

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI CATANIA

DIPARTIMENTO DI SCIENZE UMANISTICHE

Dottorato di ricerca in Studi sul patrimonio culturale XXXI ciclo

---

ANTONINO MAZZAGLIA

Ricostruzioni digitali e GIS 3D applicati all'archeologia: Il modello 3D della Necropoli di Porta Nocera (Pompei)

Tesi di dottorato

Tutor: *Chiar.mo Prof. Daniele Malfitana*

ANNO ACCADEMICO 2017 – 2018

A Loriana,
legno e vela con cui viaggiare;
ad Antonella,
porto in cui riposare.

Ringraziamenti

Quando, a conclusione di un'attività di ricerca condotta grazie al sostegno e all'apporto di molti, giunge, in chi ne ha beneficiato, il momento di ringraziare, questo potrebbe apparire come un atto dovuto, che la lunga consuetudine e la familiarità ad un lavoro di gruppo rende, in chi lo riceve, quasi scontato.

Il presente lavoro non sarebbe stato possibile senza l'apporto di molti, senza un lavoro di gruppo maturato in un clima di collaborazione e familiarità. Malgrado ciò vogliano i presenti ringraziamenti non essere accolti come un atto dovuto, ne sia prova la sincera stima e la gratitudine con cui si accompagnano.

Un ringraziamento va ai colleghi del "Laboratorio di Archeologia Immersiva e Multimedia" e del "Laboratorio di geofisica applicata all'archeologia e ai beni monumentali" dell'IBAM-CNR: Samuele Barone, Lara De Giorgi, Giovanni Fragalà, Giovanni Leucci, Danilo Pavone, Salvatore Russo, con i quali si sono condivisi i lavori sul campo e le riflessioni in laboratorio.

Un ringraziamento va ai colleghi del Fraunhofer Institute, a Ralf Kilian, Sara Saba, ai quali si deve l'ideazione e il coordinamento del Pompeii Sustainable Preservation Project.

Un ringraziamento va ai colleghi dell'Istituto per i Beni archeologici e monumentali del Consiglio Nazionale delle Ricerche, ai quali mi accomuna la passione per un lavoro speso alla costante ricerca del nostro passato.

Un ringraziamento va Federica Guzzardi e, soprattutto, a Loriana Arena, il valore del cui sostegno non può trovare adeguata espressione nelle poche righe di un testo.

Un ringraziamento, conservato fino alla fine, va al prof. Daniele Malfitana, senza il quale nulla del presente lavoro, né di quanto condotto da me negli ultimi anni, sarebbe mai stato possibile.

INDICE

Introduzione 9

Parte Prima "Strumenti" 13

Capitolo I - Misurare, Rappresentare, Conoscere 15
1.1. Disegno e conoscenza 15
1.2 Rilievo e disegno per il progetto 22
1.3 Rilievo e disegno per il restauro 35

Capitolo II - Punti e linee. Pixel e Vettori 49
2.1 Dalla matita al mouse 49
2.2 Strumenti di disegno assistito 52
2.3 Da due a tre dimensioni 60

Capitolo III - Strumenti di Rilievo 67
3.1 Misurare, disegnare 67
3.2 Strumenti di rilievo 71
3.3 Il progetto di rilievo 80

Capitolo IV - Modelli Tridimensionali 90
4.1 Dal reale al virtuale 90
4.2 Semiologia dell'immagine 92
4.3 Simboli e iconicità 94
4.4 Modelli 3D come strumenti informativi 100
4.5 Dal virtuale al reale 108

Capitolo V - Database 114
5.1 Dati, informazione e conoscenza 114
5.2 Banche dati 115
5.3 Il progetto di una banca dati 124
5.4 Banche dati geospaziali 132
5.5 Banche dati e archeologia 136

Capitolo VI - Geographic Information System 2d/3d 142
6.1 Conoscere attraverso lo spazio 142
6.2 Ricerca, metodologie e condivisione 147
6.3 GIS e archeologia 152

6.4 GIS. Limiti 157

Parte Seconda "Contesti" 162

Capitolo VII - La necropoli di Porta Nocera a Pompei 164
7.1 Necropoli di Porta Nocera 164
7.1.1 Storia degli scavi 164

Capitolo VIII - Il Pompeii Sustainable Preservation Project 178
8.1 Grande Progetto Pompei. Il ruolo della conoscenza 178
8.2 PSPP. Scopi e obiettivi del progetto 182
8.3 Le attività dell'IBAM-CNR 187
8.3.1 Le attività del Laboratorio di geofisica applicata all'archeologia e ai beni monumentali 189
8.3.2. Le attività del Laboratorio di Archeologia Immersiva e Multimedia 193

Parte Terza "risultati" 196

Capitolo ix - L'attività di Rilievo 198
9.1 Pompei fra cartografia storica e carte digitali 198
9.2 Verso un rilievo integrato 203
9.2.1 Rilievo topografico 203
9.2.2 Rilievo fotogrammetrico da drone 208
9.2.3 Rilievo fotogrammetrico close-range 211
9.2.4 Rilievo laser-scanner 216

Capitolo x - La Banca Dati 220
10.1 Grande Progetto Pompei e il "Piano della conoscenza" 220
10.2 *PSPP-Db*. Modello concettuale 223
10.3 *PSPP-Db*. Descrizione della banca dati 229
10.3.1 Progetti, campagne, attività 230
10.3.2 Persone, laboratori, enti 230
10.3.3 Ispezioni, diagnosi, interventi 231
10.3.4 Rilievo 233
10.3.5 Indagini non invasive 233
10.3.6 Analisi tecniche 233
10.3.7 Analisi dei degradi 235
10.3.8 Restauri 235
10.3.9 Scavo archeologico 235
10.3.10 Dal sito all'elemento murario 238
10.3.11 Reperti 238

10.3.12 Immagini, documenti e oggetti 2D 242
10.3.13 Modelli 3D 246
10.3.14 Cronologia 247
10.3.15 Bibliografia 246
10.3.16 Vocabolari 249

Conclusioni 254

Abbreviazioni Bibliografiche 256

Introduzione

La moderna ricerca archeologica, nel perseguire il fondamentale obiettivo della ricostruzione delle società del passato attraverso una paziente e meticolosa opera di raccolta e analisi di dati relativi a molteplici e variegate manifestazioni di quella che, con termine ormai largamente diffuso, viene indicata come "cultura materiale", fa sempre più largo uso dell'apporto di molteplici discipline e tecnologie.

Di pari passo ad una tendenza verso una specializzazione e un approfondimento sempre maggiore, che hanno portato la disciplina non solo ad estendere progressivamente i confini cronologici oggetto del proprio interesse, ma a prendere in esame tipologie di manufatti la cui mancanza di qualità estetiche o artistiche, fino a qualche decennio addietro avrebbe destinato all'oblio all'interno di qualche magazzino o, nei casi peggiori, fra il materiale di risulta di uno scavo, si è imposta una crescita esponenziale delle necessità di documentazione, delle capacità di archivizione di quantità sempre più estese di dati, di strumenti utili alla loro analisi, così come alla divulgazione e condivisione dei risultati.

Infatti al fondo di qualsiasi processo di rinnovamento della disciplina è possibile scorgervi il permanere di esigenze fondamentali, fra le quali la necessaria sintesi degli apporti di differenti specializzazioni e l'integrazione dei dati, al fine di giungere, attraverso la generazione di informazioni e nuova conoscenza, a quadri complessivi e organici. Tale aspirazione, sta assumendo negli ultimi anni, un rilievo sempre maggiore, attraverso i ripetuti richiami, avanzati da più parti, ad un'archeologia che sappia essere "globale". Dietro tale appello, oltre al timore che un'eccessiva frammentazione della disciplina in mille specializzazioni possa far perdere di vista il necessario momento di sintesi, si cela anche l'esigenza di giungere ad un processo virtuoso in cui la conoscenza prodotta serva non solo ad accrescere la nostra comprensione del passato, ma attraverso un'adeguata comunicazione e condivisione, ad una pianificazione condivisa e ad uno sviluppo compartecipato.

La sfida che attende, a ben vedere, la disciplina archeologica è sempre immutata, ma resa semplicemente più complessa dal costante aumento di dati a cui fa da coltraltare la necessità di tempi più rapidi per la generazione di conoscenza, per la divulgazione dei risultati e per la sensibilizzazione delle comunità verso la gestione, la valorizzazione e la tutela del patrimonio culturale in quanto bene comune. A ben vedere, tale sfida ruota intorno ai processi di acquisizione dei dati e a quelli, ad essi conseguenti, di produzione di informazioni e conoscenza.

Il presente lavoro prende in esame alcuni di questi processi, sia per ciò che concerne l'acquisizione dei dati, sia la successiva creazione di conoscenza, lungo tutte le fasi che dalla sua produzione giungono alla necessaria condivisione. Particolare importanza nell'ambito dell'acquisione di dati rivestono le tecniche

di rilievo indiretto, le quali sono state oggetto negli ultimi anni di profonde revisioni tecnologiche, a seguito delle quali sono radicalmente mutate non solo il livello e la qualità dei dati raccolti, ma anche le metodologie di rilievo, e le tecniche di restituzione grafica delle evidenze. La principale conseguenza, che tale sviluppo ha comportato, riguarda la relativa facilità e, di conseguenza, la grande disponibilità di oggetti digitali sia bidimensionali, che tridimensionali, realizzati per finalità differenti, che vanno dalla mera documentazione delle caratteristiche dimensionali e plano-volumetriche per finalità connesse ad analisi tecniche, al restauro, al monitoraggio, alle ricostruzioni virtuali a scopi divulgativi. L'utilizzo per specifiche finalità, tuttavia, non ne esaurisce il valore.

Risalendo indietro dal digitale all'analogico si è tentato nel presente lavoro di riflettere innanzitutto sui significati, sulle funzioni e sul valore del rilievo e delle relative rappresentazioni grafiche di tipo tradizionale, nel loro peculiare rapporto con due differenti e specifici ambiti di applicazione: il disegno per il progetto e il disegno per il restauro. L'intenzione che stava dietro tale "ritorno alle origini" del rilievo, perseguito attraverso l'esame di due degli ambiti di applicazione più importanti per la complessità degli elementi in gioco, fra quelli in cui più forti erano i legami con il patrimonio culturale nella sua componente architettonico-monumentale, era quello di enucleare funzioni e significati dell'atto del misurare e del rappresentare. Azioni che, seguite nel progressivo mutare di tecniche e metodologie, seppur profondamente alterate in alcuni ambiti e per alcune funzioni da tecniche di misura automatiche e da rappresentazioni digitali, conservano intatti gran parte dei significati che ne stanno comunque alla base e richiedono di essere compresi, anche per meglio porsi di fronte agli esiti più clamorosi delle moderne tecnologie.

Le tecniche e le strumentazioni di rilievo a sensori attivi e passivi, oggi ampiente diffuse, sono state oggetto di uno specifico riesame, volto a definire, alla luce delle peculiarità di ciascuno di esse, potenzialità e limiti nei differenti ambiti di utilizzo e in relazione a specifiche finalità. I risultati conseguiti attraverso tale riesame, di significati, tecniche e tecnologie applicate al rilievo e alla restituzione grafica, hanno fornito la base per un approccio più consapevole nei confronti degli oggetti digitali e degli ambienti di realtà "virtuale", dove vengono modellati, interconnessi e fruiti.

Ciò ha stimolato infine una riflessione sul valore e sull'utilizzo degli oggetti digitali come strumenti e veicolo di conoscenza che, nel caso degli oggetti digitali tridimensionali, offrono capacità mimetiche, rispetto all'oggetto reale di cui sono copia, in termini morfologico-dimensionali e nella resa delle superfici, tali da poter essere annoverati fra le immagini a più alto valore iconico teorizzate dalla moderna semiologia. In tale ruolo di oggetti semantizzati, trovano la propria radice moderni sviluppi, fra i quali, per le importanti connessioni che lasciano intuire con l'ambito del patrimonio culturale, trovano posto i software per il Building Information Modelling, nati per la progettazione edilizia ex novo, e recentemente estese alla gestione dell'edificato storico dei centri urbani.

Seguendo tale percorso, dall'oggetto digitale come veicolo di dati propri o derivati da specifiche associazioni, ci si è spostati a considerare le potenzialità e i limiti dei moderni DataBase Management Systems applicati alla ricerca archeologica e ai Geographic Information Systems, che ne consentono la gestione e l'analisi attraverso la componente spaziale. L'integrazione degli uni e degli altri consente di disporre oggi di potenti ambienti virtuali, veri e propri modelli sostitutivi del reale, attraverso i quali analizzare i dati e generare nuova conoscenza, dinamicamente strutturata, a servizio diretto di quella realtà di cui costituiscono un vero e proprio sostituto digitale.

I risultati ottenuti da questa base teorica, prima parte del presente lavoro, sono serviti da stimolo per condurre alcune sperimentazioni, applicate ad un caso concreto di studio: la necropoli di Porta Nocera a Pompei.

A tal fine si sono sfruttati i risultati conseguiti con la partecipazione ad un importante progetto di ricerca internazionale, il "Pompeii Sustainable Preservation Project", che vede i laboratori di Archeologia Immersiva e Multimedia e il Laboratorio di geofisica applicata all'archeologia dell'Istituto per i Beni Archeologi e Monumentali del Consiglio Nazionale delle Ricerche coinvolti, insieme a diversi gruppi appartenenti a molteplici istituzioni internazionali, capeggiate dall'Fraunhofer Institute e coordinati dal Parco archeologico nazionale di Pompei, nella messa con un approccio interdisciplinare di tecnologie e materiali per il restauro architettonico dei monumenti archeologici.

La realizzazione di rilievi laser scanner e fotogrammetrici, insieme all'esecuzione di indagini non invasive realizzate dai laboratori dell'IBAM e coordinati sul campo dallo scrivente, hanno non solo offerto la documentazione necessaria ai colleghi di differenti istituzioni, per operare le attività di restauro, ma hanno offerto la possibilità di disporre di una mole notevole di dati, raccolti nell'arco di quattro anni di attività. Questa ha costituito la base di sperimentazione del presente lavoro, volta al riutizzo dei dati digitali come strumento di archiviazione, analisi e generazione di nuova conoscenza aperta a molteplici finalità e utilizzi.

Ciò ha portato alla realizzazione di una banca dati con estensione geospaziale, che tenendo conto delle precedenti esperienze maturate in importanti progetti di gestione delle informazioni come il Sistema Informativo realizzato nell'ambito del "Grande Progetto Pompei", ha integrato i dati acquisiti durante le attività di ricerca dell'IBAM-CNR in occasione della partecipazione ai lavori del "Pompeii Sustainable Preservation Project". Una piattaforma GIS, è stata inoltre appositamente sviluppata per la gestione e per l'analisi, su base geospaziale, della banca dati e affiancata da un WebGIS, che ne potrà consentire una divulgazione e una diffusione ad un ampio e variegato pubblico.

PARTE PRIMA

STRUMENTI



Di Prometeo si narrano quattro leggende: stando alla prima, poiché aveva tradito gli dei per gli uomini, fu incatenato al Caucaso, e gli dei mandarono delle aquile a divorargli il fegato, che sempre ricresceva.
Stando alla seconda, per il dolore dei colpi di becco Prometeo si addossò sempre più alla roccia fino a diventare una cosa sola con essa.
Stando alla terza, nei millenni il suo tradimento fu dimenticato, dimenticarono gli dei, le aquile, lui stesso.
Stando alla quarta, ci si stancò di ciò che non aveva più ragione di essere. Gli dei si stancarono, si stancarono le aquile, la ferita, stanca, si richiuse. Restò la roccia inesplicabile.
La leggenda tenta di spiegare l'inspiegabile. Siccome essa proviene da un fondo di verità, deve finire nuovamente nell'inspiegabile.

F. KAFKA, *Prometeo*, 1918.

CAPITOLO I

Misurare, Rappresentare, Conoscere

Tra le molte virtù di Chuang-Tzu c'era l'abilità nel disegno.
Il re gli chiese il disegno di un granchio.
Chuang-Tzu disse che aveva bisogno di cinque anni di tempo
e di una villa con dodici servitori.
Dopo cinque anni il disegno non era ancora cominciato.
"Ho bisogno di altri cinque anni" disse Chuang-Tzu.
Il re glieli accordò.
Allo scadere dei dieci anni, Chuang-Tzu prese il pennello
e in un istante, con un solo gesto, disegnò un granchio,
il più perfetto granchio che si fosse mai visto.

Italo Calvino, *Rapidità*, 1985.

1.1 Disegno e conoscenza

La definizione degli elementi e dei processi che, nel loro complesso, costituiscono il fondamento della conoscenza umana ha da sempre attratto la curiosità e gli sforzi di illustri pensatori, come dimostra l'antichità e la costante presenza di riflessioni epistemologiche e gnoseologiche lungo tutto il corso della storia del pensiero occidentale[1]. Aldilà delle conclusioni, talvolta notevolmente differenti a cui sono giunte teorie elaborate da premesse e in contesti culturali estremamente diversificati, una qualsiasi definizione di conoscenza non può esimersi dall'affrontare questioni relative sia alla realtà esterna all'uomo, che con un processo di astrazione può essere semplificata in un insieme di dati e relazioni che ne governano l'esistenza e il comportamento, sia alla realtà ad esso interna, intesa come capacità di archiviazione, integrazione, analisi, sintesi e interpretazione di dati. A questi due elementi va aggiunto quello relativo alla natura e affidabilità, in termini di universalità e veridicità, ovvero di corrispondenza fra realtà e percezione, delle regole e dei processi che presiedono il trasferimento di dati dalla realtà esterna a quella interna al soggetto senziente.

Se la questione relativa ad un'esatta definizione dei processi cognitivi volta a definirne caratteri-stiche, campi di applicazione e limiti costituisce un argomento di estremo interesse per qualsiasi ambito della ricerca scientifi-

[1] Dalle teorie presocratiche e socratiche, attraverso i fondamentali punti di snodo rappresentati dal pensiero platonico, aristotelico e neoplatonico, l'epistemologia e la gnoseologia hanno accompagnato, attraverso passaggi cruciali rappresentati dall'empirismo inglese, dai contributi seicenteschi di Leibniz e Cartesio, e dalle fondamentali acquisizioni kantiane, lo sviluppo della filosofia fino ai recenti esiti di Popper e Kuhn.

ca, richiedendo di misurarsi con questioni legate alla presunta oggettività del dato e ad una ineliminabile componente soggettiva dell'interpretazione, la ricerca storico-archeologica non può naturalmente costituire un'eccezione. Anche in questo caso l'obiettivo rappresentato dalla ricostruzione delle civiltà del passato, viste come sistemi culturali complessi, deve necessariamente passare attraverso l'acquisizione dei dati riconducibili, in estrema sintesi, a manufatti ed ecofatti, manifestazioni materiali, che in forma generalmente lacunosa sono giunti fino a noi, e alla successiva analisi e interpretazione dello studioso. Le possibilità di giungere a questo obiettivo, sono a ben vedere, strettamente legate alla natura e struttura della realtà esterna, ai peculiari processi di analisi e di interpretazione del soggetto senziente e alle modalità di relazione fra realtà esterna e interna.

Il rilievo e la relativa rappresentazione grafica, forniscono un contributo di fondamentale importanza per il raggiungimento delle finalità perseguite dalla ricerca archeologica, sopra rapidamente e sommariamente richiamate, purché si sia disposti ad abbandonare l'approccio tradizionale, ancora in larga parte operante in seno alla disciplina, che ha tenuto nettamente separati, come momenti successivi, la fase del rilievo, insieme alla relativa documentazione grafica, da quella dell'interpretazione e dello studio dell'oggetto rilevato. Dietro tale distinzione si cela un'interpretazione del rilievo archeologico come un'attività "*a priori*" che, in virtù della forte componente tecnica e pratica, s'immagina possa applicarsi, nei limiti consentiti dal campo di variabilità di metodologie e di strumentazioni, astraendo dalle specifiche peculiarità dell'oggetto rilevato, e mantenendo al contempo intatta l'aspirazione ad una salda oggettività. Destituito da qualsiasi rapporto con quei quesiti di natura storico-archeologica che forniscono la ragione ultima di ogni ricerca, il rilievo ha finito per essere considerato come un processo meramente tecnico, richiedente esperienza nell'utilizzo di strumentazione di precisione e una buona dose di abilità manuale, maturata tramite una paziente applicazione pratica, l'una e l'altra unite a eventuali doti artistiche e alla conoscenza di norme e tecniche di rappresentazione.

Tali opinioni, ampiamente diffuse anche se generalmente inconfessate, stanno al fondo della storica propensione volta a demandare ad architetti, esperti nell'analisi tecnica di monumenti antichi e nel restauro, quando non ad altre professionalità, la produzione di quella documentazione a cui, l'archeologo riconosce e attribuisce un alto valore scientifico. Ciò ha determinato l'assenza, in tutte le fasi del percorso formativo universitario e di specializzazione in archeologia, di insegnamenti dedicati al rilievo architettonico o al disegno di architettura[2], che insieme a discipline volte a forni-

[2] V. Manacorda 2003, pp. V-VI; Medri 2003, pp. VII-IX; Cairoli Giuliani2008, pp. 9-12.

[3] È indice della scarsa attenzione prestata in passato a tali problematiche, come la prima Cattedra universitaria di "Rilievo e analisi tecnica dei monumenti antichi" in Italia, risalga agli anni Settanta del secolo scorso. Si tratta della Cattedra istituita in seno all'Istituto di Topografia antica dell'Università La "Sapienza" di Roma, che fu ricoperta fino al 2011 da Cairoli Fulvio Giuliani. Medri 2003, p.VIII.

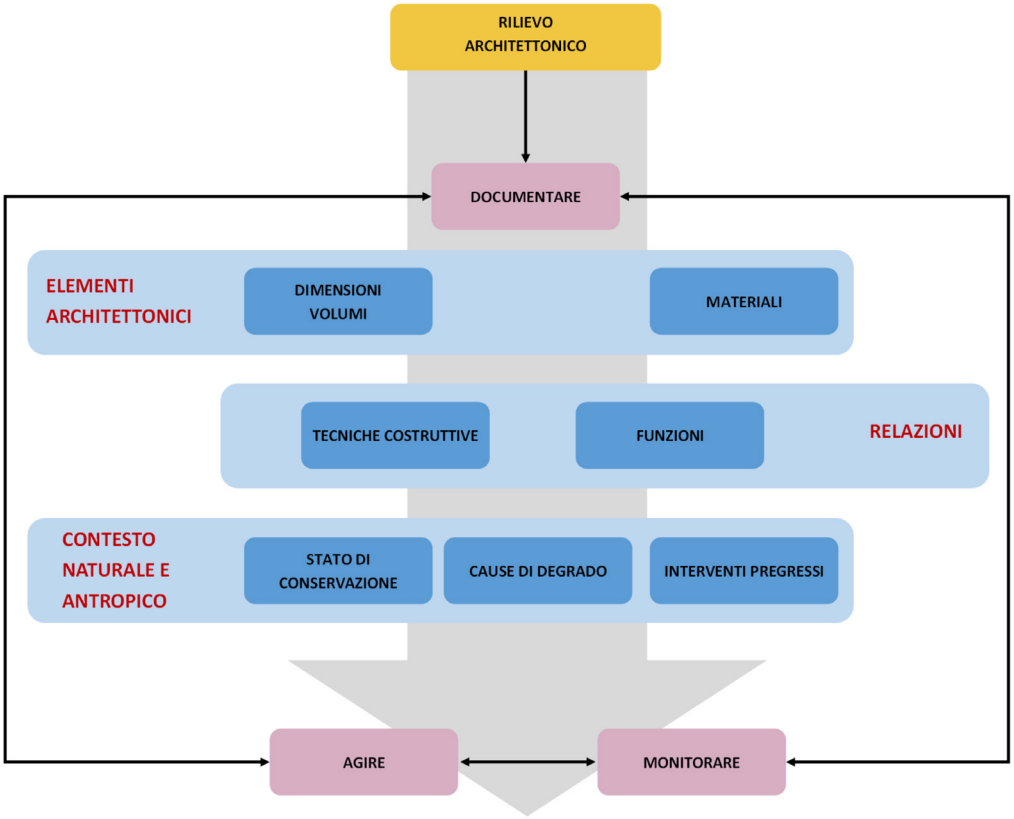


Fig. 1.1. Rilievo architettonico. Oggetti, metodologie, restituzione e finalità (elaborazione personale).

re le competenze necessarie per un'analisi delle tecniche costruttive e della scienza dei materiali edilizi, diano ragione del loro impiego, della durata, delle azioni di degrado, aspetti che costituiscono parte essenziale, invece, del percorso formativo di un architetto o di un ingegnere edile o civile[3].

