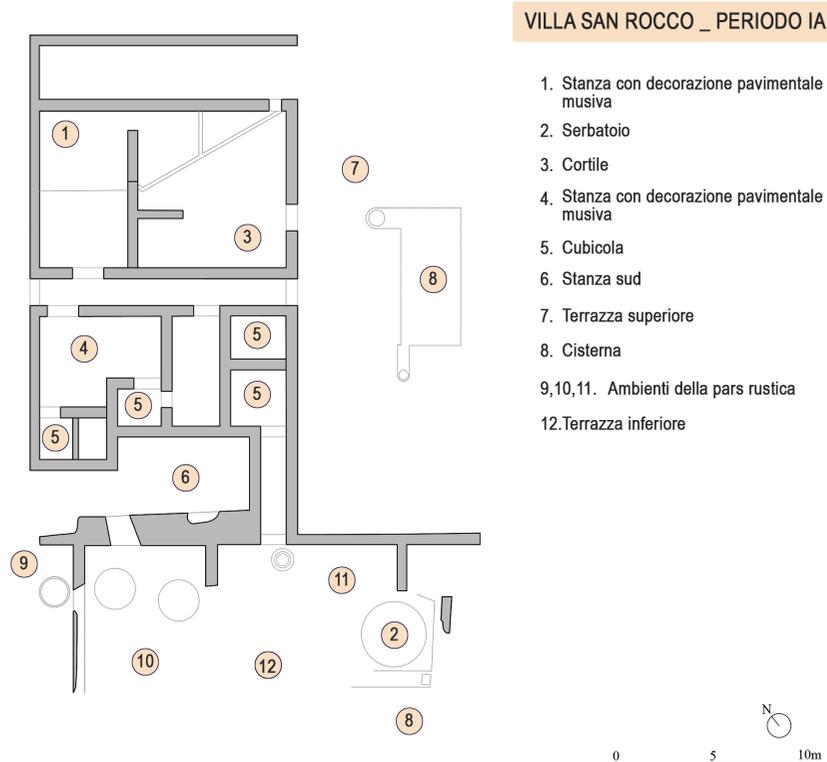
PERIODO I A. Nella prima sottofase, databile intorno alla seconda metà del I sec. a.C.⁷, la villa non muta la sua estensione, ma l'impianto di base e le stanze furono frazionate e aumentate di numero a scapito, ovviamente, della dimensione.

La stanza (1) venne ampliata eliminando il serbatoio ed estendendo a tutto l'ambiente la pavimentazione a mosaico presente nella fase precedente. È possibile ancora oggi percepire la linea di separazione tra i due mosaici e, nonostante la similitudine della tecnica, la differenza tra le dimensioni e il posizionamento dei frammenti di pietre colorate. L'accuratezza della tecnica costruttiva e della realizzazione molto probabilmente ha fatto sì che il mosaico fosse preservato anche nelle epoche successive.

Il grande atrio (4) fu suddiviso in diverse stanze, demolendo i contrafforti troncati a livello del pavimento, e probabilmente adibite a camere da letto (*cubicula*). La maggiore (4) presenta anch'essa una pavimentazione decorata a mosaico caratterizzata da frammenti di calcare bianco con file di tessere nere. Il mosaico invece della stanza contigua è realizzato con tessere nere su fondo di tessere bianche, con una fascia centrale dal disegno geometrico

⁷ L'equipe della dott.ssa Cotton, che si occupò dello scavo, non trovò elementi utili alla datazione precisa di questo periodo. L'ipotesi principale è che sia databile intorno al I sec. a.C., durante l'epoca di Cesare, conclusione dedotta dall'analisi dei due pavimenti a mosaico che caratterizzano gli ambienti (4).

Fig. 62 _ Villa di San Rocco. Periodo IA (Cotton, 1978). Elaborazione grafica S. Acquaviva



che si armonizza con i due pilastri inglobati nella muratura e sporgenti 10 cm. La pregevole decorazione ha fatto ipotizzare⁸ che questa potesse essere la camera da letto principale della villa.

Tra i diversi ambienti sopra descritti venne aperto un corridoio che percorreva trasversalmente la villa da est a ovest. Le aree invece della villa rustica non furono modificate, a testimonianza di un utilizzo continuativo per le attività agricole e produttive.

La tecnica costruttiva era pressoché la stessa, *opus caementicium* coperto da *opus incertum*. La differenza sostanziale si rintraccia nella composizione della malta che contiene una quantità maggiore di sabbia che le conferisce un colore più chiaro.

8 Cotton et al., 1978.

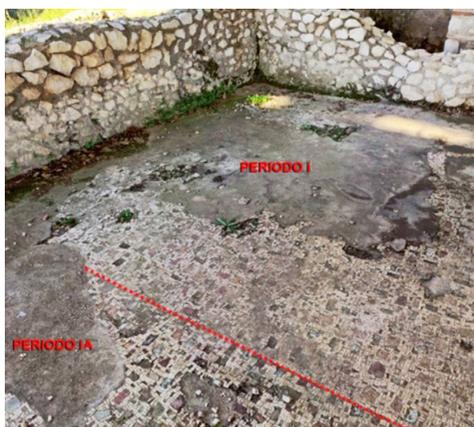


Fig. 64 _ Cubicola (4-5)- Foto S. Acquaviva

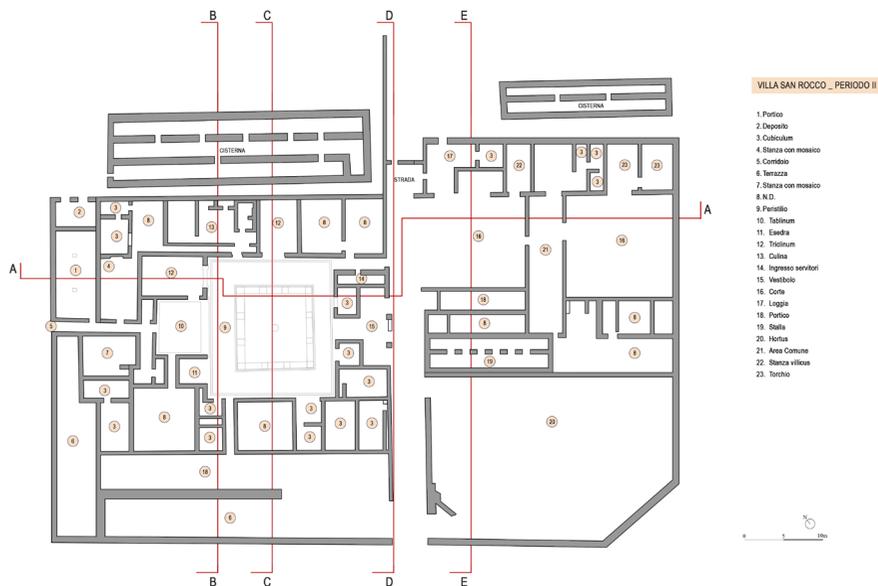
Fig. 63 _ Linea di separazione tra i mosaici del I e del II periodo. Foto S. Acquaviva



PERIODO II. In periodo tardo repubblicano la villa triplica le sue dimensioni (1335 mq), trasformandosi da semplice villa rustica a ricca *domus* con una vasta area dedita alla vita agricola e produttiva. La struttura, costruita su due terrazzamenti, fu ampliata conservando alcune delle camere più raffinate della costruzione precedente con i pavimenti musivi più interessanti. In questa fase risultava evidente la maestosità della *domus* rispetto alla precedente struttura rustica molto più modesta.

Nell'impianto planimetrico era leggibile la netta separazione tra la *pars rustica* e la *pars urbana* (cfr. Cap.4) divise dal percorso che attraversava la villa e che collegava la parte superiore della collina con la zona a valle e che probabilmente doveva servire come collegamento anche per le ville vicine (Carcaiso et al., 2012). La *pars urbana* aveva dimensioni maggiori ed era caratterizzata da una serie di ambienti collegati da corridoi di servizio. L'elemento principale attorno al quale ruotava tutta la villa era il peristilio

Fig. 65a_ Villa di San Rocco. Periodo II (Cotton, 1978). Elaborazione grafica S. Acquaviva



centrale (8) dotato al centro di un *viridarium*⁹. Dodici colonne circondavano la parte interna del peristilio - 4 per lato -, con un interasse variabile per lati paralleli e ricoperte da uno strato di intonaco. Grazie ai pochi frammenti rinvenuti fu possibile determinare il diametro delle colonne, pari a circa 60 cm, e che poggiavano su una base circolare di 85 cm di diametro. Tali informazioni hanno permesso di realizzare un'ipotesi ricostruttiva delle colonne e della loro altezza - pari a 4,84m¹⁰ - rifacendosi alla descrizione di Vitruvio dell'ordine ionico¹¹. Il pavimento del peristilio era in *opus scutulatum*, mentre presentava intonaco rosso nella parte inferiore delle pareti; attualmente tale pavimentazione, che al momento dello scavo era in pessime condizioni, è stata ricoperta da uno strato di terreno al fine di proteggerla.

Su questi ambienti aperti si apriva il vestibolo d'ingresso (15), caratterizzato

9 Nell'antica Roma, il giardino della casa patrizia, situato nello spazio centrale del peristilio, con aiuole e fontane, o nel cavedio (<https://www.treccani.it/vocabolario/viridario/>)

10 Cotton et al., 1978. Per la ricostruzione grafica delle colonne cfr. Carcaiso et al., 2007.

11 Libro IV del *De Architectura* di Vitruvio.

La villa romana di San Rocco in Francolise: una struttura abitativa romana nel territorio casertano

Fig. 65b _ Villa di San Rocco Periodo II, sezioni.
Elaborazione grafica S. Acquaviva

SEZIONE AA



SEZIONE BB



SEZIONE CC



SEZIONE DD



SEZIONE EE

da un impianto a T e da tre ingressi con altrettante porte, e ai lati due stanze (3) caratterizzate anch'esse da una pavimentazione a mosaico geometrico di grande raffinatezza – attualmente rinterrati - che ricordava la classica decorazione dei *cubicula*. specularmente, rispetto al peristilio, si ritrovavano gli ambienti dedicati alla vita pubblica e ai ricevimenti, caratterizzati dalla classica sequenza di *tablinium* (10), *triclinium* (12) ed *exedra*¹² (11).

Questi ambienti, come da fonti letterarie, erano spesso caratterizzati da una raffinata decorazione a mosaico, che è possibile ritrovare anche nella villa di San Rocco. In particolare, il *tablinum* (4) - totalmente aperto sul peristilio e con un impianto a base quadrata - presentava una soglia in marmo con una fascia in *opus tessellatum*¹³ caratterizzata da una ripetizione di esagoni dai colori caldi, con al centro piccole figurazioni a tema floreale, oggi scarsamente conservate. L'area centrale, caratterizzata dalla stessa tecnica decorativa, era costituita da un tappeto di tessere bianche nel quale erano incastonate piccole rosette di colore nero, con un emblema centrale - oggi andato perso-. I mosaici rinvenuti nel *triclinium* (12) erano divisi in due tappeti separati da una fascia decorata con meandri e svastiche tridimensionali, la parte anteriore realizzata in *opus scutulatum* mentre la parte posteriore riprendeva la stessa decorazione del *tablinum*.

Ogni lato della villa era collegato al peristilio da un corridoio. Sul lato opposto del *tablinum* si apriva il primo corridoio (31) che conduceva alla *villa vetus* (villa precedente) con una soglia decorata a mosaico rappresentante una porta con torri. Il corridoio a nord conduceva invece agli ambienti sia della *culina* (13), ma anche agli ambienti che maggiormente hanno subito modificazioni nel corso del tempo e di cui si conservano ancora lacerti murari della struttura della villa antica (3, 4, 8). Questi ultimi erano ambienti residenziali dotati di un'anticamera, decorata anch'essa con un ricco mosaico geometrico, che conduceva a due *cubicula*. Le stanze adiacenti alla *culina*, sul lato est, avendo un diretto rapporto con il peristilio

12 Il *Tablinum* era l'ambiente principale della casa, una sala aperta sull'atrio o sul peristilio situato nella maggior parte dei casi di fronte all'ingresso della casa, chiusa da una tenda o con una parete mobile. Il *triclinium* era la sala da pranzo dei romani. L'*exedra* era una sala collocata vicino l'atrio munito di sedili per il ritrovo e la conversazione (enciclopedia treccani)

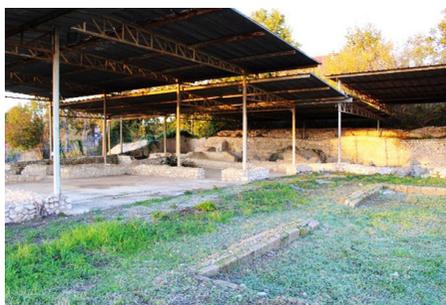
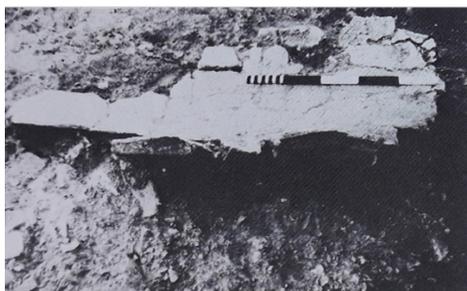
13 Tessere di dimensioni minute unite per creare forme geometriche e scene figurate (Baldassarre, I. 1995).

La villa romana di San Rocco in Francolise: una struttura abitativa romana nel territorio casertano



Fig. 66 _ Frammenti delle colonne del peristilio centrale (Cotton, 1978)

Fig. 67 _ Vista sul Triclinium e sul tablinum. Foto di S. Acquaviva



erano probabilmente altri ambienti pubblici (*triclinium*) in quanto sono stati ritrovati pavimentazioni musive di elevata raffinatezza - rappresentazioni geometriche con emblemata e in *opus signinum* -, ma che risultavano i più danneggiati a causa della costruzione delle fondazioni del nosocomio (8, 12).

Sul lato sud del peristilio si aprivano una serie di ambienti che potevano fungere da anticamere con *cubicula*. Di questi però si sa poco in quanto in parte danneggiati dai lavori edilizi di epoca moderna.

L'area sud-ovest era interamente occupata da ambienti risalenti al primo periodo, soggetti soltanto a minime modificazioni come l'aggiunta di setti

Fig. 68 _ Mosaici del tablinium (sinistra) e del triclinium (destra). Foto di S. Acquaviva

Fig. 69 _ Corridoi di accesso agli ambienti. Foto di S. Acquaviva



murari per una redistribuzione interna. La loro ricchezza e sontuosità erano state interamente conservate, segno questo di una volontà di continuità con il passato (Cotton, 1978). Le parti antiche si fondono armonicamente con il resto della nuova costruzione. In particolare, l'integrazione tra le strutture della *domus nova* e gli ambienti preesistenti era dichiarata dalla differenza di quota tra gli ambienti. I nuovi, infatti, sono rialzati di circa 60 cm, dal momento che erano stati realizzati in sovrapposizione alle strutture precedenti che non furono demolite. Ovviamente, per connettere gli ambienti posti a differenti quote, erano stati realizzati scalini di marmo e calcare (andati persi e depredati) e rampe. Il corridoio (5), insieme alle stanze adiacenti, divenne l'elemento di continuità con il passato, elemento alquanto insolito nelle ville romane.

Gli ambienti ad ovest (1, 2 e 6) subirono un ampliamento e una modifica parziale; più a nord furono aggiunti un portico e una terrazza, dove fu rinvenuta una porzione di colonna crollata¹⁴.

14 Molto spesso questi frammenti sono elementi fondamentali che aiutano e supportano gli studiosi nel riconoscimento e nell'impostazione delle diverse ipotesi ricostruttive, in quanto la

La villa romana di San Rocco in Francolise: una struttura abitativa romana nel territorio casertano



Fig. 70 _ Mosaico del Triclinum, durante lo scavo (Cotton 1978) e stato attuale (foto a cura dell'autrice)

Fig. 71 _ Ambienti della pars urbana. Foto S. Acquaviva



La ricchezza e la complessità della *pars urbana* si rispecchiava nell'articolazione e nelle dimensioni della *pars rustica*. Realizzata ad est della strada principale che attraversava la villa, e pertanto in una posizione distaccata e opposta rispetto alla villa del periodo I, questa si sviluppava su due terrazzamenti. Tutti gli ambienti ruotavano attorno ai due cortili principali separati da uno spazio comune. Il primo cortile che si apriva sulla strada principale aveva una serie di camere a carattere residenziale, mentre nel secondo cortile si affacciavano le stanze dedicate alle attività agricole. Purtroppo, la parte a sud della villa è andata distrutta dai lavori per la costruzione dell'ospedale che avevano danneggiato la maggior parte delle opere murarie rendendo difficile metterne in luce la parte sottostante. Pertanto, le informazioni circa gli ambienti che confinavano con la strada principale sono scarse e per la maggior parte deducibili dalle ipotesi ricostruttive delle poche tracce rinvenute (Cotton et al., 1978).

Per quanto concerne l'approvvigionamento idrico della villa, questo subisce un cambiamento consistente in quanto la cisterna del I periodo

realizzazione di molte strutture di epoca romana si basava sullo studio e applicazione dei dettami e delle regole costruttive riportate nei trattati antichi.

Fig. 72 _ Le fornaci della Villa di Francolise. Foto S. Acquaviva



fu soppressa e interrata e in sua sostituzione furono costruite due grandi strutture voltate a botte, capaci di accogliere migliaia di litri d'acqua¹⁵; la prima era formata da 3 cisterne collegate tra loro da piccole aperture ad arco e forniva acqua alla *pars urbana*, l'altra invece, formata da due cisterne, riforniva la *pars rustica*.

La tecnica costruttiva è sempre rappresentata dall'utilizzo dell'*opus incertum* e dell'*opus cementicium*, ma meno solido rispetto al periodo precedente in quanto in parte crollato.

PERIODO IIA. Nel I sec. d.C. la villa subì nuovi cambiamenti. Gli ambienti agricoli e produttivi della *pars rustica* vennero per la maggior parte modificati, a causa della costruzione di un *oletum* e di tre fornaci, mentre la *pars urbana* vide la sola aggiunta del *balneum*.

In sostituzione degli ambienti residenziali vennero realizzate tre fornaci di dimensioni differenti - attualmente per due strutture risulta visibile la sola camera di combustione mentre la camera di cottura è andata distrutta, mentre la terza fornace presenta solo pochi resti in quanto danneggiata durante la Seconda guerra mondiale. Tra i reperti rinvenuti, oltre ai mattoni realizzati e un'antefissa, nell'impianto di produzione è stato ritrovato anche un bollo con la scritta "LBILLIE" (fig. X), da ciò è stato ipotizzato che potesse essere il nome del proprietario della villa, L. Billienus (Carcaiso, 2007). Gli ambienti dedicati alla produzione e alla lavorazione dell'olio furono trovati in condizioni discrete protetti dai crolli dei terrazzamenti soprastanti. La costruzione dell'*oletum*, per la lavorazione dell'olio d'oliva interessò l'area posteriore alle fornaci. Il piano di calpestio, rialzato di 40 cm, era realizzato in *opus spicatum* e *signinum*, in quanto materiali più resistenti in un ambiente dedito alle attività lavorative.

15 Strutture simili è possibile trovarle nella villa di Pollio Felice a Sorrento.

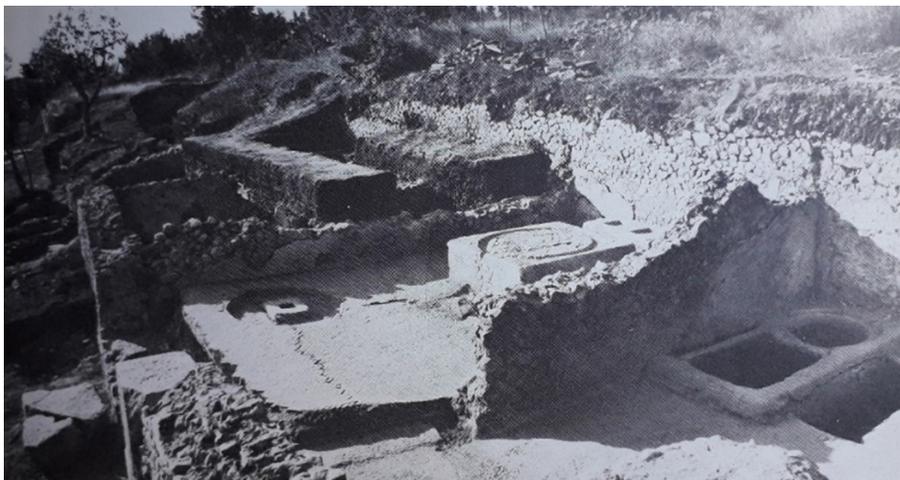


Fig. 73 _ Ambienti dell'Oletum (in primo piano). Strutture moderne realizzate sulle fornaci durante la Seconda guerra mondiale (Cotton, 1978)

Le strutture furono ritrovate in discrete condizioni e fu pertanto possibile risalire alla suddivisione del lavoro di spremitura e raccolta dell'olio. Questi ambienti erano collegati alle vasche di decantazione dell'olio ritrovate nell'area a sud. Avevano una profondità di circa 2 metri e al centro un'area rotonda più profonda per la raccolta dell'acqua. Le parti aggiunte sono realizzate in *opus reticulatum* formato da pietre di tufo con base quadrata impresse in uno strato di *opus caementicium*.

Per quanto riguarda la *pars urbana* sembra opportuno soffermarsi sulla realizzazione del *balneum*. In particolare, per la realizzazione dell'*hypocaustum* con *suspensurae*¹⁶ e l'annesso *sudatorium* fu troncato per metà il mosaico in *opus tessellatum* che decorava l'ambiente (8). La vasca fredda per il *frigidarium* viene aperta nella stanza laterale che prima era occupata da un *cubiculum*, allo stesso modo viene realizzata la vasca per il *calidarium* e il *sudatorium*. La posa della pavimentazione di questi ultimi due ambienti mostra la scarsa attenzione nella decorazione; in particolare nel *calidarium* furono utilizzati materiali di riempiego come semplici lastre di marmo bianco di dimensioni inferiori a contornare i tre lati dell'ambiente e lastre di marmo bianco con venature bluastre con motivo decorativo quadrangolare posizionate senza seguire un ordine preciso e regolare.

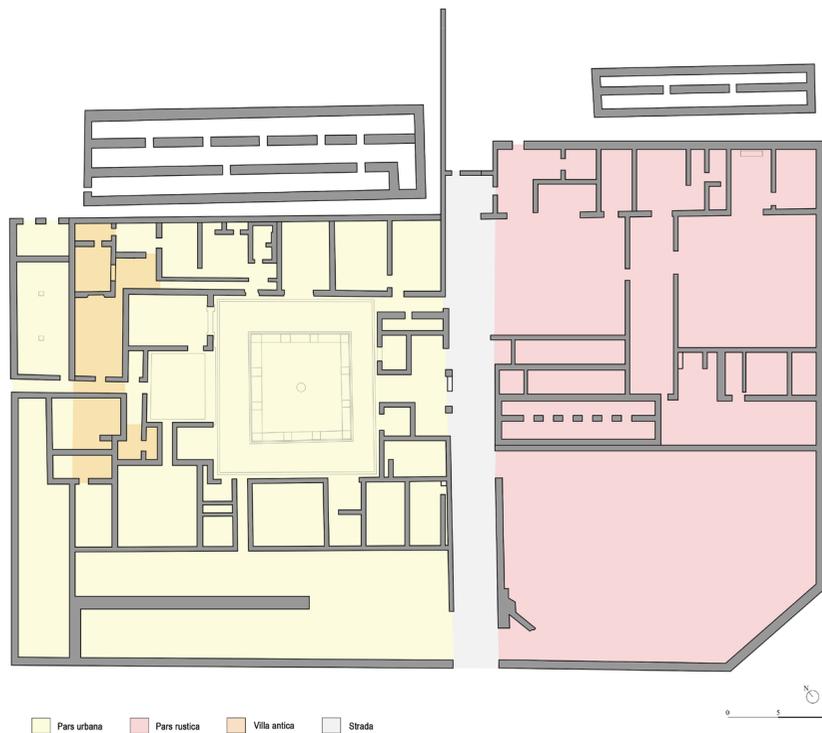
16 Il *sudatorium* e il *calidarium* erano di regola riscaldati dal basso dal *prae-furnium* attraverso il condotto sorretto dalle *suspensurae*, mentre in alcuni casi veniva irradiato anche lateralmente mediante tegole e tubuli posizionate sui prospetti degli ambienti. Il calore in questo caso era artificiale a differenza, per esempio, delle terme romane di agnano dove il calore proveniva dal sottosuolo prodotto dall'attività vulcanica dei Campi Flegrei.

Fig. 74 _ Suspensurae. Foto S. Acquaviva



Fig. 75 _ Frigidarium (sinistra). Calidarium e bagno calda (destra). Foto S. Acquaviva

Fig. 76 _ villa San Rocco Periodo II, divisione tipologica. Elaborazione grafica S. Acquaviva



CAPITOLO SESTO

**La trasposizione del reale nello spazio digitale:
i rilievi *reality-based*. Acquisizione e processamento del dato**

L'utilizzo delle metodologie di rilievo *reality-based* (cfr. cap.2) negli ultimi anni ha rivoluzionato le modalità di documentazione e di registrazione del dato archeologico e allo stesso tempo ha reso più intuitiva la sua gestione e divulgazione negli ambiti di tutela, valorizzazione e fruizione. Queste metodologie, i cui processi ad oggi sono ampiamente consolidati, permettono di acquisire la morfologia del manufatto, rilevando non solo gli aspetti quantitativi, e quindi misurabili e riconducibili alle sue determinazioni metriche e geometriche, ma anche gli aspetti qualitativi e formali, restituendoli sottoforma di nuvola di punti.