Sebbene tali considerazioni siano valide a prescindere dall'oggetto concreto del rilievo archeologico, esse sono formulate tenendo presente principalmente le problematiche e le peculiarità del rilievo architettonico di monumenti antichi e, in misura minore, quelle insite nella documentazione di scavo e dei reperti mobili, che costituiscono gli altri due oggetti su cui si rivolge l'interesse della rappresentazione archeologica (Fig. 1.1).

Infatti è innegabile che le attività di rilievo e restituzione grafica di reperti, indagini di scavo e monumenti antichi hanno condiviso una comune aspirazione alla registrazione fedele di una sempre maggiore quantità di dati. Tuttavia, se tale esigenza ha comportato la sperimentazione continua di tecniche, metodologie e codifiche nei processi di rilievo e rappresentazione, al fine di supportare l'evoluzione stessa della disciplina archeologica, il disegno e la restituzione grafica di manufatti e reperti, si sono sostanzialmente svincola-

ti, nel corso del tempo, da una stretta ed esclusiva dipendenza dal tecnico-disegnatore, finendo per costituire una delle attività generalmente svolte in prima persona dall'archeologo. A favore di ciò ha certamente contribuito, sia l'ormai chiara definizione dei requisiti minimi che ci si attende dalla documentazione grafica di manufatti archeologici[4], sia la relativa semplicità dell'esecuzione del rilievo e della successiva restituzione di reperti che, se presuppongono la conoscenza di sistemi di codifica, strettamente dipendenti dalla tipologia e dal materiale, in cui è realizzato l'oggetto da rappresentare[5], non richiedono l'utilizzo di strumentazioni complesse per il rilievo diretto dei dati funzionali all'esecuzione di viste e sezioni codificate (Fig. 1.2).

Anche nel caso del rilievo e della documentazione di attività di scavo il sistema di codifica oggi in uso presenta sufficienti caratteri di standardizzazione, pur all'interno di un ventaglio di variabilità dipendente dalle specifiche peculiarità del contesto d'indagine e oscillante fra gli estremi opposti dell'iconicità e dell'astrattezza. Frutto di una lenta evoluzione, svoltasi in parallelo all'affermarsi del metodo stratigrafico, il rilievo di contesti di scavo si presenta ormai chiaramente orientato al soddisfacimento di ben determinati quesiti sottesi al *record* archeologico, finendo con il costituire parte delle specifiche competenze professionali maturate dall'archeologo (Fig. 1.3). Nonostante ciò il contesto geomorfologico e ambientale, l'estensione areale, l'entità stessa di eventuali strutture rilevate costituiscono altrettante variabili che pongono ogni attività di rilievo nell'ambito di uno scavo archeologico come un'entità a sé, la cui complessità talvolta richiede strumentazioni, metodologie di rilievo indiretto e, di conseguenza, competenze professionali, le quali spesso esulano da quelle normalmente possedute da un archeologo.

Le peculiarità dei monumenti con forte valenza archeologica o storico-artistica, conferiscono al rilievo architettonico, che ha in essi il suo specifico campo d'applicazione, caratteri differenti rispetto alla documentazione di manufatti o di contesti di scavo. Dimensioni, articolazione plano-volumetrica, complessità degli elementi architettonici e decorativi, materiali e tecniche costruttive, contesto ambientale e talvolta urbano in cui il monumento si trova inserito, rendono il rilievo architettonico un processo complesso, la cui esecuzione richiede necessariamente l'utilizzo di strumentazioni e metodologie di rilievo indiretto, le quali, come detto, generalmente esulano dalle specifiche competenze in possesso all'archeologo, che in tal caso deve necessariamente servirsi della collaborazione di personale tecnico o di professionisti formati in differenti ambiti disciplinari (Fig. 1.4). Oltre a tali difficoltà, sono le metodologie di analisi del costruito, insieme alle molteplici finalità per cui diventa utile il supporto di tale modalità di documentazione, a

[4] Questi possono riassumersi nella registrazione fedele dei caratteri morfologici e decorativi, che insieme alla componente materica, in gran parte affidata ad altre tecniche di documentazione, costituisce il set minimo di dati necessari per la definizione dei valori storico-artistici di un manufatto.

[5] Pennacchioni 2004.

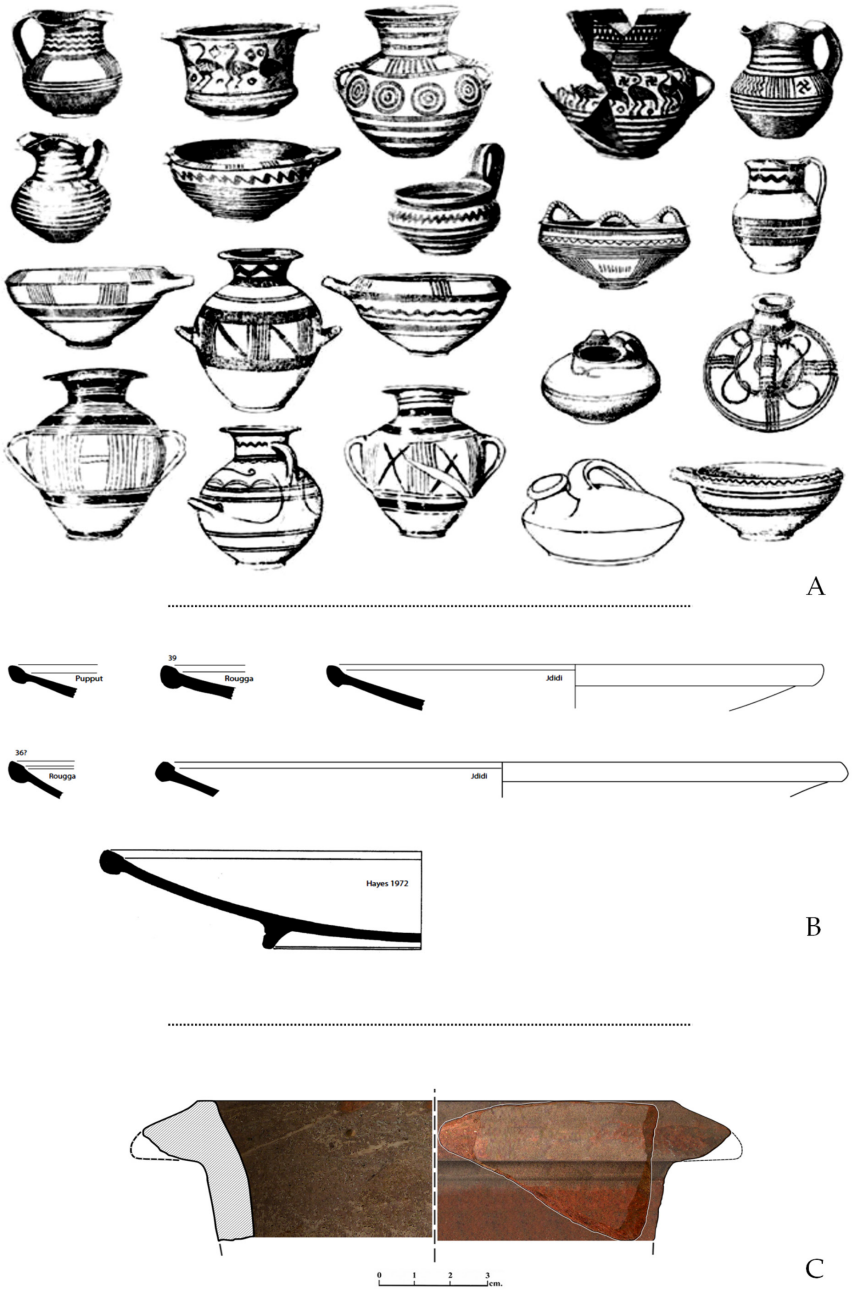


Fig. 1.2. Esempi dell'evoluzione nella codifica e nelle tecniche di rappresentazione di manufatti ceramici. A) da Orsi 1898); B) da Bonifay 2004; C) disegno inedito di O. Pulvirenti (IBAM-CNR).

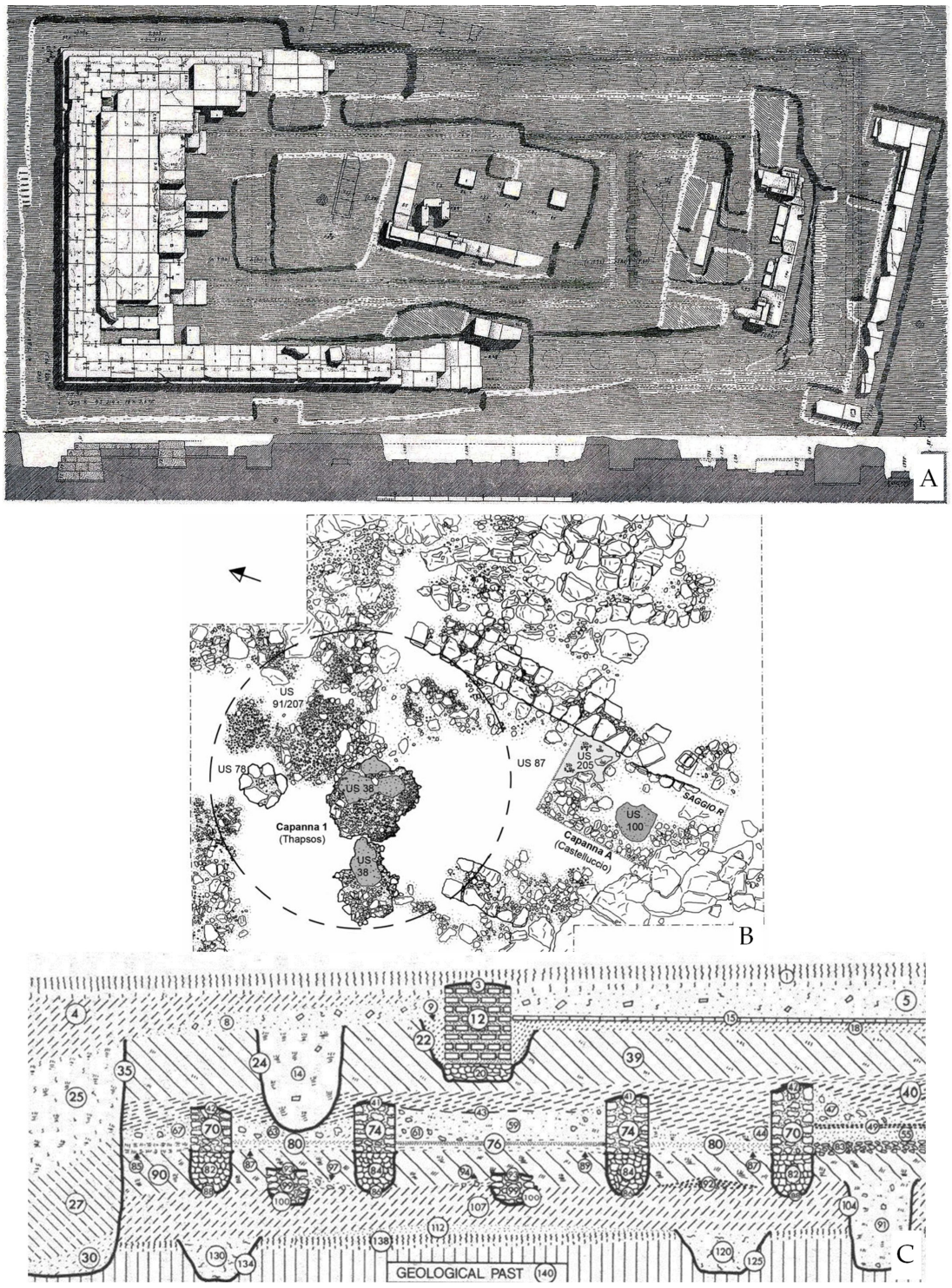


Fig. 1.3. Esempi dell'evoluzione registrata nei sistemi di codifica e rappresentazione di contesti di scavo archeologico. A) Locri, tempio ionico di contrada Marasà da Koldwey-Puchstein *1899, tafel 1; B) Catania, monte San Paolillo, pianta del saggio G/96 da TANASI 2010, p. 85, fig.5; C) Esempio di sezione di tipo "schematizzato", con l'indicazione di linee di interfaccia e numeri di strato, da* Harris *1983, p. 97 fig. 14B.*

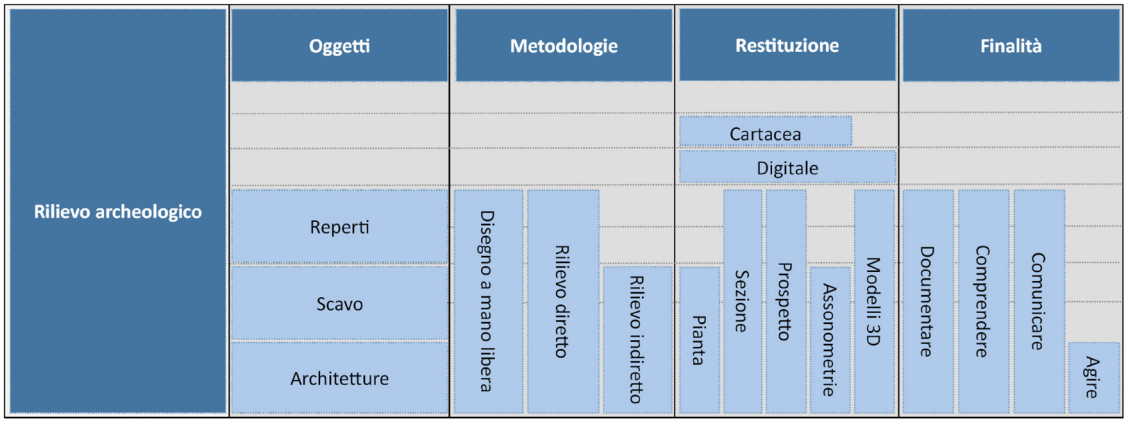


Fig. 1.4. Rapporto fra l'attività di rilievo, differenziato sulla base dell'oggetto della rappresentazione, e professionalità generalmente impiegate per la sua esecuzione.

determinare le peculiarità del rilievo architettonico in ambito archeologico, rendendone molteplici e talvolta anche estremamente differenti gli esiti finali. Infatti le metodologie oggi impiegate per l'analisi e la definizione delle molteplici fasi costruttive di un corpo edilizio, pur con l'impiego della medesima metodologia stratigrafica mutuata, con le differenze determinate dal diverso ambito di applicazione, dalle tecniche di scavo archeologico siano ormai abbastanza mature e possano vantare illustri esempi d'applicazione in ambito nazionale e internazionale, esse non costituiscono ancora una prassi operativa consolidata e basata su metodi e codifiche standardizzate. Pertanto esse non si mostrano, allo stato attuale, capaci né di uniformare, dettando regole e modelli ampiamente accettati, né di guidare con la dovuta sicurezza i processi di documentazione nello specifico ambito dell'architettura storica[6]. Inoltre l'analisi di un edificio o di un monumento a forte valenza archeologica o storico-artistica, non può esaurirsi nella sola lettura stratigrafica degli elevati, eseguita al fine di ricostruirne, attraverso l'identificazione delle singole fasi costruttive e il loro reciproco rapporto, l'evoluzione storica, fatta spesso di al-

[6] La lettura stratigrafica degli elevati, il cui fine principale risiede nella definizione delle sequenze costruttive e nella periodizzazione assoluta di un edificio storico attraverso l'identificazione, l'analisi e l'interpre-tazione delle sequenze stratigrafiche murarie, costituisce la metodologia principale dell'archeologia "dell'edilizia storica", "del costruito", "degli elevati", "del soprasuolo", secondo termini alternativi con cui talvolta ci si riferisce a quella che qui viene indicata come archeologia "dell'architettura". Tuttavia la relativa "giovinezza" di tale disciplina, sviluppatasi in anni recenti in seno all'archeologia medievale, costi-tuisce il principale fattore dietro l'attuale mancanza di standard condivisi nei processi di documentazione e codifica. Per un quadro sulla disciplina vedi i numeri annuali di "Archeologia dell'Architettura", pubblicati a partire dal 1996 come supplemento alla rivista "Archeologia Medievale", e Brogiolo-Cagnana 2012. Per l'evoluzione del metodo di lettura stratigrafica degli elevati v. Brogiolo 1988 e Doglioni 1997. Per la differenza fra architetti, archeologici e i loro rispettivi metodi d'indagine v. Tagliabue 1993.

terazioni, cambi d'uso, demolizioni più o meno estese, superfetazioni, restauri, ma presuppone, generalmente, una complessa serie di indagini strettamente dipendenti dalle specifiche finalità, che stanno dietro ogni singola attività di ricerca, e che chiamano in causa molteplici discipline. Un monumento o un edificio storico può, infatti, divenire oggetto d'interesse per l'insieme dei caratteri stilistici e decorativi che lo definiscono sotto l'aspetto estetico o per lo specifico contributo da esso fornito all'elaborazione, sviluppo e diffusione, di determinati modelli o tipologie architettoniche. Al contempo lo studio delle logiche che stanno dietro la scelta dei materiali e delle tecniche costruttive, gioca un ruolo fondamentale per la definizione di numerosi aspetti legati alla cultura materiale e al livello di conoscenza tecnologico delle società che hanno progettato, realizzato e utilizzato la singola opera edilizia. Se a questi aspetti, maggiormente legati alla comprensione e alla definizione dei valori storico-artistici, architettonici e culturali di una fabbrica, si aggiungessero quelli connessi alla tutela, conservazione e fruizione, diverrebbe allora essenziale l'apporto di discipline capaci di fornire, attraverso analisi strutturali, dati relativi alle proprietà statiche dell'edificio, allo stato di conservazione, ad eventuali fenomeni di degrado in atto, che possono interessare la struttura nel suo complesso o in alcune delle sue parti (Fig. 1.5).

Bisogna quindi guardare ad un edificio storico come ad un organismo complesso, esito concreto delle innumerevoli azioni di costruzione, modifica, demolizione che, susseguitesi nel corso dei secoli, pongono la fabbrica in una condizione di equilibrio dinamico, il cui esito è determinato dalla costante iterazione delle singole parti che lo costituiscono fra di loro e con lo specifico contesto in cui il monumento si trova inserito. Diventa quindi possibile comprendere che dal rilievo ci si attende la capacità di far fronte a molteplici funzioni documentarie, con livelli di precisione, dettaglio, codifica diversificati, che richiedono altrettanta varietà nelle tecniche e nelle strumentazioni necessarie ad ottenerle.

Se quindi al rilievo e alla rappresentazione grafica, aldilà dello specifico oggetto e contesto di applicazione, deve essere riconosciuto, definitivamente e in modo incontrovertibile, il ruolo di un vero e proprio atto conoscitivo, diventa a questo punto estremamente interessante distinguere, sulla base delle differenti finalità, due specifici campi di applicazione del rilievo e della restituzione grafica dei dati raccolti, le cui implicazioni nell'ambito della ricerca archeologica sono molteplici: il rilievo e il disegno per il progetto e per il restauro.

1.2 Rilievo e disegno per il progetto

Le capacità di astrazione e semplificazione, insieme alla possibilità di mantenere, grazie al rispetto di semplici rapporti matematici di riduzione, uno stretto legame con la realtà rappresentata, hanno fatto del disegno uno strumento indispensabile per il supporto di tutte le fasi che dalla progettazione di opere architettoniche giungono fino alla fase di realizzazione. La precisione richiesta ad un disegno re-

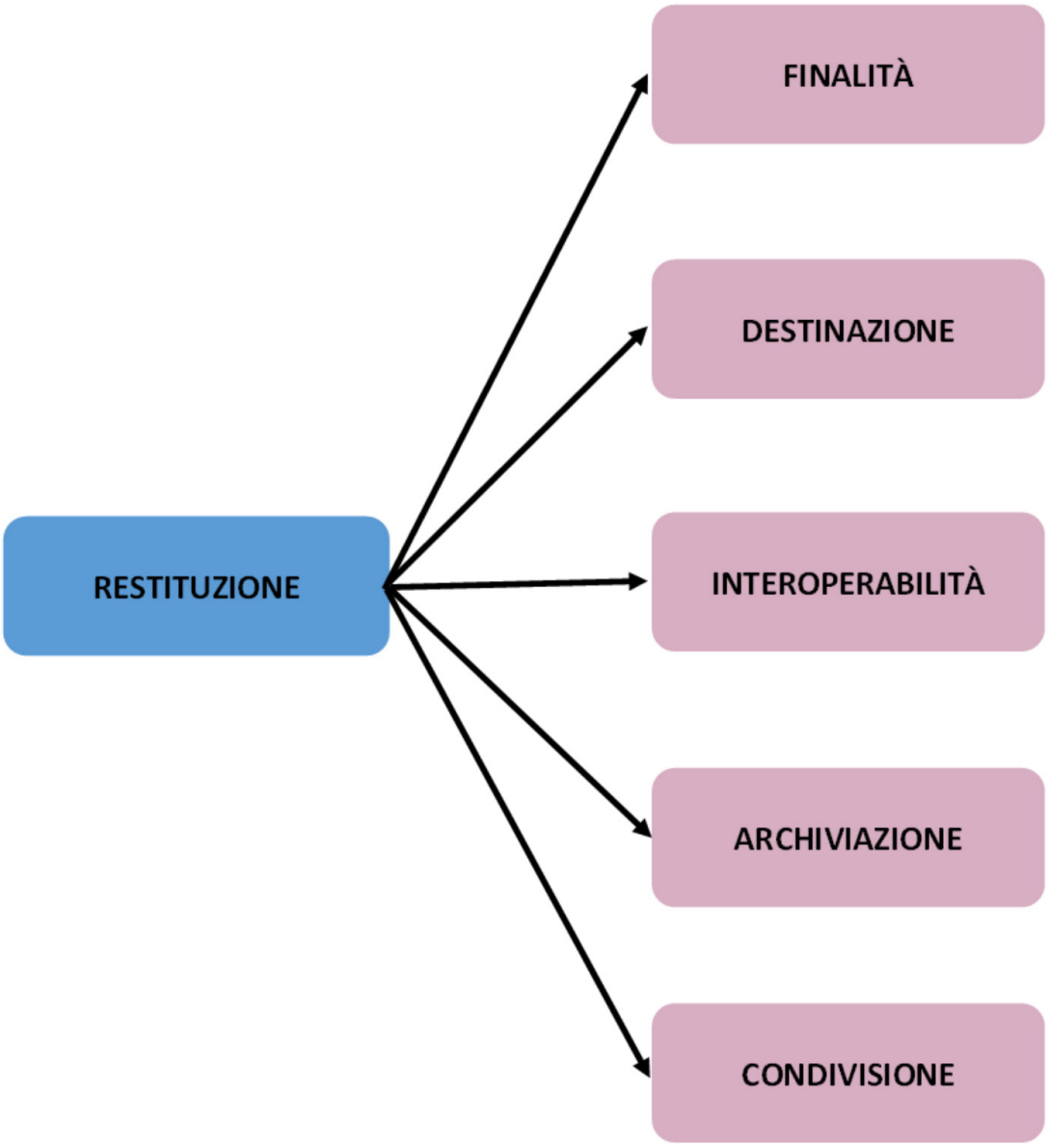


Fig. 1.5. Restituzione digitale. Finalità e campi di interesse (elaborazione personale).

datto per finalità progettuali, lo rende di fatto un documento privilegiato per la comprensione di molteplici aspetti dell'oggetto che esso rappresenta, e di cui consente, spesso, in virtù della semplificazione che le è propria, un più immediato riscontro. Si tratta di un legame così stretto fra opera realizzata e documento, che talvolta di fronte all'alterazione, alla perdita parziale o totale dell'oggetto reale, il disegno redatto in fase progettuale diventa l'unico mezzo che permette di ricostruirne l'aspetto e le caratteristiche originarie. In virtù di tale stretto legame ed essendo biunivoco il rapporto che lega l'oggetto e il documento che lo rappresenta, diventa possibile procedere anche in senso opposto, ricavando da un rilievo di precisione, condotto per fini conoscitivi e integrato con i risultati di analisi tecniche adattate allo specifico oggetto d'indagine, un documento che costituisce per noi, pur negli oggettivi limiti determinati dalla lacunosità o dalle alterazioni che nel corso del tempo potrebbero aver modificato la fabbrica originaria, la migliore approssimazione possibile nei confronti di un eventuale disegno progettuale, sintesi degli obiettivi che s'intendevano raggiungere e delle concrete soluzioni tecniche, materiche e architettoniche messe in atto per ottenerle. Tale prodotto ricavato con un processo, che oggi potremmo definire di reverse engineering si mostra utilissimo, anche quando il monumento o l'oggetto di studio non avesse avuto, a monte della sua realizzazione, un disegno progettuale, mancanza che nelle costruzioni realizzate in età antica, almeno per quelle di modesta entità, avrà costituito la norma più che un'eccezione. Infatti le prime testimonianze dell'esecuzione di disegni di progetto risalgono, allo stato attuale delle nostre conoscenze, alla prima metà del XIII secolo, periodo in cui può essere datato il Livre de portaiture di Villard de Honnecourt, una raccolta di duecentocinquanta disegni rappresentanti un'ampia varietà di soggetti fra i quali spiccano quelli raffiguranti monumenti, elementi architettonici e geometrici[7] (Fig. 1.6).

La lacunosità delle testimonianze per le fasi più antiche, sebbene non ci consenta di giungere a conclusioni certe in merito alla reale presenza e all'effettiva portata del disegno progettuale nelle fasi precedenti la realizzazione di un'opera architettonica antica, ci pone in condizioni di guardare con estremo interesse a quei documenti che, pur nell'ineliminabile incertezza riguardo la loro funzione pratica, testimoniano la piena consapevolezza dei vantaggi derivati dai processi di analisi, sintesi e astrazione, applicati ad un'azione

[7] Sebbene nessuno dei disegni raccolti nel taccuino di Villard de Honnecourt può essere considerato un disegno di progetto, tuttavia alcuni di essi, come quelli raffiguranti la cattedrale di Reims sembrano, pur nella presenza di grossolani errori di rappresentazione, essere stati copiati da originali di progetto. La recente scoperta di due disegni della medesima cattedrale, rinvenuti fra le pagine di un papiro, dove erano stati incisi per poi essere cancellati intorno al 1270, ha permesso di disporre di un'ulteriore prova a favore dell'esistenza di disegni di progetto che hanno preceduto e guidato la realizzazione della cattedrale. Questi hanno inoltre consentito di effettuare un confronto con i disegni realizzati da Villard de Honnecourt. Erlande-Branderburg *et alii* 1987; De Rosa 2000, p.203; Ackerman 2003, pp. 41-42. Per un riesame critico della figura di Villard De Honnecourt alla luce dei debiti contratti con il pensiero euclideo v. Tani 2002, pp. 107-123.

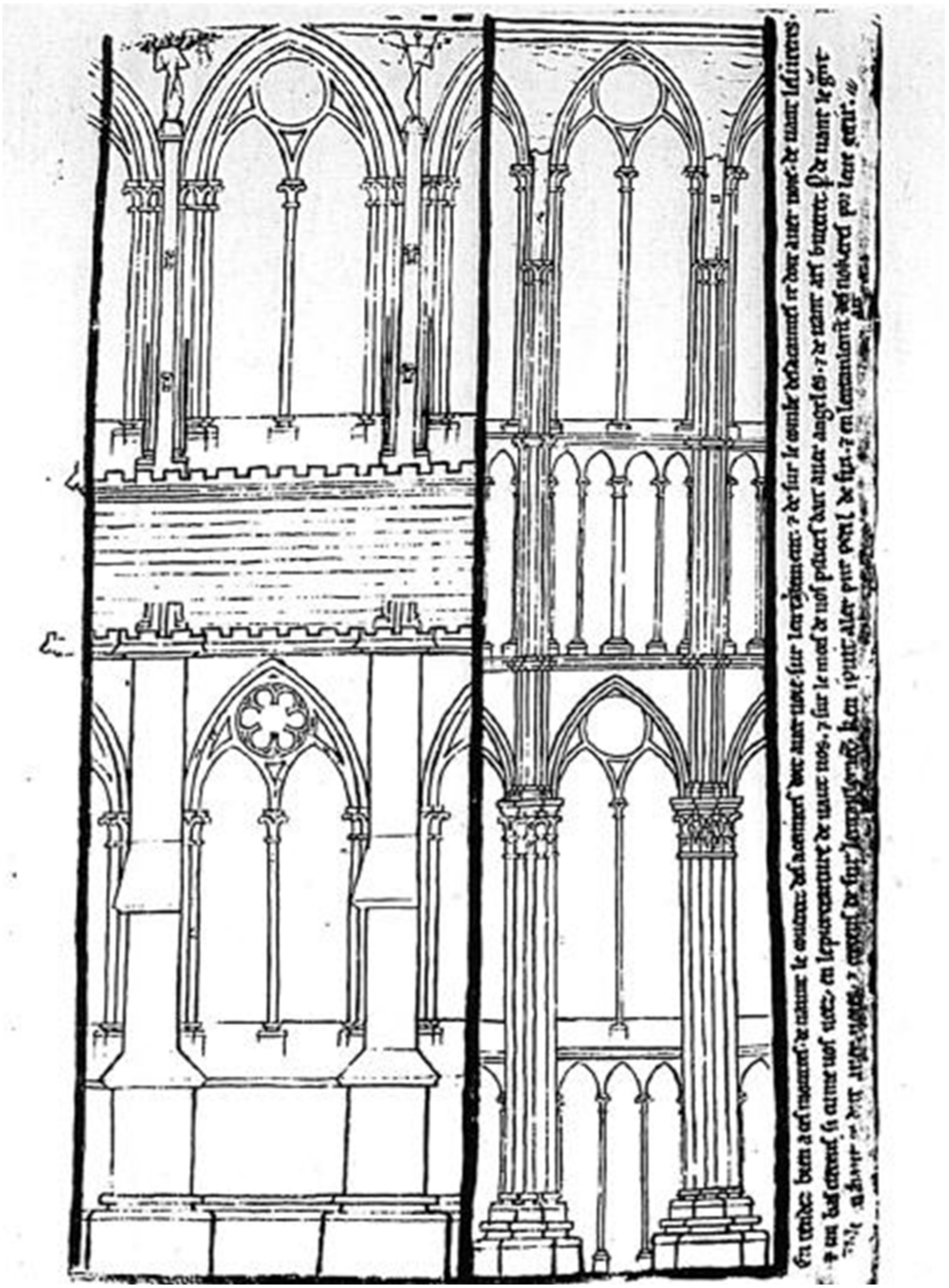


Fig. 1.6. Particolare del prospetto interno ed esterno di un tratto della navata centrale della cattedrale di Reims, da un disegno di Villard De Honnecourt (XII sec.), Folio 62.

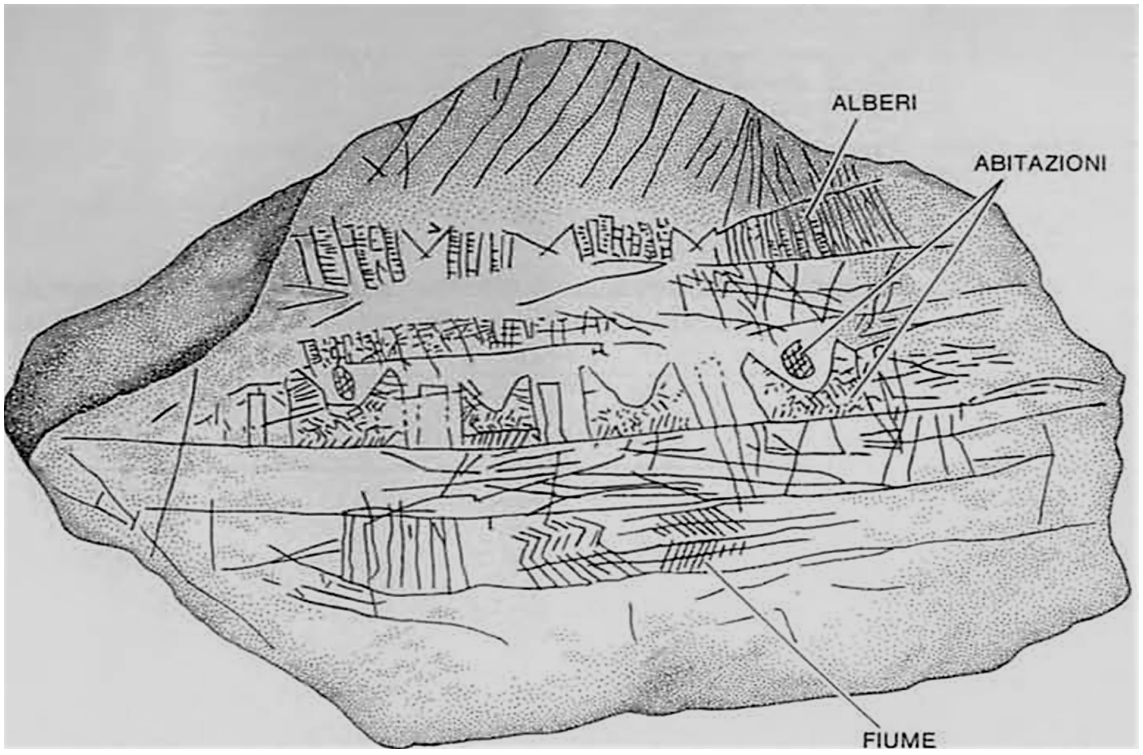


Fig. 1.7. "Mappa di Mežirič". Incisione su avorio di mammut (da Gladkih-kornietz-soffer *1985, p. 86).*

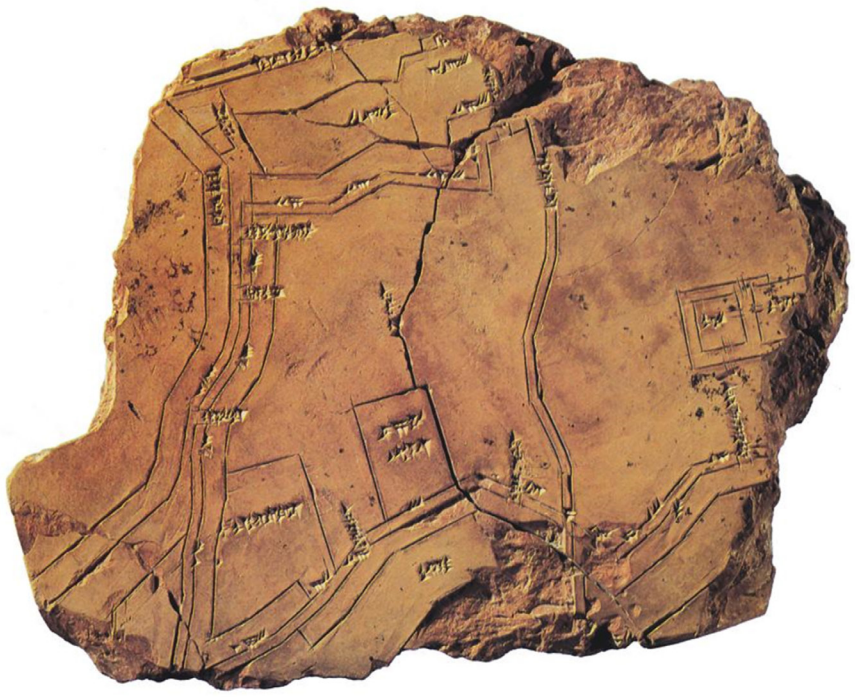


Fig. 1.8. Mappa della città di Nippur, da Tell Telloh, Iraq. Frammento di terracotta. III millennio a.C. Bagdad, Museo nazionale.

volta a modificare la realtà circostante.

In tale ottica, si è talvolta visto in alcune testimonianze di età preistorica, se non un vero e proprio disegno progettuale, un tentativo di raffigurare uno spazio antropizzato per comunicare e per razionalizzare i criteri logici che hanno guidato le scelte e le azioni poi concretamente adottate. Celebri, in tale senso, alcune incisioni come quella su un avorio rinvenuta a Mežirič nell'attuale Ucraina, all'interno di un sito Paleolitico frequentato fra il 16 e 12 mila anni fa, e raffigurante uno spazio insediativo articolato su abitazioni distribuite all'interno di un luogo fisico, caratterizzato tramite il riferimento ad alcuni elementi naturali, come alberi ed un fiume[8] (Fig. 1.7), o alcune incisioni rupestri in Valcamonica, come la cosiddetta "mappa dei Genicai", databile all'età del Bronzo, in cui ricorre la medesima attenzione alla descrizione di uno spazio insediativo, scandito dalla raffigurazione di uomini e abitazioni, queste ultime rappresentate tramite i principali elementi costruttivi[9].

Se per gli esempi appena citati è difficile poter sostenere l'esistenza di un intento di razionalizzazione delle azioni da intraprendere, condotto attraverso una schematizzazione dell'idea progettuale, certamente più significativi sono alcuni esempi giuntici dal vicino Oriente o dall'Egitto.

L'esigenza pratica determinata dalla necessità di una veloce e precisa delimitazione topografica dei confini fondiari e dei canali d'irrigazione, stimolata da condizioni ambientali soggette a repentini e ripetuti cambiamenti a causa dalle periodiche inondazioni dell'Eufrate, dovette certamente stimolare le popolazioni mesopotamiche allo sviluppo e all'affinamento di tecniche basate su solidi principi geometrici, capaci di consentire il rilievo della realtà circostante e l'intervento concreto su di essa, in cui un ruolo importante dovette certamente svolgere la capacità di astrazione e l'impiego del disegno come strumento di supporto alle fasi progettuali e realizzative degli interventi. Emblematico in tal senso è, ad esempio, il rinvenimento su una tavoletta d'argilla databile al 1500 a.C. e proveniente dalla città sumera di Nippur, di quella che può essere interpretata come una vera e propria pianta topografica della città e dei terreni circostanti, posti in relazione con il vicino corso dell'Eufrate (Fig. 1.8).

Alcuni papiri egiziani testimoniano, come alla base di certe straordinarie realizzazioni architettoniche, possa presupporsi una fase progettuale, che nel disegno dovette trovare un utile strumento di sintesi e un supporto per le fasi realizzative. Se infatti le conoscenze matematiche e geometriche elaborate dagli egizi, sotto lo stimolo della risoluzione di problemi pratici legati alle esigenze di misurazione della terra inondata periodicamente dal Nilo, sono a noi note grazie alla testimonianza delle fonti greche[10] e di ritrovamenti come il papiro di Rhind[11], queste do-

[8] Gladkih-kornietz-soffer 1985, p. 86.

[9] De Rosa 2000, p. 8.

[10] Erodoto, Ιστορίάι, II, 109; Αριστοτελε, Πέρί ουρανού,II, 14.298.

[11] Il papiro, noto anche come papiro di Ahmes, lo scriba che lo ha redatto intorno al 1650 a.C., sotto il regno di Aphophis faraone della XV dinastia, fu acquistato a Luxor nel 1850 da Henry Rhind e rappresenta il più esteso papiro di argomento matematico-geometrico giunto fino a noi.

vettero certamente essere impiegate anche per la progettazione di alcune opere architettoniche. Ciò sembra trovare conferma in straordinari disegni conservati in alcuni papiri, come quello, famoso, della tomba di Ramesse IV, faraone della XX dinastia[12] (Fig. 1.9).

Tali testimonianze lasciano intravedere, dietro il processo di astrazione operato tramite il segno grafico, una strategia selettiva e una logica improntata ad un'attenzione, seppur imprecisa, alle proporzioni e al rispetto delle relazioni spaziali che esigenze di maggiore dettaglio, come nel caso dell'esecuzione di progetti decorativi di un certo impegno ed estensione, hanno spinto fino al ricorso alla quadrettatura dello spazio destinato al disegno, che poteva essere riprodotto sulla superficie da decorare. Altra strategia, che poteva venire impiegata a supporto di una tecnica del disegno ancora incapace di servirsi con efficienza di rapporti di proporzione, prevedeva il ricorso all'indicazione delle misure che caratterizzavano gli elementi costitutivi dell'oggetto reale[13], nel rispetto di un'esigenza di precisione che può spiegarsi solo presupponendo una funzione pratica dietro la realizzazione di tali disegni.

Le testimonianze sopra ricordate pur provenendo da civiltà molto distanti nello spazio e nel tempo, sono accomunate dal medesimo utilizzo del disegno, basato su una solida conoscenza geometrica e sui principi della proiezione ortogonale[14], come supporto all'azione pratica d'intervento sul reale[15].

Se l'apporto della civiltà greca allo sviluppo della disciplina geometrica fu certamente notevole, non siamo purtroppo in condizione di valutare, in mancanza di testimonianze concrete, aldilà di quelle vascolari inutilizzabili a tale fine, il reale impiego di tali conoscenze per la redazione di rappresentazioni grafiche di complessi

[12] Il papiro, scoperto da Bernardino Drovetti fra il 1814 e il 1821 all'interno della tomba privata dello scriba Amennakhte, nel villaggio di Deir el-Medina, è conservato presso il Museo egizio di Torino. Esso costituisce la più sofisticata restituzione planimetrica di un edificio giuntaci dall'antico Egitto, il cui interesse è notevolmente amplificato per il fatto che, rappresentando un monumento giunto fino a noi, ha consentito la verifica delle informazioni registrate dall'autore, il quale dall'annotazione delle dimensioni reali dell'edificio funerario, si è spinto fino alla rappresentazione planimetrica dei maggiori elementi costitutivi. De Rosa 2000, p. 23; De Cernival 1964, p. 146.

[13] Un papiro, risalente al Nuovo Regno, rappresenta le decorazioni del prospetto di un *naos* in legno tramite il ricorso alla quadrettatura, che probabilmente dovette essere riprodotta anche sulla superficie dell'oggetto reale. In un papiro ritrovato nel recinto del re Djeser a Saqqara, faraone della III dinastia, regnante fra il 1680 ed il 1660, è rappresentato quello che può essere considerato come il profilo curvilineo di un tetto, di cui vengono annotate le quote. De Cernival 1964, pp. 145-146.

[14] De Rosa 2000, p. 23.

[15] Non bisogna infatti trascurare lo stretto legame che in tali civiltà s'instaurò fra l'elaborazione di principi matematico-geometrici, la capacità di astrazione necessaria per la semplificazione della realtà tramite il disegno e l'azione pratica rivolta alla sua modifica. Emblematiche, in quanto forniscono la misura di tale stretto legame, le testimonianze delle fonti greche, che ricordano l'esistenza di αρπεδονάπται, "annodatori di corde" (Democrito, B 299), che utilizzavano appunto tali strumenti per rappresentare sul terreno linee, cerchi e triangoli, necessari per le operazioni agrimensorie. Medesime testimonianze provengono da dipinti in alcune tombe egizie, come quelle di Menna e di Amenhotep a Tebe. La stessa attenzione verso l'importanza del ruolo del disegno e della misura, presso tali civiltà è testimoniata dall'esistenza di divinità ad esse preposte, come l'egiziano Toth e la sumera Nisaba.



Fig. 1.9. Planimetria per la realizzazione dell'edificio funerario di Ramesse IV (dettaglio). Nuovo Regno - XX dinastia. Papiro. Torino, Museo egizio.

o elementi architettonici, che avessero scopi pratici e finalità progettuali.

La quantità e la qualità delle testimonianze prodotte dalla civiltà romana e pervenute fino a noi, ci pone, invece, in condizione di poter valutare con maggiore precisione l'apporto che le tecniche di rilievo e la rappresentazione grafica ebbero in fase progettuale, supportando le concrete attività d'intervento sul reale[16]. Le conoscenze teoriche e le competenze pratiche necessarie a supportare le fasi di rilievo e di rappresentazione a supporto di un'ampia varietà di interventi furono certamente appannaggio di variegate professionalità all'interno della società romana, che con differente grado di articolazione, basato sulla complessità delle opere da realizzare e sull'ampiezza e varietà di conoscenze e capacità tecnico-pratiche da esse richieste, ha come estremi da una parte i semplici mensori e gromatici, addetti a piccole attività di rilievo, alla centuriazione dei terreni o alla realizzazione di opere infrastrutturali di modesto impegno, dall'altra i grandi architetti, addetti alla progettazione e realizzazione di ardite opere monumentali o infrastrutturali, fra questi estremi dovevano collocarsi gli architetti militari. Agli architetti destinati alla progettazione e realizza-

[16] Migliari-Docci 1997, pp. 27-29.