Com'è noto lo sviluppo sempre crescente di queste metodologie in campo archeologico ha portato molti vantaggi in termini di accuratezza, di acquisizione e fotorealismo sia applicate ad ambiti territoriali, sia riferiti a singoli manufatti o reperti. Di conseguenza, diviene di fondamentale importanza effettuare scelte ponderate sulla metodologia più adeguata da utilizzare e sui livelli ottimali di risoluzione da raggiungere¹. Tali scelte dipendono dalle caratteristiche geometriche del manufatto, dallo stato di conservazione, dall'accessibilità e dalle finalità stesse dell'operazione.

¹ La scelta del parametro di risoluzione deve essere gestita in base alla finalità del rilievo. Basse risoluzioni su manufatti con peculiarità significative porterebbero in fase di processamento ad una semplificazione e una perdita di informazione; allo stesso modo parametri elevati per zone poco significative comporterebbero un aumento dei tempi di processamento.

Fig. 77 _ Villa romana di San Rocco. Foto di S. Acquaviva



La scelta della metodologia e della tipologia di sensori da utilizzare per il rilievo della Villa di San Rocco è dipesa dalla volontà di ottenere un modello tridimensionale completo, tale da poter divenire esso stesso un archivio digitale a diversi livelli di dettaglio, su cui poter operare differenti tipologie di indagini.

A seguito della raccolta della documentazione grafica d'archivio sono stati eseguiti sopralluoghi esplorativi per comprendere l'articolazione del sito, lo stato di conservazione e le condizioni delle differenti strutture murarie della villa, nonché le relazioni con il contesto in cui si inserisce. L'area conserva importanti testimonianze archeologiche, che si costituisce come elemento complesso caratterizzato dalla frammentarietà delle strutture² delle diverse parti che lo compongono. I resti murari della villa emergono dal terreno per una quota che varia dai 30 ai 60 cm nelle aree più interne, fino ad un massimo di 2,00 m nei limiti più esterni e per i muri di contenimento. È ancora evidente l'articolazione originale dell'impianto e sono ben conservate gran parte delle pavimentazioni musive, attualmente protette da una struttura poste a copertura del sito costituita da pilastri in ferro dell'altezza di circa 4 metri collocati circa ogni 4-5 metri a sostegno di una copertura metallica. La presenza di tali elementi ha in parte condizionato le scelte in merito alle acquisizioni metriche poiché in alcune ore del giorno generano forti contrasti di luci e ombre sulle superfici mosaicate causando disturbi nelle acquisizioni di tipo fotografico.

Si è dunque scelto di procedere con acquisizioni *Terrestri mediante Laser Scanner* (TLS) integrate successivamente con rilievi fotogrammetrici terrestri e aerei a diversi livelli di dettaglio.

2 Caratteristica che accomuna la maggior parte dei siti archeologici.

6.1. L'acquisizione del dato: i rilievi *range-based*

Il rilievo *range-based* ha consentito di registrare, in tempi brevi, una grande quantità di dati metrici ed ha interessato l'ampia area su cui insiste la villa. Si è scelto di utilizzare un laser scanner capace di acquisire un notevole numero di punti a distanze variabili in modo da riuscire a registrare la maggior parte dei dati necessari a definire l'esatta collocazione delle diverse strutture, nonostante l'articolazione dei vari elementi.

È stato pertanto scelto il laser scanner *Faro Focus3D s150*³ con tecnologia *phase-shift*. Questo strumento è composto da un emettitore che proietta il raggio laser sulla superficie dell'oggetto da acquisire e da un sensore che registra il ritorno dell'impulso allo strumento. Mediante la comparazione della differenza di fase tra il segnale emesso e quello di ritorno lo scanner laser acquisisce la misura della distanza (cfr. Cap. 2).

In particolare, il Faro Focus3D s150⁴ è in grado di acquisire 976.000 punti al secondo con un'accuratezza di ± 1 mm a 25 m. Possiede un campo visivo che si apre di 360° ruotando attorno all'asse verticale e di 300° attorno all'asse orizzontale⁵, con un range di acquisizione che varia tra 0,6 metri e i 150 metri. Lo strumento integra una fotocamera da 165 mpx con HDR fino a 5 esposizioni che consente di compensare l'esposizione durante lo scatto delle fotografie.

Nell'ottica di ottenere un risultato di qualità, nelle fasi di acquisizione è stata posta attenzione all'angolo di incidenza del raggio laser posizionando opportunamente lo strumento rispetto alle parti da rilevare in modo da ottenere un dato accurato e limitando, quanto possibile, eventuali errori derivanti dalle operazioni.

3 Lo strumento è stato fornito dal laboratorio di Tecniche e Tecnologie Innovative per il Rilievo e la Rappresentazione (TIR Lab), struttura afferente al Dipartimento di Architettura (DiArc) dell'Università di Napoli "Federico II".

4 <https://www.microgeo.it/wp-content/uploads/2021/06/Tech-Sheet-CAM2-laser-scanner-Focus-ITA.pdf>

5 L'angolo del campo di vista misurato rispetto all'asse orizzontale è ridotto (300°) in quanto lo strumento non rileva la propria base – il treppiedi - lasciando una zona d'ombra nella nuvola di punti. Tale perdita di dato può essere sopperita programmando adeguatamente le diverse stazioni successive in modo da coprire tale la mancanza.



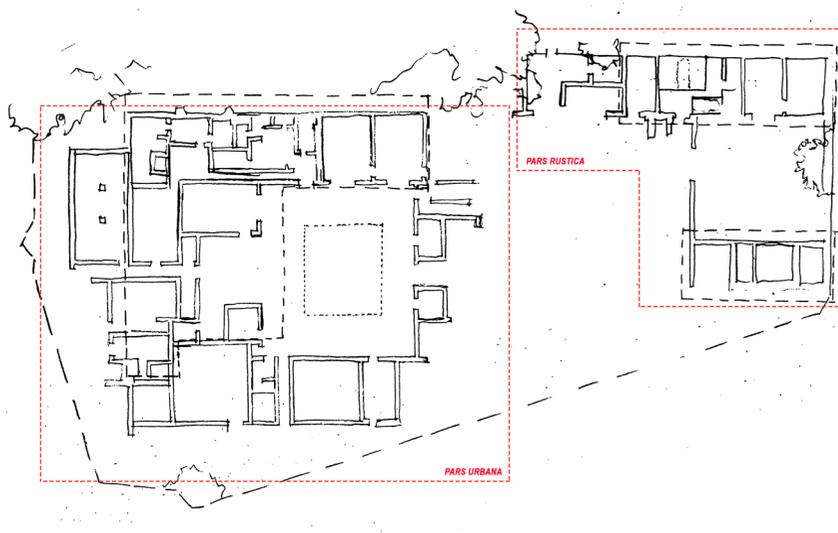
Fig. 78 _ Laser scanner Faro Focus 3D s150

LASER SCANNER FARO FOCUS 3D s150	
Range di misurazione	Da 0,6 a 150m
Velocità di scansione	976.000 punti al secondo
Riflettività	90% (bianco) 10% (grigio scuro) 2% (nero)
Errore di misurazione	± 1 mm
Fotocamera	Integrata con HDR
Risoluzione camera	Fino a 165 megapixel di colore
Campo visivo	300° / 360°
Classe del laser	Classe del laser 1
Sensori integrati	Compensatore biassiale, Sensore dell'altezza, Bussola, GNSS
Peso	4-5 kg

Tabella _ Laser scanner Faro Focus 3D s150

Fig. 79 _ Struttura in ferro posta a protezione delle strutture murarie

Fig. 80 _ Scomposizione dell'area di rilievo e progettazione del rilievo. Elaborazione S. Acquaviva



Nell'ambito del progetto di rilievo sono state programmate il numero di *scan position* necessarie a documentare l'intera villa tenuto ovviamente conto della sua articolazione. Pertanto, in aree caratterizzate da ambienti vicini e piccoli, separati da murature di diversa altezza, è stato necessario moltiplicare le postazioni nell'ottica di coprire l'intera area e di evitare zone d'ombra.

Per un controllo puntuale delle attività di rilievo, il progetto di acquisizione è stato suddiviso in tre zone, scelte in base all'impianto della villa:

- area della *pars rustica* (27 scansioni);
- area della *pars urbana* (49 scansioni);
- area di collegamento e di definizione del perimetro esterno della villa (25 scansioni).

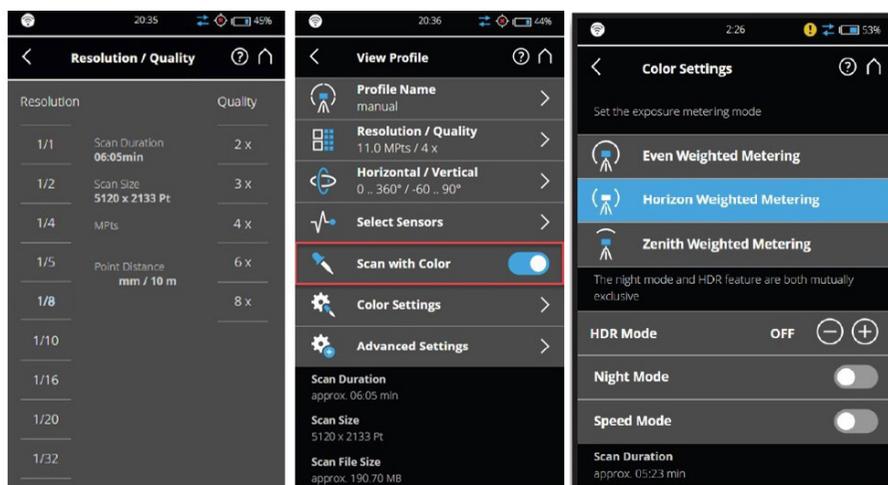


Fig. 81 _ Parametri per il settaggio dello strumento.
S. Acquaviva

Rispetto alle impostazioni dello strumento, la risoluzione e la qualità⁶, che rappresentano rispettivamente la densità di punti da rilevare e il numero di volte in cui ogni punto viene battuto, sono stati stabiliti affinché non fosse necessario operare variazioni lungo il percorso. Nello specifico, considerando le distanze dello strumento dagli elementi archeologici e il passo tra le scansioni, si è stabilita una risoluzione pari a 6 mm a 10 m e una qualità 3X, battendo ogni punto 3 volte, in modo da ottimizzare i tempi di acquisizione.

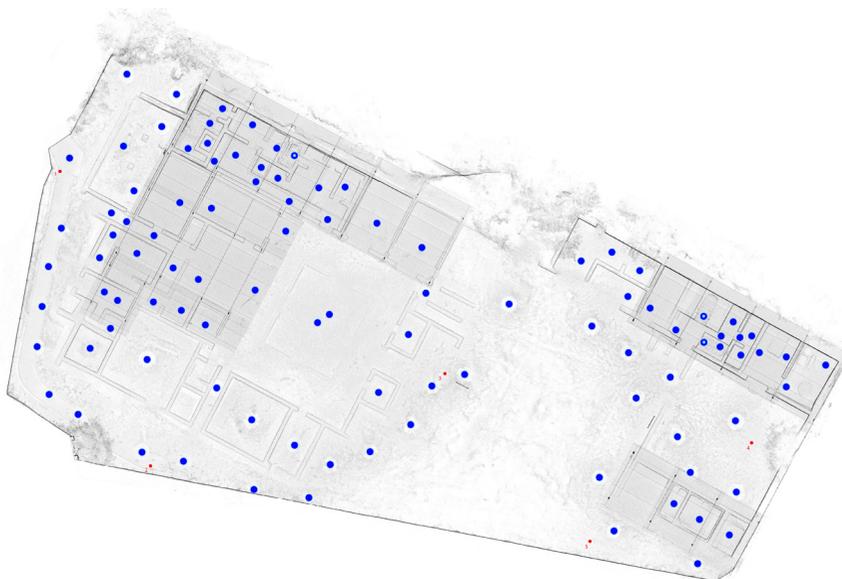
Si è scelto inoltre di tenere attiva la contestuale acquisizione fotografica, registrando quindi il dato del colore nonostante la forte esposizione solare a cui è sottoposta la villa durante le ore in cui è consentito l'accesso al sito, settando la modalità ponderata orizzontale (*horizon weighted metering*)⁷ attraverso la quale la fotocamera utilizza l'informazione della luce proveniente dall'alto per determinarne l'esposizione.

Per il rilievo complessivo sono servite in totale 101 scansioni (di cui tre in ambienti con altezza inferiore a 1 metro) ad una distanza variabile tra

⁶ Maggiore è il numero di volte in cui ogni punto viene battuto maggiore sarà il tempo di ogni scansione.

⁷ Il laser Faro Focus 3D s150 consente di impostare 3 modalità diverse per regolare l'esposizione delle immagini fotografiche: Bilanciata (la camera utilizza la luce proveniente da tutto l'ambiente), ponderata orizzontale (la camera utilizza la luce proveniente dall'alto), ponderata zenitale (la camera utilizza la luce proveniente dal basso).

Fig. 82 _ Punti di stazionamento dello scanner



i 5 e i 7 metri, cercando di realizzare un percorso chiuso per ricalibrare eventuali errori nel processamento del dato. L'anteprima di ogni nuvola di punti, generata alla conclusione di ogni scansione, ha consentito un controllo maggiore del processo, valutando di volta in volta le operazioni, in quanto la presenza della vegetazione e delle coperture, avrebbero potuto facilmente provocare disturbo e zone d'ombra.

Purtroppo, l'area a nord della villa, occupata dalle cisterne, non è stata rilevata in quanto non accessibile al momento dei rilievi a causa del terreno sconnesso e della forte differenza di quota.

6.1.1. Processamento, editing e filtraggio della nuvola di punti

La lettura e l'elaborazione iniziale del dato acquisito con il laser scanner sono state effettuate attraverso l'utilizzo del software proprietario *Faro Scene*, importando le nuvole nel formato .fls. Come è noto, le nuvole importate presentano un sistema di riferimento locale solidale con lo strumento e quindi legato alla posizione dello scanner al momento dell'acquisizione che costituisce l'origine stessa del sistema (0,0,0)⁸. Pertanto, è

⁸ La funzione del laser scanner Faro Focus s150 di registrazione in loco in real-time non è stata utilizzata in quanto lo strumento deve essere collegato ad un computer che ha comunque una capacità limitata di funzionamento legata alla potenza della batteria. Inoltre, il procedimento

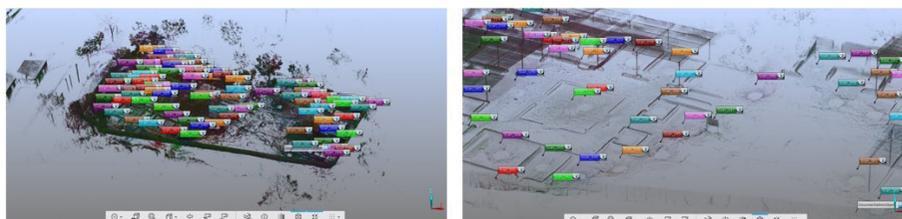
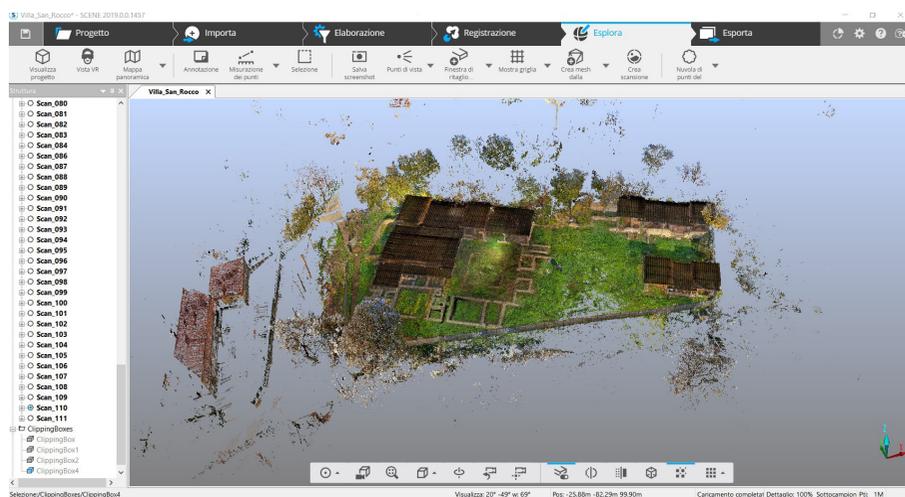


Fig. 83 _ Vista corrispondenza all'interno del software proprietario FaroScene. Elaborazione S. Acquaviva

Fig. 84 _ Nuvola di punti della Villa di San Rocco elaborata nel software Faro Scene. Elaborazione S. Acquaviva

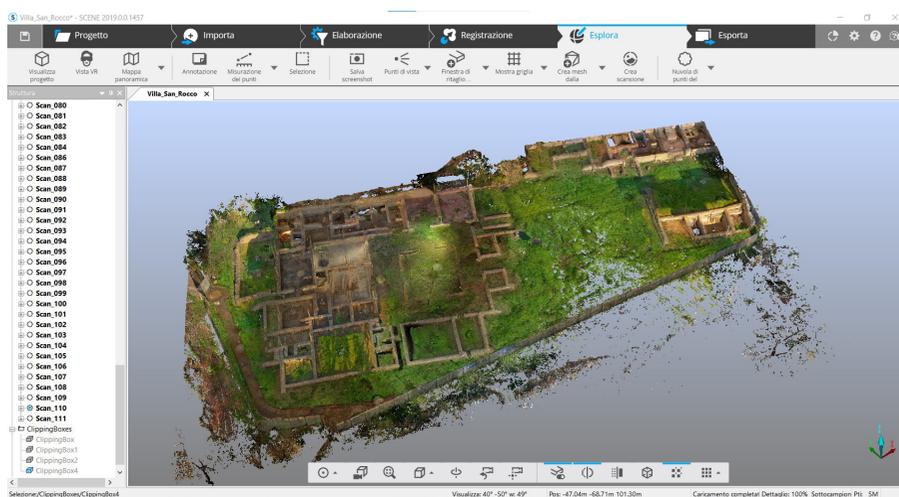
risultata necessaria una fase di allineamento e registrazione delle nuvole di punti al fine di orientare in un sistema di riferimento comune attraverso operazioni di roto-traslazione rispetto ad una scansione di riferimento. Questa fase è avvenuta mediante processi semi-automatici *cloud to cloud* e *vista dall'alto* senza la necessità di apporre preliminarmente dei target nella scena, in quanto il grado di sovrapposizione tra le singole scansioni è stato progettato per garantire una adeguata presenza di elementi comuni tra scan position successive, per un valore maggiore del 70%, agevolandone così l'allineamento, insieme alle informazioni derivanti dai sensori attivi nello strumento (compensatore biassiale, l'altimetro, la bussola e il GPS).



Considerando l'elevato numero di scansioni da processare, si è scelto di suddividere il lavoro in tre cluster, allineando prima le scansioni appartenenti al singolo cluster e, successivamente, i cluster stessi, in modo da rendere più agevole la fase computazionale in base all'hardware

era impossibile da attuare considerando il fatto che il rilievo è andato avanti per diversi giorni.

Fig. 85 _ Nuvola di punti della Villa di San Rocco elaborata nel software Faro Scene. Elaborazione S. Acquaviva



utilizzato⁹ ed ottenere il dato globale. A seguito del processamento, l'estrazione del report ha consentito di verificare la divergenza tra l'errore massimo e minimo tra i punti e i parametri utilizzati, un'immagine qualitativa delle sovrapposizioni tra le scansioni e il numero di connessioni per coppie di scansioni con il relativo grado di sovrapposizione media. Nonostante l'accuratezza del dato metrico ottenuto attraverso le scansioni, sono apparse alcune criticità per quanto concerne la resa fotografica. Le modalità e la risoluzione degli scatti fotografici delle camere interne allo strumento, sebbene siano di elevata qualità, non sono risultate sufficienti a documentare la resa materica delle superfici e le specifiche caratteristiche delle stratigrafie archeologiche. Alcune aree, inoltre, sono risultate eccessivamente sovraesposte, sia per le condizioni di illuminazione, ma anche per le caratteristiche fisiche della pietra calcarea che, in determinate condizioni di illuminazione, ne ampliava i riflessi. Si è dunque scelto di procedere con un editing delle immagini acquisite dallo scanner per ottenerne un miglioramento nelle variazioni cromatiche. Il software Faro Scene consente di effettuare delle prime operazioni di bilanciamento del bianco sebbene non risulti possibile avere contezza della regolazione in quanto i parametri non possono essere gestiti manualmente. Pertanto, sono state esportate le

Statistiche punto di scansione

Cluster/Scansione 1	Cluster/Scansione 2	Errore punto [mm]	Sovrapposizione
Scan_110	Scan_109	1.8	96.9%
Scan_110	Scan_104	4.0	79.4%
Scan_110	Scan_103	5.1	74.9%
Scan_110	Scan_065	3.6	76.2%
Scan_110	Scan_076	3.9	72.9%
Scan_111	Scan_107	4.6	71.0%
Scan_111	Scan_065	8.1	65.9%
Scan_111	Scan_079	9.4	79.0%
Scan_111	Scan_100	5.7	65.9%
Scan_111	Scan_076	7.8	80.2%
Scan_001	Scan_002	6.4	57.6%
Scan_001	Scan_004	4.4	36.9%
Scan_001	Scan_016	2.7	39.4%
Scan_001	Scan_015	3.1	28.0%
Scan_002	Scan_004	6.5	63.0%
Scan_002	Scan_007	10.2	46.5%
Scan_003	Scan_001	2.9	40.4%
Scan_003	Scan_002	6.3	63.6%
Scan_003	Scan_004	2.6	84.4%
Scan_003	Scan_005	3.0	67.2%
Scan_003	Scan_009	3.5	54.5%
Scan_003	Scan_015	1.2	69.8%
Scan_003	Scan_014	1.1	67.6%
Scan_003	Scan_011	2.7	57.2%
Scan_003	Scan_016	0.9	70.9%
Scan_003	Scan_012	1.4	60.9%
Scan_004	Scan_015	2.0	60.1%
Scan_005	Scan_002	8.7	54.2%
Scan_005	Scan_004	2.7	84.7%
Scan_005	Scan_009	1.1	84.0%
Scan_005	Scan_073	1.3	82.1%
Scan_005	Scan_069	1.7	64.6%
Scan_005	Scan_074	1.5	78.3%
Scan_005	Scan_010	1.2	78.8%
Scan_005	Scan_015	1.8	69.2%

Fig. 86 _ Report del progetto di rilievo.

⁹ Maggiore è il numero di scansioni maggiore sarà la quantità di dato in termini di gigabyte e maggiore sarà il tempo di elaborazione.



Fig. 87 _ Bilanciamento del bianco realizzato all'interno del software FaroScene. Elaborazione S. Acquaviva

immagini equirettangolari¹⁰ in HDR e importate all'interno del software *open source* Darktable¹¹ dedicato alla post-produzione delle immagini, per intervenire sul bilanciamento del bianco. La luce, qualsiasi essa sia – naturale o artificiale - ha un suo colore e una conseguente temperatura¹², e pertanto differenti fonti di luce generano delle dominanti cromatiche nelle immagini in quanto la camera non ha la stessa capacità dell'occhio umano di adattarsi alla luce e non riesce a riprodurre i colori correttamente. È stato necessario esportare i file dal software *Scene* in formato jpeg, che prevede un lavoro più veloce sulle immagini rispetto ad un'immagine in formato raw, con l'obiettivo di ottenere comunque il migliore risultato possibile. Infine, ogni immagine modificata è stata importata nuovamente nella cartella di destinazione all'interno del software, ed è stato possibile così applicare il dato colorimetrico a tutte le scansioni

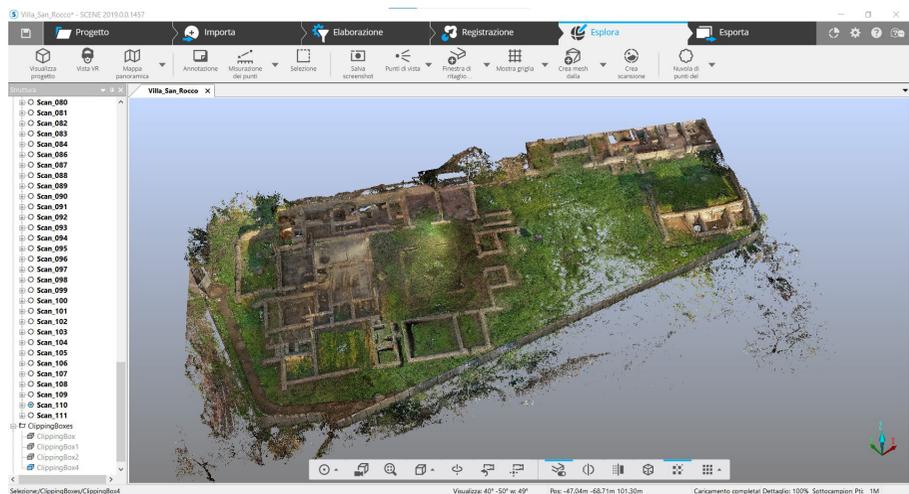
La nuvola, nella sua resa iniziale, presentava elementi di rumore dovuti alla presenza dell'operatore o di altri elementi di disturbo come le coperture

10 Le immagini equirettangolari sono uno dei prodotti estrapolati dalle operazioni di rilievo laser scanner. Consistono nella proiezione su un piano bidimensionale (rettangolare) della superficie di una sfera. In particolare in un'immagine equirettangolare le verticali restano tali mentre lo zenit e il nadir (le aree superiori e inferiori dell'ipotetica sfera) appaiono stirate in senso orizzontale. Le proporzioni di tale immagine devono rispettare il rapporto 2:1 (larghezza:altezza).

11 <https://www.darktable.org/>

12 Il colore della luce viene misurato in gradi kelvin (°K). La temperatura della luce diurna si attesta su i 5500 °K e assume una colorazione blu. Per esempio, le lampadine vengono definite a luce calda se assumono una colorazione tendente al giallo-rosso, mentre sono definite a luce fredda quelle tendenti al blu.