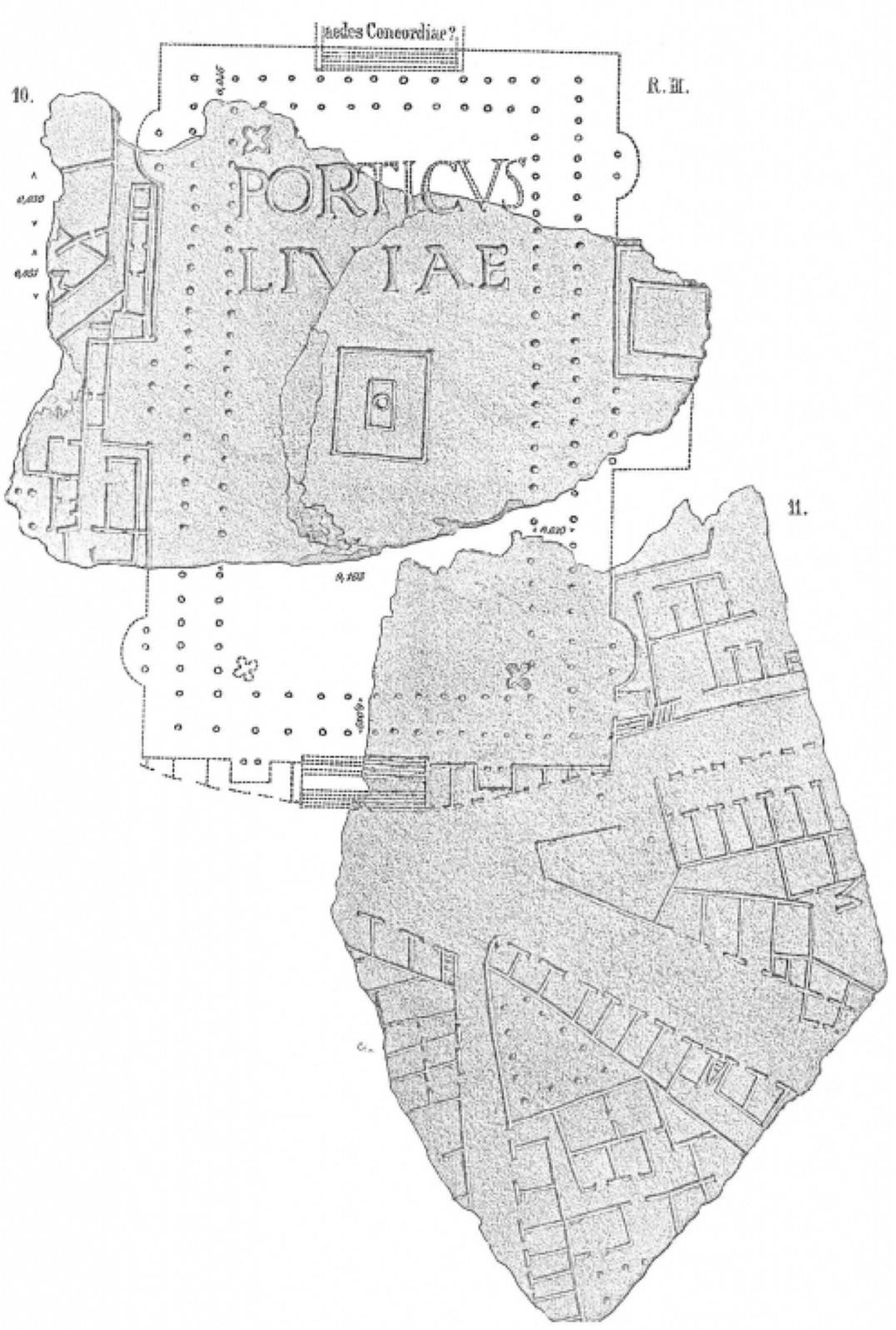


Fig. 1.10. Forma Urbis, lastre 10-11 da Jordan *1874.*

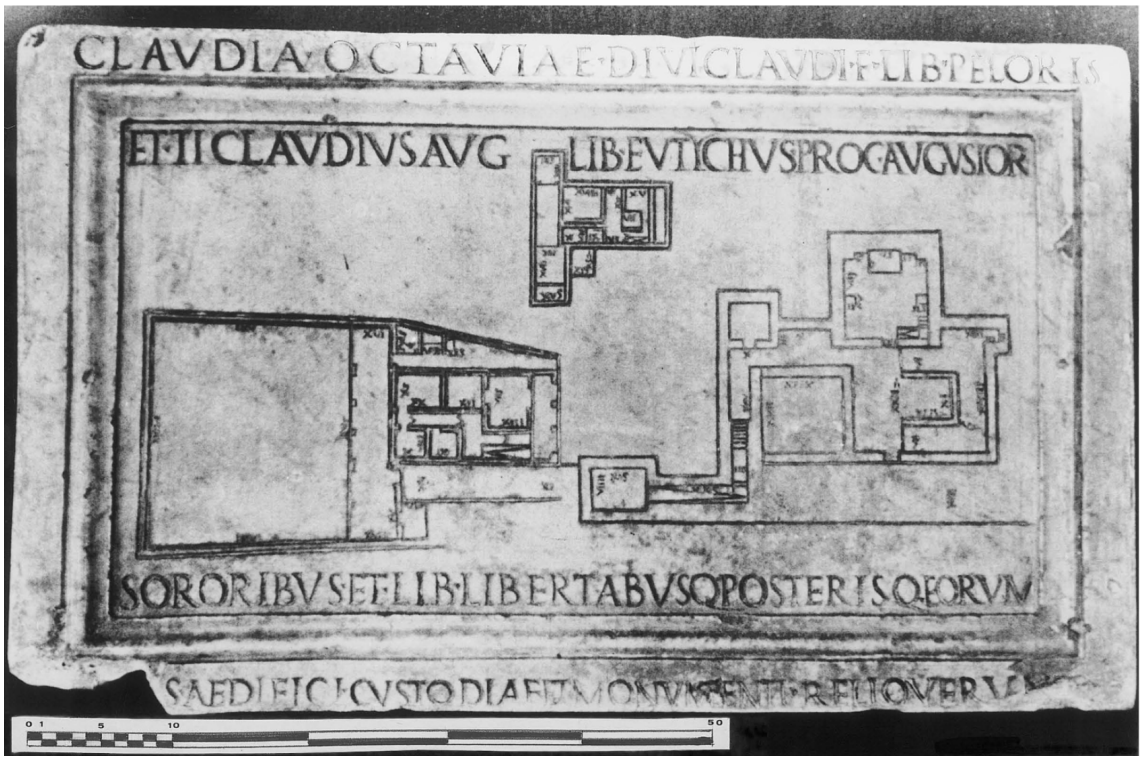


Fig. 1.11. C.d. "Pianta di Perugia", planimetria di un edificio funerario. Provenienza incerta, forse Roma. Età neroniana. Marmo. Perugia, museo archeologico. Da Rodriguez Almeda *2002, Tav.III.*

zione di opere di un certo impegno era richiesta la padronanza di molteplici competenze che spaziavano dall'astrazione matematico-geometrica, alla sensibilità artistica e formale dell'approccio umanistico, a quella tecnico-pratica derivata dalla conoscenza delle caratteristiche di resistenza e conformità all'utilizzo, di differenti materiali costruttivi[17]. In un quadro così complicato non è quasi mai possibile determinare quanto la fase progettuale, imprescindibile almeno per la realizzazione di programmi edilizi complessi che richiedevano l'organizzazione precisa e puntuale di tutte le attività del cantiere, abbia avuto in una rappresentazione per il progetto uno strumento capace di offrire un supporto organizzativo e decisionale, dalle fasi preparatorie fino alla completa realizzazione dell'opera.

Alcune testimonianze, talvolta straordinarie, come la *Forma Urbis* di età severiana (Fig. 1.10), pianta topografica della città di Roma realizzata seguendo un ben preciso rapporto di riduzione fra misure reali e rappresentazione grafica[18], acquisiscono in tal senso un'importanza straordinaria[19]. Alcuni

[17] Riguardo le differenti tipologie di architetto, distinguibili sulla base delle competenze teorico-pratiche, formazione umana e professionale, tipologie di opere realizzate, v. Sacripanti 1953 pp. 8-11.

[18] Sulla scala di riduzione grafica, tradizionalmente indicata in un rapporto di 1:240 (un piede sulla carta, corrisponderebbe a due actus reali), v. il recente De Caprariis 2017, pp. 1-27.

[19] Carettoni *et alii* 1960.

dettagli in essa presenti possono infatti considerarsi come l'esito più maturo e meglio conosciuto di una tradizione di rilievo e rappresentazione, in cui emergono, oltretutto, indizi di una ben precisa codifica del segno, che si configura come una risposta concreta ad esigenze amministrative di una certa importanza, tale da aver giustificato una mole di lavoro non indifferente in termini di rilievi e restituzione in proiezione planimetrica, delle misure e dei dettagli registrati. Si tratta di una tradizione, ufficiale e ufficializzata, di rappresentazione per scopi pratici, testimoniata almeno a partire dall'età augustea e a cui dovettero certamente inspirarsi, riprendendone simbologie e criteri, le restituzioni di edifici e monumenti eseguite da privati, per gli scopi più svariati, ma sempre legate ad esigenze pratiche, di cui ci sono giunte molteplici testimonianze[20], come, la pianta di Perugia (Fig. 1.11), rappresentante un edificio funerario con i relativi annessi, redatta in età neroniana probabilmente a supporto di questioni legate ad un lascito testamentario[21], che colpisce per l'adozione di codifiche grafiche molto simili a quelle poi adottate successivamente per la realizzazione della *Forma Urbis*.

Tali testimonianze dell'utilizzo pratico del disegno, si aggiungono ai risultati di una riflessione teorica, tramandataci essenzialmente attraverso il *De Architectura* di Vitruvio, che investì, insieme all'esatta definizione della disciplina, anche il ruolo e le competenze dell'architetto[22].

Nel secondo capitolo del primo libro del *De Architectura*, Vitruvio discutendo della dispositio, una delle parti insieme all'ordinatio e all'*eurytmia*/*symmetria*/*decor*/*distributio*, in cui può essere articolata la disciplina, afferma che essa è composta dall'*ichnographia*, dall'*orthographia* e dalla *scaenographia*[23]. Tali termini, complice la poca perspicuità del passo in questione, sono stati generalmente considerati dai traduttori e commentatori dell'opera come dei riferimenti precisi alle principali modalità di rappresentazione grafica attraverso le quali l'architetto prefigura e comunica quale sarà l'esito finale di una qualsiasi idea progettuale. In tale ottica e con il sostegno di una prassi operativa fondata sulla moderna distinzione fra ideazione, rappresentazione e realizzazione, nell'ichnographia si è visto un riferimento alla pianta, nell'*orthographia* all'alzato della fronte, e nella *scaenographia*, non senza problemi e difficoltà testuali ad una sorta di vista prospettica (Fig. 1.12). È di estremo interesse però notare, seguendo Maria Teresa Bartoli[24], come un approccio al passo vitruviano, che si ponga, se non l'impossibile eliminazione dei condizionamenti derivati dalle conquiste tecnico-scientifiche moderne in merito alle forme di rappresentazione e alla

[20] Rodriguez-Almeida 2002.

[21] Jordan 1874, p. 11 n.6 e tav. XXXIV n.1.

[22] Com'è noto, l'opera dedicata all'imperatore Augusto è tradizionalmente datata fra il 25 e il 23 a.C.

[23] Vitruvio, I, 2, 2: *Species dispositionis, quae graece dicuntur ideae, sunt haec: ichnographia, orthographia, scaenographia. Ichnographia est circini regulaeque modice continens usus, e qua capiuntur formarum in solis arearum descriptiones. Orthographia autem est erecta frontis imago modiceque picta rationibus operis futuri figura. Item scaenographia est frontis et laterum abscedentium adumbratio ad circinique centrum omnium linearum responsus.*

[24] Bartoli 1978.

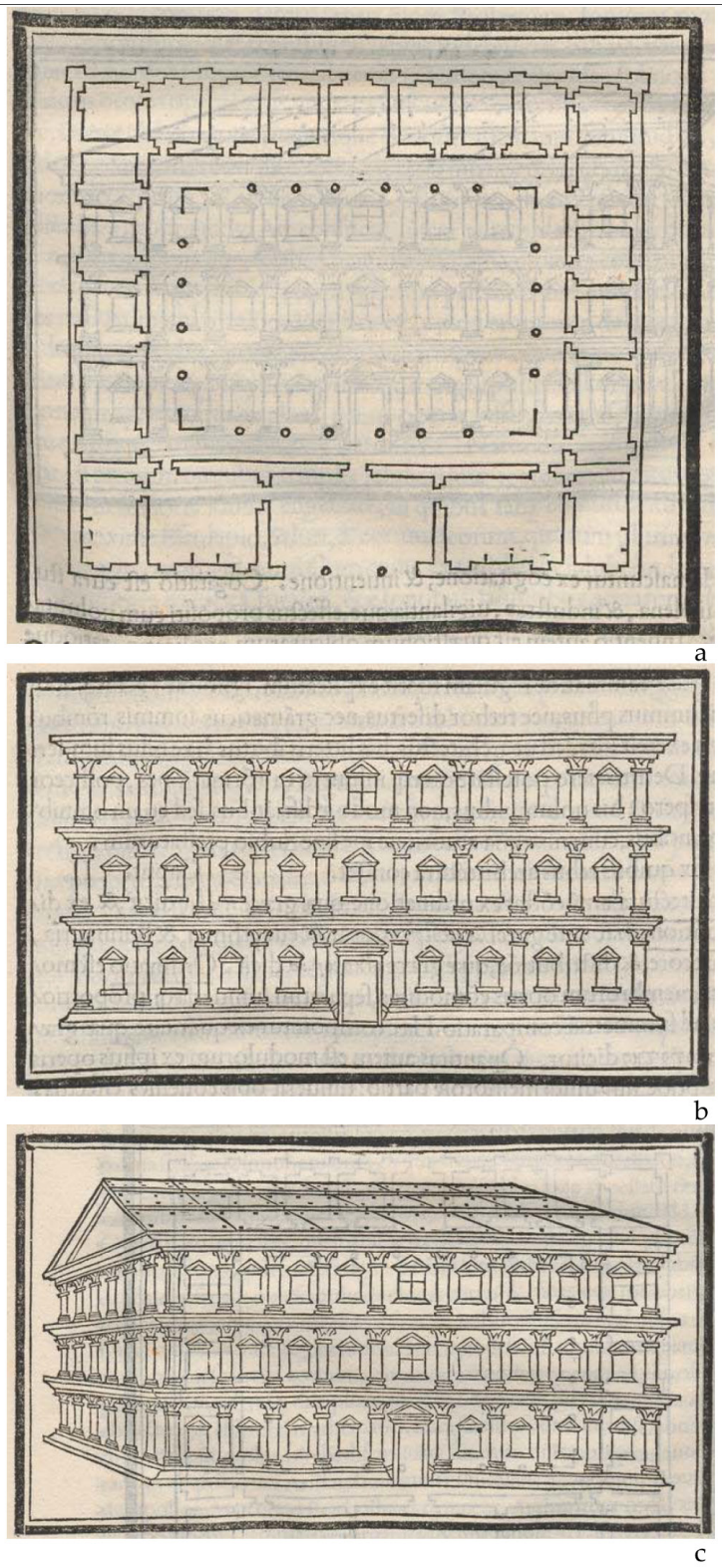


Fig. 1.12. Disegni illustrativi per l'ichnographia (a), l'orthographia (b) e la scaenographia (c), intese rispettivamente come pianta, alzato e vista prospettica. Da Giocondo *1511, Folio AIIII.*

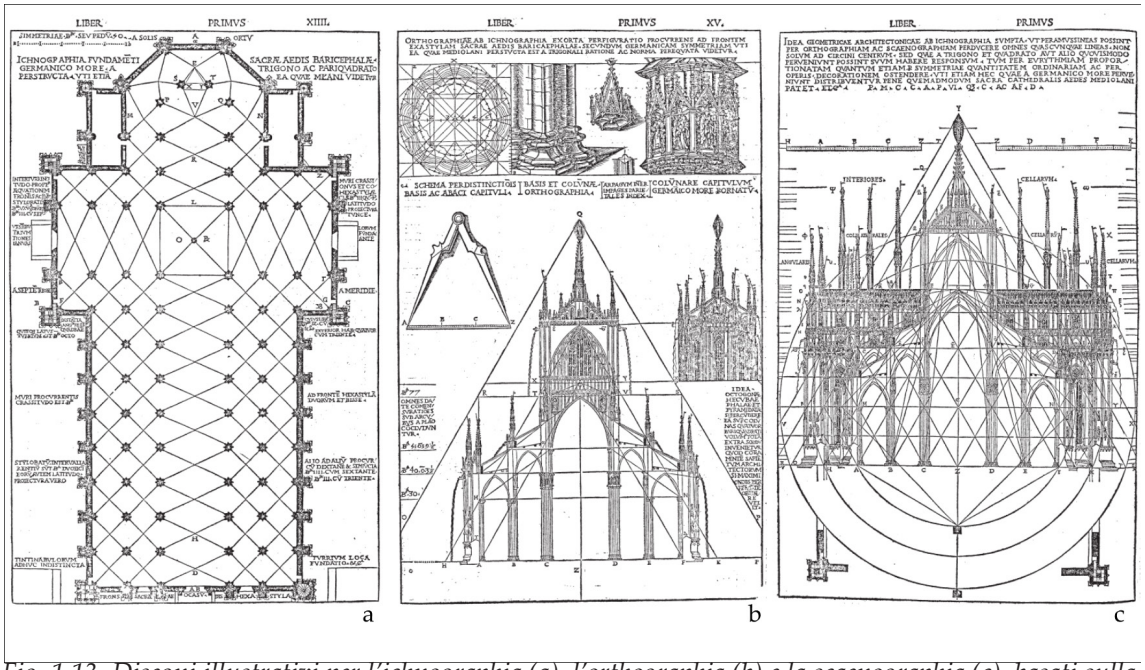


Fig. 1.13. Disegni illustrativi per l'ichnographia (a), l'orthographia (b) e la scaenographia (c), basati sulla cattedrale di Milano. La prima è la pianta in terra, con i dettagli necessari a realizzarla; la seconda è l'alzato prospettico realizzato secondo regole proporziali; la terza è sempre l'alzato ma sottoposto alle correzioni necessarie per contenete le distorsioni ottiche. Da Cesariano *1521, Folii XIIII (recto) e XV (recto e verso).*

prassi progettuale, almeno la ferma volontà di limitarne gli effetti distorcenti, può spingere a riconsiderare da una prospettiva differente il brano in questione. Basandosi sulla traduzione e il commento del *De Architectura* di Vitruvio pubblicata a Como nel 1521, da Cesare Cesariano[25] e sfruttando il punto di vista di un di architetto, ingegnere e pittore per molti versi ancora legato ad una mentalità tardo-medievale, la studiosa adduce convincenti prove volte a vedere nei riferimenti vitruviani all'*ichnographia*, all'*orthographia* e alla *scaenographia*, i tre momenti successivi, posti in stretta interdipendenza, della «*formazione della cosa ideata tenendo conto della realtà delle tecniche di esecuzione*». L'*icnografia* non sarebbe il disegno della pianta, bensì l'ideazione della forma che la struttura assumerà sul terreno attraverso le operazioni di articolazione geometrica dello spazio e le successive azioni di scavo, il cui momento grafico, eseguito con l'impiego di *regula* e *circinus*, può semmai servire come prefigurazione delle azioni concrete da eseguire sul campo tramite pali, fili, squadre e livelle. L'*orthographia* non sarebbe pertanto una semplice vista del prospetto, ma una rappresentazione degli elementi architettonici e decorativi fondamentali della facciata esaminati nel loro complesso. Infine, la *scaenographia*, più che una vista prospettica, sarebbe da intendere come una rappre-

[25] Cesariano 1521.

sentazione funzionale al controllo dei reciproci rapporti geometrici e spaziali degli elementi costitutivi della fabbrica, così come individuati nell'*orthografia* (Fig. 1.13).

Aldilà dell'esempio concreto, ciò che si può in tal modo desumere non è soltanto una dimostrazione dell'esistenza e dell'importanza, attestata già in età molto antica, della rappresentazione grafica come momento di supporto alla fase realizzativa e progettuale, ma anche, e soprattutto, il suo alto potenziale informativo. Questo deriva al disegno, nella sua imprescindibile funzione di collegamento fra il momento dell'ideazione e quello della realizzazione progettuale, dalla stretta interconnessione che esso è capace di instaurare con le conoscenze tecniche, con quelle teorico-pratiche e con le strumentazioni, che sono sempre strettamente dipendenti dal contesto storico, culturale, sociale, economico in cui vengono concepite e impiegate. Nello studio di architetture antiche, quindi, un rilievo che abbia come obiettivo la ricostruzione dell'idea progettuale, pur nei limiti di un processo da considerarsi il più delle volte come un'approssimazione *ad infinitum*, in quanto in costante tensione verso una meta mai completamente raggiungibile, a causa della lacunosità o delle alterazioni in cui ci è giunta la fabbrica antica, costituisce un momento imprescindibile e per certi aspetti inderogabile. Ciò si rivela estremamente utile per la costruzione di una conoscenza e di una comprensione integrata e storicizzata, che voglia tentare di scorgere, dietro i resti materiali delle architetture antiche, la società che li ha progettati e realizzati.

1.3 Rilievo e disegno per il restauro

Il restauro di monumenti antichi costituisce l'altro grande ambito in cui all'attività di rilievo e restituzione grafica viene generalmente riconosciuta la funzione di strumento conoscitivo e di supporto all'azione concreta. La definizione precisa delle caratteristiche di un rilievo e della relativa rappresentazione grafica a supporto delle attività di restauro, presuppone, preliminarmente, un'esatta definizione di ciò che debba essere inteso come restauro, nelle sue finalità e nei suoi obiettivi. Molteplici teorie sul restauro si sono avvicendate, in forma coerente, almeno dalla fine del XIX secolo. Queste, sedimentatesi al fondo delle più recenti e attuali, fanno ancora avvertire i propri effetti, finendo con il caricare il termine di molteplici significati, che, in certo qual modo, devono essere tenuti in considerazione quando ci si riferisce ad interventi sull'edificato storico.

L'approccio "stilistico" al restauro del francese Eugène Emmanuel Viollet Le Duc[26] (Fig. 1.14) e la posizione

[26] Eugène Emmanuel Viollet Le Duc (1814-1879) era fermamente convito che alla base del pregio artistico di un'architettura antica vi fosse un'unità stilistica, espressa attraverso la forma esteriore e connessa alla struttura. Questa poteva essere lesa dalle vicissitudini del tempo e dall'azione dell'uomo. Al restauratore, guidato da una scaltrita conoscenza tecnica e artistica e da un riesame di tutta la documentazione storica, spettava pertanto il compito di ricondurre il manufatto alla sua unità stilistica, rimuovendo superfetazioni, colmando lacune e, talvolta, anche inventando, se, come si legge nel suo famoso *Dictionnaire raisonnè d'architecture française du XIe au XVIe siècle*, vol. 8, alla voce "Restauration" «*Restaurer un édifice, ce n'est pas l'entretenir, le réparer ou le refaire, c'est le rétablir dans un état complet qui peut n'avoir jamais existé à un moment donné*», Viollet Le Duc 1868.