Fig. 88 _ Nuvola di punti generata a seguito della riapplicazione del colore tramite le equirettangolari modificate. Elaborazione S. Acquaviva



o i punti generati da interferenze di tipo strumentale (come la divergenza del raggio laser rispetto alla superficie) o punti lontani estranei alle finalità preposte. Si è proceduto così al filtraggio di tali elementi mediante l'esportazione del progetto in formato .rcp, formato nativo del software Autodesk ReCap (fig. X) e a ripulire la nuvola da tali punti di disturbo mediante i tools presenti.

A seguito di questa fase che ha consentito di ottenere una nuvola di punti completa dell'intero sito, è emersa la necessità di alleggerire il dato - in quanto formato da circa 324 milioni di punti - per renderlo più gestibile senza però comprometterne la qualità e la completezza. Pertanto, la nuvola è stata esportata in formato .e57 per poter essere importata in altri software di gestione del dato, in particolare il sw Cloud Compare¹³, dove si è proceduto alla sua decimazione. Nello specifico, mediante l'utilizzo del tool *Subsample* che consente di ridurre la densità della nuvola attraverso la scelta della distanza minima tra i punti¹⁴, eliminando quelli che tra loro hanno una distanza inferiore.

Il dato così generato, filtrato e decimato, costituisce un elemento

13 Software open source

14 Si è scelto di mantenere una distanza tra i punti di 6 mm in base ai parametri di risoluzione scelti precedentemente in fase di progettazione delle scansioni.

metricamente corretto utile come base per le successive operazioni di controllo e confronto con i modelli fotogrammetrici, al fine di ottenere una documentazione quanto più accurata e un dato che fosse gestibile nel database tridimensionale.

6.2. L'acquisizione del dato: i rilievi *image-based*.

Nonostante il laser scanner utilizzato sia dotato di camera fotografica, e abbia consentito di acquisire immagini del sito, la risoluzione del dispositivo non ha restituito dati pienamente soddisfacenti. Dunque, a seguito del rilievo TLS è stato progettato un rilievo *image-based*, nell'ottica di acquisire dati di maggiore dettaglio di alcuni elementi. Tale acquisizione è stata dettata dalla volontà di avere un dato quanto più fotorealistico e cromaticamente corretto dell'area, grazie al quale leggere le differenti tessiture murarie e soprattutto registrare le ricche ed eleganti pavimentazioni musive. Inoltre, si è sperimentato l'utilizzo di differenti camere ed obiettivi al fine di valutare la risposta di ogni strumentazione in funzione dello stesso scopo prefissato e comprendere quale di essa fosse maggiormente adatta.

6.2.1. Fotogrammetria integrata: aerea e terrestre

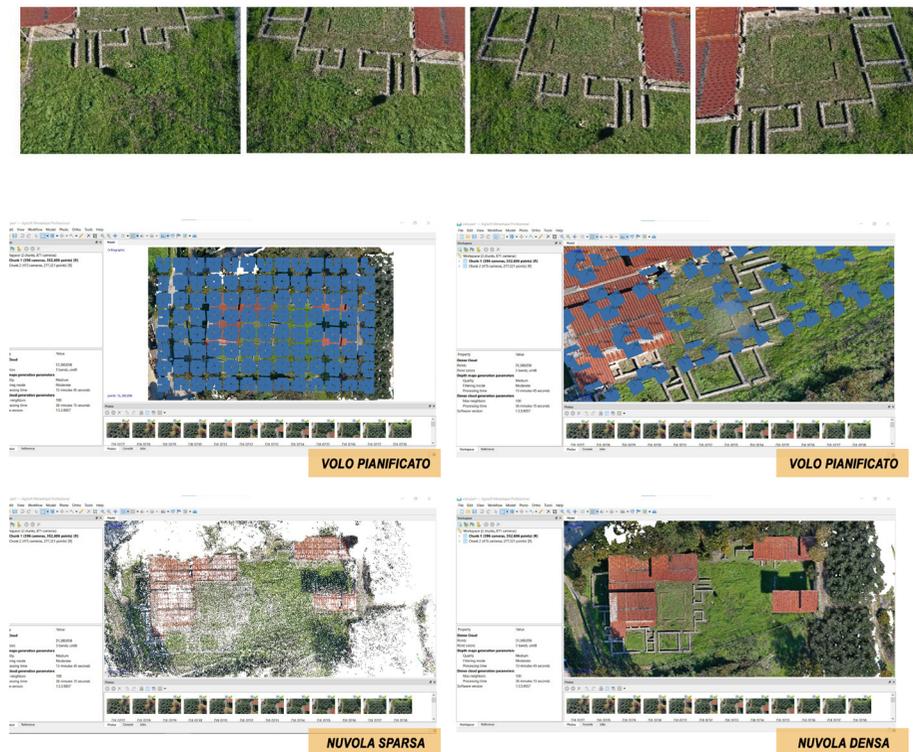
Considerata l'estensione della villa e l'articolazione degli ambienti si è proceduto compiendo un primo rilievo fotogrammetrico aereo di inquadramento tramite UAS, al fine di ottenere un dato che potesse essere l'elemento di connessione tra i rilievi di dettaglio fotogrammetrici e quelli laser.

Si è scelto di utilizzare un drone DJI Mavic 2 Pro, dotato di camera fotografica Hasselblad, modello 11d-20c, con sensore CMOS dalle dimensioni di 1 pollice e risoluzione 20 megapixel.

Com'è noto ogni operazione aerea che vede coinvolti gli UAS deve essere compiuta nel massimo della sicurezza e nel rispetto della normativa vigente. L'area di Francolise è sottoposta a limitazioni di volo a causa della vicinanza con l'aeroporto militare di Grazzanise (CE). In particolare, è prevista la possibilità di volare solo ad un'altezza massima di 60 metri¹⁵, perfettamente compatibile con le attività utili alla presente ricerca. Un

15 Per superare tale soglia sarebbe necessario richiedere una riserva di spazio aereo.

Fig. 89 _ Acquisizione dei fotogrammi ed elaborazione nuvola di punti. Elaborazione S. Acquaviva



primo piano di volo è stato programmato per ottenere una planimetria a larga scala del sito, impostando l'altezza di volo a 35 metri. Il volo è stato effettuato in modalità automatica¹⁶, a doppia griglia (*double grid*) ortogonale al fine di evitare vuoti e raggiungere una sovrapposizione ottimale dell'80% circa, con camera inclinata di circa 45° e con modalità di ripresa *trigger sequence*, che consente di effettuare scatti continui secondo un intervallo di tempo prefissato (2 sec).

In funzione dei parametri scelti e dell'area da rilevare (117mx74m) è stato determinato il tempo di volo necessario pari a 21 minuti che si è scelto di dividere in due voli separati dai quali sono stati ottenuti 407 fotogrammi. La realizzazione del volo è stata calibrata anche in funzione dei marker precedentemente apposti nell'area e registrati in prima battuta dal rilievo mediante laser scanner. La scelta di posizionare tali tipologie di target che fossero visibili e registrabili da entrambe le metodologie di rilievo è stata effettuata nell'ottica di avere dei punti in comune tra i differenti output

16 Si è scelto di utilizzare per tali procedure l'app open source pix4dcapture.

che ne consentissero un più facile e rapido allineamento per le successive operazioni di unione e confronto.

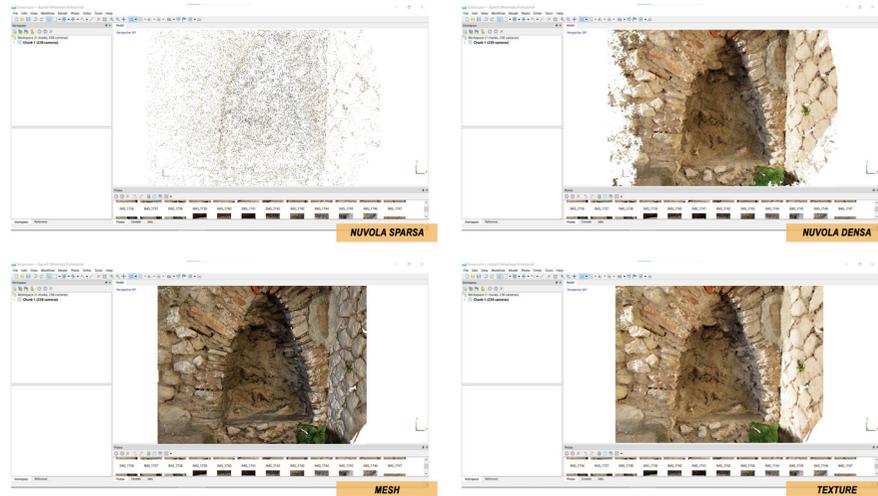
La seconda battuta di rilievo ha riguardato l'acquisizione di dettaglio delle tessiture e delle creste murarie e di alcuni elementi che caratterizzano la struttura del torchio della *pars rustica*, mediante la combinazione di fotogrammetria aerea e terrestre. L'utilizzo della fotocamera (Reflex Canon 2000D) soprattutto negli spazi più piccoli e coperti dalle tettoie in ferro ha sopperito alla mancanza di spazio di manovra per il drone e ha colmato le lacune presenti nel rilievo laser scanner, agevolando la registrazione degli elementi di dettaglio, come le strutture dell'area del torchio e del *balneum*. Il dataset aereo è stato acquisito, anche in questo caso, mediante il drone DJI Mavic 2 Pro, dividendo l'area in tre parti, anche in relazione alla durata delle batterie. I voli sono stati eseguiti in modalità manuale (volo libero) in quanto la presenza delle strutture di sostegno delle coperture e la carenza del segnale satellitare al di sotto delle stesse avrebbero potuto provocare criticità nel movimento dello strumento, provocando anche un aumento dei tempi di acquisizione.

Come già descritto nei capitoli precedenti (Cfr. cap.2) la fase di acquisizione fotogrammetrica genera un dataset costituito da fotogrammi che devono essere processati e analizzati mediante determinati applicativi per poter ricostruire la geometria e la forma delle superfici indagate ed estrapolare i prodotti 2D e 3D richiesti.

Il processamento dei dati fotogrammetrici, avvenuto mediante il software *Agisoft Metashape* basato su algoritmi *structure from motion* e di *Dense Multi View 3D Reconstruction*, ha consentito di creare nuvole di punti dall'elevato dettaglio dalla ricostruzione della posizione di presa delle immagini. I dataset fotogrammetrici, come per i dati laser, hanno subito una prima fase di editing volta a selezionare ed eliminare le immagini poco nitide e cercare di mitigare i forti contrasti cromatici che si sono verificati a causa dell'illuminazione naturale.

Seguendo poi la classica pipeline fotogrammetrica, sono stati elaborati i diversi dataset ed estrapolate le nuvole di punti. La prima fase di elaborazione ha riguardato l'allineamento per la costruzione della nuvola sparsa. Una volta settati i parametri relativi all'accuratezza, l'algoritmo interno al software, tramite il riconoscimento dei parametri di calibrazione della camera utilizzata, ha individuato i punti omologhi (*tie points*), valutando

Fig. 90 _ Elaborazione del dataset fotogrammetrico terrestre di una nicchia presente all'interno della pars rustica. Elaborazione S. Acquaviva



l'orientamento delle camere. Il modello generato è costituito da una nuvola di punti non strutturata, sulla quale viene poi generata la nuvola densa (*dense point cloud*). È stato possibile infine filtrare questo dato dai punti meno accurati e affidabili calcolando il numero di mappe di profondità che devono essere combinate per la generazione stessa dei punti della nuvola. Più basso sarà il numero della mappe di profondità meno affidabile sarà il punto. In tal modo è stato possibile avere alla fine del processo una nuvola di punti maggiormente accurata e con minor grado di errore e rumore.

Si è scelto poi di integrare i differenti dataset – mediante i marker precedentemente apposti nell'area - per ricostruire, sulla base della nuvola completa, il modello poligonale e infine, attraverso la ri-proiezione delle immagini sui triangoli della mesh, generare la texture finale. I modelli così creati sono stati fondamentali per le fasi successive di rappresentazione. In particolare, grazie all'estrazione di ortofoto - strumento dall'elevato contenuto informativo, colorimetrico e metrico – è stato possibile descrivere lo stato di fatto delle strutture e analizzare le differenti tessiture murarie. Tali elaborati, inoltre, sono stati utili per un aggiornamento e un confronto con la documentazione d'archivio rinvenuta durante la fase di ricerca. I modelli 3D invece hanno costituito la base per le successive sperimentazioni in ambiente GIS.

6.2.2. Rilievo delle pavimentazioni musive

Un rilievo più specifico invece ha riguardato le pavimentazioni musive presenti nell'area della *pars urbana*, impiegando la fotogrammetria aerea, per evitare il contatto diretto con i mosaici, alcuni dei quali in scarse condizioni. Le pavimentazioni musive che caratterizzano la villa di Francolise – realizzati in *opus tessellatum* e *scutulatum* - costituiscono una ricca documentazione storica e allo stesso tempo hanno fornito informazioni circa la cronologia del sito¹⁷. Hanno subito in tempi recenti interventi di restauro sia in laboratorio (Cotton, 1978) che *in situ* (Carcaiso, 2007). Ad oggi grazie alle moderne tecniche di rilievo è possibile generare in tempi brevi un calco digitale della pavimentazione senza ricorrere ai metodi del rilievo a contatto su polivinile o calchi in vetroresina¹⁸, ricreando un modello metricamente accurato dell'oggetto che consente non solo di produrre le classiche rappresentazioni grafiche bidimensionali per studi iconografici, ma al tempo stesso di avere un vero e proprio documento sullo stato di conservazione del mosaico, permettendo di leggerne le deformazioni, divenendo un vero e proprio archivio digitale per futuri interventi.

Sono stati pertanto acquisiti numerosi fotogrammi¹⁹ per poter generare un modello dall'elevata resa fotorealistica. Questi presentano un overlap dell'80% e sidelap circa del 40% e si è stabilito un GDS (Ground sample distance) pari a 1,2 mm/pixel. La registrazione delle immagini è stata eseguita ponendo l'asse della camera in posizione perpendicolare al piano di campagna ed integrando successivamente riprese con la camera inclinata di 45°. La campagna di acquisizione è stata suddivisa in quattro voli per un tempo totale di volo pari a 68 minuti durante il quale sono stati acquisiti 1332 fotogrammi per otto tipologie di pavimentazioni differenti.



Fig. 91 _ Fase di acquisizione dei fotogrammi

17 In particolare, lo studio del disegno dei mosaici, come anche degli affreschi, e la loro interpretazione consentono di inquadrare l'opera e il suo contesto in un determinato stile legato ad un determinato periodo storico.

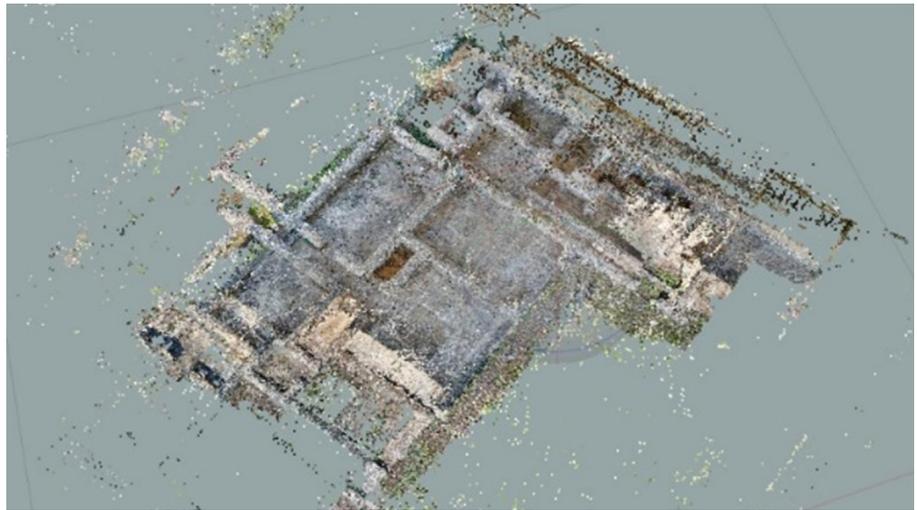
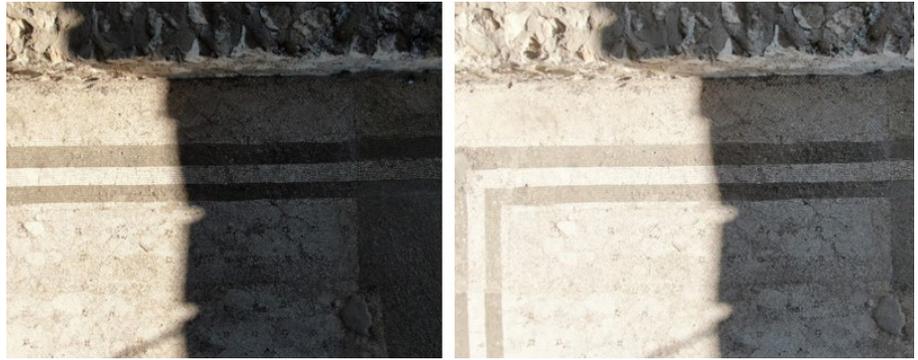
18 Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio, art.107 del Dlgs 42/2004: «È di regola vietata la riproduzione di beni culturali che consista nel trarre calchi dagli originali di sculture e di opere a rilievo in genere, di qualunque materiale tali beni siano fatti. Sono ordinariamente consentiti, previa autorizzazione del soprintendente, i calchi da copie degli originali già esistenti»

19 È stato utilizzato anche in questo caso il drone Mavic 2 Pro.

Fig. 92 _ Processi di photo-editing per il miglioramento della qualità di un'immagine. Elaborazione S. Acquaviva

Fig. 93 _ Nuvola di punti densa. S. Acquaviva

Fig. 94 _ Modello poligonale texturizzato. S. Acquaviva



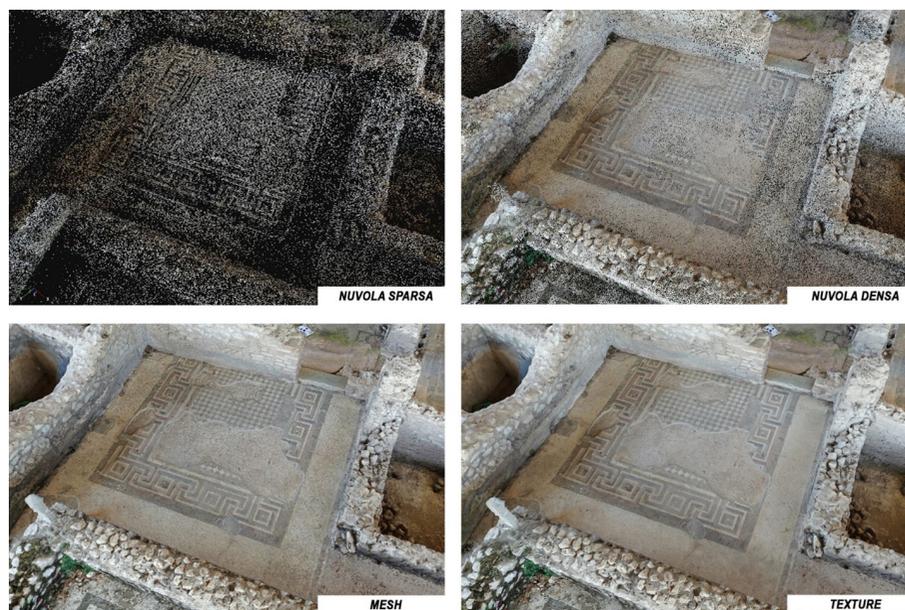


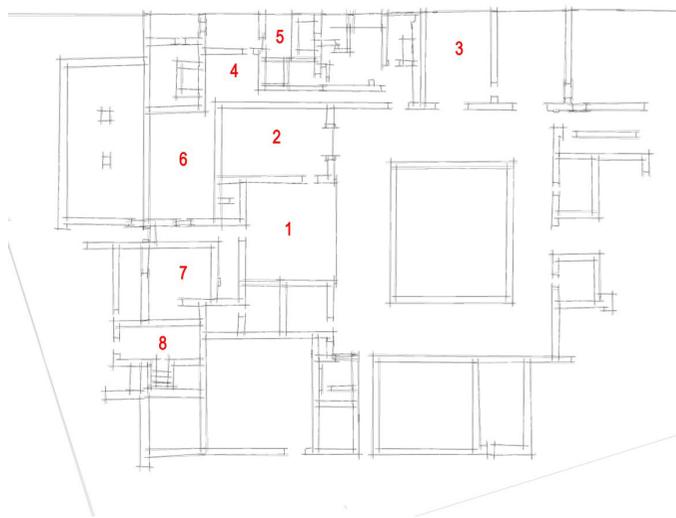
Fig. 95 _ Particolare del processamento fotogrammetrico del mosaico dell'area del Balneum. Elaborazione S. Acquaviva

I tempi di acquisizione anche in questo caso sono stati molto elevati in quanto eseguiti in modalità manuale dovendo effettuare il volo al di sotto delle coperture controllando il drone manualmente mediante il controller. L'illuminazione naturale se da un lato ha consentito di effettuare foto nitide, dall'altro, nelle aree poste al margine della copertura, ha generato forti cambi di illuminazione creando contrasti netti tra luci e ombre. Pertanto, per poter uniformare la cromia della texture sono state testate diverse procedure di photoediting che hanno però ridotto soltanto parzialmente la variazione di luce.

Le fasi di processamento del dato sono state le medesime di quelle effettuate in precedenza. La differenza sostanziale risiede nei parametri scelti per la creazione dei modelli puntiformi e poligonali, elaborati in questo caso con maggior dettaglio (*high level*). Come nell'elaborazione dei rilievi laser scanner, anche per la nuvola di punti fotogrammetrica si è ricorso a tecniche di filtraggio al fine di ottenere nelle fasi successive una mesh geometricamente corretta, evitando la creazione di errori topologici tra i triangoli della superficie costruita.

Una lettura attenta delle ortofoto estrapolate dalle operazioni di rilievo ha permesso un'analisi conoscitiva indirizzata a definire la composizione e, in

Fig. 96 _ individuazione in pianta delle pavimentazioni musive della villa. elaborazione grafica S. Acquaviva



alcuni casi, le regole che sottendono le forme di tali mosaici. Gli schemi compositivi sono stati analizzati sia singolarmente che in rapporto a tutta la figurazione per avere una lettura completa delle relazioni geometriche che intercorrono tra le parti. In particolare, sono stati rilevati i mosaici e le pavimentazioni appartenenti al *tablinum* (1), ai due *triclinia* (2,3), al *balneum* (4,5), ai 3 *cubicula* (6,7,8)²⁰.

Mosaico 1: Realizzato nel II periodo in *opus tessellatum* e *scutulatum*, decora l'ambiente del *tablinum* (6,9mx6,5m). La pavimentazione ha una decorazione semplice e lineare. L'accesso dal peristilio è caratterizzato da una soglia suddivisa in tre fasce, la prima composta da listelli in marmo bianco, la seconda caratterizzata da una decorazione geometrica con esagoni policromi in successione che racchiudono al loro interno elementi floreali, la terza è formata da due fasce semplici, bianca e nera (B). Il fondo del mosaico è costituito da tessere bianche intervallate da piccole crocette (4 tessere nere e una bianca centrale) e inquadrato da tre cornici, due con tessere nere e la centrale con tessere bianche, utilizzate per inquadrare l'intero mosaico. Al centro è possibile ritrovare segni che richiamano la presenza di un'emblemata (C), andato perso, di cui oggi è possibile riconoscere soltanto una piccolissima porzione caratterizzata da tessere bianche, rosse e nere. La seconda soglia, che conduce all'ingresso ovest, è adornata con un piccolo mosaico di una porta urbica (A), la cui fornice è composta da un arco a tutto sesto, con ai lati due piedritti in tessere

²⁰ La descrizione tecnico-costruttiva e di dettaglio sono analizzate in Cotton 1968, Carcaiso 2007, Carcaiso 2012.

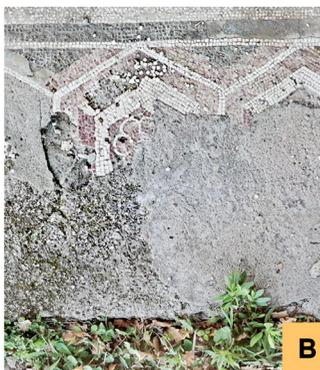


Fig. 97 _ Mosaico del tablinum. Fotografie a cura dell'autrice

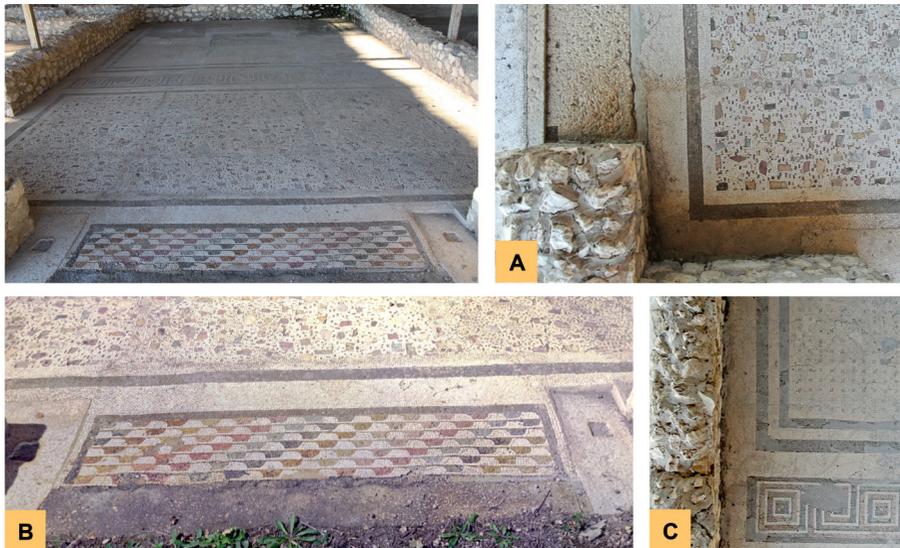
Fig. 98 _ Vista piana, estrapolata dai rilievi precedentemente compiuti, del mosaico del tablinum. elaborazione grafica S. Acquaviva



Fig. 99 _Mosaico del triclinum (mosaico 2).
Fotografie a cura dell'autrice

dorate; il disegno di tale soglia richiama in qualche modo la sua funzione di ingresso del *tablinum*, di attraversamento della porta. Ad oggi il mosaico è conservato in discrete condizioni a meno della soglia principale dove il disegno del mosaico è del tutto scomparso a causa dell'umidità e dell'acqua che filtra dalla copertura.