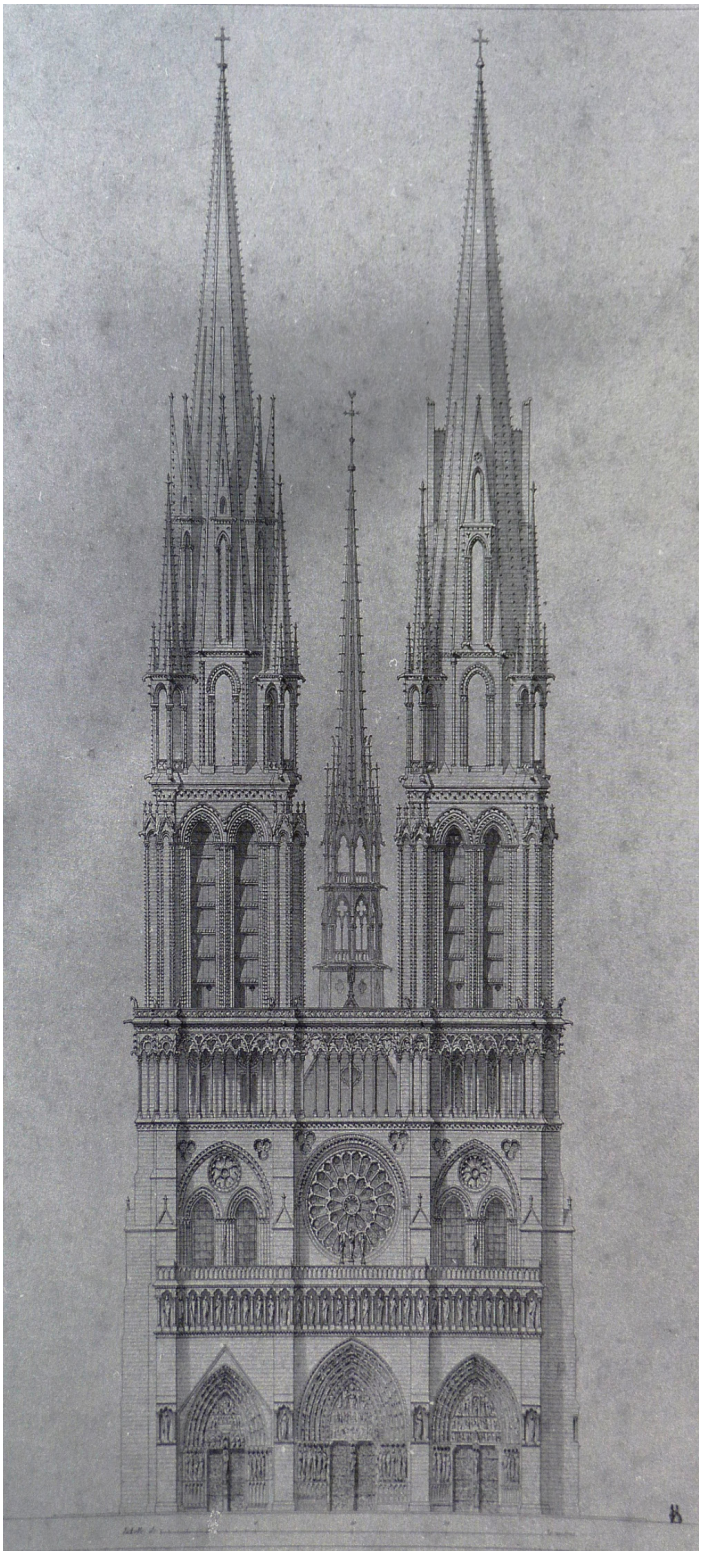


Fig. 1.14. Notre-Dame, Parigi, prospetto della facciata ovest della Cattedrale, realizzato da Eugene Emmanuele Viollet Le Duc secondo una proposta di restauro mai realizzata nei termini in cui è stata immaginata dall'architetto (1843).

diametralmente opposta del restauro "romantico" dell'inglese John Ruskin[27] (Fig. 1.15), maturati nel medesimo clima positivistico e romantico di fine Ottocento, rappresentano la fase iniziale di un travaglio critico sul restauro, che spinse, con riflessioni ancora straordinariamente attuali, a riflettere sul ruolo e sulle funzioni che i monumenti antichi rivestono per l'uomo e la società moderna. Sia lo stile artistico posto da Viollet Le Duc a fondamento di qualsiasi intervento di restauro, sia la concezione dell'opera d'arte come complesso irripetibile, e quindi non restaurabile, di circostanze e relazioni materiali e immateriali, raccolsero, da un lato, i frutti di una riflessione sul valore storico-artistico dei monumenti antichi, maturata sul finire del Settecento da un'archeologia ormai affrancata dall'approccio storico-erudito, dall'altro fornirono il fianco a molteplici critiche e allo sviluppo di una "terza via" al restauro che, in posizione mediana fra le prime due, cercò in qualche modo una difficile conciliazione degli opposti.

Tale approccio, maturato in Italia sempre sullo scorcio del XIX secolo come risposta alle teorizzazioni straniere, si concretizzò nel restauro "storico" o "filologico" di Camillo Boito e dell'allievo Luca Beltrami, che difesero un'azione di restauro basata su un riesame scientifico di tutte le fonti storiche e documentarie disponibili, in cui si vide l'unico correttivo possibile agli esiti più fantasiosi del restauro "stilistico", e sulla conservazione di tutte le tracce materiali lasciate sul monumento dal trascorrere del tempo[28] (Fig. 1.16).

Un'importante contributo al processo di definizione del sistema di valori attribuibili ad un monumento antico, di fondamentale importanza anche per le implicazioni nel campo del restauro, è rappresentato dalle teorie di Alois Riegle[29], il cui merito fu certamente quello

[27] John Ruskin (1819-1900) riteneva che all'origine di un'opera architettonica vi fosse un atto artistico unico e irripetibile, in quanto strettamente dipendente dal contesto storico in cui ha avuto luogo. Questo rappresenterebbe la prima fase della vita di un qualsiasi edificio, a cui farebbe seguito l'utilizzo e, da ultimo, la necessaria conservazione. Questa tenta di rallentare gli effetti del tempo, visto nella duplice dimensione di tempo "culturale" e "naturale", il cui esito inevitabile è, comunque, la morte dell'edificio. «*Il cosiddetto restauro è la peggiore delle distruzioni*» affermava John Ruskin in opposizione al restauro "stilistico" nella sua opera *The seven lamps of architecture*, aforisma 31 (Ruskin 1849).

[28] Camillo Boito (1836-1914) e Luca Beltrami (1854-1933) videro nell'opera architettonica un documento storico il cui valore artistico doveva essere ricostruito attraverso un attento studio delle fonti e dei documenti disponibili e nel pieno rispetto dei segni lasciati dal tempo. Su queste premesse doveva basarsi ogni azione di restauro, seguendo il principio della distinguibilità e la logica del minore intervento, racchiusa nella celebre affermazione di Camillo Boito, secondo il quale i monumenti "*devono venire piuttosto consolidati che riparati, piuttosto riparati che restaurati*". Interessante, inoltre, la differenza posta da Camillo Boito fra monumenti dell'antichità classica, del medioevo e monumenti post-rinascimentali, ciascuno oggetto di differenti tipologie e gradazioni di restauro. Infatti al restauro "archeologico", il cui oggetto sarebbero i monumenti dell'antichità classica, Boito riconobbe la possibilità di ricomposizioni di frammenti e integrazioni minime, semplificate e facilmente distinguibili. Il restauro "pittorico", il cui fine era la conservazione dei monumenti medievali, doveva agire limitando al massimo le aggiunte e reintegrando solo in casi eccezionali, sempre comunque evitando di cancellare le tracce della storia. Il restauro "architettonico", infine, in virtù dell'oggetto a cui era rivolto, ovvero i monumenti che dall'età rinascimentale giungono ai nostri giorni, aveva maggiori libertà di integrazione e sostituzione delle parti.

[29] Lo studioso austriaco (1858-1905), esponente della scuola di Vienna, non solo distinse



Fig. 1.15. Palazzo dei Badoari Partecipazzi, Venezia. Decorazione tramite dischi. Da Ruskin *1851-1853, vol. I, Tav.VIII.*

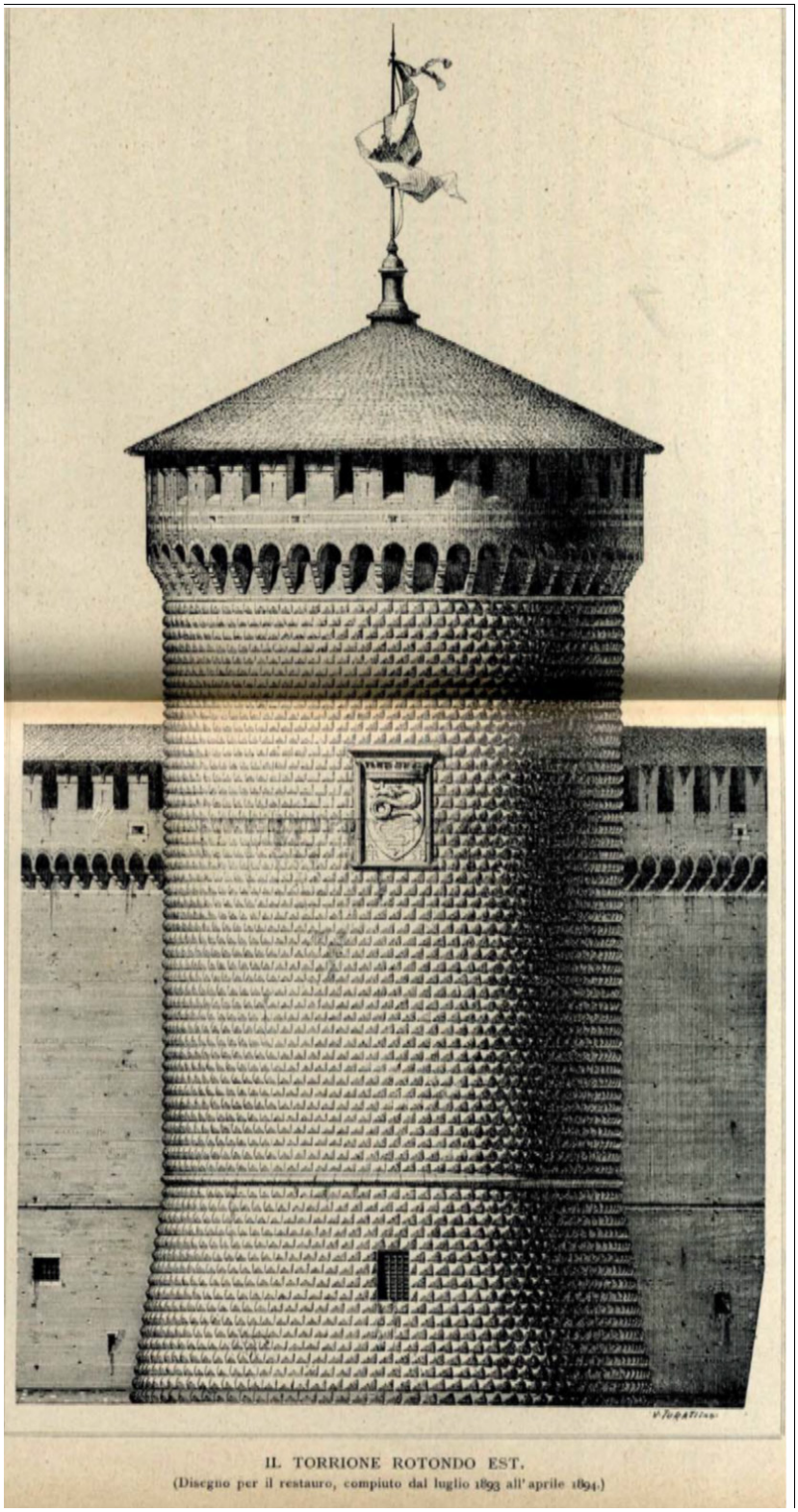


Fig. 1.16. Castello di Milano, Torrione rotondo ad est, Milano. Disegno per il restauro (1893-1894), da Beltrami *1894.*

di aver dimostrato come in un qualsiasi monumento antico possano essere definiti molteplici valori, che richiedono strategie di conservazione e restauro differenti e talvolta inconciliabili. Alla base di tale assunto vi è il riconoscimento del carattere relativo e non assoluto del valore artistico, estremamente mutevole, in quanto connesso con il concetto di *kustwollen* "volontà d'arte", e dipendente dallo specifico contesto storico e dal singolo artista che lo ha elaborato. Ciò ha spinto il Riegl a rivedere la tradizionale teoria degli stili artistici e a riconoscere un valore documentario a qualsiasi manufatto architettonico di carattere storico, con la conseguente estensione dell'ambito di pertinenza del restauro e l'inclusione di categorie, come l'edilizia c.d. "minore", fino a quel momento considerate estranee dall'ambito di applicabilità del restauro.

L'apporto delle teorie elaborate da Riegle e dagli altri esponenti della "Scuola di Vienna" si rivelarono preziose per gli sviluppi futuri del restauro. L'invito a considerare la storia dell'arte come mezzo per comprendere le condizioni culturali di una società, contenuto al fondo delle tesi degli studiosi viennesi, coniugato con le posizioni elaborate da Boito e Beltrami, che si erano tradotte in un approccio al monumento architettonico come ad un vero e proprio documento storico, furono alla base dell'approccio "scientifico" al restauro elaborato da Gustavo Giovannoni[30], che fornì una solida base teorica e linee di indirizzo capaci di esercitare un'influenza profonda sugli interventi di restauro maturati sia in Italia, che all'estero fino al secondo dopoguerra[31]. Considerando un monumento architettonico come il risultato di un processo creativo "collettivo", in

fra monumenti "intenzionali" e "non intenzionali", riconducendo all'interno di quest'ultima categoria tutte quelle costruzioni, non progettate fin dall'inizio come monumenti e divenuti tali in virtù del trascorrere del tempo e delle intrinseche qualità artistiche dell'opera. Riegle riconobbe inoltre a ciascun manufatto architettonico a carattere storico due differenti categorie di valori: i "valori quanto memoria" e i "valori contemporanei". Nella prima categoria lo studioso ricondusse sia il "valore storico", inteso come l'insieme dei significati che rendono un monumento testimonianza utile per la ricostruzione di molteplici aspetti sociali e culturali della civiltà che lo ha prodotto e la cui trasmissione è strettamente dipendente dalla conservazione della forma originaria, sia il "valore dell'antico", derivato dall'insieme delle tracce e delle modifiche che il passare del tempo e della storia hanno lasciato o aggiunto al monumento e che richiedono, per essere trasmessi, la loro conservazione durante le attività di restauro. Fra i "valori contemporanei", rientrano, oltre a quello "artistico", anche il valore "d'uso", legato all'utilizzo effettivo a cui un manufatto storico può essere assoggettato, e il "valore di novità", strettamente connesso con la tendenza a valutare positivamente l'integrità della forma e del colore, che caratterizzano le costruzioni recenti, ma raramente quelle storiche. Riegle 1893.

[30] Assommando in se interessi, capacità, e competenze a quel tempo ripartite fra ingegneri edili, architetti, storici dell'arte, urbanisti, Gustavo Giovannoni (1873-1947) spazio dall'analisi tecnica e materico-strutturale alla storia dell'architettura e all'urbanistica, rimanendo sempre attento sia all'importanza della formazione accademica e professionale, sia alla necessità di giungere alla predisposizione di strumenti legislativi adeguati a supportare le future azioni nel campo del restauro e della pianificazione urbana. Frutto, ad esempio, dell'attenzione del Giovannoni per il contesto urbano fu la legge n. 1497 del 1939, *Sulla protezione delle bellezze naturali*. Tutto ciò rende impossibile limitare l'eredità intellettuale dello studioso al solo campo delle teorizzazioni sul restauro.

[31] Un esempio emblematico del rilievo internazionale assunto dalle teorie del restauro "scientifico" di Gustavo Giovannoni è rappresentato dalla Carta del Restauro redatta a seguito della Conferenza internazionale di Atene del 1931, i cui principi si basano sostanzialmente sulle tesi elaborate dallo studioso.

cui i valori artistici e formali, inquadrabili in un'evoluzione storico-tipologica ben definita, si coniugavano con quelli tecnico-costruttivi, Giovannoni pose a fondamento di qualsiasi intervento di restauro un'esaustiva conoscenza della fabbrica, indagata nelle sue valenze storiche e nelle sue componenti stilistiche, materiche e strutturali, tramite l'apporto di numerose discipline ausiliarie ed estesa fino a comprendere l'ambiente urbano in cui il monumento si trova inserito (Fig. 1.17). Fondandosi su tale base conoscitiva e su una figura di progettista "integrale" capace di comprenderla e gestirla, Giovannoni articolò l'intervento di restauro in differenti "categorie" distinte in base alle specifiche finalità a cui esse miravano: consolidamento, ricomposizione, completamento, rinnovamento e liberazione[32].

L'entità delle distruzioni avvenute durante il secondo conflitto mondiale resero necessari molteplici deroghe ai principi del restauro "scientifico" elaborato da Giovannoni, alla base anche della Carta del Restauro di Atene del 1931. La necessità di programmare tempi rapidi di ricostruzione e ottenere risultati che contribuissero a lenire le enormi ferite inferte a molti centri storici, mal si conciliavano con le esigenze e i tempi necessari all'applicazione delle norme del restauro scientifico che, come detto, intendeva basare l'azione su una conoscenza integrata del monumento e sul rispetto della stratificazione storica. Ciò determinò lo sviluppo e l'applicazione di differenti principi che consentissero al restauro, pur mantenendo una solida base scientifica, di operare con maggiore velocità. Ciò è quanto si riproposero di fare gli esponenti del restauro "critico", stretti intorno all'insegnamento di Roberto Pane, Renato Bonelli e Cesare Brandi[33]. Pur mantenendo saldo il riconoscimento del ruolo centrale della conoscenza, l'approccio "critico" rifiutò la riduzione dell'intervento di restauro alle categorie in cui, sulla scorta delle teorizzazioni di Gustavo Giovannoni, era stato rinchiuso. Non esistono regole fisse, ma solo l'insieme concreto, unico e irripetibile di valori artistici, caratteri storici e tecnico-materici dell'opera, che l'architetto-restauratore deve saper comprendere, conoscere e dominare, servendosene come guida affidabile per cogliere, aldilà delle vi-

[32] Il restauro di "consolidamento", era inteso come un intervento prettamente tecnico, volto a eliminare condizioni di dissesto. Il restauro di "ricomposizione" mirava, invece, a ripristinare l'unità sostanziale di un monumento attraverso la ricomposizione di parti smembrate. Il restauro di "completamento" prevedeva l'aggiunta di parti mancanti attraverso l'utilizzo di un linguaggio neutro. Il restauro di "rinnovamento", derivava dalla necessità dell'adattamento, tramite interventi nuovi, della struttura a mutate condizioni di viabilità o dell'ambiente artistico. Il restauro di "liberazione", agiva tramite la rimozione di parti aggiunte prive di valore storico-artistico.

[33] Roberto Pane (1897-1907), Renato Bonelli (1911-2004), Cesare Brandi (1906-1988) furono i principali protagonisti della fase di ricostruzione post-bellica in Italia. A loro va riconosciuto un importante contributo allo sviluppo di una teoria del restauro capace di coniugare molteplici tendenze e suggestioni (dalla critica estetica di Benedetto Croce, alla suggestione della nascente psicanalisi), base di un'attività pratica e direzionale esercitata attraverso l'Istituto Centrale del Restauro, di cui Cesare Brandi fu fondatore e direttore dal 1939 al 1960. Importante fu anche il contributo che tali studiosi diedero allo sviluppo di strumenti normativi adeguati a supportare le teorie sul restauro da loro elaborate e concretizzatosi nella Carta del Restauro di Venezia del 1964 e nella Carta italiana del Restauro del 1972, il cui influsso agì a livello nazionale e internazionale.



Fig. 1.17. Palazzetto Torlonia, Roma. Disegno per il restauro di Gustavo Giovannoni (dettaglio) (1908-1909).

cissitudini storiche subite dalla componente materica, l'unità artistica del manufatto, per la cui conservazione o ripristino è necessario applicare lo spirito critico e creativo del restauratore.

Se questi sono gli elementi su cui si articola il restauro "critico", ciò che gli conferisce efficacia è il fondamento teorico all'interno del quale vengono applicati. Per la sua formulazione Cesare Brandi s'interrogò su ciò che rende un qualsiasi manufatto[34], oggetto o architettura vista nel suo ambiente urbano, un'opera d'arte degna di essere tutelata e restaurata, giungendo a riconoscerne l'esito in una duplice istanza, estetica e storica. Se quest'ultima è strettamente legata alla dimensione spaziale, in cui l'opera è collocata, e ai processi storici che ne hanno determinato lo stato attuale, è nel valore estetico, oggetto di percezione immediata da parte della coscienza del singolo, che risiede il valore artistico. Entrambe le istanze non possono però sussistere senza la materialità dell'opera, che rappresenta, al contempo, il mezzo, tramite il quale l'immagine artistica viene trasmessa e il peculiare substrato fisico, storico e spaziale, in cui si manifesta. È nella materialità che avviene lo sdoppiamento fra la "struttura", intesa come mero supporto fisico aldilà di qualsiasi manifestazione formale, e "l'aspetto", che gli deriva dall'atto creativo dell'artista.

Strettamente connesso con le istanze culturali e sociali delle comunità umane, che vivono, agiscono e si riconoscono all'interno di paesaggi storici in cui la stratificazione delle tracce materiali, antiche e recenti, deve convivere con le esigenze di utilizzo e rifunzionalizzazione degli spazi, il restauro continua ad essere al centro di elaborazioni teoriche ed applicazioni pratiche, talvolta estremamente diversificate. È il caso del restauro "tipologico-processuale" di Saverio Muratori, Paolo Maretto e Gianfranco Caniggia[35] che, basandosi sul concetto di "tipo architettonico" prevalente in determinate aree o quartieri e dei caratteri edili "tradizionali" ad esso connessi, ha elaborato apposite strategie di restauro e pianificazione urbana. Con differente prospettiva, basata su un approccio al manufatto architettonico che per certi versi recupera una sensibilità "romantica" nei confronti dei valori storici e forte di una rinnovata scoperta dell'importanza della cultura materiale, la recente "conservazione integrata" ha visto nell'architettura un "manufatto" da conservare integralmente nella sua componente materica e nella stratificazione storica, fatta di aggiunte e alterazioni, attraverso le quali è sempre possibile ricostruire non solo la storia "ufficiale", dominata da grandi artisti e scandita dal succedersi

[34] L'estensione del restauro dai monumenti architettonici ai manufatti mobili, emerge dalla Carta del Restauro del 1972, dove il contributo di Cesare Brandi fu essenziale.

[35] Saverio Muratori (1910-1973) e gli allievi Gianfranco Caniggia (1933-1987) e Paolo Maretto (1932-1988) dalle facoltà di architettura di Roma, Firenze, Genova, Reggio Calabria, hanno dedicato la loro attività teorica e pratica all'applicazione, nello studio e nella pianificazione urbana, di un approccio all'architettura basato sul concetto di tipologia e sull'identità urbana ed applicato a differente scala (architettonica, edilizia, urbana e territoriale). Tale posizione avversata dalle teorie accademiche imperati e tacciata di passatismo, si opponeva, in realtà, alle tendenze operanti in ambito architettonico, che prediligevano l'applicazione di modelli e tipologie importate spesso da contesti stranieri.

di correnti stilistiche, ma anche quella umile e dimessa delle tecniche costruttive, delle maestranze, delle committenze. Dallo strutturalismo degli anni sessanta e settanta, ai recenti sviluppi dell'ermeneutica, fino alle acquisizioni della cultura post-moderna, il restauro applicato all'architettura continua ad essere al centro di un intenso dibattito e di una vitale contaminazione di saperi e discipline, testimone dell'importanza cruciale che riveste per l'essere umano la conservazione delle tracce materiali del proprio passato.

Non stupisce, quindi, come l'esito di tale secolare travaglio critico circa le metodologie e le finalità del restauro, abbia dato vita ad una ricca produzione scientifica e ad un'attività accademica e professionale dove si sono distinte personalità di grande rilievo, capaci di coniugare conoscenze teoriche e pratiche applicandole in differenti contesti, dal singolo edificio, alla scala urbana. Invece, ciò che è realmente mancato, specialmente nel nostro paese, complice l'estrema eterogeneità e talvolta la rapidità con cui si sono susseguite differenti teorie sul restauro, è stata una solida e ben articolata normativa, a cui hanno supplito, fino ai giorni nostri, le Carte del restauro che, influenzate dalle teorie dominanti e redatte allo scopo di fornire delle linee d'indirizzo generale, non possono non far avvertire le carenze determinate dalla mancanza di un quadro normativo più stringente[36]. Tuttavia, pur mutando il contesto storico-culturale e il quadro di riferimento, l'avvicendarsi delle Carte del Restauro lasciò sostanzialmente invariate alcune fondamentali questioni, come immutata si mostra tutt'ora l'esigenza di produrre una base conoscitiva puntuale, affidabile ed estesa a coprire molteplici aspetti della fabbrica oggetto del restauro.