Mosaico 2: il *triclinium* è decorato con un mosaico geometrico in opus *tessellatum* e *scutulatum* (7,6mx4,8m). Realizzato anch'esso nel II periodo, ha un motivo decorativo articolato in fasce dettato dalla funzione dell'ambiente (anticamera e sala principale). In particolare, la soglia (B) – che in ogni ambiente costituisce un mosaico nel mosaico – ha un disegno in squame embricate policrome, bipartite e bicolori, che danno un effetto tridimensionale. Il mosaico dell'anticamera (A) è realizzato in opus *scutulatum* con tessere e frammenti di marmo, posizionati in modo casuale generano un disegno vibrante e armonioso, e bordato da una cornice in tessere nere. L'area principale è decorata da una soglia con meandri e svastiche prospettiche (C), che funge da separazione tra i due mosaici principali. Un emblema centrale con motivo geometrico di rombi policromi circondato da una cornice di tessere nere e un tappeto



di tessere bianche in cui sono incastonate tessere nere. Purtroppo, a causa delle continue infiltrazioni d'acqua e la forte umidità è forte il degrado che sta danneggiando anche in questo caso parte del mosaico.

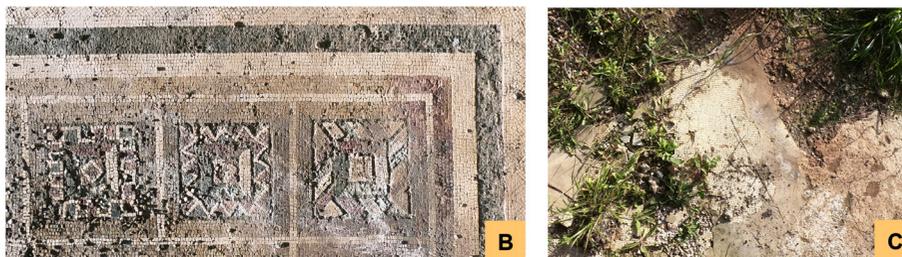


Fig. 100 _ Ortofoto estrapolata dai rilievi precedentemente compiuti del mosaico del triclinum. elaborazione grafica S. Acquaviva

Mosaico 3: anche il secondo *triclinium* risale al II periodo della villa ed è in opus *tessellatum* (4,8mx6,5m). L'attuale stato di degrado e i danni provocati dai lavori di costruzione delle fondazioni del nosocomio negli anni '60 ne hanno cancellato la maggior parte della decorazione. Il perimetro del mosaico è caratterizzato da una fascia di 15 cm di tessere bianche (A). In successione si ritrovano tre fasce di tessere monocromatiche (nera, bianca, ocra) che fungono da cornice ad una fascia cassettonata decorata

Fig. 101 _ Mosaico del triclinum (mosaico 3).
Fotografie a cura dell'autrice

Fig. 102 _ Ortofoto estrapolata dai rilievi del
mosaico del triclinum (mosaico 3). Elaborazione
grafica S. Acquaviva



con motivi geometrici e floreali. Ogni quadrato a sua volta è caratterizzato da cornici con decorazione diversa: bande inclinate alternate, bande diagonali e meandri semplici. Cerchi, rosette, elementi floreali decorano infine il centro di ogni quadrato (B). Nelle poche tracce rinvenute di tale raffigurazione è possibile leggere come il ritmo e la simmetria scandiscono la composizione. Purtroppo per quanto tale composizione sia di natura geometrica e scandita dalla ripetizione dei sotto-elementi risulta di estrema difficoltà ricostruirne il disegno complessivo, in quanto sono presenti soltanto pochi frammenti di un tessellato bianco (C) in continuazione con la nota decorazione ma non si evince correttamente la presenza di un disegno decorativo nella fascia posta all'ingresso. Una prima ipotesi potrebbe consistere nella ripetizione per tutto il perimetro dell'ambiente del cassettonato, una seconda ipotesi invece porterebbe a richiamare la decorazione a fasce del *triclinum* precedentemente descritto (mosaico 2).

Mosaico 4: appartenente al I periodo della villa, nelle fasi successive è stato per metà demolito per costruire il *balneum (frigidarium)* della villa del II periodo (3,8mx3,4m). Essendo un mosaico geometrico ritmo e proporzione scandiscono ogni l'elemento, dal generale al particolare. È possibile poi scomporre il mosaico in diverse sotto parti. Ciò che emerge a prima vista è la parte centrale formata da una decorazione a scacchiera bicroma (tessere bianche e nere); ogni quadrato ha un lato pari a 6 cm. Tale disegno è contornato da tre cornici semplici monocrome di diverso colore – bianco, nero e rosso – e caratterizzate da uno spessore, in senso trasversale, di 4, 5 e 6 tessere.

Fig. 103 _ Mosaico del balneum (mosaico 4).
Fotografie a cura dell'autrice

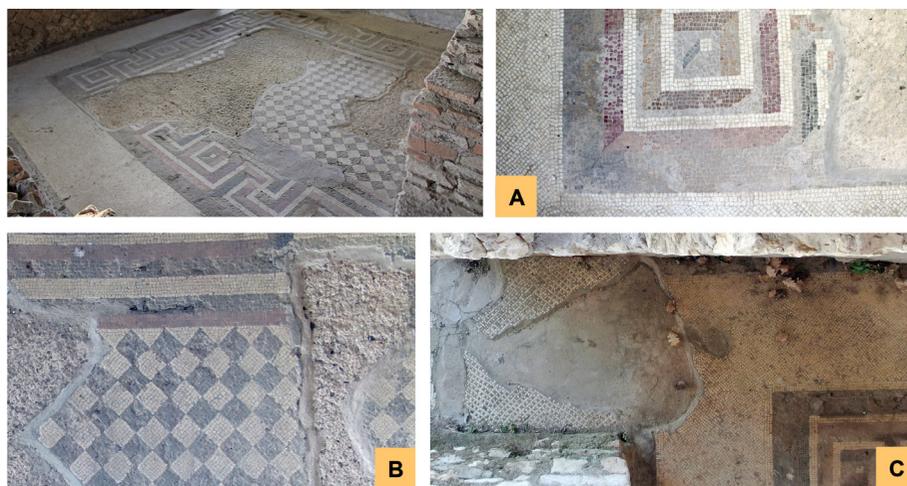
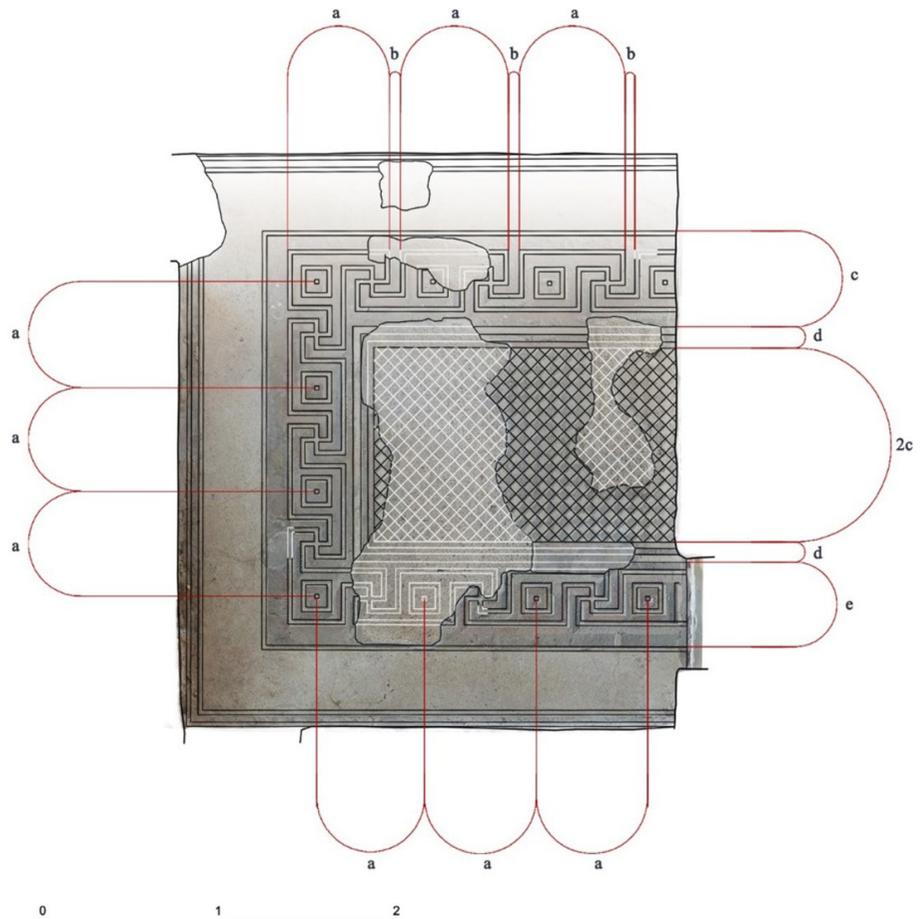


Fig. 104 _ Rappresentazione bidimensionale del mosaico del balneum con ipotesi ricostruttiva del disegno originario. Elaborazione grafica S. Acquaviva



L'elemento che però caratterizza tutta la composizione è la cornice costituita da un motivo a meandro di svastiche alternato a quadrati in prospettiva, caratterizzata da moduli regolari. La tridimensionalità della cornice è sottolineata dall'utilizzo di diverse tonalità di colore. Sono presenti poi tre fasce più esterne di differente spessore formate da tessere bianche, differenziate tra loro dalla variazione dell'inclinazione delle tessere stesse che si dispongono inclinate a 45° rispetto alle altre. La soglia di collegamento di questo ambiente con il *cubicola* (6) è caratterizzata da tessellato bianco, verde e rosso che richiamano i colori del mosaico interno.

Pavimentazione 5: La pavimentazione che decora il calidarium è in lastre di marmo greco con venature bluastre (1,9mx1,1m). Probabilmente

La trasposizione del reale nello spazio digitale: i rilievi reality-based. Acquisizione e processamento del dato

fu utilizzato marmo di rimpiego proveniente dalla stessa villa e facente parte di decorazioni parietali. Il disegno di queste lastre è caratterizzato da un disegno geometrico quadrangolare, ma disposto in modo non simmetrico. Le lastre, infatti, non seguono un disegno regolare ma sono posizionate senza un disegno preciso, quasi a voler soltanto realizzare la pavimentazione e non per effetto decorativo.



Fig. 105 _ Pavimentazione marmorea del balneum. Fotografia a cura dell'autrice.

Fig. 106 _ Ortofoto della pavimentazione marmorea del calidarium, della struttura della vasca e dei tubuli. Elaborazione grafica S. Acquaviva 98



Mosaico 6: realizzato in *opus scutulatum* in due momenti diversi (4,7mx7,6m).

Fig. 107 _ Mosaico del cubiculum (6). Fotografie a cura dell'autrice

Fig. 108 _ Ortofoto estrapolata dai rilievi del mosaico del cubiculum (mosaico 6). Elaborazione grafica S. Acquaviva

L'area a destra risale alla villa del I periodo, mentre quella a sinistra al



periodo IA (C). È possibile, inoltre, notare come sia differente dagli altri mosaici di epoca successiva non presentando decorazioni geometriche. È costituito da una cornice esterna di circa 40 cm in tessere rettangolari di calcare (A), disposte a coppie secondo un intreccio definito 'a canestro', che inquadra il pavimento in tessere bianche di calcare e pietre colorate (B). Anche qui come nel triclinium per quanto le tessere siano disposte in

modo casuale creano una decorazione dal forte impatto visivo e di colore cangiante.

Mosaico 7: Realizzato nel periodo IA costituisce un semplice pavimento in calcare in cui sono incastonati tessere di mosaico nere (4,4mx5m). A causa di cedimenti del terreno risultava sconnesso e caratterizzato da fratture, consolidate in anni recenti mediante interventi di restauro.

Fig. 109 _ Mosaico del cubiculum (7). Fotografie a cura dell'autrice

Fig. 110 _ Mosaico del cubiculum (8). Fotografie a cura dell'autrice



Mosaico 8: questo mosaico è una commistione di diverse fasi. La pavimentazione della parte a nord-est, realizzata nel periodo IA, ha un disegno che risponde perfettamente all'articolazione funzionale del cubiculum (camera da letto). In particolare, risulta divisa in due parti da una fascia di tessere bianche bordata da triangoli neri che si va a inserire

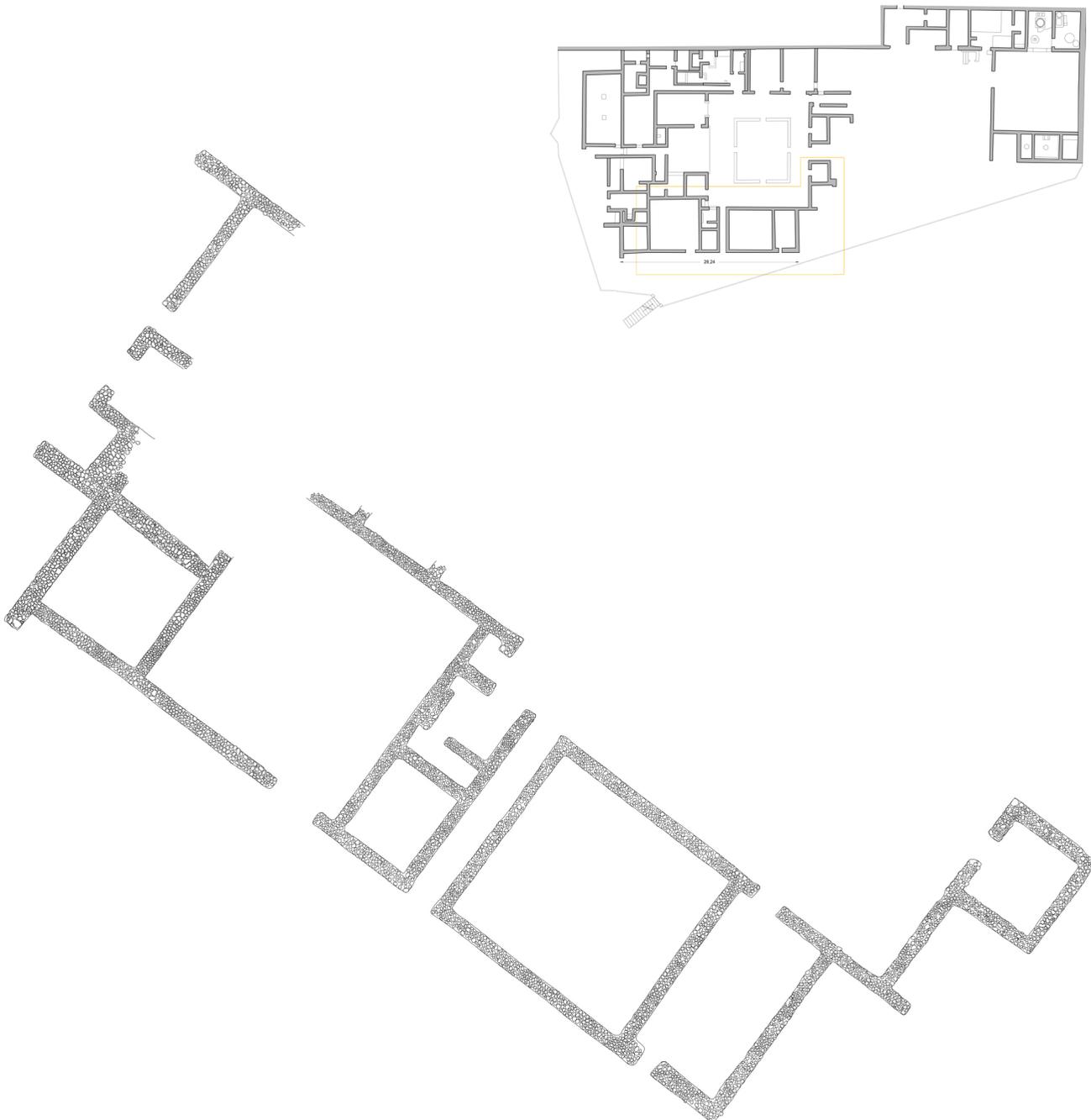
perfettamente tra i due pilastri che fuoriescono dalle pareti e che rappresentano il limite probabilmente per il posizionamento del *lectus*. Il resto dell'ambiente aveva una pavimentazione in scaglie di calcare bianco con all'interno allettate tessere nere. Nel II periodo l'ambiente subisce modifiche che ne alterano le dimensioni in lunghezza, e nella composizione viene inserita una fascia di meandri e svastiche con tessere bianche e nere e in successione una fascia decorata con scaglie di calcare (verde, rosa e nero) inserite in un impasto di malta, marmo e calcare.

La lettura e l'analisi approfondita di tali mosaici, coadiuvata dai dati generati dai rilievi reality based, in particolar modo le ortofoto che hanno permesso di avere una visione d'insieme di tali decorazioni ottenendo un punto di vista differente da quello acquisito durante i sopralluoghi, non si limita a considerarne gli aspetti iconografici ma consente di comprendere anche le caratteristiche materiche, oltre che l'eventuale stato di degrado che può interessare le tessere o il supporto. Con tali strumenti digitali è possibile con un unico modello pervenire a informazioni sempre più dettagliate a seconda delle esigenze di studio, come per esempio la descrizione dei materiali adottati, il dimensionamento delle tessere oppure la presenza di deformazioni.



La trasposizione del reale nello spazio digitale: i rilievi reality-based. Acquisizione e processamento del dato







6.3. Procedure di integrazione e confronto delle nuvole di punti

Nei paragrafi precedenti si è visto come i dati provenienti dai rilievi reality based costituiscano elementi dall'elevata accuratezza e dettaglio, dovuto allo sviluppo di strumenti sempre più performanti. Le nuvole di punti, generate dai rilievi laser scanner quanto quelli fotogrammetrici, costituiscono però modelli simili nel concetto ma con caratteristiche diverse per quanto concerne la struttura, diretta conseguenza delle singole caratteristiche degli strumenti, del contesto e dell'operatore che le utilizza. Per avere un'ulteriore stima della qualità metrica delle nuvole di punti del sito archeologico si è proceduto con comparazione tra gli output. La sovrapposizione delle nuvole è avvenuta mediante il software cloud compare che consente di importare nello stesso spazio di lavoro nuvole di punti di differente formato. In particolare, il dato laser scanner ha costituito il riferimento per rototraslare la nuvola fotogrammetria in quanto costituisce un dato corretto dal punto di vista metrico e geometrico e orientato correttamente. Per poter procedere all'allineamento e comparazione ci si è serviti di target posizionati accuratamente nella scena che sono stati ripresi durante entrambi i rilievi, in modo tale da fornire i punti di aggancio tra i due modelli puntiformi. Pertanto, una volta importate le due nuvole di punti all'interno del software si è proceduto attraverso il tool Align ad allinearle mediante almeno tre coppie di punti in comune. A seguito di questo primo allineamento manuale si è passati ad una registrazione più rigorosa mediante l'algoritmo ICP del software stesso. Il confronto tra la nuvola laser e fotogrammetrica ha evidenziato uno scostamento nell'ordine di qualche millimetro, notando che i valori più alti si sono concentrati nelle aree ricoperte di vegetazione, che hanno creato disturbo nel momento di acquisizione del dato

ripercuotendosi, come si vede, nelle fasi successive.

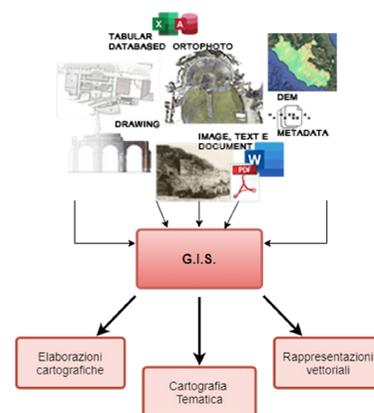
Si è scelto poi di integrare i due dataset – mediante i marker precedentemente apposti nell'area - per ricostruire, sulla base della nuvola completa, il modello poligonale e infine, attraverso la ri-proiezione delle immagini sui triangoli della mesh, generare la texture finale.

CAPITOLO SETTIMO

**Gestione e modellazione del dato tridimensionale
nello studio della villa di San Rocco**

Quando si parla di patrimonio archeologico si deve sempre tenere conto della sua storia millenaria che risulta spesso direttamente proporzionale alla fragilità delle strutture e alla volontà di proteggerle e conservarle per le generazioni future. Ogni azione volta, pertanto, alla conservazione e alla tutela di tali beni comporta la formazione di un'ingente mole di dati, che ha inizio dalla documentazione storica, passando per le analisi dello stato di fatto, fino ad arrivare alla programmazione delle operazioni future per la loro salvaguardia.

Più che in ogni altro ambito, in quello archeologico, i database costituiscono un sistema fondamentale per archiviare tutti i dati provenienti dalle operazioni di scavo e di lettura delle evidenze archeologiche (schede US, schede USM, schede dei reperti), nonché i dati di rilievo e le successive rappresentazioni. Ma ancora più efficaci, in questi contesti, sono i sistemi GIS che costituiscono un supporto indispensabile per rappresentare i diversi fenomeni spaziali, in quanto, permettono l'unione tra elementi grafici e cartografici correttamente georeferenziati con informazioni derivanti dalle più svariate analisi. Come si è visto la costruzione del database delle ville romane (cfr. par. 4.2) ha permesso di collegare alla corretta posizione geografica di ogni sito, individuati mediante layer puntuali, una moltitudine di dati che possono essere sia visualizzati che interrogati. Questo consente di restituire le differenti informazioni sotto forma di mappe tematiche,



artefatti dalla forte efficacia visiva. ciò è dovuto al fatto che un fenomeno è percepito con più facilità se collegato ad un'immagine chiara e precisa.

L'integrazione tra le metodologie del rilievo e della rappresentazione e i sistemi GIS ha portato nel tempo a nuove sperimentazioni in questo campo. L'utilizzo delle ortofoto, che è possibile generare dai dati laser e fotogrammetrici, ha permesso una lettura più attenta e rigorosa delle diverse evidenze archeologiche, rappresentate poi mediante i classici strumenti della grafica vettoriale (piane, sezioni, prospetti e assonometrie) ed infine collegate a una moltitudine di dati di natura diversa. Tale impostazione consente di effettuare analisi incrociate a più ampio raggio e con diversi livelli di dettaglio che implementano l'interpretazione e la comprensione dell'oggetto indagato. In tale ottica il GIS costituisce pertanto una visione grafica del mondo reale e il rilievo e la rappresentazione digitale aiutano a specificare i diversi fenomeni legati ad esso.

7.1. Scelte metodologiche e individuazione del processo operativo per la costruzione di un modello informativo dell'evidenza archeologica

Come anticipato nei capitoli precedenti, non esiste ancora una soluzione univoca per archiviare la grande mole di informazioni di diversa natura atte a descrivere e documentare il patrimonio archeologico. Si assiste spesso alla progettazione di sistemi creati *ad hoc* che consentono di raccogliere e archiviare dati e informazioni, ma non rappresentano però strumenti facilmente condivisibili e gestibili, il che limita la loro applicazione a singoli casi. Ne sono un esempio i sistemi basati sulla modellazione parametrica (BIM/HBIM) che consentono, attraverso la costruzione di modelli geometrico-informativi, la gestione dei dati riferiti alle componenti architettoniche ma difficilmente utilizzabili nei contesti archeologici perché questi ultimi sono caratterizzati da forme non standardizzate non presenti nelle librerie di oggetti parametrici. Spesso per poter raccontare e esplicitare le informazioni di un determinato caso studio si fa ricorso anche ai sistemi di realtà virtuale nell'ambito dei quali si associano informazioni, scelte a priori, agli oggetti tridimensionali, ma che costituiscono semplicemente dei visualizzatori informativi.

Nella maggior parte dei casi però se non si ricorre a questi *single systems*, si ha a che fare ancora con una documentazione testuale e grafica – bidimensionale e tridimensionale – raccolta secondo modalità differenti e non rapportate tra loro. Si tratta di documenti (immagini, disegni, testi, modelli) leggibili con strumenti e *tool* differenti in quanto ognuno caratterizzato da un proprio formato (dwg, jpeg, pdf, etc.) e che purtroppo, di sovente, sono custoditi in diversi luoghi¹. Questa condizione implica un dispendio di tempo nella fase di conoscenza preliminare di un bene, nonché può influire negativamente anche sull'efficacia della ricerca.

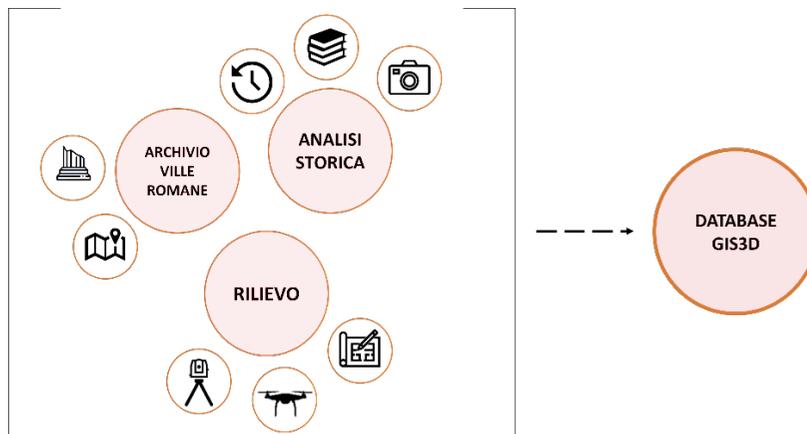
L'obiettivo, pertanto, di questo studio è stato quello di definire un approccio metodologico per la strutturazione di un sistema informativo tridimensionale (GIS 3D) che fosse capace di gestire grandi volumi di dati, basato sull'utilizzo dei modelli – puntiformi e poligonali - provenienti dai rilievi *reality-based*. Questi ultimi divengono il supporto digitale a cui legare dati di diversa natura utili al riconoscimento dell'oggetto archeologico, nonché strumento in grado di rendere fruibili e interrogabili dati di natura storica, geografica, metrica attraverso la possibilità di compiere analisi multi-scalari. Una struttura sempre implementabile e condivisibile che si serve di standard e linguaggi comuni, aperta agli apporti metodologici e procedurali di settore derivanti dalla collaborazione di differenti figure professionali². Tale processo metodologico è stato sperimentato per la villa romana di San Rocco in Francolise che costituisce un caso studio ottimale in quanto ricca di stratificazioni storiche e di elementi di pregio che possono essere strutturati in un archivio digitale.

1 Nella maggior parte dei casi tutta la documentazione non è sempre conservata e catalogata nel medesimo luogo. Se si prende ad esempio la villa di Francolise, durante le fasi iniziali della ricerca si è constatato che parte della documentazione grafica e i reperti (non accessibili) era conservata presso l'ufficio della Soprintendenza di Caserta e Benevento mentre la documentazione fotografica presso l'archivio fotografico del Museo Nazionale di Napoli.

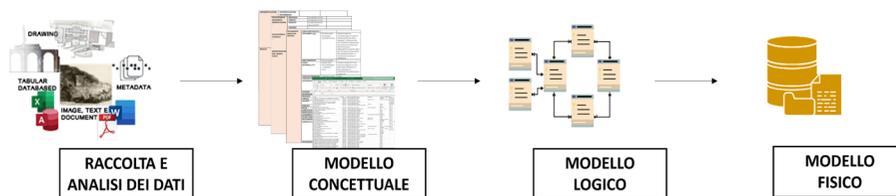
2 Di fondamentale importanza è stato il confronto con archeologi esperti del settore grazie ai quali si sono evidenziate le diverse criticità in tale ambito e le necessità ricercate.

Fig. 111 _ Base di dati da importare in ambiente GIS. Elaborazione grafica S. Acquaviva

Fig. 112 _ Schema di progettazione di un database



La problematica fondamentale relativa alla possibilità di trasposizione del dato tridimensionale in ambiente GIS ha costituito soltanto la punta dell'iceberg di questa sperimentazione. Poterlo importare non significa necessariamente poterlo gestire e manipolare e renderlo rispondente a ciò che rappresenta anche nel significato. A priori bisogna definire un modello concettuale e logico utile alla costruzione della struttura di base del sistema e delle relazioni tra oggetti e dati, per creare un database archeologico efficace e integrare armoniosamente e rendere solidali, in un'unica piattaforma, dati bidimensionali, tridimensionali e alfanumerici. È infine necessario stabilire in che modo rendere accessibili le informazioni - mappe, 3D, tabelle - per renderle visualizzabili e correttamente leggibili.



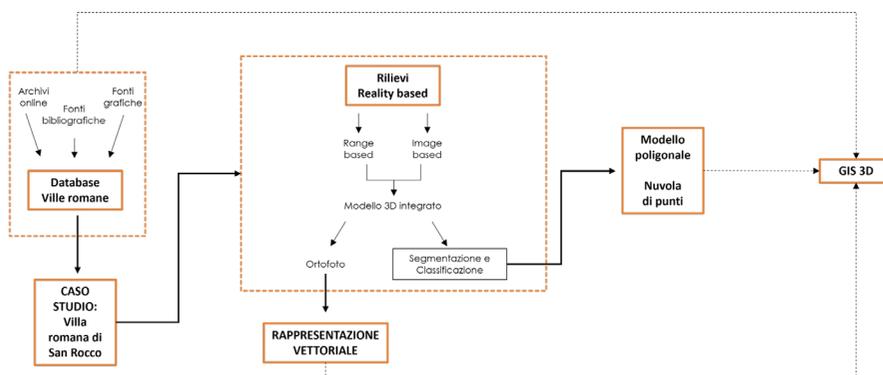


Fig. 113 _ Diagramma identificativo dei dati da inserire nel sistema GIS 3D. Elaborazione grafica S. Acquaviva

È evidente che la costruzione di un database per i siti archeologici, spesso caratterizzato da evidenti stratificazioni interrelate tra loro, rappresenta uno strumento efficace dove ogni oggetto o manufatto è legato non soltanto a ciò che rappresenta ma al contesto che lo circonda. C'è l'esigenza quindi di mostrare e di consentire un'organizzazione corretta dei dati, realizzando una struttura gerarchica grazie alla quale interrogare il sistema e ricevere informazioni integrate in modo da comprendere più approfonditamente i legami tra le diverse parti e i loro significati.

Come già anticipato, trattandosi di un sito archeologico già sottoposto a campagne di scavo, la villa di Francolise presenta notevole documentazione testuale che assieme alle rappresentazioni grafiche, bidimensionali e tridimensionali, aggiornate grazie ai rilievi effettuati nell'ambito di questo studio, ha bisogno di essere catalogata ma soprattutto correlata agli elementi che descrive.

Alcuni studi cronologici e storici su elementi campione della villa, come per esempio i mosaici che decorano le pavimentazioni, anche se già compiuti (Cotton M., 1968) rimangono elementi a sé stanti senza un vero collegamento *interattivo* con il loro reale significato. È possibile, inoltre, far riferimento ai reperti, per esempio i diversi frammenti di tegole o di elementi in terracotta, prodotte dalle fornaci site nella villa, che oggi sono conservati presso gli archivi della soprintendenza e che non risultano facilmente visibili e distaccati dal loro luogo di rinvenimento. Realizzare schede informative per ogni elemento collegate ad un modello tridimensionale dell'oggetto/sito, a sua volta collocato nello spazio rispetto alla corretta posizione in fase di rinvenimento, potrebbe aiutare

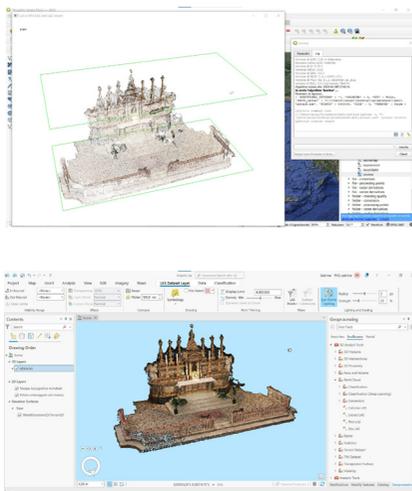


Fig. 114 _ Importazione nuvola di punti in QGIS e ArcGIS. Elaborazione S. Acquaviva

nelle successive ipotesi conoscitive e ricostruttive.

Pertanto, la volontà di implementare un sistema informativo con forme tridimensionali cui collegare le informazioni derivanti dalle operazioni di rilievo digitale ha comportato il dover valutare a priori quale fosse lo strumento più adatto per effettuare e portare avanti la sperimentazione, uno strumento in grado di poter accogliere e integrare i risultati di strumenti esterni differenti. L'architettura del sistema GIS per essere utile alle finalità della ricerca oltre a consentire l'importazione e la gestione dei dati 3D deve al tempo stesso essere costruita per possedere le funzionalità necessarie per rendere il sistema interattivo e consentire di interrogare i dati di natura diversa, sia in modo integrato ma anche per analisi puntuali.

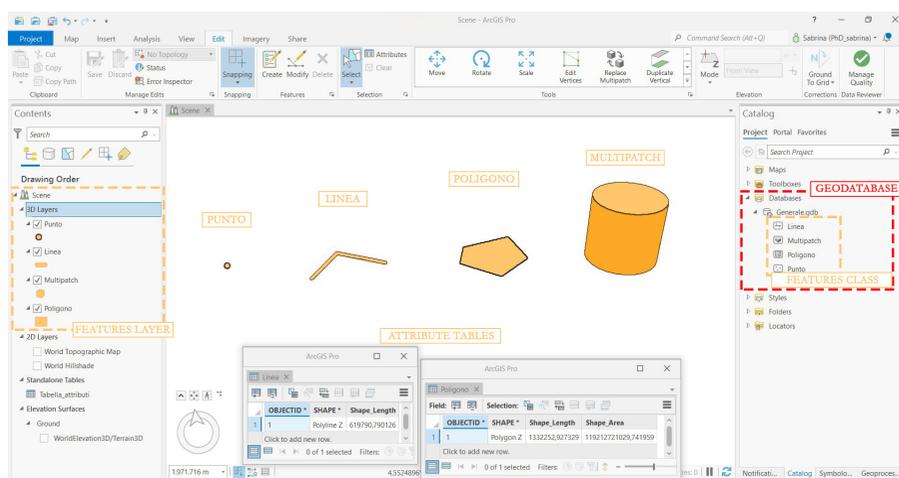
Ad oggi esistono numerosi applicativi GIS, sia open source che commerciali, che rappresentano e gestiscono correttamente il mondo reale in due dimensioni, ma presentano numerose difficoltà per la gestione del dato tridimensionale. Quelli più utilizzati sono rappresentati dal software open source QGIS e quello proprietario ArcGIS della ESRI. Se si prendono in considerazione questi due software e si confrontano i differenti tool presenti nei sistemi, spesso si tende a prediligere il primo per la possibilità di personalizzazione e modifica del codice sorgente nonché per la disponibilità di un numero cospicuo di plug-in che aiutano gli utenti a svolgere le analisi più disparate. Il software della ESRI, invece, è considerato un software chiuso, in quanto non può essere modificato da privati ed è spesso utilizzato solo per grandi progetti. Spesso si confonde anche la natura open source³ di QGIS in quanto viene utilizzato e scelto maggiormente per la sua gratuità.

In questo contesto sono stati sperimentati inizialmente entrambi i software per comprendere quale sarebbe stato l'applicativo più adatto per la sperimentazione. Se si analizzano dal punto di vista del dato tabellare e vettoriale, entrambi presentano le medesime opportunità e caratteristiche, ognuno con la sua veste grafica (GUI) personalizzata. Anche le analisi spaziali di unione, sovrapposizione, intersezione e le interrogazioni sono simili tanto sui dati vettoriali, su quelli raster, che quelli privi di geometria.

³ Erroneamente spesso un software open viene considerato gratuito a tutti gli effetti. In realtà, i software sono considerati open source quando si ha la possibilità di gestire e modificare il codice sorgente, ad indicare una licenza aperta. I software gratuiti possono considerarsi open source, ma non tutti i programmi open source sono software gratuiti.

Ma se si guarda al dato tridimensionale - geometrico, puntiforme e/o poligonale - presentano consistenti differenze, in quanto il software ArcGIS ne consente la visualizzazione e una maggior gestione e analisi all'interno del medesimo workspace, coesistendo correttamente con gli altri dati bidimensionali e alfanumerici. Sebbene il software QGIS stia implementando questa funzione, attualmente consente di realizzare soltanto modelli geometrici, gestendo il solo parametro relativo all'altezza mediante la tabella attributi, visualizzabili in un finestra differente attraverso plug-in come 3D Map e Qgis2threejs. Più limitata è la gestione dei modelli puntiformi, attraverso lo strumento di *geoprocessing lastools*, ma sempre legata ad un diverso workspace operativo, mentre risulta critica la gestione dei modelli poligonali. Pertanto, la scelta è ricaduta sulla piattaforma ArcGIS Pro di ESRI che ha fornito una serie di strumenti, estensioni e tools tali da riuscire a gestire e sostenere le differenti problematiche relative all'organizzazione del progetto. L'elemento fondamentale risiede nella struttura del Geodatabase che costituisce il contenitore univoco in cui registrare e archiviare tutte le informazioni – gli elementi del mondo reale - sottoforma di *feature class* dotati di differente geometria (punto, linea, poligono, multipatch), uniti in gruppi di classi (*features layers*) meglio conosciuti come strati informativi. Per conferire un significato reale alle forme geometriche è fondamentale l'assegnazione degli attributi (cfr. cap.3) contenuti in apposite tabelle (*attribute tables*), archiviate all'interno del Geodatabase, in quanto senza di essi le *feature classes* risulterebbero differenti solo nella forma e nelle dimensioni.

Fig. 115 _ Elementi di un geodatabase.
Elaborazione grafica S. Acquaviva



Tale strumento e la relativa struttura nascono per scopi differenti dalla suddetta sperimentazione. Principalmente oggi vengono utilizzati per analisi di grandi aree territoriali e urbane dotati pertanto di tools appositi che in questa ricerca vengono valutati e analizzati criticamente per verificarne l'efficacia e adattarli allo specifico caso.

Come specificato il dato primario della sperimentazione del sistema GIS è rappresentato dalle nuvole di punti e dai modelli poligonali texturizzati acquisiti nel corso della ricerca. Tali elementi caratterizzati da un elevato grado di dettaglio e verosimiglianza con il reale hanno subito una serie di processi di semplificazione e post processamento per poter ridurre i tempi di caricamento ed essere gestiti dalla piattaforma. Queste lavorazioni, che ne hanno facilitato l'utilizzo, sono state portate avanti affinché i modelli fossero gestibili ma non mancanti sotto il profilo qualitativo e visivo.

Per quanto però l'importazione e la gestione dei modelli di rilievo rappresenti un punto fondamentale della sperimentazione, parallelamente ciò che dà forma al sistema e che lo rende realmente un GIS 3D sono gli attributi e i livelli informativi che vengono aggiunti. L'inserimento del solo oggetto tridimensionale nello spazio di lavoro non avrebbe fatto altro che ridurlo ad un classico visualizzatore 3D. La grande apertura della piattaforma nella memorizzazione di varie tipologie di dati, principalmente sotto forma tabellare, spinge a voler registrare indefinitamente qualsiasi dato che sia possibile inserire. È stata effettuata pertanto, a priori, una scelta sulla tipologia di dati da inserire nel sistema e delle relative connessioni gerarchiche e sulle modalità di inserimento e collegamento all'elemento tridimensionale, al fine di garantire che le relazioni instaurate tra di essi fossero rispondenti al fenomeno analizzato senza creare letture errate in fase di analisi. Sono state redatte tabelle apposite relative alle tecniche costruttive murarie, sui mosaici e sulle forme di degrado presenti - confluite poi nel sistema GIS sottoforma di tabelle attributi - sulla base di ricerche di tipo archeologico, storico-architettonico ed archivistico-documentarie, individuando i principali esempi leggibili ancora all'interno della villa.

La catalogazione e la caratterizzazione delle tecniche edilizie e delle opere murarie, avvenuta parallelamente allo studio degli output di rilievo, ha anche aiutato a segmentare e classificare i modelli 3D, in quanto ciò che si genera a seguito del processamento dei dati grezzi sono elementi

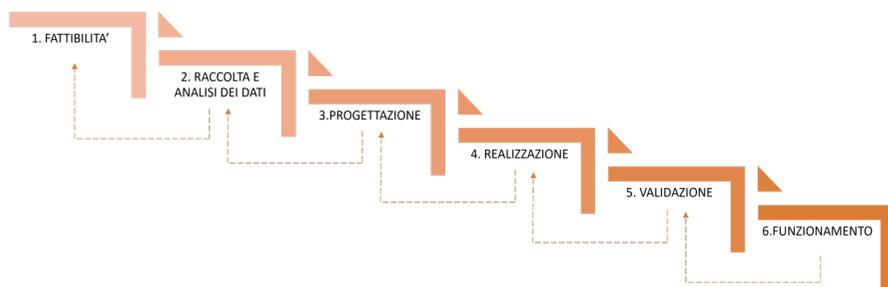
omogenei e non consapevoli del loro apporto informativo. In tal modo è stato possibile collegare correttamente gli attributi alle porzioni di modello specifico. La strutturazione di questi modelli collegati alle *attribute table* e le successive relazioni ad elementi altri – rappresentazioni bidimensionali, tridimensionali e testuali - forniscono la base per le successive interrogazioni sul sistema, per analizzare il contesto archeologico della villa ed estrapolare le informazioni necessarie. Tale articolazione induce a comprendere come queste operazioni non siano in realtà standardizzate, ma devono essere analizzate e strutturate caso per caso a seconda di ciò che si vuole rappresentare per creare un workflow operativo utile.

Fig. 116 Ciclo di vita di un sistema informativo.
Elaborazione grafica S. Acquaviva

7.2. Progettazione del *geo-database intra-site* della villa

Lavorare all'interno di un sistema GIS significa operare in un contesto che rappresenta una visione esemplificativa dei dati che compongono la realtà fisica. Inoltre, rispetto ad una rappresentazione puramente geometrica dei manufatti, utilizzare un sistema informativo significa registrare e gestire anche tutte le informazioni che riguardano le relazioni spaziali tra i diversi elementi, strutturando i dati definendone anche la topologia.

La prima fase della ricerca, pertanto, ha visto delinearci la struttura del sistema informativo mediante la raccolta dell'insieme delle informazioni messe a disposizione dallo studio delle evidenze archeologiche. Nonostante l'utilizzo di un software già strutturato e pronto per l'utilizzo in realtà è stato necessario effettuare un'analisi dettagliata a priori del sito indagato per comprendere quali dati andassero inseriti effettivamente all'interno del sistema, per renderlo rispondente all'obiettivo e valutarne la fattibilità.



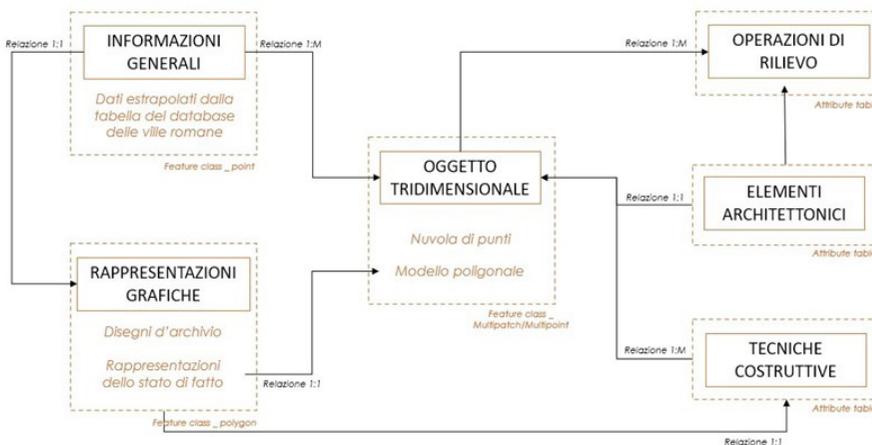
La ricerca d'archivio e le successive fasi di rilievo e rappresentazione

Fig. 117 _ Modello concettuale. Elaborazione grafica S. Acquaviva

Fig. 118c _ Diagramma entità-relazione. Elaborazione grafica S. Acquaviva



hanno guidato verso la stesura e il riconoscimento di una serie di dati che caratterizzano la villa di Francolise, in particolare caratteristiche metriche e morfologiche tradotte in modelli e rappresentazioni bidimensionali, dati storici cronologici e decorativi sottoforma di dati alfanumerici. Tali elementi conoscitivi hanno consentito di definire un quadro generale sulla villa e hanno rappresentato la base per la formazione del sistema informativo. La prima operazione, quindi, è stata quella di elaborare e tracciare l'idea di ciò che si voleva rappresentare in un progetto realmente eseguibile mediante la creazione di un modello denominato concettuale, uno schema grafico tramite cui stabilire le entità facenti parte del sistema, gli attributi e come associarli tra loro.



Lavorare su un caso studio a scala architettonica ha comportato ovviamente una maggiore attenzione e un'analisi più dettagliata. In particolare, le attività di rilievo e di rappresentazione sono risultate essenziali per l'organizzazione del diagramma in quanto consentono anch'esse di ricostruire un modello del reale quale schema riassuntivo delle parti e degli elementi che lo compongono, azioni volte a raggiungere una maggiore comprensione e chiarificazione degli elementi (De Rubertis R., 1994; Ugo V., 1994). In tal modo la scomposizione avvenuta mediante la lettura dei dati di output dei rilievi e delle successive elaborazioni hanno costituito le entità che hanno popolato il diagramma. Ogni singolo elemento risulta relazionato all'altro sia a livello costruttivo che topologico. La configurazione di tale modello mira a rispettare quei parametri di efficienza ed efficacia utili al raggiungimento dell'obiettivo finale con rigore coerente, permettendo la definizione degli oggetti, i loro attributi e le loro relazioni. Consente pertanto di definire quali sono le componenti del sistema finale e di separare i dati correttamente evitando di creare disordine. In particolare, sono stati organizzati cinque insiemi che identificano i dati da inserire nell'archivio (Informazioni testuali storiche e tecniche, dati tecnici di rilievo, immagini, disegni 2D, modelli 3D). Nel caso della sperimentazione del GIS 3D è stato di fondamentale importanza valutare, in tale schema, anche i dati puntiformi e poligonali come entità separate da relazionare ad altri elementi.

Questa scomposizione dei dati, oltre ad aiutare a favorire la connotazione semantica del modello, è stata basilare per la progettazione successiva del database che costituisce il modello logico del processo, utile per semplificare e ottimizzare le operazioni di archiviazione, interrogazione e manipolazione dei dati e comprenderne la correttezza del processo di strutturazione. Ciò è avvenuto mediante la creazione del diagramma entità-relazione (E-R) che mostra come le entità che compongono gli insiemi si relazionino tra loro, aiutando in questo modo a comprendere come articolare e quali strumenti utilizzare per popolare successivamente il *geodatabase* all'interno della piattaforma nella fase operativa. Dal diagramma E-R (fig. 99) è possibile evincere come per quanto i modelli tridimensionali siano il fulcro della sperimentazione, necessitano comunque di una serie di dati altri che portano ad una conoscenza approfondita del fenomeno analizzato senza i quali il sistema informativo non potrebbe esistere.

Fig. 119 _ Operazione di decimazione della nuvola di punti. Elaborazione grafica S. Acquaviva

Il punto finale del flusso operativo risiede nella realizzazione e nel popolamento del geodatabase, che costituisce quel modello fisico derivante dallo studio dei modelli precedenti comprendente di tutte le tabelle, gli attributi e le relazioni. Una caratteristica importante del modello di dati del *geodatabase* è quella di essere basato su una tecnologia *object-oriented*, ossia che permette di considerare una *feature* spaziale (linea, punto, poligono) con tutti i suoi attributi come un oggetto univoco. In tal modo tutte le informazioni sono direttamente disponibili in un unico elemento invece di essere distribuiti in diverse tabelle. Una corretta articolazione della struttura ne consente la modifica e l'implementazione con l'aggiunta di altre entità nel tempo, vista la natura rigenerativa di questi sistemi.

7.2.1. Editing del dato tridimensionale per la gestione in ambiente GIS

Successivamente alla fase di ideazione delle relazioni tra gli elementi del database, essenziale è stato procedere con operazioni di decimazione e semplificazione dei punti e dei triangoli che costituiscono i modelli 3D, al fine di poter importare il dato reality-based in ambiente GIS 3D e utilizzarlo come riferimento per la strutturazione e la successiva assegnazione delle *attribute tables* informative e per la definizione delle primitive geometriche rappresentative delle tessiture murarie e/o dei fenomeni di degrado.

Com'è noto la complessità numerica che caratterizza le nuvole di punti o le mesh prodotte nelle fasi di processamento, generano spesso un risultato caratterizzato da un elevato dettaglio – geometrico e cromatico - in quanto c'è la volontà di riprodurre fedelmente la realtà e tutte le sue specificità, ma allo stesso tempo implicano un notevole dispendio di risorse se si considerano gli hardware e i conseguenti tempi computazionali, date le elevate dimensioni dei prodotti tridimensionali.



Creare però una serie di modelli con risoluzioni differenti sarebbe controproducente in quanto aumenterebbe ancora di più la dimensione dei dati e il tempo per elaborarli. La soluzione ideale comprende la realizzazione di un unico modello su cui poter svolgere operazioni di decimazione e semplificazione senza dover necessariamente perdere la qualità visiva e geometrica del dato.

Ovviamente decimare una nuvola di punti comporta operazioni differenti rispetto alla decimazione di un modello mesh. Nel caso specifico della villa di Francolise, per quanto concerne la nuvola di punti, questa a seguito delle operazioni di comparazione e integrazione (cfr. cap. 6) è risultata composta da 270 milioni di punti che rappresentano una quantità considerevole non sempre gestibile. Si è scelto pertanto di operare una decimazione mediante il software open source *Cloud Compare* usufruendo del tool *Subsample*⁴. Tra le differenti modalità di decimazione della nuvola si è scelta la modalità *space* che consente di scegliere la distanza media tra due punti vicini e in casi di superfici non regolari e curvilinee questo parametro viene gestito rispetto al singolo *scalar field*⁵, un parametro legato alle caratteristiche geometriche della nuvola, in modo tale da permettere al tool di conservare più o meno punti a seconda dell'area interessata. Si è scelto di impostare un valore pari a 6 mm per non perdere il dettaglio geometrico del modello. La nuvola così decimata è risultata maggiormente gestibile e importabile all'interno del software ArcGIS.

Il procedimento di decimazione delle mesh invece è un'operazione che consta di diverse fasi in quanto ciò di cui bisogna tener conto non è soltanto l'accuratezza e la correttezza del modello a livello geometrico ma anche il mantenimento della qualità visiva della texture, per poter leggere, come nel caso della villa di Francolise, le differenti tessiture murarie, i dettagli dei mosaici e rendere facilmente riconoscibile l'oggetto che si sta visualizzando.

4 Il tool *subsample* presenta tre diverse modalità di decimazione: *space*, *random* e *octree*. la modalità *random* si basa semplicemente sul numero di punti da conservare scelto dall'utente ma li decima in modo casuale non considerandone nessun altro parametro. La modalità *octree* invece consente di scegliere un livello di suddivisione dell'*octree* secondo il quale la nuvola sarà semplificata.

5 I campi scalari corrispondono alle caratteristiche che possono essere associate ad una nuvola di punti, come per esempio colore, normali, curvatura, etc. Ad ogni punto viene assegnato un valore a seconda del campo scalare calcolato. Una nuvola può contenere più campi scalari.