La documentazione, tanto quella redatta per fini conoscitivi e relativa allo stato di fatto, quanto quella realizzata per registrare le fasi di intervento uno degli strumenti es-

[36] A partire dalle raccomandazioni elaborate in occasione del III Congresso degli ingegneri e architetti italiani, tenutosi a Venezia nel 1883, le Carte del Restauro si sono periodicamente susseguite, con l'obiettivo di stabilire una base metodologica condivisa a livello nazionale e internazionale, che fosse capace di guidare i processi conoscitivi e le azioni di intervento per la tutela, il restauro e la manutenzione del patrimonio storico-monumentale, in un secolo caratterizzato, a livello europeo, dalle distruzioni causate da due conflitti mondiali e dai processi di ricostruzione e ammodernamento post-bellici. Dalla Carta di Atene del 1931, redatta in occasione della Conferenza internazionale degli architetti, a quella italiana del 1932; dalla Carta di Venezia del 1964, elaborata nell'ambito del II Congresso internazionale degli architetti e tecnici dei monumenti, alla Carta italiana del 1972; dalla Dichiarazione di Amsterdam del 1975, emanata dal Comitato dei Ministri del Consiglio d'Europa, alla Carta di Washington del 1987, fino alla recente Carta di Cracovia del 2000, tali documenti offrono una testimonianza diretta dell'attenzione crescente nei confronti della conservazione dei monumenti e degli edifici storici, in nome del loro valore documentario da ottenersi attraverso il restauro e la salvaguardia della componente materica. Tuttavia, a fronte di tale secolare tradizione, non esiste a livello nazionale una norma che regoli in modo organico e sistematico le azioni di restauro e conservazione del patrimonio culturale, con speciale attenzione all'edificato storico. Il D.Lgs 42 del 2004, Codice dei Beni Culturali, si limita a riconoscere, nell'art.29 comma 5, al Ministero, anche con il concorso delle regioni e con la collaborazione delle università e degli istituti di ricerca competenti, il compito di definire linee di indirizzo, norme tecniche, criteri e modelli di intervento in materia di conservazione dei beni culturali.

senziali in qualsivoglia progetto di restauro, tanto da essere esplicito il riferimento ad essa in quasi tutte le Carte normative redatte fino ad oggi[37].

Appare allora evidente come le metodologie impiegate nell'intervento di restauro, strettamente dipendenti dal clima culturale e dall'influsso della base teorica dominante, insieme alle specifiche finalità che stanno dietro l'esigenza di conservazione e le peculiari caratteristiche sia del manufatto, che del contesto in cui esso si trova inserito, rendono estremamente mutevoli la quantità e la qualità dei dati raccolti e, di conseguenza, le strategie necessarie per la loro documentazione e rappresentazione.

Così ad un qualsiasi rilievo per il restauro e alla successiva formalizzazione grafica può venire richiesta la documentazione di molteplici caratteri, derivati da: rilievi dimensionali e plano-volumetrici; analisi materica; indagini stilistiche, tecnico-costruttive e strutturali; analisi stratigrafica, volta a identificare superfetazioni, alterazioni, lacune, integrazioni; analisi dello stato di fatto e mappatura del quadro fessurativo, con la localizzazione dei materiali impiegati, del relativo stato di conservazione, dei fenomeni di degrado, che generalmente richiedono di ampliare le indagini dal monumento all'ambiente circostante in cui esso si trova inserito e con il quale ha instaurato un equilibrio dinamico[38]. Un insieme complesso di dati, il cui valore è strettamente dipendente dalle possibilità di contestualizzazione nello spazio tridimensionale della fabbrica. A ciò può far fronte la rappresentazione grafica, attraverso la redazione di opportune carte tematiche costruite sulla base della selezione e articolazione delle informazioni acquisite.

Sembra scontato ribadire come il valore e l'utilità pratica di un rilievo dipenda dal livello di precisione e di accuratezza raggiunto nella raccolta e registrazione dei dati che, specie nel caso di un intervento di restauro, è sempre molto alto e tale da richiedere un costante confronto con la realtà. Eppure una lunga tradizione di studi del costruito che, pur affondando le proprie radici nell'approccio rinascimentale ai monumenti antichi, non manca di far sentire ancora oggi i suoi effetti, prevede un'analisi del monumento tramite un processo induttivo che dal rilievo e dalla registrazione dei caratteri peculiari della fabbrica, mira al raggiungimento di un modello ideale. Al fondo di tale astrazione vi è l'esigenza di avere a disposizione un modello architettonico che, aldilà della precisa trasposizione dell'oggetto reale nelle sue peculiarità fisiche, sia utilizzabile come strumento di studio e di confronto per l'analisi storica, tipologica e stilistica. L'esito naturale di tale tendenza all'astrazione, non favorisce, come potrebbe sembrare naturale, un esame diretto delle caratteristiche fisiche, dimensionali, costruttive, di un manufatto, ma piuttosto spinge verso l'applicazione di alcune categorie, quali la "geometria", "l'integrità della forma" e la "simmetria", capaci di per se di favo-

[37] Carta del Restauro 1883, articolo 6; Carta del Restauro 1932, art.11; Carta del Restauro 1964, art.16; Carta del Restauro 1972, allegato B; Carta di Washington 1987, art.6; Carta di Cracovia 2000, art. 3.

[38] Marino 1990, pp. 11-15, pp. 175-213.

rire quel processo di generalizzazione, che astraendo dall'imperfezione insita nelle manifestazioni materica consente un più rapido e facile raggiungimento del modello ideale[39]. Non deve quindi stupire come costituisca una prassi ancora oggi consueta, anche nell'ambito del restauro architettonico, uno studio del monumento o dell'edificio storico condotto attraverso un esame sommario, suffragato da poche misure dirette, quando non eseguito con una semplice stima "a vista" delle forme, delle volumetrie, dei caratteri materici e costruttivi della fabbrica, ritenute sufficienti per ottenere quel modello ideale, astratto ed unitario dell'edificio, su cui diventa, proprio in virtù della semplificazione ottenuta, estremamente facile agire[40].

Fra differenti teorizzazioni in merito alle finalità dell'intervento di restauro e le opposte aspirazioni che da un lato mirano alla concretezza e precisione del dato e dall'altro all'astrazione di modelli ideali, si pone anche il rilievo e la restituzione grafica per il restauro archeologico. Se ogni «rappresentazione ha attenzioni, intenzioni, interessi e poetiche la cui mutevolezza non dipende dall'oggetto rappresentato, ma dall'atteggiamento con cui lo si affronta[41]», il contesto storico e culturale all'interno del quale è stata concepita e prodotta ogni singola rappresentazione, diviene elemento essenziale e imprescindibile per una sua corretta utilizzazione e interpretazione. In tale prospettiva, la definizione di una storia della rappresentazione può costituire un utile strumento, tramite il quale predisporre un quadro di riferimento generale per la contestualizzazione delle singole manifestazioni grafiche. Se una storia della rappresentazione, sia essa finalizzata al progetto, o all'intervento di restauro architettonico, può oggi contare sugli apporti di una lunga tradizione di studi[42], che ha indagato, mettendone nel giusto rilievo, lo stretto legame che intercorre fra teorie sul restauro, storia dell'arte e dell'architettura, contesto storico e culturale, sviluppo di metodologie, tecniche e strumentazioni sia per il rilievo diretto, che indiretto[43], sia per la successiva restituzione

[39] «*La categoria aristotelica dell'integrità della forma conduce ad integrare mentalmente e quindi graficamente, le parti mancanti; quella della geometria a rendere regolari i perimetri dei solidi; quella della simmetria a ritenere che aldilà dell'asse di simmetria si trovi un'immagine speculare*». Rocchi 1990, p. 1.

[40] Rocchi 1990, pp. 4 e ss. «*Il rilievo*», ribadisce lo stesso studioso consiste in «*lavoro sul campo, non a tavolino, e lavoro integrato, non scisso in una parte manuale e una parte intellettuale (secondo il calcolo ingenuo e meschino di coloro che presumono di poter appropriarsi le fatiche altrui riservandosi di trarre comodamente sulla carta le conclusioni: a tali mosche cocchiere sfugge appunto ciò che la ricognizione diretta acquisisce, avanzando a loro solo un confuso e rissoso ruolo di retroguardia*», Rocchi 1982.

[41] De Rubertis 2007, p. 21.

[42] La bibliografia sull'argomento, comprendente sia pubblicazioni monografiche, che articoli in riviste scientifiche e una vasta manualista con finalità didattico-divulgativa, che può essere suddivisa fra rilievo, disegno e rappresentazione per il progetto e il restauro, è vasta e articolata e non può essere riassunta in modo esaustivo questa sede. Si rimanda, anche per i riferimenti bibliografici a: V. Cundari 2006; De Rosa, 2000-2001; De Rubertis 1994; Docci-Maestri 1990; Docci 1994; Docci 1997; Unali 1996.

[43] Lo sviluppo di strumenti di precisione per il rilievo indiretto della superficie terrestre è stato da sempre condizionato da un duplice fattore: le conoscenze di natura matematico-geometriche, che forniscono la base teorica necessaria per l'utilizzo dei dati acquisiti e l'esigenza di precisione. Se la base teorica rimase pressoché immutata nel corso dei secoli, derivando essenzialmente dal sistema di conoscenze elaborate nel IV sec.

grafica, altrettanto non può dirsi per la storia del rilievo e della rappresentazione redatta a supporto di attività di restauro in ambito archeologico, il cui interesse solo in anni recenti ha suscitato l'attenzione degli studiosi[44].

Le peculiarità che la rappresentazione grafica, applicata alla comprensione e al restauro dei monumenti antichi, ha acquisito derivandole dalle specifiche necessità della ricerca archeologica, richiedono per essere efficacemente comprese di valutare l'apporto di molteplici elementi. Occorre, innanzitutto, riesaminare in prospettiva storica lo sviluppo della disciplina, cogliendo i nessi che legano il lento maturare di un pensiero critico nel suo progressivo affrancarsi da un'impostazione storico-erudita e la definizione di una metodologia d'indagine che sapesse applicarlo allo studio e all'interpretazione dei resti materiali, al fine di giungere ad una ricostruzione, la più obiettiva possibile, delle società antiche nel loro manifestarsi come sistemi culturali complessi[45]. Bisogna porre mente al progressivo aumento delle esigenze di precisione, accuratezza, verificabilità dei processi di raccolta e documentazione, strettamente connessi con il progressivo aumento della quantità e qualità dei dati, determinata dall'affermarsi, nell'ambito della ricerca archeologica, di una vocazione fortemente interdisciplinare.

Occorre predisporre degli strumenti di valutazione capaci di attribuire il giusto rilievo ai processi di generazione, trasmissione e condivisione di conoscenze, che attraverso la formazione accademica o varie forme di apprendistato, stanno alla base tanto del singolo professionista, quanto di un'intera comunità storicamente determinata e nel suo rapportarsi al patrimonio culturale, come ad un insieme di valori da comprendere, conservare e consegnare alle generazioni future[46]. Occorre,

a.C. dal greco Euclide, fu il secondo elemento, ovvero la richiesta di maggiore precisione ad aver influito generando il bisogno di strumenti capaci di garantire più precise misurazioni della superficie terrestre. L'esigenza di avere a disposizione misure maggiormente attendibili per la superficie terrestre, iniziò gradualmente a farsi sentire in Europa dagli inizi del XVIII sec. d.C. in stretta connessione con la diffusione di riforme tributarie basate sull'estensione areale dei possedimenti e sulla necessità di disporre di basi catastali affidabili. Ciò determinò una produzione di strumenti di rilievo, la quale più che innovare sperimentando, perfezionò, anche grazie ai vantaggi offerti dalla produzione seriale di tipo industriale, modelli ideati in età antica o rinascimentale. Tuttavia la maggiore disponibilità di strumenti di precisione che alla metà del XIX sec. d.C. comprendevano, catene agrimensorie, odometri, bussole, rolline metriche, tavolette pretoriane, squadri agrimensori, grafometri, teodoliti, livelle e clinometri, non determinò di per se la loro applicazione al rilievo architettonico e archeologico, dove l'esigenza di ottenere misurazioni più precise dei dati dimensionali, fu mitigata per lungo tempo da un rilievo finalizzato alla definizione di un modello ideale, per il quale l'esattezza delle misurazioni raggiunta dai nuovi strumenti era superflua. V. Ludovico 1991; Dotto 2010, pp. 113-134.

[44] L'attenzione ad una ricostruzione storica delle personalità, dei metodi, delle finalità del rilievo e della rappresentazione grafica, da mettere in rapporto con la storia della ricerca archeologica è abbastanza recente e in gran parte ancora da esplorare. V. Paolini 2010, pp. 69-92, e soprattutto Buscemi 2010, con la pubblicazione degli Atti di una gionata internazionale di studio dal titolo "*La documentazione grafica dei monumenti antichi nell'800, tra tecniche e ideologia*", svoltasi a Catania il 25 novembre 2009.

[45] Paolini, *op. cit.*, pp. 69 e ss.

[46] Una storia del rilievo archeologico non può, infatti, essere neppure concepita al di fuori delle personalità che concretamente e attraverso le loro opere, hanno contribuito a svilupparla. Di queste va indagata innazitutto la formazione culturale e professionale, maturata in seno alle accademie

infine, contestualizzare ogni prodotto artistico realizzato nel clima culturale, sociale, economico in cui è stato concepito, sforzandosi di porlo in una sequenza storica, dalla quale possa trasparire l'influsso operato dalle teorie storico-artistiche e del restauro, le richieste della committenza, il mercato editoriale, le tendenze politiche e amministrative in atto a livello locale, nazionale e internazionale egli interventi a supporto delle esigenze di tutela e valorizzazione del patrimonio culturale[47]. Solo in questo modo ogni rappresentazione per il restauro archeologico e per il patrimonio culturale, può ampliare i suoi significati e da mero strumento di documentazione può farsi esso stesso veicoli di significati e di valori storici sia a livello individuale che collettivo.

italiane e straniere che, a partire almeno dalla seconda metà del XVIII secolo subirono un profondo processo di riorganizzazione, con una maggiore attenzione allo studio e ai valori di un mondo classico, destinato ad ampliare progressivamente i suoi limiti cronologici e spaziali, parallelamente alle scoperte archeologiche e ai cambiamenti del quadro storico-politico internazionale, le cui ripercussioni non sono da trascurare, in quanto capaci di influire notevolmente nella scelta dei luoghi siano essi intesi come destinazione di una missione archeologica o come tappa nell'ambito del *Grand tour* che, durante il XVII e il XVIII secolo, fu lo strumento fondamentale per la maturazione culturale dell'intellettuale europeo. Con la stessa attenzione riservata alla formazione culturale e professionale, va indagata, attraverso un attento riesame delle opere prodotte, la personalità artistica del singolo autore, contestualizzandola nel quandro storico, culturale, sociale e politico a lui contemporaneo, requisito fondamentale, per poter impostare una ricostruzione della storia del rilievo archeologico unitaria e di ampio respiro. Vedi, ad esempio, quanto fatto su singoli personalità in: Dato-Pagnano 1995; Buscemi 2003 pp. 3-9, 2006, pp. 63-90 e 2008, su Sebastiano Ittar; Szemethy 2010, pp. 87-112 su George Niemann; De Bon-Pianetti-Modrzewska 2010 pp. 147-156 su Alessio de Bon; Grigneri Pantano 1995, 1999, 2006 su Jean Hoüel nella Sicilia Sud-orientale, pp. 65-82; Pane 1980; Bettagno 1978; Rossi Pinelli 2003 su G. B. Piranesi.

[47] Appare sempre più evidente la necessità di trattare qualsiasi rappresentazione grafica del patrimonio culturale, alla stregua di un qualsiasi altro documento storico, sviluppando una metodologia di analisi integrata. L'attenzione rivolta, in certi frangenti storici, a determinate aree geografiche e ai monumenti in esse rappresentate, potrebbe trovare spiegazione nel differente grado di accessibilità determinato dal quadro politico nazionale e internazionale di riferimento, come è accaduto con la dominazione turca in Grecia, che per tutto il XVIII sec e metà del XIX spinse i viaggiatori europei verso l'Italia meridionale e la Sicilia. Allo stesso modo anche gli interventi politico-amministrativi e legislativi messi in atto dai vari organi di governo possono, talvolta offrire informazioni preziose per la comprensione e contestualizzazione di interventi di rilievo e documentazione per il restauro. È il caso ad esempio della documentazione prodotta in Sicilia, a partire dal 1779, da Carlo Chenchi e Luigi Mayer, che non si spiegherebbe senza il dispaccio del re Ferdinando IV, che istituiva nelle persone di Ignazio Paternò Castello, V Principe di Biscari e Gabriele Lancillotto Castello, i due regi custodi, a cui era demandata la formazione dei "*Plani*", basata su un'azione di documentazione e catalogazione dei beni presenti nell'isola.

Capitolo II

Punti e linee, pixels e vettori

«La distinzione fra spazio materiale e spazio virtuale e la loro rappresentazione come componenti reciprocamente indispensabili all'esistenza dello spazio reale vissuto dall'uomo consente di collocare i prodotti delle nuove tecnologie digitali fra gli elementi del reale».

Giorda 2000, p. 25.

2.1 Dalla matita al mouse

Lo sviluppo delle tecnologie informatiche, grazie ai vantaggi derivati dal loro utilizzo, hanno assunto un ruolo sempre più pervasivo in molteplici campi dell'attività umana. L'influsso delle *Information and Comunication Technologies* all'interno della società contemporanea è tale che, al giorno d'oggi, risulta impossibile pensare a qualsivoglia attività umana sia fisica, che mentale, la quale nel suo svolgimento non presupponga l'utilizzo di strumenti informatici. Se, infatti, il processo continuo di interazione fra realtà interna all'"Io sensiente" e mondo esterno da esso percepito, in cui può sintetizzarsi il nucleo fondante di ogni azione umana, può essere visto come un ininterrotto flusso di dati, che richiedono processi continui di trasmissione, archiviazione e interpretazione, diventa possibile comprendere come, le tecnologie informatiche, nate appunto dall'esigenza di una più veloce ed efficiente gestione, archiviazione ed interpretazione di dati, non solo abbia avuto un impressionante sviluppo, ma stia progressivamente cambiando, in modo inconscio e irreversibile, non solo le nostre abitudini di vita, ma le modalità stesse dei nostri processi cognitivi, agendo perfino sulla struttura del nostro cervello. Infatti la psicologia sociale, da tempo e in contrasto con il paradigma interpretativo difeso dalla comunità scientifica e coincidente con l'assunto di un modello unico e universale di funzionamento dei processi cognitivi umani, basato sull'esistenza di regole fisse per la percezione, memorizzazione e utilizzo di categorie logiche, propone di ripensare ai processi cognitivi in modo più malleabile, considerando la stretta dipendenza che essi hanno con gli stimoli e i processi socio-culturali a cui la realtà esterna sottopone l'individuo lungo tutto l'arco della sua esistenza. Inoltre i dati raccolti da esperimenti condotti in ambito neurologico e volti ad indagare la capacità neuroplastica del nostro cervello in relazione ai processi cognitivi, cominciano a rilevare gli esiti, in ter-

mini di neuromorfologia cerebrale, dei *biofeedback* generati da *input* sensoriali esterni, continuati e percepiti come importanti dal soggetto sensiente.

Assume allora maggiore rilievo e pregnanza la distinzione, divenuta celebre, operata Mark Prensky fra *digital immigrants* e *digital natives*, con la quale lo scrittore ed educatore statunitense intendeva differenziare fra le generazioni nate prima della rivoluzione digitale, della diffusione pervasiva di internet e di strumenti ITC in ogni ambito della vita umana, e la generazione attuale, abituata fin dalla nascita al loro utilizzo[1]. Se negli anni futuri i *digital immigrants* saranno destinati inevitabilmente all'estinzione, l'uomo che li sostituirà, definito dallo stesso Prensky con il suggestivo termine di "*homo sapiens digital*" o "*human digital*", sarà un essere umano digitalmente potenziato. Le sue capacità cognitive, infatti, stimolate da una naturale evoluzione a stretto contatto con una componente tecnologica e digitale pervasiva, potranno garantirgli la possibilità di giungere ad una conoscenza superiore a quella odierna, soggetta ai condizionamenti determinati dai limiti degli uomini attuali. Tutto ciò, secondo Prensky, dovrà necessariamente passare attraverso una nuova forma di comprensione, derivata dall'accesso e dalla capacità di analisi di enormi masse di dati, a cui dovrà corrispondere una forma di "saggezza digitale", che ne detterà le norme per il corretto utilizzo[2].

Il disegno, nella sua duplice funzione di rappresentazione per il progetto e per il restauro, è stato anch'esso interessato negli ultimi anni da una profonda revisione, determinata dalla diffusione di software appositamente progettato per il disegno digitale. Tuttavia, nonostante gli indiscutibili vantaggi che gli odierni strumenti di disegno assistito offrono in termini di precisione, velocità di esecuzione, automazione di procedure ripetitive, nonché nella facilità di archiviazione, gestione e condivisione degli elaborati finali, il disegno eseguito manualmente con tecniche "tradizionali" conserva ancora oggi gran parte del suo valore, derivato dai caratteri peculiari che esso possiede in quanto strumento conoscitivo e non mero mezzo tecnico finalizzato, unicamente, ad una rappresentazione obiettiva della realtà. Diventa pertanto comprensibile come l'esecuzione di un disegno imponga la conoscenza sia di metodologie di lettura e analisi del reale, sia tecniche di rappresentazione strettamente dipendenti dal contesto di studio e dalle specifiche finalità per le quali l'elaborato viene redatto.

Infatti il processo che va dall'ideazione all'esecuzione di un qualsiasi disegno può essere schematicamente posto fra i due estremi, dell'analisi del contesto e delle specifiche finalità della rappresentazione da un lato e dall'altro della scelta delle tecniche più adatte per

[1] Prensky 2001a; Prensky 2001b. Lo scrittore, in una prospettiva orientata principalmente all'educazione delle nuove generazioni, pone in rilievo la netta differenza esistente nei processi cognitivi dei *digital immigrants* e dei *digital natives*. Le nuove generazioni, a differenza delle precedenti, stimolate dall'ipertestualità e dal *multitasking* di internet e degli strumenti informatici attuali, sono abituati, fin dalle prime fasi formative, a modalità di accesso non sequenziale a quantità spesso rilevanti di dati e allo svolgimento, in parallelo, di molteplici attività, che richiedono strategie educative non tradizionali.

[2] Prensky 2009.

dargli espressione grafica. L'analisi del contesto da rappresentare richiede l'applicazione di appropriate metodologie per la decodifica della complessità del reale, per la sua scomposizione in elementi costituenti dotati di autonomo significato, e per la selezione, sulla base delle specifiche finalità, di quelli ritenuti utili per la rappresentazione finale[3]. La scelta delle tecniche di rappresentazione richiede, oltre la conoscenza e la padronanza dei principi della geometria descrittiva per la rappresentazione di uno spazio tridimensionale su una superficie bidimensionale, anche di differenti stili grafici e di codifiche per la trasmissione di specifici contenuti e informazioni.

Limitando la presente analisi alle sole rappresentazioni per il progetto e per il restauro applicato a monumenti e contesti storico-archeologici, queste possono essere suddivise in due differenti ambiti: lo schizzo a mano libera e il disegno tecnico.