Fig. 120 _ Modello High poly. Elaborazione S. Acquaviva

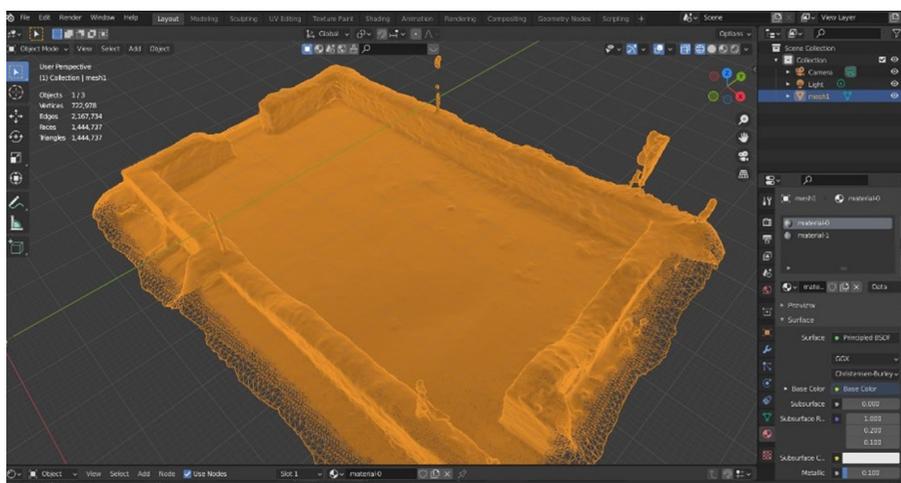


Fig. 121 _ Modello low poly. Elaborazione S. Acquaviva

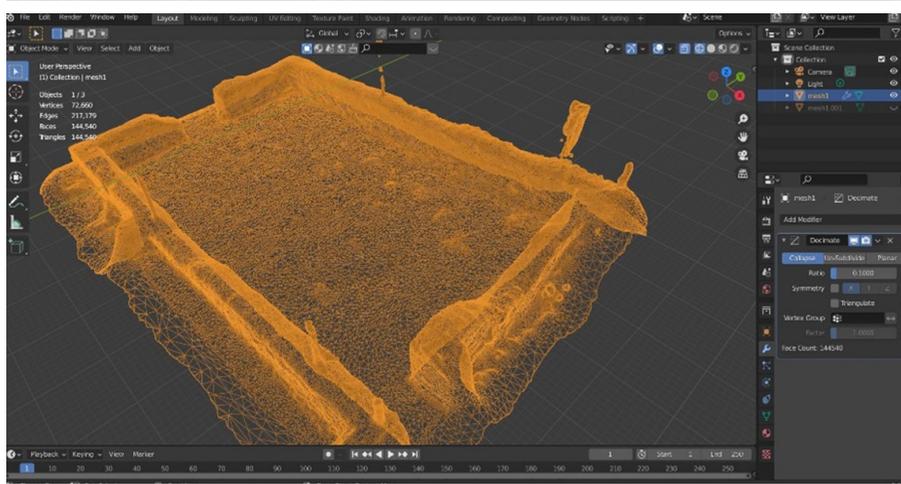
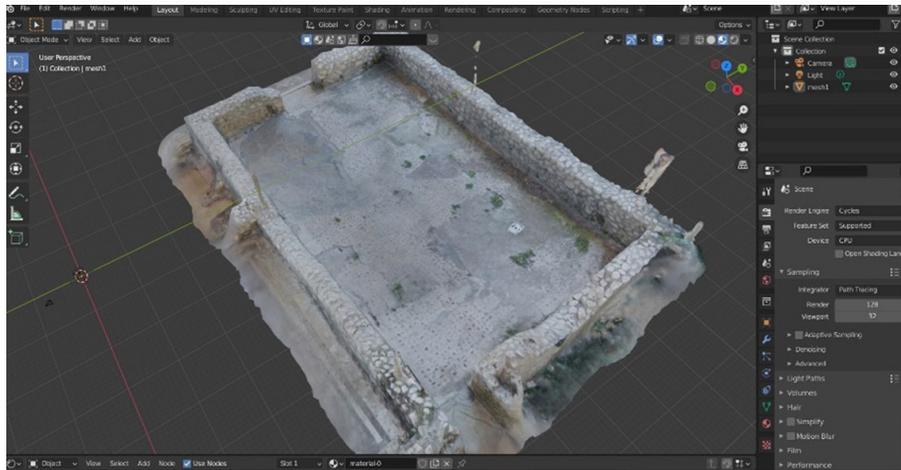


Fig. 122 _ Texture baking. Elaborazione S. Acquaviva



La scelta di avere un modello texturizzato - con un alto livello di dettaglio - ha implicato ovviamente la creazione di una mesh con un numero considerevole di poligoni che devono necessariamente essere ridotti per poter usufruire del modello nei differenti applicativi utilizzati per la ricerca. È stato necessario quindi bilanciare il mantenimento delle forme geometriche e la diminuzione delle risorse computazionali.

Operare attraverso il software di processamento fotogrammetrico e ridurre il dettaglio della mesh implica in automatico un ricalcolo della texture e una diminuzione della sua qualità. Pertanto, si è ricorso ad azioni di post processing operando direttamente sul modello originale denominato high poly. Tale operazione denominata *retopology* consiste nel processo di conversione di modelli ad alta risoluzione *high poly* in modelli *low poly* di un oggetto 3D ridimensionando il numero dei poligoni che lo caratterizzano al fine di renderlo utilizzabile e non affaticare le prestazioni degli hardware. In particolare, tale operazione è stata effettuata mediante il software open source *Blender*⁶ che presenta una serie di comandi, denominati *modifiers*, che consentono di effettuare diverse operazioni di *retopology*⁷ a seconda del caso. Pertanto, importato il modello poligonale texturizzato – nel formato *collada*⁸ - mediante il comando di *remesh*, è stato possibile ricostruire automaticamente la geometria ad alto dettaglio con una topologia più uniforme e leggera. Anche in questo caso è stato necessario mediare tra la qualità della rappresentazione e la percentuale di riduzione dei poligoni. Per le parti del modello dove non era richiesto un elevato grado di dettaglio, come per esempio le aree legate alla vegetazione, si è scelto di ridurre al minimo il numero di triangoli. Il passo successivo è stato quello di proiettare

6 Blender è un software open source e multipiattaforma di modellazione, animazione, montaggio video, composizione, rendering e texturing di immagini tridimensionali e bidimensionali e consente di utilizzare script (in Python). Dispone inoltre di funzionalità per mappature UV. È attualmente uno dei software maggiormente utilizzati in quanto paragonabile per caratteristiche e complessità, ad altri noti programmi per la modellazione tridimensionale come Cinema 4D, 3D Studio Max e Maya.

7 La *retopology* è un processo di semplificazione della topologia di una mesh per renderla più pulita e più facile da utilizzare. È un'azione necessaria per la topologia alterata risultante dallo *sculpting* o dalla topologia generata da una *La retopology* può essere eseguita manualmente manipolando la geometria o tramite metodi automatizzati.

8 COLLADA (COLLABorative Design Activity) è un formato file di interscambio tra applicazioni 3D distribuito gratuitamente insieme al codice sorgente.

una nuova texture ad alta qualità sul modello low-poly costruito, in quanto quella originale non aderiva più correttamente alla geometria del modello a seguito della modifica della morfologia della mesh, provocando delle distorsioni nell'immagine. È stato quindi necessario calcolare una nuova mappatura UV⁹ del modello decimato per poter procedere mediante la tecnica di texture baking e *mappare* la texture ad alta qualità. Tale operazione è avvenuta sempre mediante il medesimo software in grado di calcolare la *normal map* e la *diffuse map* del modello originale e riproiettarle sul modello decimato, simulando in tal modo i dettagli dell'oggetto rendendolo realistico. A conclusione di queste operazioni si è ottenuto un modello molto più leggero per numero di poligoni, maggiormente gestibile e una texture dall'elevata qualità.

La mole di dati così ottenuta, sebbene rappresenti un dato maggiormente gestibile e dall'elevata qualità visiva, affinché riconduca a significati precisi e funga da guida per le successive operazioni, necessita di essere criticamente interpretata e sistematizzata secondo regole chiare e ben delineate. Le nuvole di punti e le mesh, infatti, sebbene siano visivamente performanti, sono modelli privi di caratterizzazione topologica e semantica, poiché costituiti da entità – punti e poligoni – che solo nella loro messa a sistema complessiva restituiscono (in parte) il significato di ciò che rappresentano, dato, appunto, dall'assonanza visiva e dalla verosimiglianza istituita col reale a cui rimandano.

La lettura, la scomposizione e la codifica delle parti e degli elementi connotanti il patrimonio archeologico è operazione da condurre con estrema attenzione e coscienza critica, al fine di non alterare il dato e, quindi, influenzare la comprensione delle informazioni trasmesse. Informazioni che, in parte, sono già presenti intrinsecamente nei modelli reality-based e che necessitano di essere estrapolate per agevolare la conoscenza del manufatto. Come già anticipato (cfr. cap.2), nonostante si faccia sovente uso di processi automatizzati di segmentazione basati su tecniche di machine learning, i risultati sono ancora caratterizzati da problematiche

9 La mappatura UV è una tecnica di texture mapping che permette di applicare efficacemente e correttamente le texture su un modello tridimensionale. La mappatura UV è il processo di trasferimento di una mesh 3D da un modello 3D a uno spazio 2D.

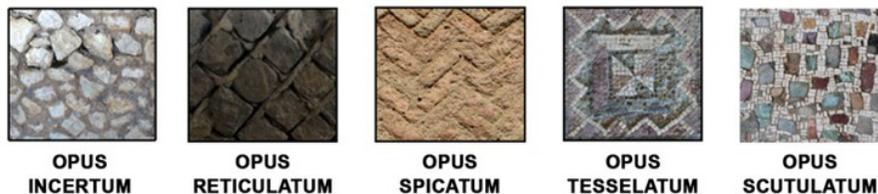


Fig. 118 _ Tessiture murarie presenti all'interno delle strutture della villa di Francolise. Elaborazione S. Acquaviva

relative all'esatto riconoscimento delle forme complesse, alla definizione delle relazioni che si instaurano tra le diverse componenti, ai tempi di computazione dell'elaborazione, ancor di più se si parla di archeologia. Di conseguenza, si è ricorso ad operazioni manuali che, per quanto laboriose e dispendiose in termini di tempo, consentono, con il supporto di ontologie e tesauri, un maggior controllo dell'individuazione puntuale degli elementi. In tal modo si perviene, partendo da nuvole di punti e mesh, a modelli geometrici semanticamente definiti, con suddivisione in elementi simili e assegnazione delle relative classi di appartenenza.

Nel proseguire la sperimentazione, dunque, propedeutica alla segmentazione e classificazione dei dati di rilievo reality-based della villa di San Rocco, è stata l'analisi delle tessiture murarie e delle pavimentazioni musive, scomponendo in tal modo l'area in base anche alla struttura delle entità del database secondo quel modello concettuale ideato. La catalogazione è avvenuta in particolare tenendo in considerazione gli elementi strutturali (muri, pilastri, colonne) e architettonici (pavimentazioni e elementi decorativi) che caratterizzano i resti ancora visibili nel sito.

Una volta stabilite le classi, si è passati alla fase operativa vera e propria di segmentazione dei modelli. Diversi sono i software (CloudCompare, Recap Pro, RealityCapture, Zephyr, etc.) che consentono di eseguire il procedimento, ma al fine di validare la pipeline operativa per la specifica ricerca, è stato scelto di valutare i risultati restituiti dalla piattaforma GIS utilizzata. ArcGIS Pro, infatti, consente, con tools specifici e processi automatizzati e semi-automatizzati, di individuare e selezionare porzioni di modello e caratterizzarle mediante annotazione di classi. Le fasi operative che sono state condotte sul dato point cloud hanno messo in evidenza sin da subito l'elevata capacità del sistema di gestire, in fase di visualizzazione, un'enorme mole di dati derivanti dalla quantità di punti che costituisce il

modello. La prima operazione ha visto la conversione del formato las¹⁰ della nuvola di punti, in quanto quello derivato dalle operazioni di rilievo consta del formato 1.3 che limita il numero di classi di categorie a cui associare i punti. ArcGIS ha permesso tale conversione nel formato 1.4, che mette a disposizione ulteriori informazioni e classificazioni dei punti¹¹. Una volta stabilito quali classi assegnare, la segmentazione e classificazione degli elementi è avvenuta in maniera simultanea e, a partire dai punti selezionati e dall'assegnazione della relativa classe, è stato possibile visualizzarle mediante attivazione/disattivazione dei layer. Ma tale classificazione semantica, risulta un espediente puramente grafico-visivo e non consente di associare ulteriori metadati alle porzioni di nuvola di punti¹².

Di contro la mesh, sebbene sia stata importata nella versione alleggerita, impone un maggiore sforzo computazionale all'hardware grafico, incidendo sensibilmente sulla fluidità della sua visualizzazione. Inoltre, l'individuazione degli elementi avviene attraverso gli strumenti di geoprocessing, che consentono la segmentazione del modello mediante l'impostazione di piani – orizzontali e verticali –, rendendo il procedimento più lungo, difficoltoso e laborioso, in particolar modo in presenza di forme archeologiche con differenti soluzioni di continuità.

Valutate quindi le criticità nella gestione del modello mesh in particolare e la necessità di pervenire a soluzioni univoche nell'individuazione degli elementi, è stato scelto di operare segmentazione e classificazione in piattaforme differenti, delegando la prima operazione al software Blender

10 Ad ogni punto lidar può essere assegnata una classificazione che definisce il tipo di oggetto che ha riflesso l'impulso laser. I punti Lidar possono essere classificati in una serie di categorie, tra cui terreno, vegetazione e acqua. Le diverse classi sono definite utilizzando codici interi numerici nei file LAS. I codici di classificazione sono stati definiti dall'American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) per i formati LAS 1.1, 1.2, 1.3 e 1.4. ArcGIS supporta tutte le versioni di LAS. https://www.asprs.org/wp-content/uploads/2019/03/LAS_1_4_r14.pdf

11 Il formato las 1.4 consente una classificazione divisa in 266 classi, di cui 200 definibili dagli utenti.

12 ArcGIS dà la possibilità di convertire la nuvola di punti in formato Multipoint e trasformarla pertanto in una feature class.

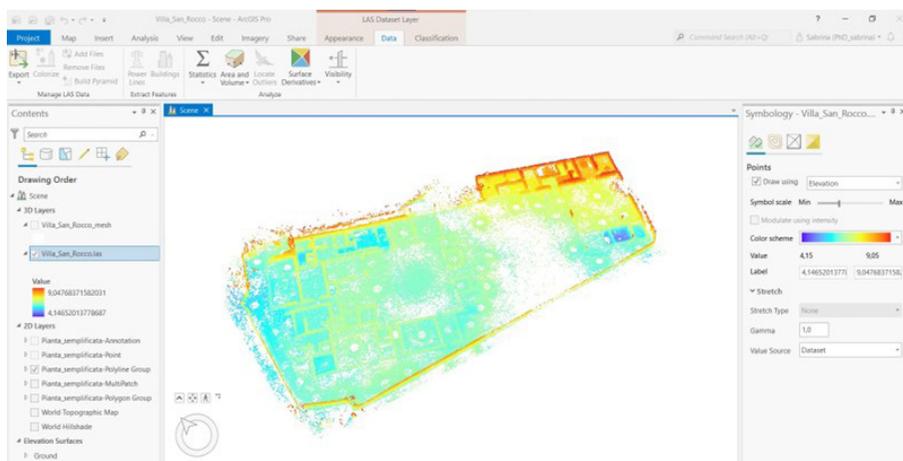
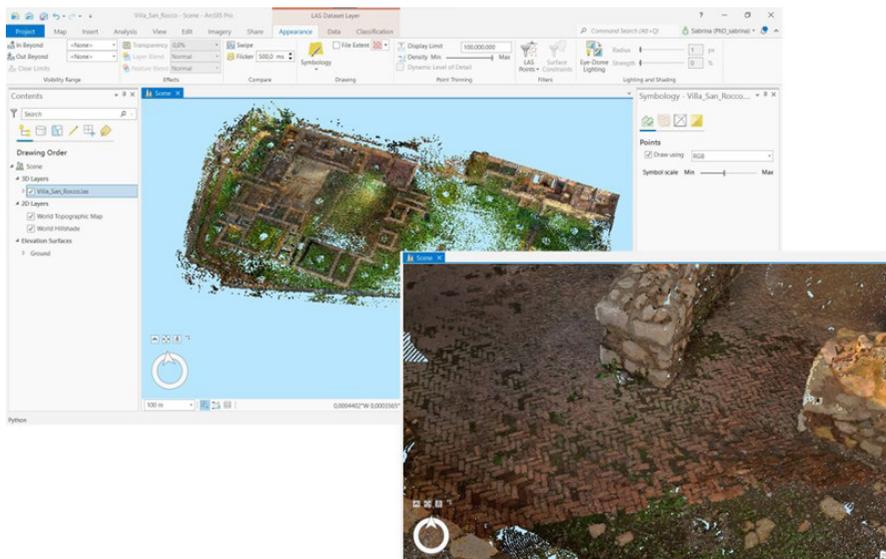


Fig. 123 _ Modalità di visualizzazione nuvola di punti: Elevazione

Fig. 124 _ Modalità di visualizzazione nuvola di punti: RGB1



– già utilizzato nelle operazioni precedenti - mentre la seconda a ArcGIS Pro. È indubbio, infatti, che le caratteristiche e i tools di editing presenti nei software di modellazione consentano una più agevole manipolazione del dato reality-based. Ma, come è ben noto, l'applicativo risulta carente nell'indicizzazione di tali elementi. Di conseguenza, ogni porzione di mesh esportata da Blender è stata in seguito classificata mediante l'inserimento del corrispettivo codice in ArcGIS Pro, in relazione all'elemento reale che rappresenta.

Fig. 125 _ Modalità di visualizzazione mesh - Multipatch

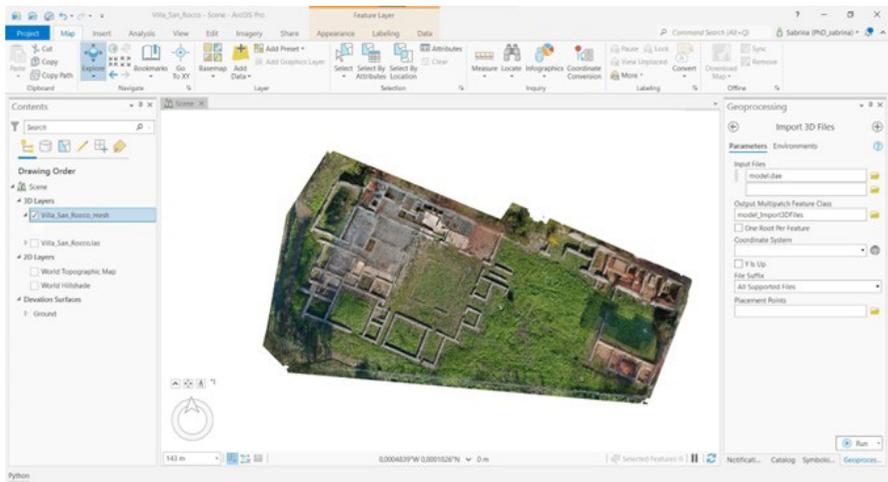
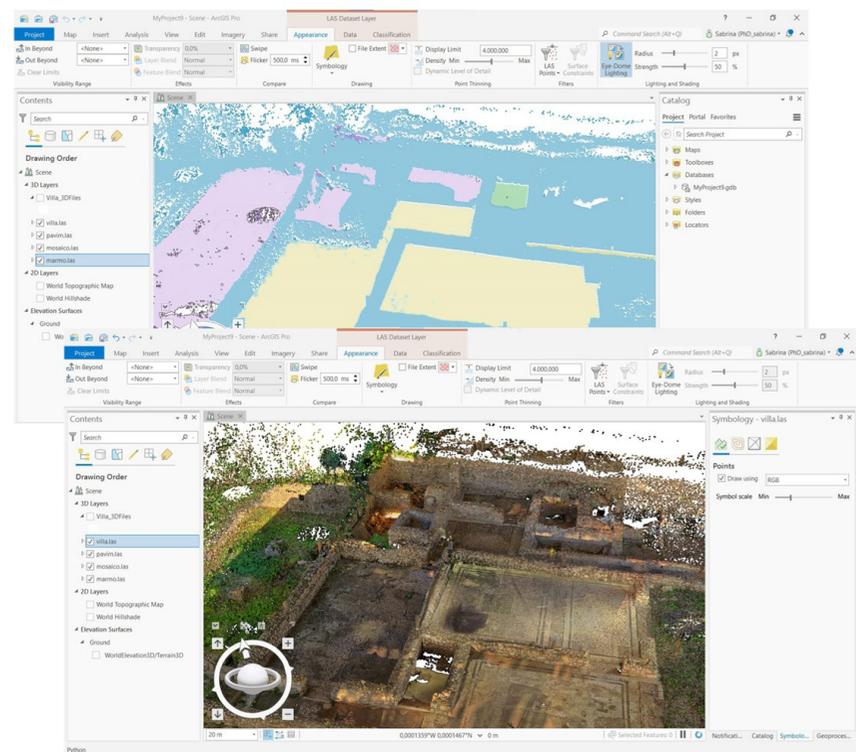


Fig. 126 _ Segmentazione e classificazione nuvola di punti. Elaborazione grafica S. Acquaviva



7.2.2. Importazione in ambiente GIS dei modelli puntiformi e poligonali

Concluso l'editing e la segmentazione dei modelli tridimensionali si è proseguito con la sperimentazione valutando le differenti possibilità di manipolazione dei modelli e le modalità di strutturazione dei dati da associare all'interno dell'ambiente GIS. In particolare, come già anticipato nei paragrafi precedenti, i dati che sono stati raccolti durante le fasi di studio e rilievo, oltre a fornire i modelli tridimensionali, hanno generato dati di diversa natura tra i quali:

-dati alfanumerici che comprendono l'analisi storica, i dati di localizzazione e dello stato di fatto;

-dati vettoriali concernenti le piante delle differenti epoche storiche del sito e rappresentazioni grafiche aggiornate a diverse scale derivanti dalle ortofoto redatte;

-dati raster che comprendono principalmente tutte le immagini acquisite nel corso dei differenti sopralluoghi e le immagini d'archivio.

Ciò che è stato necessario valutare è la rispondenza reale del modello concettuale e logico ipotizzati nelle fasi iniziali. Ciò ha riguardato in particolare la dimostrazione della veridicità delle scelte effettuate in fase progettuale sulla tipologia di dati da importare all'interno del *geodatabase* e quali gestire come features layer e features class¹³ e quali come tabelle e, diretta conseguenza di questa scelta, stabilire le relazioni tra questi stessi elementi.

I primi dati analizzati per rigor di logica sono stati i modelli - nuvola di punti e mesh - importati nello spazio di lavoro già nella fase precedente ma che vengono interpretate come entità differenti dal sistema, sia nella struttura formale che nella loro caratterizzazione.

In particolare, le nuvole di punti seppur importate come layer, denominati *lasDataset*, e gestibili e manipolabili in quanto danno la capacità di assegnarvi correttamente la classe di appartenenza e di restituirle sottoforma visuale¹⁴,

13 Un feature layer è un layer contenente un raggruppamento di feature simili e le relative proprietà associate. I feature layer rappresentano il modo in cui ArcGIS Pro rappresenta le feature class. Sono il tipo di livello più comunemente usato.

14 I dataset LAS sono ricchi di informazioni, ad esempio intensità, elevazione, 'last return' e valori RGB. Queste possono essere utilizzate per definire la simbologia

non consentono di collegarvi nessun tipo di informazione non essendo dotate come tutte le *feature class* di tabelle attributi. Per far sì che anche tale rappresentazione del reale possa essere collegata ad una tabella attributi è stato necessario convertirla in una diversa *feature class* denominata *Multipoint*, cioè una raccolta ordinata di punti, non perdendo però la classificazione precedentemente assegnata ad ognuno. In tal modo nella conversione la nuvola diventa a tutti gli effetti un *feature class* dotata di una propria tabella attributi che può essere modificata e ampliata nella struttura.

Diversamente, il modello poligonale viene importato come oggetto tridimensionale e letto come *multipatch*, ovvero una *feature class* utilizzata per definire la rappresentazione delle facce esterne degli oggetti 3D, dotata già di una propria tabella attributi da implementare con ulteriori informazioni. Le funzionalità *multipatch* e dei file *las* e le possibili operazioni da compiere su questi modelli non possono essere realizzate con tool standard, ma devono piuttosto essere costruite utilizzando gli strumenti di geoprocessing presenti nella toolbox del software.

7.2.3. Gestione e analisi dei dati tridimensionali

Conclusa la fase editing e importazione dei modelli tridimensionali si è proseguito con la sperimentazione delle modalità di annotazione dei metadati, di mappatura e caratterizzazione dei diversi fenomeni che connotano la villa in ambiente GIS. Le riflessioni derivanti dalla lettura, visualizzazione e informatizzazione dei modelli *reality-based*, hanno spinto a considerare la *mesh* come supporto per quest'ultima fase applicativa della ricerca, in quanto elemento geometricamente accurato e che, allo stesso tempo, consente una lettura visiva corretta delle strutture divenendo elemento fondamentale per le analisi e interrogazioni successive e per il riconoscimento dei diversi oggetti archeologici. Le diverse porzioni di nuvola di punti sono state egualmente inserite nello spazio di lavoro al fine di implementare il database anche con il relativo apporto informativo.

durante la visualizzazione dei dati, consentendo di analizzare le caratteristiche all'interno della nuvola di punti.