Uno schizzo a mano libera nasce generalmente per dare forma ad un'idea, che può tanto riguardare la definizione di un nuovo progetto, quanto la realizzazione di un intervento su un contesto preesistente, come accade in un intervento di restauro. In entrambi i casi uno schizzo, instaurando un differente rapporto con lo specifico oggetto della sua rappresentazione, può essere eseguito "dal vero", quando il processo di analisi e interpretazione della realtà esistente e la codifica del contenuto da veicolare attraverso l'immagine avvengono contestualmente alla lettura e osservazione della realtà, oppure in forma mediata, quando e talvolta partendo da schizzi "dal vero" il processo di riflessione e relativa codifica grafica, avvengono in un momento successivo a quello dell'esame diretto *in situ*. In entrambi i casi, l'indeterminatezza che caratterizza uno schizzo a mano libera e la sua assoluta libertà nei confronti di segni e norme di rappresentazione codificate, piuttosto che costituire un limite ne rappresenta l'elemento di forza, favorendo un processo creativo dinamico capace di scongiurare la fissità e l'immobilismo di un'idea creativa, tramite la libera associazione di concetti[4]. Allo stesso modo la possibilità offerta da uno schizzo di associare al segno grafico concetti e idee, rende possibile utilizzare una rappresentazione grafica come strumento per la "reinterpretazione" personale e soggettiva della realtà e per la trasmissione dei contenuti ad essa relativi[5] (Fig. 2.1).

Il disegno tecnico, a differenza dello schizzo, per il suo stretto legame con il successivo momento della definizione degli elementi caratterizzanti un'idea progettuale o un intervento esecutivo, necessita di un rapporto più stringente e obiettivo con la realtà rappresentata, insieme all'applicazione e al rispetto di norme di codifica standardizzate[6],

[3] Verstijnen *et al*. 1998, pp. 177-200.

[4] Glazer 2000, p. 10 ; Kavakli-Gero 2001, si soffermano ad analizzare gli effetti positivi, in termini di "*insight creativo*" e di "pensiero divergente" favoriti dall'indeterminatezza dello schizzo.

[5] Suwa-Purcell-Gero 1998.

[6] Gli standard riconosciuti a livello nazionale e internazionale nell'ambito del disegno tecnico è estremamente puntuale e articolata. Essa prende in considerazione molteplici aspetti: dalle dimensioni dei fogli (UNI EN ISO 5457:02), ai tipi di linea (UNI EN ISO 128-20:02; UNI ISO128-24:06), alle scale di rappresentazione (UNI EN ISO 5455:98), ai riquadri di iscrizioni (UNI EN ISO 7200:2007), alle scritte (UNI EN ISO 3098-0/5:00), alle quotature (UNI 3973,3974,3975:89). Essa codifica, infine, anche i metodi di rappresentazione (UNI EN ISO 5456-1/3:01).

necessarie a limitare eventuali incertezze, quando non veri e propri errori nella lettura delle informazioni rappresentate, da parte di un'utenza diversa dall'autore del disegno (Fig. 2.2).

Nonostante gli indubbi, e oramai irrinunciabili, vantaggi del ricorso a software di disegno assistito, permane pertanto rilevante il valore della rappresentazione grafica ottenuta manualmente con tecniche di tipo "tradizionale", sia sotto l'aspetto formativo, sia nei riguardi di quello progettuale ed esecutivo. Sebbene software e periferiche di ultima generazione hanno chiaramente dimostrato di poter assicurare un'interazione con l'utente sempre più precisa, fornendo al contempo un'esperienza fisico-procedurale molto vicina a quella che per secoli ha accompagnato la realizzazione di un disegno manuale, l'insieme delle peculiarità che caratterizzano una rappresentazione di tipo "tradizionale", ne rendono ancora estremamente utile, se non indispensabile, l'apprendimento come fondamento teorico, i cui vantaggi si riverberano anche nel corretto utilizzo di software di disegno digitale[7].

2.2 Strumenti di disegno assistito

La generica etichetta di "software per il disegno digitale" comprende oggi molteplici applicativi, profondamente diversificati per le finalità dei prodotti che consentono di realizzare, per lo specifico campo di applicazione in vista del quale sono stati progettate, per il bacino di utenza a cui sono rivolte. Vi sono software per l'esecuzione di semplici schizzi, altri appositamente pensati per il fotoritocco o per il disegno tecnico. Anche dal punto di vista dei costi, così come dell'accessibilità del codice sorgente, vi è oggi un'ampia varietà di scelta fra software libero e open source e software proprietario[8]. Fra le applicazioni ricadenti all'interno del settore della *computer graphics*, i software CAD, nati per il disegno tecnico,

[7] Federle 2010, pp. 12-19.

[8] Con software libero o freeware si intende una tipologia di software, che gli sviluppatori rilasciano gratuitamente agli utenti con licenze che ne consentono l'utilizzo e la redistribuzione. Tale tipologia è generalmente differente rispetto a software open source, di cui oltre all'utilizzo gratuito viene rilasciato anche il codice sorgente e tutta la documentazione utile non solo a mettere l'utente in condizione di comprendere l'esatto funzionamento, ma anche la modifica e l'eventuale implementazione. Con software proprietario, invece, si intendono degli applicativi o anche dei sistemi operativi, sviluppati da case produttrici che ne consentono l'utilizzo dietro pagamento. In quest'ultimo caso, la licenza che viene acquisita dall'utente non comprende il rilascio del codice sorgente, ma solo l'uso del software senza possibilità di implementazione o di comprensione profonda dei processi di elaborazione che l'applicativo opera sui dati di partenza. La differenza quindi fra software libero, open source e proprietario non investe solamente questioni legate all'acquisto o alle licenze che ne regolano l'utilizzo, ma investe anche la questione, ben più importante nel caso di utilizzo di software per la produzione di informazioni di rilievo scientifico, della possibilità di un controllo dei processi di elaborazione dei dati e della loro aderenza e congruità con gli obiettivi prefissati in seno ad una specifica ricerca, che solo il software *open source* garantisce. Strettamente connessa con le differenti tipologie di software, è infine la questione dei formati di importazione ed esportazione dei file. Se infatti, tutti i software tendono generalmente a garantire un ampio utilizzo di formati di dati "in ingresso", tendono per ovvie ragioni commerciali, a limitare fortemente a formati proprietari, le possibilità di esportazione. Anche in questo caso, tale aspetto, che investe in modo rilevante, questioni di obsolescenza del software e di *long term preservation* dei dati. Per le questioni legate all'utilizzo di software libero nell'ambito della moderna



Fig. 2.1. Piramide Cestia, Roma 2000; matita e pastelli su carta. (Da Pierluisi *2004, p. 31 n.18).*

rappresentano certamente quelli che hanno avuto il più precoce sviluppo e, di conseguenza, possono oggi vantare la maggiore maturità. Dietro tale acronimo, tuttavia, occorre distinguere due differenti tipologie di applicazione: i *Computer Aided Drafting* e *Computer Aided Design*.

Alla prima categoria appartengono tutti quei software appositamente sviluppati per supportare il disegno tecnico, sia 2D che 3D, nella creazione di un modello digitale. I secondi, invece, hanno come specifico obiettivo la progettazione di manufatti, sia reali, sia virtuali, e si pongono, per così dire, ad un livello intermedio fra gli applicativi della precedente categoria e i software sia CAE, *Computer Aided Engineering*, che CAM, *Computer Aided Manufacturing*, i quali consentono di ottenere un prototipo di un oggetto, partendo da un modello digitale che può essere sottoposto ad una serie di analisi tecniche, volte ad accertarne la corrispondenza con gli specifici requisiti progettuali.

Il primo calcolatore elettronico dotato di periferiche di input/output per l'immissione e la visualizzazione di dati fu realizzato all'inizio degli anni '40 del secolo scorso, nei laboratori del *Massachusetts Institute of Technology*. Sviluppato nell'ambito del progetto *Whirlwind* diretto dal SAGE, *Semi Automated Ground Environment* della *United States Air Force*, esso doveva supportare la realizzazione di un simulatore di volo per l'addestramento dei bombardieri che fosse in grado di riprodurre, in tempo reale, i parametri fisici e aereodinamici di differenti tipologie di aeromobili. Tramite una "*light gun*", messa a punto dallo scienziato Bob Everett diveniva possibile, infatti, inserire dati direttamente tramite un monitor[9]. L'importanza assunta dalla visualizzazione grafica del risultato di un'elaborazione elettronica si rafforzò negli anni successivi, quando esigenze di difesa e di controllo dello spazio aereo statunitense spinsero allo sviluppo del *SAGE air defence system*. Il cuore del progetto consisteva in un elaboratore elettroni-

ricerca archeologica vedi le considerazioni in D'Andrea 2006 e, gli atti di convegni che con cadenze annuali affrontano da differenti punti di vista l'aromento, quali il convegno internazionale "*Computer Applications & Quantitative Methods in Archaeology*", la cui prima edizione risale al 1973, e "*ArcheoFoss - Free, Libre and Open Software e Open Format nei processi di ricerca archeologica*", organizzato in Italia dal 2006, e i cui atti vengono da alcuni anni pubblicato in supplementi della rivista "Archeologia e Calcolatori".

[9] L'elaboratore elettronico alla base del progetto *Whirlwind* utilizzava circa 5000 valvole termoioniche e aveva una capacità di elaborazione di 20000 istruzioni al secondo. Redmond -Smith 1980.

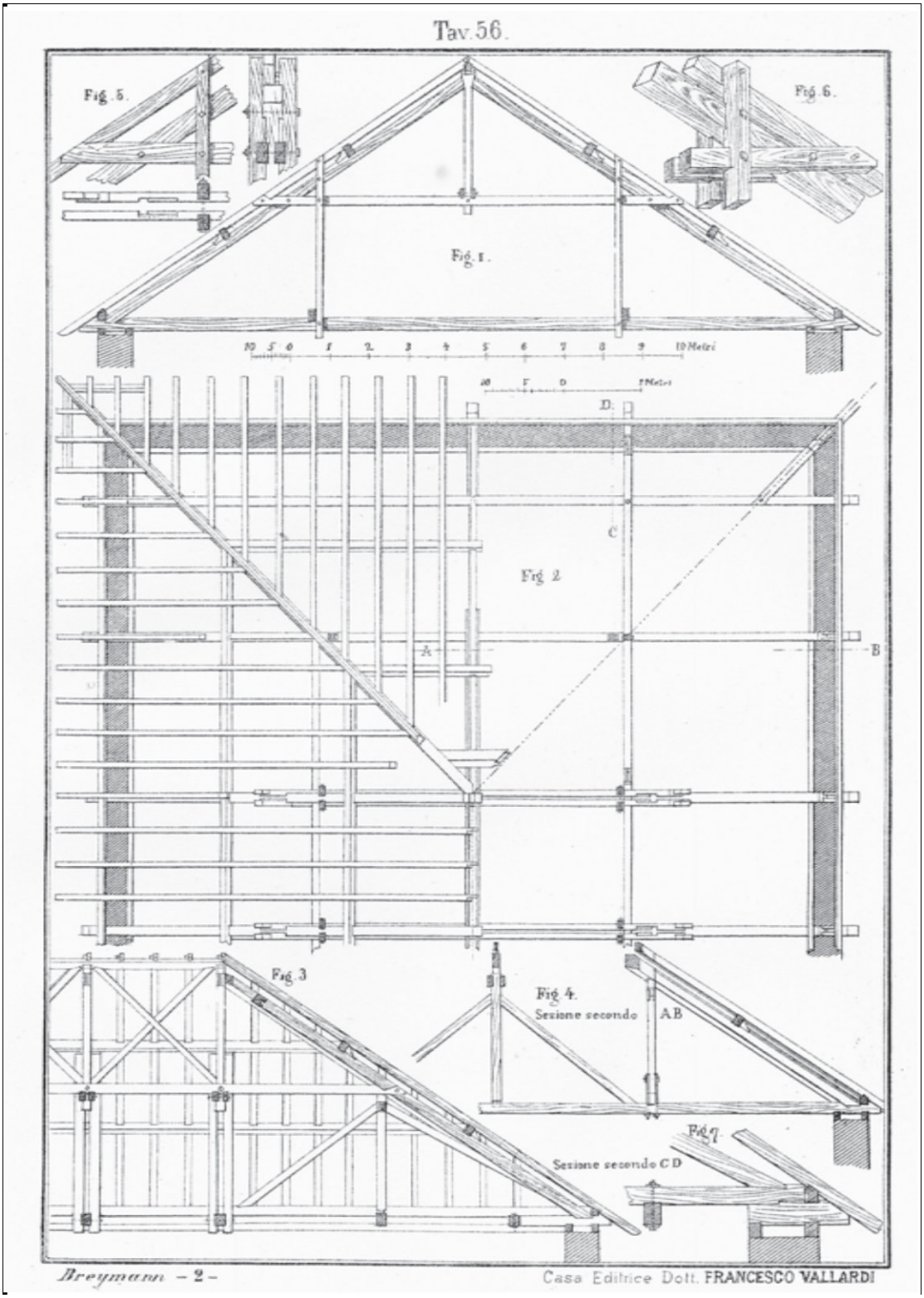


Fig. 2.2. Disegno tecnico per la costruzione di un tetto. (Da Breymann *1885, tav.56).*



Fig. 2.3. SAGE Control Room. (Da Wikipedia).

co capace di visualizzare, tramite dei punti luminosi su uno schermo, e di aggiornare in tempo reale la posizione di aeromobili in volo lungo le coste degli Stati Uniti[10](Fig. 2.3). Nel medesimo anno, sempre all'interno del *Lincoln Laboratory* del MIT, fu messo a punto un nuovo supercalcolatore, il TX-0, basato totalmente su transistor, che era dotato di maggiori capacità grafiche e di una "*light pen*" più evoluta, messa a punto da Ben Gurley. Il TX-0 consentì lo sviluppo e l'esecuzione di differenti applicazioni, fra le quali, anche un primitivo programma di disegno, che consentiva tramite la *light pen* di selezionare e trasportare direttamente dallo schermo linee e poligoni[11].

Nel 1957 la *U.S. National Bureau of Standards*, mise a punto per lo *Standards Eastern Automatic Computer* (SEAC), un

[10] Il SAGE *Air Defence System*, era basato sul supercomputer AN/FSQ7 dell'IBM e fu operativo dal 1956 al 1978.

[11] Hurst *et alii* 1989.

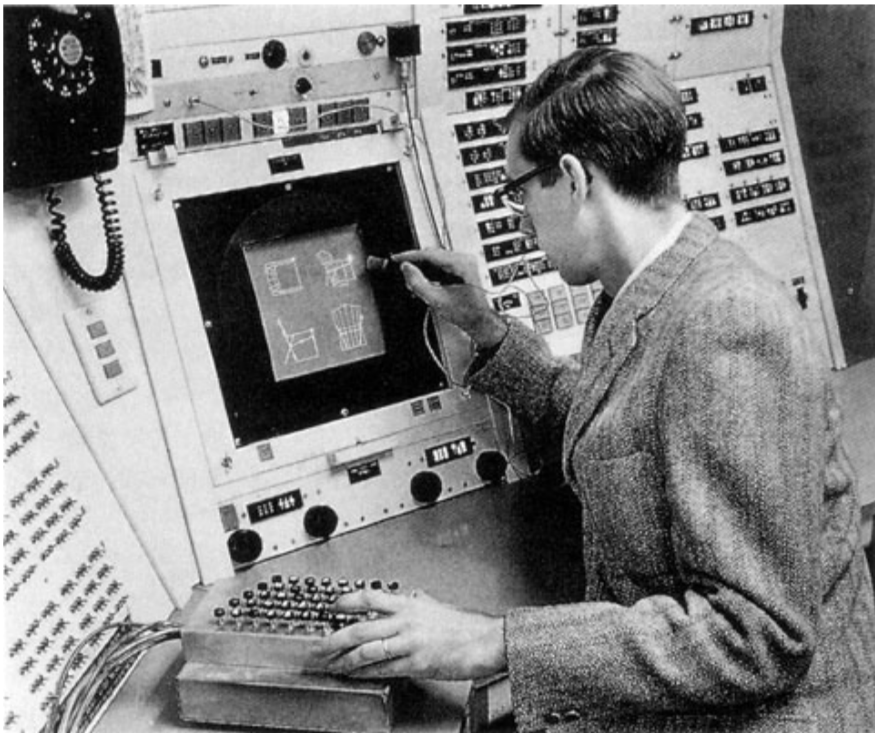


Fig. 2.4. Ivan Sutherland mentre utilizza nei laboratori del Massachussetts Institute of Technologies il programma Sketchpad (1962). (Da: www.history-computer.com).

computer da loro sviluppato, il primo modello di scanner che, pur essendo progettato per l'acquisizione di testi, costituì una tappa fondamentale nella storia della *computer graphics*, consentendo per la prima volta la digitalizzazione di immagini[12].

Il contesto era favorevole per tentare la rappresentazione della terza dimensione. Verso questo obiettivo indirizzarono i loro sforzi sia Lawrence Gilman Roberts, che Steven Anson Coons, entrambi ricercatori del MIT. Il primo, lavorando con il TX-2, il successore del TX-0[13], mise a punto un sistema per la simulazione di un oggetto posto in uno spazio tridimensionale, coniugando i principi della geometria proiettiva con l'utilizzo di matrici per la gestione della posizione assunta, di volta in volta, dai vertici dell'oggetto nella loro disposizione spaziale. Era inoltre necessario mettere a punto un sistema per gestire, in modo dinamico, la visualizzazione o l'occultamento di quelle linee che potevano risultare nascoste alla vista dello spettatore sulla base della posizione

[12] Il SEAC fu il primo computer a programma memorizzato. Era basato sulla tecnologia dei diodi logici ed era capace di eseguire programmi il cui codice era archiviato su nastri magnetici esterni.

[13] Il TX-2 fu un supercalcolatore a transistor, operativo dal 1958 e sviluppato dal *Lincoln Laboratory* del MIT per applicazioni grafiche e per l'intelligenza artificiale.

del punto di osservazione. Al secondo si deve lo sviluppo di algoritmi parametrici per la rappresentazione di superfici curve tridimensionali e l'approfondimento di metodologie per l'interazione uomo-macchina[14].

Grazie a progressi ottenuti dai suoi predecessori Ivan Sutherland, un allievo di Steven Anson Coons, mise a punto durante gli anni di dottorato al MIT, concluso nel 1963, il software *Sketchpad*, che può essere considerato l'antenato dei moderni software orientati al *Computer Aided Design*[15]. Un'interfaccia grafica appositamente sviluppata per aumentare le possibilità di disegno offerte all'utente dall'impiego a video di una *light pen*, insieme ad un approccio parametrico, che consentiva un controllo maggiore delle caratteristiche grafiche degli oggetti disegnati, furono i punti di forza di *Sketchpad* (Fig. 2.4). Non sorprende quindi come furono chiari, ben presto, le potenzialità commerciali dello sviluppo di tali prodotti, capaci di favorire i processi di progettazione e sviluppo industriale. Infatti proprio negli stessi anni in cui Ivan Sutherland stava sviluppando il suo Sketchpad, Norman Taylor, Jack Gilmore e Charles Adams, iniziarono per conto della Itek Corporation, lo sviluppo *Digigraphics* una *Electronic Drafting Machine* (EDM) basata sul computer DPD-1 e destinata alla commercializzazione, in un momento in cui anche la General Motors e l'IBM si orientavano allo sviluppo di prodotti similari[16].

I vantaggi derivati dall'utilizzo di software CAD e CAM non si riducono solo alla maggiore precisione nella resa dei caratteri dimensionali dell'oggetto da rappresentare e ad un aumento di velocità nelle fasi di esecuzione del disegno, ma comprendono anche la possibilità di giungere alla progettazione di superfici tridimensionali altrimenti impossibili da realizzare con i metodi tradizionali. Tale non trascurabile vantaggio fu certamente alla base della crescente diffusione, che tali applicativi ebbero dalla fine degli anni sessanta, quando cominciarono ad essere utilizzati anche in campo civile e non solo militare. Ciò costituì, certamente, uno degli stimoli maggiori verso l'implementazione di *tools* sempre più sofisticati. Ciò accadde, ad esempio, a Pierre Béziers, un ingegnere che lavorava alla casa automobilistica Renault, il quale a partire dal 1962, sotto lo stimolo della necessità di progettare superfici aereodinamiche da impiegare nella produzione di autovetture, iniziò a studiare

[14] A Coons si deve in particolare la definizione delle omonime "*Coons patch*", ideate per rispondere alla necessità della progettazione di superfici aereodinamiche per la costruzione di aerei da impiegare durante il secondo conflitto mondiale. L'impostazione data al problema dallo studioso e risolta attraverso la definizione di una superficie delimitata da quattro curve e caratterizzata da uno spazio interno, la cui conformazione è strettamente definita dall'applicazione di algoritmi di interpolazione sui valori assunti dalle curve esterne, è alla base delle moderne *b-spline* e delle *Nurbs*. Coons 1977; Coons 1978.

[15] Sutherland 1963.

[16] *Digigraphics* fu commercializzato a partire dal 1962. Alla fine dello stesso anno la vendita passò alla *Control Data Corporation*, che ne avviò anche il *porting* verso ulteriori piattaforme. Pochi furono gli esemplari che nel complesso vennero venduti, principalmente a industrie aereospaziali e alla US Navy, nei pochi anni in cui il sistema venne commercializzato. Tuttavia la scarsa diffusione che esso ebbe è da imputare più agli alti costi dell'hardware, che alle limitazioni insite nel prodotto.

le possibilità della rappresentazione delle infinite curve desumibili da due punti nello spazio, il risultato, le omonime "curve di Béziers", insieme allo sviluppo dell'*Unisurf*, un sistema CAD e CAM da lui messo a punto fra il 1968 e il 1975, rappresentano il maggiore contributo dato da Béziers allo sviluppo della *Computer graphic* (Fig. 2.5).

La rappresentazione digitale di oggetti e contesti, sia essa in due o in tre dimensioni, richiedendo una considerevole potenza di calcolo, rimase per diverso tempo limitata a pochi calcolatori elettronici appartenenti ad alcuni centri di ricerca, a grosse industrie e istituzioni militari. Difatti fu solo alla fine degli anni settanta, con la diffusione dei primi *Personal Computer* capaci di produrre, a costi contenuti, grafica 2D e 3D, che gli applicativi software per la *computer graphics*, fra i quali anche CAD e CAM, ebbero una grande diffusione[17], raccogliendo l'eredità di decenni di sperimentazione nel campo dell'interazione uomo-macchina e nello sviluppo di interfacce grafiche, che rendessero sempre più semplice e intuitivo, l'utilizzo di applicazioni (Fig. 2.6).

Se, certamente, nell'ambito della ricerca archeologica, architettonica o storico-artistica, l'utilizzo di software di disegno assistito per la progettazione e la produzione industriale è abbastanza raro, molto utile si rivela al contrario, l'impiego di software CAD, inteso nell'accezione di *Computer Aided Drawing*, sia nelle fasi di restituzione digitale di singoli reperti, sia in nella documentazione di scavo o architettonica di un monumento o un edificio storico (Fig. 2.7).

In tale ambito, dietro la diffusione di strumenti di disegno assistito, si celano i notevoli vantaggi che essi consentono. L'assoluta libertà che un software di disegno assistito possiede sia nei confronti del supporto fisico per la rappresentazione, sia degli strumenti tradizionali di disegno, consente, infatti, di ottenere un livello di affidabilità nella resa dimensionale di volumi e superfici, altrimenti impossibile. La semplicità e la velocità nell'esecuzione di integrazioni, correzioni, modifiche o nello svolgimento di operazioni ripetitive, come ad esempio la duplicazione in serie di elementi grafici, o l'esecuzione di campiture, insieme a potenti strumenti di disegno parametrico, che consentono un veloce e rapido aggiornamento di più oggetti funzionalmente o strutturalmente omogenei, rappresentano certamente, ulteriori vantaggi. Infine l'estrema rapidità dell'esecuzione di una copia di un disegno digitale, rende possibile una più rapida condivisione della risorsa, assicurando, al contempo, maggiori garanzie riguardo la sua conservazione futura.