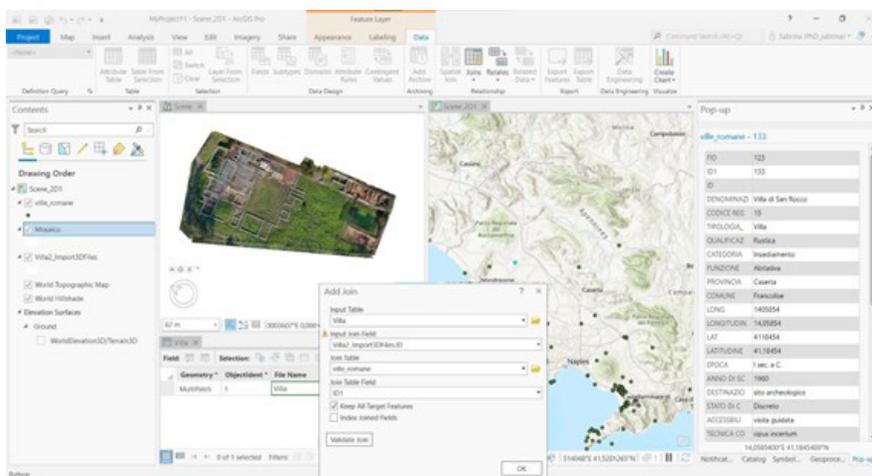


Fig. 128 _ Creazioni del collegamento (JOIN) tra la tabella attributi delle ville romane 2D e il modello poligonale. Elaborazioni grafiche a cura dell'autrice

L'importazione dei modelli direttamente nello spazio tridimensionale è avvenuto considerando tali elementi non secondo i tradizionali approcci che rendono il valore della coordinata z come attributo di un'entità bidimensionale (GIS 2.5D), ma come veri e propri oggetti 3D, per i quali la visualizzazione della spazialità non è pura apparenza visiva ma informazione reale, ricavabile e gestibile al pari delle altre due coordinate (x e y).

Operativamente, il *workflow* si connota con azioni consequenziali eseguite per la corretta strutturazione del database e delle relazioni tra nuvole di punti, mesh e dati alfanumerici. La definizione di questi ultimi, in particolare, è avvenuta combinando le norme di classificazione del patrimonio archeologico redatte dall'ICCD (Istituto Centrale per il Catalogo e la Documentazione) con diversi parametri specifici desunti dalle indagini – bibliografica, archivistica, rilievo, etc. – eseguite per la conoscenza approfondita del sito.

Il geodatabase iniziale è costituito dal modello tridimensionale importato e dai dati relativi alla mappatura 2D delle ville romane precedentemente strutturati, che sono visualizzabili nello stesso spazio di lavoro ma non ancora relazionati tra di loro. Pertanto, la prima tabella attributi generale risulta già costruita sulla base dei dati storici, morfologici, fisici e descrittivi del caso studio e inserita nel database 2D delle ville romane (cfr. cap.4); essa rappresenta, di fatto, il layer 0 del database a scala architettonica (intra-site), ovvero il primo elemento inserito nello spazio di lavoro, con

informazioni complessive di supporto nell'inquadrare il sito e le attività condotte. È stata collegata direttamente al modello poligonale mediante un codice univoco comune ai due elementi, venendosi a costituire quale elemento relazionale tra i sistemi, 2D e 3D. In particolare, l'unione tra più oggetti del geodatabase avviene quando si ha bisogno di informazioni che non sono presenti nella tabella corrente ed è possibile ricavarli da un'altra, oppure c'è necessità di incrociare dati di più tabelle per ricavare delle nuove informazioni. ArcGIS consente di associare i record in una tabella con i record in un'altra tramite un campo comune, noto come *primary key*. In particolare, bisogna tener presente che è possibile effettuare due diverse operazioni relazionali tra i diversi oggetti del sistema. La prima consiste nel cosiddetto *join*, in questo caso vengono aggiunti gli attributi di una tabella all'altra in base a un campo comune a entrambe, che non necessariamente deve avere la stessa denominazione, a differenza del tipo di dati che deve essere il medesimo (numeri con numeri, stringhe con stringhe, etc.). Invece, l'operazione di *relate* tra due tabelle, anch'essa basata su un campo comune, non aggiunge gli attributi di una all'altra, ma mostra quali elementi sono relazionati agli altri. Quando si uniscono le tabelle si stabiliscono due tipi di relazioni, uno-a-uno (1:1) o uno-a-molti (1:M) tra la tabella degli attributi del layer e la tabella contenente le informazioni che si desidera unire. Per esempio, una stessa tessitura muraria può appartenere a diverse epoche storiche (1:M). È possibile, inoltre, unire i dati anche secondo la posizione che condividono nello spazio, quando per esempio non si ha a disposizione un campo attributo comune. In questo caso si ricorre ai cosiddetti *join spaziali* che non sono dinamici, non modificano le tabelle attributi ma richiedono il salvataggio dei risultati in un nuovo livello di output.

Le fasi successive, pertanto, hanno visto l'importazione dei successivi dati e il loro arricchimento semantico e descrittivo e allo stesso tempo la strutturazione delle varie relazioni e collegamenti tra i differenti elementi per creare una banca dati 3D fortemente relazionata con informazioni indispensabili alle indagini di ambito archeologico.

Per quanto concerne il modello mesh segmentato questo è stato implementato con una serie di attributi derivanti dalle tabelle delle caratteristiche strutturali e architettoniche della villa e collegata mediante *join/relate* ad ulteriori tabelle descrittive degli apparati decorativi,

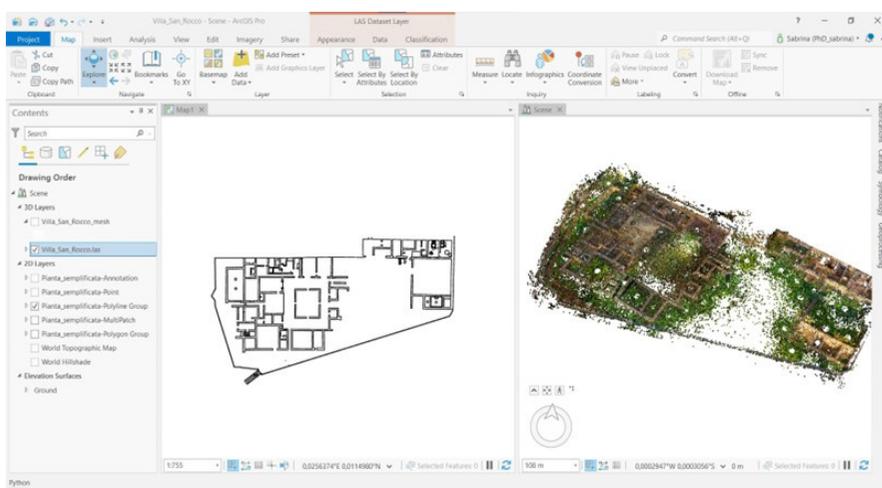


Fig. 129 _ Visualizzazione dei dati 2D e 3D nel medesimo workspace. Elaborazioni grafiche a cura dell'autrice

utilizzando come campo comune un codice univoco assegnato alle strutture in fase iniziale nel modello logico. In seguito, è stato possibile individuare le forme di degrado caratterizzanti l'area e graficizzarle attraverso primitive geometriche che, ricalcandone le caratteristiche direttamente in aderenza al modello poligonale, hanno restituito in digitale la rappresentazione del fenomeno reale. Le feature class (3D) linea e poligono, quindi, sono state inserite nello spazio di lavoro per indicare le lesioni, le prime, e il degrado, le seconde. Tale mappatura è stata eseguita mediante i tools di editing del software e per ogni entità inserita sono state costruite le tabelle attributi, che sono state dapprima completate con i metadati e poi relazionate alle precedenti anche in questo caso mediante operazioni di join, in modo da rendere questa parte del sistema tutto interrelato.

Al modello 3D sono stati relazionati (relate) anche i dati bidimensionali, realizzati con i classici software CAD, importati e trasformati in layer poligonali, sempre memorizzati sul database, sui quali è stato possibile compiere operazioni grafiche, in quanto il GIS costituisce uno strumento utile per la graficizzare gli oggetti. In tal modo è stato possibile rappresentare in pianta le caratteristiche delle differenti tessiture murarie. Gli oggetti grafici sono stati poi aggiornati inserendo le relative informazioni, rendendo possibile una veloce analisi qualitativa dell'entità stessa. Allo stesso modo di come accade sul modello 3D è stato possibile graficizzare i fenomeni di degrado, visualizzando il lavoro sia in bidimensionale che in tridimensionale, mediante parametri univoci comuni – il numero assegnato

al fenomeno di degrado – e collegarlo (*relate*) alle tabelle dei due elementi mettendoli in relazione.

Le immagini raster invece sono state catalogate e archiviate singolarmente nelle differenti tabelle attributi appartenenti ai singoli oggetti o associate a singoli hotspot informativi allegati ai diversi modelli per una miglior comprensione delle differenti parti.

Il fenomeno, quindi, è stato descritto in tutte le sue componenti, dove le informazioni morfologiche e dimensionali, lette su un accurato rilievo reality-based dello stato di fatto, sono strettamente correlate alla posizione spaziale delle stesse, derivante dalla base informativa-grafica del sistema GIS, e ai dati alfanumerici. Al contempo, il database, così costruito e archiviato, è sempre interrogabile, interpretabile e implementabile laddove mutino le condizioni del sito o sia richiesto un aggiornamento a seguito di futuri interventi.

Il geodatabase così costituito è stato poi interrogato mediante le cosiddette query. Per query in GIS si intendono tutte le operazioni che consentono di interrogare, estrarre e incrociare i dati contenuti negli strati informativi di un progetto. Se le query sono rivolte alla posizione relativa alla geometria degli oggetti (sovrapposizioni, intersezioni, ecc.), si definiscono “interrogazioni spaziali”. Le query mostrano la potenza dei sistemi GIS che vanno ben oltre le operazioni di visualizzazione. Per esemplificare questo processo, si consideri ad esempio la costruzione di una query mirata alla ricerca e all’analisi delle pavimentazioni appartenenti al periodo I della villa. A seguito dell’interrogazione il risultato della query è composto dalla visualizzazione dell’elemento richiesto – sia in 2d che in 3D - e dalla sua tabella attributi contenente tutte le informazioni inerenti.

In conclusione, tali sistemi hanno consentito di raccogliere in un unico template la conoscenza storica, la configurazione spaziale, la descrizione diacronica delle parti per una miglior lettura dello stato di fatto delle strutture. Attraverso questa applicazione e grazie all’integrazione di due tecnologie, la fotogrammetria digitale e il GIS, e l’indiscusso miglioramento nella gestione dei dati 3D da parte del GIS, la tridimensionalità, nell’archeologia in generale e, in particolare per l’archeologia dei prospetti murari, è diventata una componente indispensabile per l’interpretazione del sito.

Gestione e modellazione del dato tridimensionale nello studio della villa di San Rocco

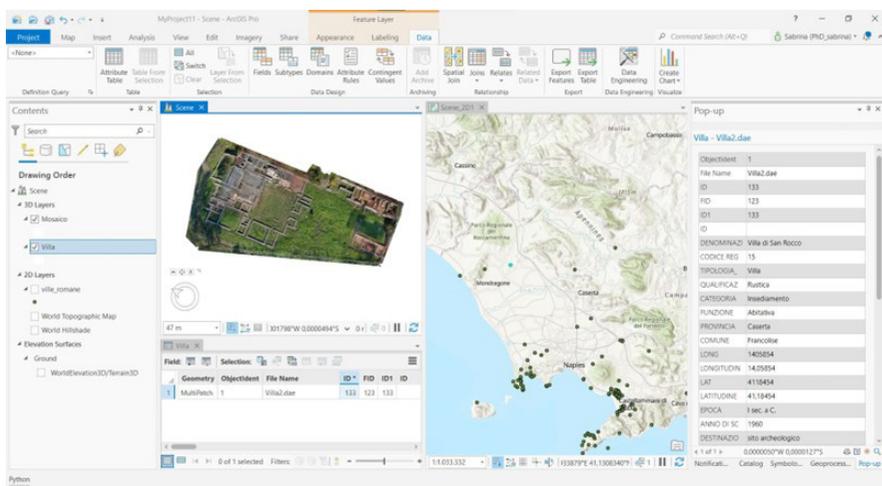


Fig. 130 _ Visualizzazione dei dati. Elaborazioni grafiche a cura dell'autrice

CONCLUSIONE

Lo sviluppo delle tecnologie digitali, delle nuove e sempre più performanti forme di rappresentazione tridimensionale e la creazione sistemi informativi per l'archiviazione e la gestione di grandi quantità di dati, sia a scala architettonica che a scala urbana, ha permesso il raggiungimento di obiettivi prima impensabili nel settore del Cultural Heritage.

I contenuti scientifici scaturiti dalle diverse sperimentazioni condotte in questo ambito mostrano come l'utilizzo di tali tecnologie abbia influenzato in modo positivo la ricerca archeologica, creando nuove modalità di rappresentazione che racchiudono i significati intrinseci degli oggetti.

La ricerca di dottorato ha quindi avuto l'obiettivo di analizzare i processi di integrazione e di interazione per la conoscenza dei contesti archeologici attraverso l'ausilio delle metodologie di rilievo integrato ad alta risoluzione fornendo quindi la base necessaria per la creazione di sistemi informativi tridimensionali.

La prima fase del progetto ha avuto l'obiettivo di raccogliere e archiviare le informazioni storiche, morfologiche, fisiche e descrittive relative alle ville romane disseminate sul territorio campano al fine di creare un database conoscitivo di tali siti. Tutto il processo è stato gestito attraverso il software GIS di Esri, in grado di archiviare, gestire, analizzare e rappresentare dati spaziali. Per ogni villa, attraverso layer puntuali, sono

stati registrati: localizzazione e tipologia architettonica, quadro storico, tipologia costruttiva, stato di conservazione, accessibilità e allegati fotografici e documentali. Tutti i dati, che possono essere successivamente implementati, sono stati integrati gli uni agli altri in modo tale da creare un archivio utile per il proseguo della sperimentazione.

La fase successiva ha interessato l'approfondimento di un singolo caso campione, la villa romana di San Rocco in Francolise. In particolare, in relazione alla conformazione morfologica e materica della Villa si è scelto di effettuare un rilievo incentrato sull'utilizzo integrato delle metodologie reality-based - laser scanner e fotogrammetria - al fine di ottenere un modello finale accurato metricamente e ottimale nella resa fotorealistica, in particolar modo delle tessiture murarie e delle pavimentazioni musive. Il modello tridimensionale generato ha costituito una fonte di informazioni, andando ad arricchire il database già precedentemente costruito (2D), e allo stesso tempo ha costituito un modello matematico utile per le successive analisi e sperimentazioni in ambiente tridimensionale.

Sviluppi futuri della ricerca puntano ad indagare le modalità di archiviazione e manipolazione del dato geometrico in ambiente tridimensionale, esplorando in particolar modo l'integrazione tra le piattaforme GIS e BIM al fine di costruire sistemi informativi multi-scalari e multidisciplinari e quindi strutturare un database univoco e interoperabile al fine di ampliare la conoscenza dei contesti archeologici.

Tali sistemi però presentano caratteristiche diverse per quanto concerne i formati di interscambio dei dati (CityGML e IFC), la gestione delle informazioni e la scala di rappresentazione, che potrebbero creare problemi nell'interoperabilità dei due sistemi.

BIBLIOGRAFIA

Angelini A., Gabrielli R. (2013). *Laser scanning e photo-scanning. Tecniche di rilevamento per la documentazione 3D di beni architettonici ed archeologici*, in “Archeologia e Calcolatori”, vol. 24, pp.379-394.

Banfi, F. (2019). *HBIM generation: extending geometric primitives and bim modeling tools for heritage structures and complex vaulted systems*, in “Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.”, vol. XLII-2/W15, pp. 139-148. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-139-2019>.

Banfi, F. (2020). *HBIM, 3D drawing and virtual reality for archaeological sites and ancient ruins*, in “Virtual Archaeology Review”, vol. 11(23), pp. 16-33. <https://doi.org/10.4995/var.2020.12416>.

Baratti G. (2012). *Verso un approccio archeologico al rilevamento e alla modellazione tridimensionale*, in “LANX”, vol. 13, pp. 1-26.

Beltrame C., Costa E., (2018). *3D survey and modelling of shipwrecks in different underwater environments*, in “Journal of Cultural Heritage”, vol. 29, pp. 82-88.

Bertocci S. (2022). *Strumenti per la comunicazione e la conservazione della documentazione del patrimonio archeologico: il complesso di Villa Adriana (Tivoli, RM) e il sito archeologico di Masada (Israele)*, in A. Arrighetti, R. Pansini (a cura di), *Sistemi e tecniche di documentazione, gestione e valorizzazione dell'architettura storica*.

Alcune recenti esperienze, “Archeologia e Calcolatori”, vol. 33.1, pp. 259-278. <https://doi.org/10.19282/ac.33.1.2022.14>

Bezzi L., Dell’Unto N. (2011). *Rilievo tridimensionale di reperti archeologici: tecniche a confronto*, in F. Cantone (a cura di), *ARCHEOFOSS. Open Source, Free Software e Open Format nei processi di ricerca archeologica*, atti del VI Workshop (Napoli, 9-10 giugno 2011), Pozzuoli, Naus Editoria, pp. 141-152.

Bianchini M. (2008). *Manuale di rilievo e di documentazione digitale in archeologia*, Roma, Editore Aracne.

Bianconi F., Filippucci M. (2019), *La fotomodellazione per il rilievo archeologico*, in “Archeologia e Calcolatori”, vol. 30, pp. 205-228. <https://doi.org/10.19282/ac.30.2019.13>

Bosco A., D’Andrea A., Nuzzolo M., Zanfagna P. (2019). *A BIM approach for the analysis of an archaeological monument*, in A. Cardaci, F. Fassi, F. Remondino (a cura di), *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 8th International Workshop 3D-ARCH “3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures” (Bergamo, 6-8 February 2019), vol. XLII-2/W9, pp. 165-172.

Brancaccio S. (1980). *Il sisma e l’incuria: nuovi e antichi mali del patrimonio artistico. Note da Sessa Aurunca, Francolise, Teano, Cerinola, Caramanica, Marina di Minturno*, Scauri, Arti grafiche Caramanica.

Brusaporci S., Trizio I. (2013). *La Carta di Londra e il Patrimonio Architettonico: riflessioni circa una possibile implementazione*, in “SCientific RESearch and Information Technology (SCIRES-IT)”, vol. 3, n. 2, pp. 55-68.

Campana S. (2014). *3D modeling in archaeology and cultural heritage – Theory and best practice in Campania*, in F. Remondino (a cura di), *3D Recording and Modeling in Archaeology and Cultural Heritage Theory and best practices: Theory and best practices*, “Archaeopress BAR”, n. 2598 pp. 7-12.

Campi M. (2017). *Sistemi di conoscenza per l’Archeologia. I luoghi dei teatri e degli anfiteatri romani in Campania*, Napoli, ArtstudioPaparò Editore.

Campi M., di Luggo A., Palomba D., Palomba R. (2019). *Digital surveys and 3d reconstructions for augmented accessibility of archaeological heritage*, in *Internation-*

al Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XLII-2/W9, pp. 205-212.

Cotton, M.A. (1960). *The San Rocco Villa at Francoise*.

Cotton, M.A. (1979). *The late Republican Villa at Posto, Francoise*, London, The British School at Rome.

Crimaco L. (2005). *Modalità insediative e strutture agrarie nella Campania settentrionale costiera*, in Vitolo G. (a cura di), *Le città campane fra tarda antichità e alto Medioevo*, Salerno, Laveglia, pp. 61-129.

D.L. 22 gennaio 2004, n. 42 *Codice dei beni culturali e del paesaggio*.

D'Andrea A. (2000). *Modelli GIS nel Cultural Resource Management*, in "Archeologia e Calcolatori", n. 11, pp. 153-170.

D'Andrea A. (2006). *Documentazione archeologica, standard e trattamento informatico*, Budapest, Archaeolingua.

De Luca L. (2011). *La fotomodellazione architettonica*, Palermo, Flaccovio editore.

Dell'Unto N., Landeschi G. (2021). *Archaeological 3D GIS*, New York, Routledge editore.

Demetrescu E., Ferdani D. (2021). *From Field Archaeology to Virtual Reconstruction: A Five Steps Method Using the Extended Matrix*, in "Appl. Sci.", n. 11, 5206.

Demetrescu E., Ferdani D., Pagano A., Pietroni E. (2020). *Roman Villas and Domus: from digital acquisition on the field to novel approaches in interactive storytelling inside VR environments*, in "Villae Romanas, Cascais, Câmara Municipal de Cascais", pp. 164-185.

Dessales H. (2020). *The Villa of Diomedes: The making of a Roman villa in Pompeii*, Paris, Hermann Editore.

di Luggo A., Catuogno R., Scandurra S. (2017). *Procedure integrate per il rilievo e la rappresentazione del patrimonio archeologico: il teatro ellenistico-romano di Sarno*, in M. Campi (a cura di), *Sistemi di conoscenza per l'Archeologia. I luoghi dei teatri*

e degli anfiteatri romani in Campania, Napoli, ArtstudioPaparo Editore, pp. 131-138.

Djindjian F. (1998). *GIS usage in worldwide archaeology*, in “Archeologia e Calcolatori”, vol. 9, pp. 19-30.

Docci M., Maestri D. (2009). *Manuale di rilievo architettonico ed urbano*, Roma-Bari, Editore Laterza.

Esposito A. (2009). *La Villa di Damecuta a Capri. Analisi dei resti e ricostruzione dei livelli dell'edificio*, in “Oebalus”, n. 4, pp. 323-340.

Fassi F., Fregonese L., Ackermann S., De Troia V. (2013). *Comparison between laser scanning and automated 3D modeling techniques to reconstruct complex and extensive cultural heritage*, in “ISPRS Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-5/W1”, pp. 73-80.

Ferdani D., Demetrescu E., Cavalieri M., Pace G., Lenzi S. (2019). *3D Modelling and Visualization in Field Archaeology. From Survey to Interpretation of The Past Using Digital Technologies*, in “Groma”, n. 4.

Foresta S., Pacetti P. (2012). *Le ville romane della Costa d'Amalfi, Soprintendenza per i Beni Archeologici delle Province di Salerno, Avellino, Benevento e Caserta*, Salerno, Zelig, 2012.

Forte M. (2002). *I sistemi informativi geografici in archeologia*, Roma, MondoGIS.

Forte M. (2010). *Cyber-Archaeology: Notes on the simulation of the past*, in “Virtual Archaeology Review”, vol. 2, n. 4, pp. 7-18.

Forte M. (2010). *Introduction to Cyber-Archaeology*, in M. Forte (a cura di), *Cyber-Archaeology*, “BAR International Series”, n. 2177, pp. 9-13.

Frassine M., A.N. Rigoni, A. Bezzi, L. Bezzi, G. Naponiello (2014). *Un prototipo di Augmented Reality per la valorizzazione della villa romana di Torre di Pordenone (Friuli-Venezia Giulia)*, in “Archeologia e Calcolatori”, vol. 25, pp. 189-206.

Fregonese L., Fassi F., Achille C., Adami A., Ackermann S., Nobile A., Giampaola D., Carsana V. (2016). *3D survey technologies: investigations on accu-*

racy and usability in archaeology. The case study of the new “Municipio” underground station in Naples, in “Acta Imeko”, vol. 5, n. 2, pp. 55-63.

Fridhi, A., & Frihida, A. (2019). *GIS 3D and Science of Augmented Reality: Modeling a 3D Geospatial Environment*, in “Journal of Soft Computing in Civil Engineering”, vol. 3(4), pp. 78-87. doi: 10.22115/scce.2020.212254.1148

Giandebiaggi P. et al. (2015). *Integrated survey methodologies for the multi-scale knowledge of archaeology of architecture: the survey of the amphitheatre in Durrës*, in “SCIRES-IT”, vol. 5.

Glahn C., Gruber M.R. (2020). *Designing for Context-Aware and Contextualized Learning*, in S. Yu, M. Ally, A. Tsinakos (a cura di), *Emerging Technologies and Pedagogies in the Curriculum. Bridging Human and Machine: Future Education with Intelligence*, Singapore, Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0618-5_2

Grilli, E., Dininno, D., Petrucci, G. and Remondino, F. (2018). *From 2D to 3D supervised segmentation and classification for cultural heritage applications*, in “ISPRS TC II Mid-term Symposium “Towards Photogrammetry 2020””, n. 42, pp. 399-406.

Guermandi M.P. (2009). *Provando e riprovando: un quarto di secolo di applicazioni*, in “Archeologia e Calcolatori”, vol. 20 (1998), pp. 155-168.

Janovský, M. (2022). *New technologies and their interconnection in the creation and processing of 3dmodels and scenes*, in “Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.”, vol. XLVI-5/W1-2022, pp. 129-134. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-5-W1-2022-129-2022>.

Johannowsky W. et al. (1986). *Le ville romane dell'età imperiale*, Napoli, Società editrice napoletana.

Lafon X. (2001). *Villa maritima: recherches sur les villas littorales de l'Italie romaine: 3. siècle av. J.C.-3. siècle ap. J.C.*, Rome, École française de Rome.

Lanzara E., Scandurra S., Musella C., Pulcrano M., Palomba D., Asprone D., di Luggo A. (2021). *Modellazione parametrica delle volte e implementazione condivisa del dato in sistemi HBIM_Parametric modelling of vaults and shared implementation in HBIM systems*, in Empler T., Caldaroni A., Fusinetti A. (a cura

di), *3D Modeling & BIM 2021 – Digital Twin*, Dei editore.

Libertini G. (1999). *Persistenza di luoghi e toponimi nelle terre delle antiche città di Atella e Acerrae*, Sant'Arpino, Istituto di studi atellani, 1999.

Manacorda D. (2010). *Archeologia in città tra ricerca, tutela e valorizzazione*, in *Il Capitale culturale “Studies on the Value of Cultural Heritage”*, Macerata, Eum edizioni università di Macerata, vol. 1, pp. 131-141. <https://doi.org/10.13138/2039-2362/17>.

Mandolesi L., Montagnetti R., Pickel D.G. (2022). *Come nasce una base GIS per l'archeologia open source, sviluppata da archeologi per gli archeologi: lo scavo di Poggio Gramignano, Lugnano in Teverina (TR)*, in A. Arrighetti, R. Pansini (a cura di), *Sistemi e tecniche di documentazione, gestione e valorizzazione dell'architettura storica. Alcune recenti esperienze*, «Archeologia e Calcolatori», vol. 33.1, pp. 93-112. <https://doi.org/10.19282/ac.33.1.2022.06>

Mansuelli G.A. (1958). *Le ville del mondo romano*, Milano, Pleion, 1958.

Mansuelli G.A. (1958). *Le ville nel mondo romano*, Milano, Pleion.

Medri M. (2003). *Manuale di rilievo archeologico*, Roma-Bari, Editori Laterza.

Mehrer M.W. (2002). *A GIS-based archaeological decision-support model for cultural resource management*, in “Archeologia e Calcolatori”, vol. 12, pp. 125-134.

Mielsch H. (1990). *La villa romana*, Firenze, Giunti editore.

Ortalli J. (2006). *Vivere in villa: le qualità delle residenze agresti in età romana*, atti del Convegno (Ferrara, gennaio 2003), Firenze, Le lettere, 2006.

Pansini R. (2022). *Rilievo, documentazione e ricostruzione di un centro monumentale con fotogrammetria e modellazione tridimensionali: il caso della città romana di Sala*, in A. Arrighetti, R. Pansini (a cura di), *Sistemi e tecniche di documentazione, gestione e valorizzazione dell'architettura storica. Alcune recenti esperienze*, in “Archeologia e Calcolatori”, 33.1, pp. 239-256. <https://doi.org/10.19282/ac.33.1.2022.13>

Paris S. (2017). *The transformation of technological culture in design, through new tectonics and digital technologies. International teaching and research scenarios*, in “TECHNE - Journal of Technology for Architecture and Environment”,

n. 13, pp. 194-203. <https://doi.org/10.13128/Techne-19746>

Parrinello, S., Picchio, F. (2019). *Integration and comparison of close-range SFM methodologies for the analysis and the development of the historical city center of Bethlehem*, in “The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences”, XLII-2/W9, pp. 589-595. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-589-2019>.

Pensabene P., Gasparini E. (2012). *La villa romana di Cottanello (Rieti): nuove indagini della Sapienza, Università di Roma a quarant'anni dalla scoperta*, in “Lazio e Sabina”, n. 8, pp. 147-157.

Previtali M. (2019). *A virtual logbook for the documentation of a continuously changing archaeological site: the San Clemente site in Albenga (Italy)*, in “Virtual Archaeology Review”, vol. 10, n. 21, pp. 56-66.

Pulcrano M., Scandurra S., Fragalà E., Palomba D., di Luggo A. (2021). *Multi-sensor data acquisition and integration processes for the study and documentation of the Church of Santa Maria degli Angeli in Pizzofalcone in Naples*, in “The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences”, XLVI-M-1-2021, pp. 571-578. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-M-1-2021-571-2021>

Remondino F., Rizzi A. (2010). *Reality-based 3D documentation of natural and cultural heritage sites-techniques, problems and examples*, in “Applied Geomatics”, vol. 2, pp. 85-100.

Romizzi L. (2001). *Ville d'otium dell'Italia antica: 2. sec. a. C.-1. sec. d. C.*, Napoli, Edizioni scientifiche italiane.

Russo M. (2020). *La fotomodellazione in ambito archeologico. Potenzialità, limiti e prospettive in storia-restauro. Ricerche a Roma e nel Lazio*, Roma, GB EditoriA, pp. 133-147.

Russo M., Remondino F., Guidi G. (2011). *Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico* in “Archeologia e Calcolatori”, vol. 22, pp. 169-198.

Russo M., Remondino F., Guidi G. (2011). *Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico*, in “Archeologia e Calcolatori”, vol.

22, pp. 169-198.

Saleri R., Cappellini V., Nony N., De Luca L., Pierrot-Deseilligny M., Bardiere E., Campi M. (2013). *UAV photogrammetry for archaeological survey: The Theaters area of Pompeii* in *Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage)*, Marseille, pp. 497-502.

Salerno R. (2012). *Tecniche del "Disegno-Rilievo": Disegnare nell'epoca di Internet*, in G. D'Acunto (a cura di), *Complessità e configurazione. Disegno e geometria delle forme architettoniche*, Venezia, Cafoscarina.

Santagati C. (2014). *Metodologie digitali per il rilievo e la valorizzazione del patrimonio culturale ipogeo*, in "Virtual Archaeology Review", vol. 5, n. 10, pp. 82-92.

Scagliarini Corlàita D., Guidazzoli A., Salmon Cinotti T. et al. (2003). *Archeologia virtuale e supporti informatici nella ricostruzione di una domus di Pompei*, in "Archeologia e Calcolatori", vol. 14 (2003), pp. 237-274.

Stefani G. (1998). *Boscoreale: la Villa di "Asellius" e le sue pitture*, in "Rivista di Studi Pompeiani", vol. 9, pp. 41-62.

Swoboda K.M. (1924). *Römische und Romanische Paläste*, Vienna, Böhlau.

Tessaro Pinamonti A. (1984). *Rapporti fra ambiente naturale ed ambiente architettonico nella villa romana del I sec. d.C. in Italia*, "Rivista di Archeologia", n. 8, 1984.

Tessaro Pinamonti A. (2015). *Rapporti fra ambiente naturale ed ambiente architettonico nella villa romana del 1. sec. d.C.*

Ugo V. (1994). *Fondamenti della rappresentazione architettonica*, Bologna, Esculapio.

Zannini U. (2004). *La scoperta di Urbana: indagini storico-archeologiche nel territorio di Francolise*, Napoli, Istituto grafico editoriale italiano.

Zannini U. (2010). *Testimonianze storiche, archeologiche ed artistiche del territorio di Francolise*, Napoli-Dragoni, s.n.-Imago media.

Zubrow E.B.W. (2006). *Digital Archaeology: a historical context* in T.L. Evans,

P.T. Daly (a cura di), *Digital Archaeology Bridging Method and Theory*, New York, Routledge Editore, pp. 8-27.

INDICE DELLE FIGURE

Fig. 1 _ Caratterizzazione delle tecniche edilizie. Fonte: Medri M., Manuale di rilievo archeologico, 2003	p. 21
Fig. 2 _ Visualizzazione in ambiente tridimensionale della nuvola di punti della Villa di Caius Olius Ampliatus (Ponticelli, Napoli). Elaborazione di S. Acquaviva	p. 23
Fig. 3 _ Terme di via Terracina (sopra), Terme di Baia (centro), Anfiteatro di Pozzuoli (sotto). Fotografie a cura dell'autrice	p. 25
Fig. 4a _ Tour virtuale della Villa romana di Caius Olius Ampliatus. Elaborazione grafica S. Acquaviva	p. 29
Fig. 4b _ Tour virtuale con utilizzo di immagini 360° della Villa romana di San Rocco (Francolise, Caserta). Elaborazione grafica S. Acquaviva	p. 29
Fig. 5 _ Etruschi in 3D. Fonte: Remondino, F. et al. (2011). The Etruscan in 3D: from space to underground. Geoinformatics FCE CTU Journal, vol. 6, pp. 283-290, Prague, Czech Republic.	p. 30
Fig. 6 _ Rilievo e ricostruzione del Teatro romano di Benevento. Fonte: Campi M. et al. (2019). Digital surveys and 3d reconstructions for augmented accessibility of archaeological heritage, in ISPRS, Volume XLII-2/W9, pp. 205-212.	p. 31
Fig. 7 _ Fig. 7 _ Schema riassuntivo delle ICT. Elaborazione grafica S. Acquaviva	p. 33
Fig. 8 _ Strumenti e tecniche per rilievi e misure 3D. Fonte: Remondino, F. (2011).	

3D surveying and modelling of complex architectural sites and heritage objects. DISEGNARECON, 4(8), 90–98. Rielaborazione grafica S. Acquaviva	p. 35
Fig. 9 _ Scavo archeologico relativo ai Cantieri della Metropolitana di Napoli (Stazione Municipio). Fonte: Fregonese et al. (2016). 3D survey technologies: investigations on accuracy and usability in archaeology. The case study of the new “Municipio” underground station in Naples.	p. 36
Fig. 10 _ Nuvola di punti dello Scalone monumentale delle Terme di Agnano. Elaborazione S. Acquaviva	p.37
Fig. 11 _ Differenti tipologie di rappresentazione della nuvola di punti: RGB, elevazione e normali. Ingresso del Complesso Termale di Agnano. Elaborazione S. Acquaviva	p. 38
Fig. 12 _ Classificazione strumentazioni image-based e range-based. Elaborazione S. Acquaviva	p. 38
Fig. 13 _ Differenti viste della nuvola di punti dell’ambiente ipogeo della Villa romana di Ponticelli (NA). Elaborazione S. Acquaviva	p. 40
Fig. 14 _ Classificazione laser scanner. Elaborazione grafica S. Acquaviva	p. 41
Fig. 15 _ Triangulation scanner (sopra), sistemi time of flight (centro), sistemi phase shift (sotto). Elaborazione grafica S. Acquaviva	p. 42
Fig. 16 _ Principio del processo structure from motion da immagini multiple. Elaborazione grafica S. Acquaviva	p. 44
Fig. 17 _ Elaborazione fotogrammetrica di una struttura archeologica (villa romana di Ponticelli, Napoli). Elaborazione S. Acquaviva	p. 46
Fig. 18 _ Elaborazione fotogrammetrica di un altare. Elaborazione S. Acquaviva	p. 47
Fig. 19 _ Integrazione della nuvola di punti laser scanner e fotogrammetrica mediante la scelta di control point. Elaborazione S. Acquaviva	p. 50
Fig. 20 _ Classificazione dei processi di editing sui modelli reality-based. Elaborazione grafica S. Acquaviva	p. 52
Fig. 21 _ Decimazione modello mesh. Elaborazione S. Acquaviva	p. 53
Fig. 22 _ Operazione di remeshing applicato al modello poligonale. Elaborazione S. Acquaviva	p. 53
Fig. 23 _ Operazioni di semplificazione del modello poligonale. Fonte: S. Acquaviva et al., Reality-based model and 3d information systems: a gis 3d to mapping the crack panel of the church of Santa Maria degli Angeli in Pizzofalcone in Naples, 2022.	p. 54
Fig. 24 _ Rappresentazione bidimensionale delle strutture di ingresso del Complesso Termale di Agnano. Elaborazione S. Acquaviva	p. 56
Fig. 25 _ Rappresentazione bidimensionale della fontana del Complesso Termale di Agnano. Elaborazione S. Acquaviva	p. 57

- Fig. 26 _ Rappresentazione bidimensionale e ricostruzione del salone centrale del Complesso Termale di Agnano. Elaborazione S. Acquaviva p. 58
- Fig. 27 _ Nuvola di punti con individuazione delle geometrie costruttive degli ovali di pianta e sezione. Fonte: S. Scandurra et al., Sistemi voltati nei processi cloud to BIM - Vaulted systems in cloud to BIM procedures, in 3D modeling e BIM p. 60
- Fig. 28 _ Segmentazione e classificazione delle nuvole di punti. Fonte: Grilli E. et al. (2018). From 2d to 3d supervised segmentation and classification for Cultural Heritage applications in ISPRS, Vol. XLII-2, pp. 399–406. p. 60
- Fig. 29 _ Segmentazione e classificazione dei modelli reality-based della Chiesa di Santa Maria degli Angeli a Pizzofalcone (Napoli). Fonte: S. Acquaviva et al., Reality-based model and 3d information systems: a gis 3d to mapping the crack panel of the church of Santa Maria degli Angeli in pizzofalcone in naples, 2022. p. 61
- Fig. 30 _ Fasi dell'evoluzione dei sistemi GIS: dall'ideazione alla realizzazione. Elaborazione grafica S. Acquaviva
- Fig. 31 _ Workflow operativo per i progetti strutturati in ambiente GIS. Elaborazione grafica S. Acquaviva p. 64
- Fig. 32 _ GIS del sito archeologia di Segesta. Fonte: Taccola E. et al. (2017). Segesta. Agora. Dal rilievo fotogrammetrico 3D alla creazione di un GIS su piattaforma Open Source in Annali della Scuola Normale Superiore di Pisa, serie 5, supplemento. p. 66
- Fig. 33 _ Integrazione Sistemi GIS 3D e BIM. Fonte: Matrone F., Colucci E., De Ruvo V., Lingua A., Spanò A., 2019. HBIM in a semantic 3d GIS database, in Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLII-2/W11, pp. 857–865. p. 72
- Fig. 34 _ Extended Matrix. Fonte: Demetrescu et al. From Field Archaeology to Virtual Reconstruction: A Five Steps Method Using the Extended Matrix In Appl. Sci. 2021, 11(11), 5206 p. 76
- Fig. 35 _ Mappatura dei fenomeni di degrado in aderenza al modello poligonale. Fonte: : S. Acquaviva et al., Reality-based model and 3d information systems: a gis 3d to mapping the crack panel of the church of Santa Maria degli Angeli in pizzofalcone in naples, 2022. p. 77
- Fig. 36 _ Villa rustica Di Caius Olius Ampliatus, pars rustica. Ripresa aerea (Google earth). Fotografia a cura dell'autrice. p. 82
- Fig. 37 _ Mosaici delle sale per gli ospiti, IV sec. d. C., mosaico, Villa del Casale di Piazza Armerina. p. 83
- Fig. 38 _ Villa d'otium di Oplontis (Villa di Poppea). Ripresa aerea (Google earth). Fotografia a cura dell'autrice. p. 84
- Fig. 39 _ Villa marittima di Pollio Felice (Sorrento, Napoli). Vista aerea e strutture murarie degli ambienti della villa. p. 84
- Fig. 40 _ Ricostruzione Villa della Pisanella a Boscoreale (villa rustica). Ricostruzione Villa dei Misteri (villa d'otium). Fonte: Russo D., Sulla classificazione delle Ville Romane del Rostovzev,

Sylva Mala II, Bollettino del Centro Studi Archeologici di Boscoreale, Boscotrecase e Trecase. Mielsch H., La villa romana, 1990, pag.37.	p. 85
Fig. 41 _ Villa romana del Fondo Brancaccio in Contrada Civita Giuliana a Pompei. Rielaborazione grafica a cura dell'autrice	p. 86
Fig. 42 _ Villa della Pisanella (Boscoreale). Rielaborazione grafica a cura dell'autrice	p. 86
Fig. 43 _ Villa di Ponticelli (Napoli). Rielaborazione grafica a cura dell'autrice	p. 87
Fig. 44 _ Ville d'otium: Villa di Asellius (Boscoreale, Napoli), Villa Damecuta (Capri, Napoli), Villa di Cottanello (Rieti), Villa Diomede (Pompei, Napoli). Rielaborazione grafica a cura dell'autrice	p. 88
Fig. 45 _ Scheda informativa. Elaborazione S. Acquaviva	p. 91
Fig. 46 _ Tabella delle ville romane generata nel database postgresQL. Elaborazione S. Acquaviva	p. 91
Fig. 47 _ Visualizzazione grafica della tabella delle ville romane generata nel database postgresQL. Elaborazione S. Acquaviva	p. 92
Fig. 48 _ Tabella attributi del database Ville_Romane. Elaborazione S. Acquaviva	p. 94
Fig. 49 _ Visualizzazione della Villa di San Rocco (Francolise). Tabella attributi. Elaborazione S. Acquaviva	p. 95
Fig. 50 _ Localizzazione della Villa San Rocco all'interno dei confini cittadini	p. 97
Fig. 51 _ Villa San Rocco (Francolise)	p. 98
Fig. 52 _ Localizzazione del comune di Francolise all'interno dei confini provinciali. Elaborazione grafica S. Acquaviva	p. 98
Fig. 53 _ Il paesaggio e i rilievi montuosi dell'area nord di Caserta. Elaborazione grafica S. Acquaviva	p. 98
Fig. 54 _ M. De Laurentiis, Universae Campaniae Felicis Antiquitates, 1826.	p. 99
Fig. 55 _ Terra di Lavoro Olim Campania felix. Magini G., 1642	p. 99
Fig. 56 _ Planimetria della Villa San Rocco I e II, 1962. Archivio della Soprintendenza archeologia, belle arti e paesaggio per le province di Caserta e Benevento.	p. 101
Fig. 57 _ Veduta verso la piana del Volturno e il mare. Foto S. Acquaviva	p. 103
Fig. 58 _ Villa di San Rocco. Periodo I. Elaborazione grafica S. Acquaviva	p. 104
Fig. 59 _ Sezione longitudinale e trasversale della villa. Elaborazione grafica S. Acquaviva	p. 105
Fig. 60 _ Pavimentazione ambiente 1 e serbatoio (sinistra). Particolare delle basi dei contrafforti dell'ambiente 4 (destra)	p. 105
Fig. 61 _ Serbatoio a pianta circolare dell'ambiente 1 (sinistra) e Dolium (destra) del Periodo I	

(Cotton, 1978)	p. 107
Fig. 62 _ Villa di San Rocco. Periodo IA (Cotton, 1978)	p. 108
Fig. 63 _ Linea di separazione tra i mosaici del I e del II periodo. Foto S. Acquaviva	p. 109
Fig. 64 _ Cubicola (4-5)- Foto S. Acquaviva	p. 109
Fig. 65 _ Villa di San Rocco Periodo II. Elaborazione grafica S. Acquaviva	p. 110
Fig. 66 _ Frammenti delle colonne del peristilio centrale (Cotton, 1978)	p. 113
Fig. 67 _ Vista sul Triclinium e sul tablinum. Foto di S. Acquaviva	p. 113
Fig. 68 _ Mosaici del tablinium (sinistra) e del triclinium (destra). Foto di S. Acquaviva	p. 114
Fig. 69 _ Corridoi di accesso agli ambienti. Foto di S. Acquaviva	p. 114
Fig. 70 _ Mosaico del Triclinium, durante lo scavo (Cotton 1978) e stato attuale (foto a cura dell'autrice)	p. 115
Fig. 71 _ Ambienti della pars urbana. Foto S. Acquaviva	p. 115
Fig. 72 _ Le fornaci della Villa di Francolise. Foto S. Acquaviva	p. 116
Fig. 73 _ Ambienti dell'Oletum (in primo piano). Strutture moderne realizzate sulle fornaci durante la Seconda guerra mondiale (Cotton, 1978)	p. 117
Fig. 74 _ Suspensurae. Foto S. Acquaviva	p. 118
Fig. 75 _ Frigidarium (sinistra). Calidarium e bagno calda (destra). Foto S. Acquaviva	p. 118
Fig. 76 _ villa San Rocco Periodo II, divisione tipologica. Elaborazione grafica S. Acquaviva	p. 118
Fig. 77 _ Villa romana di San Rocco. Foto di S. Acquaviva	p. 120
Fig. 78 _ Laser scanner Faro Focus 3D s150	p. 121
Fig. 79 _ Struttura in ferro posta a protezione delle strutture murarie	p. 122
Fig. 80 _ Scomposizione dell'area di rilievo e progettazione del rilievo. Elaborazione S. Acquaviva	p. 122
Fig. 81 _ Parametri per il settaggio dello strumento. S. Acquaviva	p. 123
Fig. 82 _ Punti di stazionamento dello scanner	p. 124
Fig. 83 _ Vista corrispondenza all'interno del software proprietario FaroScene. Elaborazione S. Acquaviva	p. 125
Fig. 84 _ Nuvola di punti della Villa di San Rocco elaborata nel software Faro Scene. Elaborazione S. Acquaviva	p. 125
Fig. 85 _ Nuvola di punti della Villa di San Rocco elaborata nel software Faro Scene. Elaborazione S. Acquaviva	p. 126

Fig. 86 _ Report del progetto di rilievo.	p. 126
Fig. 87 _ Bilanciamento del bianco realizzato all'interno del software FaroScene. Elaborazione S. Acquaviva	p. 127
Fig. 88 _ Nuvola di punti generata a seguito della riapplicazione del colore tramite le equirettangolari modificate. Elaborazione S. Acquaviva	p. 128
Fig. 89 _ Acquisizione dei fotogrammi ed elaborazione nuvola di punti. Elaborazione S. Acquaviva	p. 130
Fig. 90 _ Elaborazione del dataset fotogrammetrico terrestre di una nicchia presente all'interno della pars rustica. Elaborazione S. Acquaviva	p. 132
Fig. 91 _ Fase di acquisizione dei fotogrammi	p. 133
Fig. 92 _ Processi di photo-editing per il miglioramento della qualità di un'immagine. Elaborazione S. Acquaviva	p. 134
Fig. 93 _ Nuvola di punti densa. S. Acquaviva	p. 134
Fig. 94 _ Modello poligonale texturizzato. S. Acquaviva	p. 134
Fig. 95 _ Particolare del processamento fotogrammetrico del mosaico dell'area del Balneum. Elaborazione S. Acquaviva	p. 135
Fig. 96 _ individuazione in pianta delle pavimentazioni musive della villa. elaborazione grafica S. Acquaviva	89
Fig. 97 _ Mosaico del tablinum. Fotografie a cura dell'autrice	p. 137
Fig. 98 _ Vista piana, estrapolata dai rilievi precedentemente compiuti, del mosaico del tablinum. elaborazione grafica S. Acquaviva	p. 137
Fig. 99 _ Mosaico del triclinum (mosaico 2). Fotografie a cura dell'autrice	p. 138
Fig. 100 _ Ortofoto estrapolata dai rilievi precedentemente compiuti del mosaico del triclinum. elaborazione grafica S. Acquaviva	p. 139
Fig. 101 _ Mosaico del triclinum (mosaico 3). Fotografie a cura dell'autrice	p. 140
Fig. 102 _ Ortofoto estrapolata dai rilievi del mosaico del triclinum (mosaico 3). Elaborazione grafica S. Acquaviva	p. 140
Fig. 103 _ Mosaico del balneum (mosaico 4). Fotografie a cura dell'autrice	p. 141
Fig. 104 _ Rappresentazione bidimensionale del mosaico del balneum con ipotesi ricostruttiva del disegno originario. Elaborazione grafica S. Acquaviva	p. 142
Fig. 105 _ Pavimentazione marmorea del balneum. Fotografia a cura dell'autrice.	p. 143
Fig. 106 _ Ortofoto della pavimentazione marmorea del calidarium, della struttura della vasca e dei tubuli. Elaborazione grafica S. Acquaviva	p. 143

Fig. 107 _ Mosaico del cubiculum (6). Fotografie a cura dell'autrice	p. 144
Fig. 108 _ Ortofoto estrapolata dai rilievi del mosaico del cubiculum (mosaico 6). Elaborazione grafica S. Acquaviva	p. 144
Fig. 109 _ Mosaico del cubiculum (7). Fotografie a cura dell'autrice	p. 145
Fig. 110 _ Mosaico del cubiculum (8). Fotografie a cura dell'autrice	p. 145
Fig. 111 _ Base di dati da importare in ambiente GIS. Elaborazione grafica S. Acquaviva	p. 158
Fig. 112 _ Schema di progettazione di un database	p. 158
Fig. 113 _ Diagramma identificativo dei dati da inserire nel sistema GIS 3D. Elaborazione grafica S. Acquaviva	p. 159
Fig. 114 _ Elementi di un geodatabase. Elaborazione grafica S. Acquaviva	p. 161
Fig. 115 _ Ciclo di vita di un sistema informativo. Elaborazione grafica S. Acquaviva	p. 163
Fig. 116 _ Modello concettuale. Elaborazione grafica S. Acquaviva	p. 164
Fig. 117 _ Diagramma entità-relazione. Elaborazione grafica S. Acquaviva	p. 164
Fig. 120 _ Operazione di decimazione della nuvola di punti. Elaborazione grafica S. Acquaviva	p. 166
Fig. 121 _ Modello High poly. Elaborazione S. Acquaviva	p. 168
Fig. 122 _ Modello low poly. Elaborazione S. Acquaviva	p. 168
Fig. 123 _ Texture baking. Elaborazione S. Acquaviva	p. 168
Fig. 124 _ Modalità di visualizzazione nuvola di punti: Elevazione	p. 173
Fig. 125 _ Modalità di visualizzazione nuvola di punti: RGB	p. 173
Fig. 126 _ Modalità di visualizzazione mesh - Multipatch	p. 174
Fig. 127 _ Segmentazione e classificazione nuvola di punti. Elaborazione grafica S. Acquaviva	p. 174
Fig. 128 _ Creazioni del collegamento (JOIN) tra la tabella attributi delle ville romane 2D e il modello poligonale. Elaborazioni grafiche a cura dell'autrice	p. 177
Fig. 129 _ Visualizzazione dei dati 2D e 3D nel medesimo workspace. Elaborazioni grafiche a cura dell'autrice	p. 179
Fig. 130 _ Visualizzazione dei dati. Elaborazioni grafiche a cura dell'autrice	p. 181



Sabrina Acquaviva (1987) si laurea, nel 2017, in Architettura 5UE presso l'Università degli Studi di Napoli Federico II con una tesi in Rilievo dell'Architettura dal titolo "Complesso termale di Agnano: percorso documentario grafico – conoscitivo per la ricostruzione della memoria". Dal 2019 è cultore della materia per il settore scientifico disciplinare ICAR/17 e svolge attività di ricerca di rilievo e della rappresentazione nell'ambito architettonico, urbanistico e archeologico, con particolare riferimento alle tecnologie di acquisizione reality-based ed ai processi bidimensionali e tridimensionali GIS.

ARCHITETTURA UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II - DIPARTIMENTO DI ARCHITETTURA

DOTTORATO IN ARCHITETTURA TECNOLOGIE SOSTENIBILI RECUPERO E RAPPRESENTAZIONE D

Università degli Studi di Napoli Federico II

Dottorato di Ricerca in Architettura

Tecnologie sostenibili, recupero e
rappresentazione dell'architettura e dell'ambiente
ciclo XXXV

Coordinatore del Dottorato di Ricerca in Architettura

Fabio Mangone