Sono questi, pur nella piena consapevolezza dei vantaggi e delle peculiarità insite in una rappresentazione gra-

[17] Risale al 1977 la commercializzazione dell'Apple I, opera di Steve Jobs e Steve Wozniak, seguita nel 1981 dal primo *Personal Computer* realizzato dalla divisione degli sviluppatori dell'IBM, guidati da Don Estridge. Si tratta di un periodo di intensa sperimentazione, che vide la commercializzazione da parte di differenti produttori americani o giapponesi, come la Tandy, la Commodore, l'Atari, di *home computer* che, malgrado i costi contenuti, disponevano di capacità grafiche non indifferenti. Nello stesso periodo, inoltre, proprio per favorire lo scambio di software fra PC di differenti produttori s'impose lo standard MSX, *Machines with Software eXchangeability*.

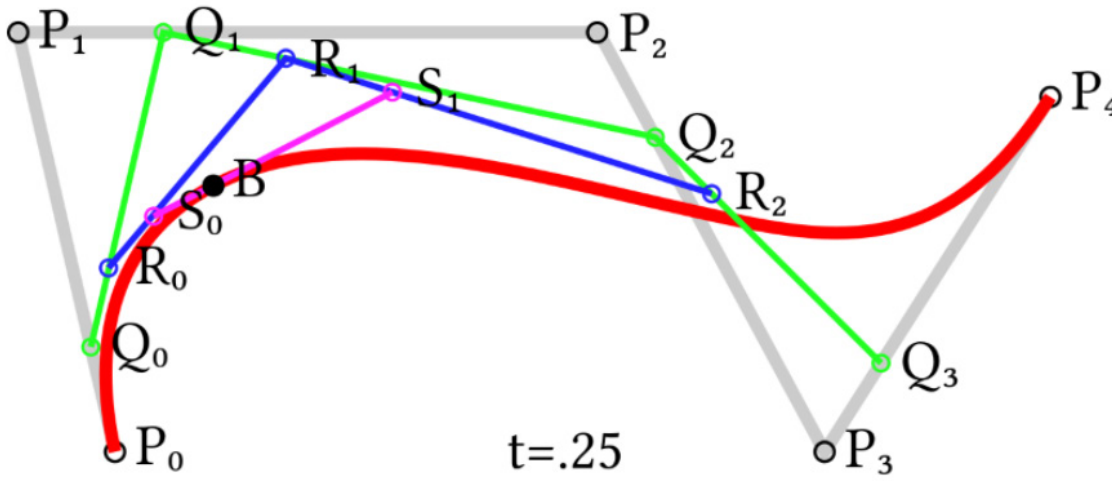


Fig. 2.5. Curva di Bezier, ottenuta applicando una funzione polinomiale di quarto grado. (Da: Wikipedia).

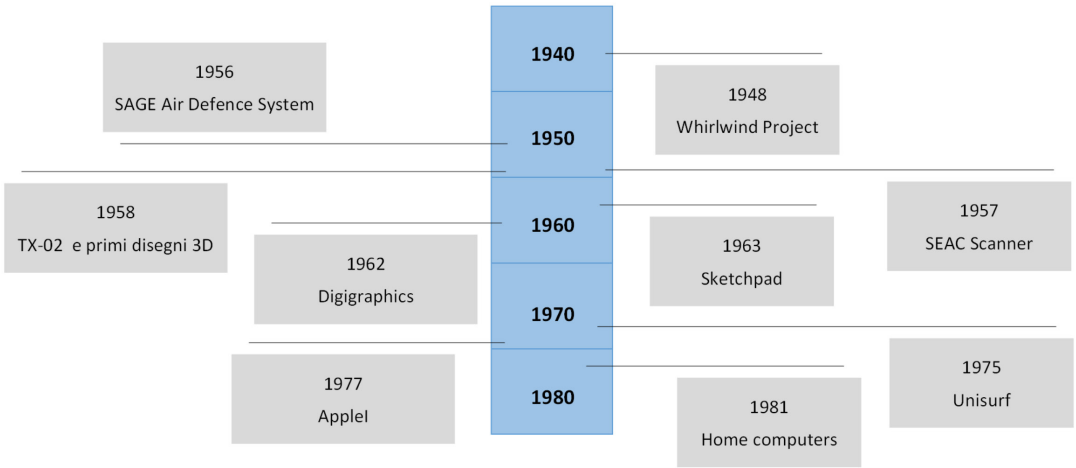


Fig. 2.6. Tappe salienti dello sviluppo e della diffusione di strumenti hardware e soluzioni software per la computer graphics.

fica di tipo tradizionale, le potenzialità che un disegno digitale possiede e che vanno, in ogni caso, declinate sulla base delle specifiche caratteristiche dell'oggetto della rappresentazione.

2.3 Da due a tre dimensioni

Nel medesimo modo con cui è possibile utilizzare differenti tecniche e metodologie per la riproduzione grafica di tipo "tradizionale" di un oggetto o un contesto reale, anche il disegno digitale offre molteplici tipologie di rappresentazione, con caratteristiche a volte estremamente variegate.

Tutto ciò rende il panorama dei software di disegno, all'interno del quale gli applicativi CAD occupano solamente una parte, estremamente articolato. Una prima, fondamentale, differenza, derivata da un'opposta strategia di rappresentazione grafica, permette di distinguere fra software di disegno "raster" e "vettoriale".

Un'immagine raster si basa essenzialmente su uno spazio di rappresentazione articolato e ripartito su una matrice, paragonabile ad una vera e propria griglia strutturata su una successione regolare di righe e colonne, le cui singole unità, denominate generalmente *pixels*, hanno una dimensione predeterminata e la possibilità di contenere informazioni omogenee, valevoli cioè per l'intero spazio occupato dal singolo *pixel*. Una qualsiasi elaborazione grafica basata su un formato raster avviene pertanto attribuendo delle informazioni cromatiche ai *pixels* che compongono la matrice. Da quest'ultima derivano tutte le peculiarità, ma anche i limiti, insiti in una rappresentazione grafica raster. La matrice, infatti possiede delle dimensioni, determinate dal numero di righe e colonne, che può essere preventivamente scelta dall'utente, ma non modificabile successivamente all'esecuzione di una rappresentazione, se non a patto di una consistente perdita di qualità che, in alcuni casi limite, può compromettere il reale utilizzo dell'immagine ottenuta (figura 2.8). Le dimensioni della matrice, insieme a quelle del singolo *pixel*, possono pertanto essere considerati elementi "fissi", da cui dipende la risoluzione di un'immagine e, di conseguenza, la sua qualità, da misurare sul grado di somiglianza esistente fra la caratterizzazione e la distribuzione cromatica presente nell'oggetto o contesto originale e quella riprodotta nella restituzione digitale.

La riproduzione tramite un'immagine raster di un qualsiasi oggetto reale avviene, infatti, assimilando quest'ultimo ad una sua rappresentazione bidimensionale, le cui informazioni, sottoposte ad un processo di segmentazione in unità contenenti ciascuna una differente connotazione cromatica, vengono archiviate all'interno dei singoli *pixels* che compongono la matrice di un'immagine digitale. Appare chiaro, quindi, come esista uno stretto rapporto fra il livello di segmentazione dell'immagine, il numero di *pixels* contenuti in essa, e la qualità di una rappresentazione digitale.

Un altro elemento che occorre inoltre tenere in considerazione nelle immagini raster è il peculiare rapporto che esse intrattengono con la rappresentazione di uno spazio, sia bidimensionale, che tridimensionale. Potendosi di fatto equiparare la matrice che ne sta

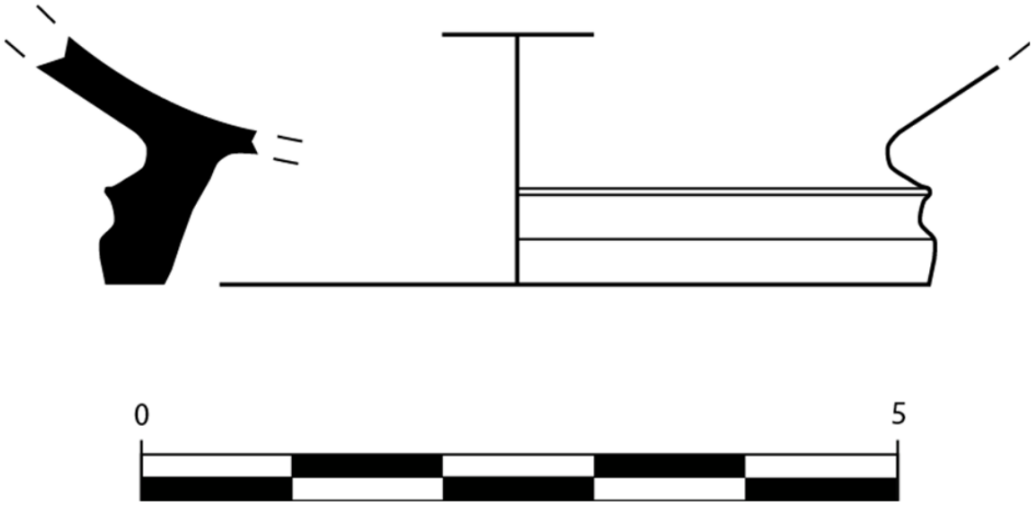


Fig. 2.7. Utilizzo di un Software CAD per la realizzazione di un disegno di un reperto ceramico. (elaborazione personale).

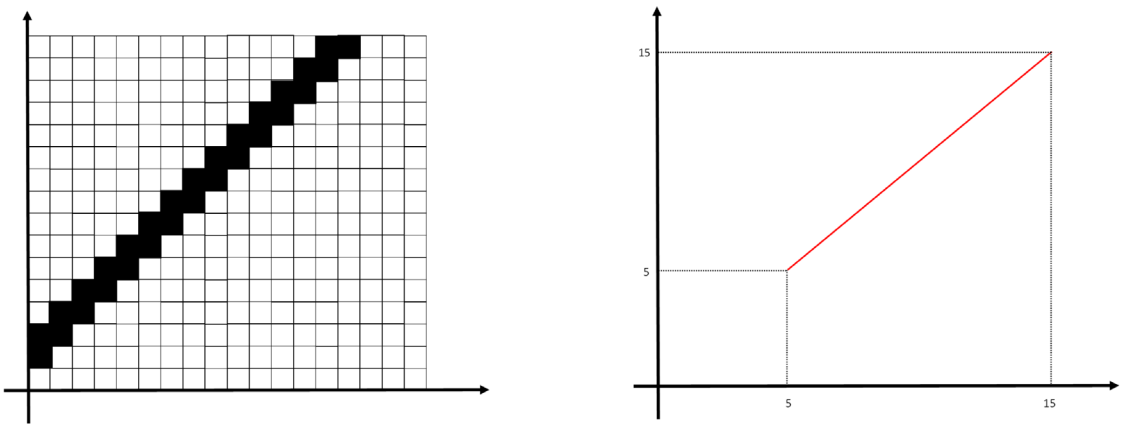


Fig. 2.8. Immagine raster. Frammento di reperto ceramico corredato di scala grafica per apprezzarne le dimensioni reali. (Foto ed elaborazione personale).

alla base al supporto cartaceo su cui si esegue fisicamente un disegno di tipo "tradizionale", la rappresentazione di un oggetto attraverso tale formato non può generalmente consentire la riproduzione delle dimensioni effettive dell'oggetto reale, ma impone il ricorso ad una scala di riduzione che ne renda possibile la rappresentazione all'interno dei limiti di uno spazio ben definito. Allo stesso modo, la riproduzione della terza dimensione può avvenire unicamente attraverso una rappresentazione prospettica o una scomposizione e proiezione dei lati costituenti l'oggetto reale su piani ortogonali, con tecniche e convenzioni che, nate per la risoluzione di problematiche insite nella rappresentazione tradizionale di un oggetto, mantengono tutta la loro pregnanza nel passaggio al digitale.

Occorre, infine, soffermarsi su un ultimo aspetto, che riveste tuttavia un'importanza fondamentale, implicando la disamina delle possibilità e del peculiare modo con cui un'immagine raster può archiviare dati e informazioni relative all'oggetto rappresentato, rendendole, eventualmente, disponibili per successivi riutilizzi. Trattando di dati e informazioni ci si riferisce, naturalmente a contenuti differenti rispetto a quelli veicolati direttamente dall'immagine rappresentata dall'oggetto digitale, per la quale valgono le medesime considerazioni che potrebbero essere fatte per un'immagine di tipo "tradizionale". Le informazioni legate, ad esempio, alle dimensioni di un oggetto rappresentato in un'immagine raster, derivano dalla disponibilità di un elemento di riferimento necessariamente connaturato all'immagine rappresentata, come



Fig. 2.9. Immagine raster. Frammento di reperto ceramico corredato di scala grafica per apprezzarne le dimensioni reali. (Foto ed elaborazione personale).

nel caso di una scala grafica in relazione alla quale viene ritratto un oggetto e che consente, tramite l'applicazione di semplici proporzioni, di giungere alla stima delle dimensioni reali dell'oggetto ritratto (Fig. 2.9).

Ciò che invece s'intende prendere in considerazione in questa sede è piuttosto l'eventuale possibilità, per un'immagine raster, di veicolare altre tipologie di informazione. Come detto, tale formato d'immagine si basa sull'archiviazione, all'interno di ciascun *pixel* della matrice che ne costituisce la struttura, del dato cromatico. Allo stesso modo, e seguendo il medesimo principio, è possibile attribuire a ciascun *pixel* altre tipologie di informazioni, come avviene nel caso di un geotiff, formato tipico di ortofoto o di carte digitali, la cui matrice raster, oltre al dato cromatico, contiene le informazioni necessarie

per una corretta scalatura e per un preciso posizionamento di un'immagine in all'interno di uno spazio digitale che riproduce dal punto di vista geografico la superficie terrestre. Medesimo principio è alla base, ad esempio, di modelli digitali del terreno, file immagine raster i cui *pixels* contengono oltre ad altre tipologie di informazioni, derivate dallo studio tematico su base spaziale di un qualsiasi fenomeno, anche il dato altimetrico, che ne rende possibile una gestione in tre dimensioni, alla stregua di una qualsiasi superficie che possieda la capacità di modellarsi dinamicamente, adattandosi ad un eventuale supporto fisico. Naturalmente, dovendo sempre distribuire le informazioni fra i vari pixels che compongono l'immagine, una rappresentazione raster si adatta bene alla rappresentazione di fenomeni discreti e non continui.

Una rappresentazione vettoriale e i relativi software di gestione, presentano notevoli differenze, sotto molteplici aspetti, rispetto a quanto appena descritto in merito al formato raster. Un file vettoriale non utilizza griglie di riferimento o matrici per la rappresentazione grafica, ma degli algoritmi matematici, che consentono di memorizzare la posizione dei vertici delle figure rappresentate, come accade ad esempio con la geometria analitica, che giunge alla rappresentazione di figure complesse o alla definizione del comportamento spaziale di determinate funzioni, a partire dallo studio di espressioni matematiche, la cui risoluzione fornisce indicazioni sull'esatta disposizione dei vertici dell'oggetto di interesse, espressi attraverso insiemi di coordinate spaziali.

La strategia appena descritta possiede notevoli vantaggi rispetto al modello matriciale di un raster. Non essendo di fatto imbrigliato nelle rigide maglie di una griglia, un disegno vettoriale offre la possibilità di uno spazio virtualmente infinito, all'interno del quale poter disegnare e rappresentare, nelle loro esatte dimensioni e quindi senza riduzione di scala, qualsiasi oggetto reale. Questa è soltanto una delle molteplici caratteristiche che il formato vettoriale possiede. Se la rappresentazione di un oggetto in un formato vettoriale avviene, infatti, senza riduzione di scala all'interno di uno spazio virtualmente infinito, ciò vale contemporaneamente per le tre dimensioni. Un oggetto tridimensionale riprodotto in formato vettoriale possiede, quindi, come l'oggetto reale di cui è una copia digitale, tre dimensioni (Fig. 2.10). Le implicazioni di tale caratteristica sono notevoli e per nulla trascurabili. Un oggetto vettoriale tridimensionale, non è pertanto un oggetto bidimensionale, a cui il rispetto di determinate regole prospettiche o l'applicazione di convenzioni grafiche conferiscono un'illusoria tridimensionalità, ma un vero e proprio oggetto 3D, esplorabile dinamicamente in uno spazio dotato anch'esso di tre dimensioni. Un oggetto a cui possono essere attribuite molteplici caratteristiche, tipiche dell'oggetto reale. Non occorre, infatti, predisporre un sistema di riferimento connaturato alla rappresentazione, per poter apprezzare le dimensioni di un oggetto digitale vettoriale, in quanto tale dato è insito nell'oggetto stesso e può essere ottenuto tramite qualsiasi software di disegno o visualizzazione vettoriale, con alcune semplici opera-

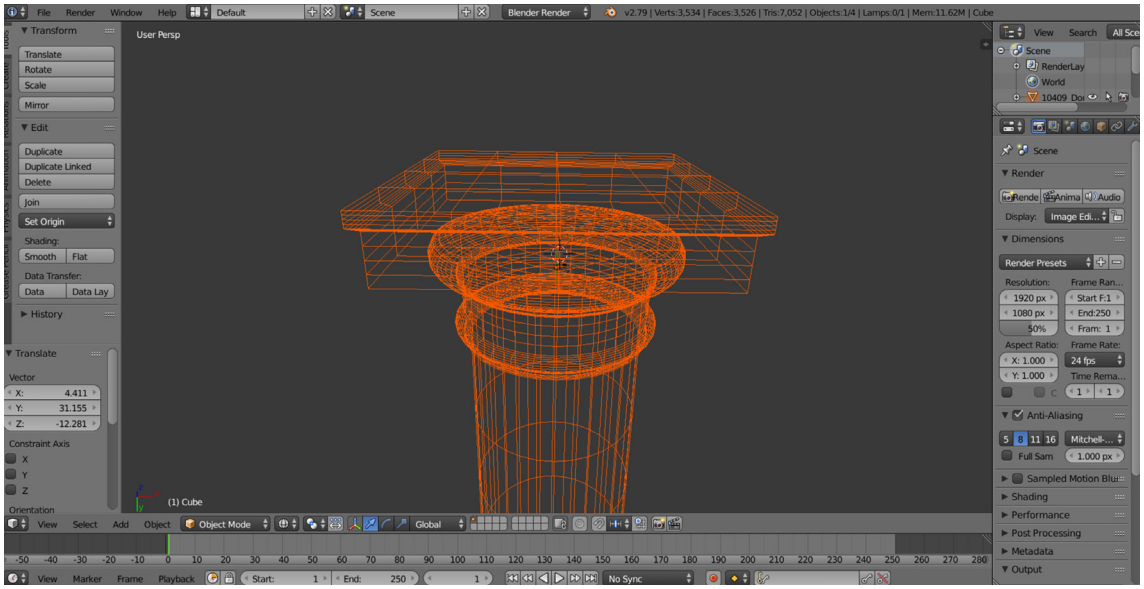


Fig. 2.10. Esempio di elaborazione di un'immagine raster. Visualizzazione in modalità wireframe del dettaglio di una colonna in stile dorico, con il software di disegno 3D Blender. (elaborazione personale).

zioni d'interrogazione. Conservando le tre dimensioni un oggetto digitale può anche mantenere le informazioni relative al volume interno racchiuso dalle sue superfici. Il *voxel* è l'unità di volume di un oggetto digitale e consente di ripartire il volume interno di un oggetto, non solo per stimarne la capacità, ma anche, e soprattutto, per agevolare l'attribuzione di informazioni e di dati all'oggetto vettoriale.

Anch'esso infatti, come accede per un raster, può contenere e veicolare dati e informazioni, ma in modo estremamente più performante e con implicazioni di più vasta portata. Ad un oggetto digitale tridimensionale in formato vettoriale possono essere attribuite disparate informazioni, come, ad esempio, i valori desunti dalle caratteristiche fisiche del materiale di cui l'oggetto reale è fatto o informazioni che, pur non possedendo uno stretto legame con le caratteristiche materiche e formali dell'oggetto reale, assumono particolar importanza nel legame spaziale che possono instaurare con esso. Le implicazioni e i campi di applicazione che scaturiscono da tali associazioni sono innumerevoli. Disporre di un oggetto tridimensionale, a cui l'attribuzione di dati e informazioni desunti da parametri fisici legati al materiale di cui l'originale è fatto, consente di effettuare simulazioni da cui desumere, solo per limitarsi ad alcuni esempi, la risposta a determinate sollecitazioni strutturali, le conseguenze di fenomeni di degrado in atto o la quantità di materiale necessario ad un intervento di restauro.

Si tratta, a ben vedere, di implicazioni molto vaste, ma che possono però amplificarsi ulteriormente se solo si pone mente agli effetti che l'applica-

zione di strategie di segmentazione semantica possono determinare. Immaginando di scomporre in parti un oggetto digitale tridimensionale, come potrebbe accadere, ad esempio, con un edificio suddiviso in base agli elementi strutturali che lo compongono, e di attribuire a ciascuno di esse tutte le informazioni atte a descriverne le caratteristiche fisiche, il ruolo funzionale e i legami strutturali che mettono in relazione ogni singolo componente con il tutto di cui è parte, ciò che si otterrebbe è un oggetto complesso, capace di riprodurre in maniera più fedele il comportamento dell'oggetto reale, offrendo innumerevoli opportunità di studiarne il funzionamento e le risposte a sollecitazioni generate da diversi scenari applicativi.

Proprio in tale prospettiva, occorre, infine, porre attenzione ad un'ulteriore implicazione che è connessa alla creazione e all'utilizzo di oggetti digitali tridimensionali specificatamente orientati al supporto di attività di ricerca, tutela e valorizzazione. Il maggiore o minore grado di utilizzabilità dei modelli per tali finalità dipende dalla capacità che essi hanno di restituire fedelmente le caratteristiche dimensionali dell'oggetto reale. Tale esigenze, nel caso di manufatti architettonici o di reperti archeologici, si scontra con l'alto grado di irregolarità morfologica che essi inevitabilmente presentano. Le rappresentazioni di tipo digitale pur consentendo gradi di precisione per nulla paragonabili a quanto può essere ottenuto con restituzioni di tipo tradizionale, non possono in tal caso fare a meno dell'apporto dei dati derivati da attività di rilievo strumentale.

Sono proprio le enormi possibilità offerte oggi da strumenti di rilievo tridimensionale, come le scansioni laser, ad offrire nuova materia di sperimentazione nell'ambito della restituzione digitale, lungo quel difficile percorso di approssimazione infinita che caratterizza l'oggetto digitale nei confronti di quello reale. Se fino a pochi anni fa il disegno digitale aveva in comune con i metodi di rappresentazione di tipo "tradizionale" la stretta dipendenza dai risultati conseguiti da sistemi di rilievo di tipo essenzialmente topografico, che consentivano un bassissimo grado di approssimazione alle irregolarità dell'oggetto reale, la disponibilità di nuvole di punti o di *mesh* poligonali derivate da una scansione laser e da processi di post-produzione, offrono oggi al settore della rappresentazione digitale dati la cui quantità e qualità era inimmaginabile fino ad alcuni anni addietro. Tuttavia l'estrema complessità, insieme alla quantità dei dati disponibili, se da un lato sembra poter offrire garanzie di un altissimo grado di aderenza dell'oggetto digitale nei confronti di quello reale da cui i dati derivano, rende dall'altro lato estremamente complesso, lungo e dispendioso, qualsiasi processo di rappresentazione digitale tramite procedimenti manuali a partire da nuvole di punti e *mesh* poligonali.

Tale passaggio, necessario per giungere a modelli tridimensionali morfologicamente e semanticamente coerenti, rappresenta una delle sfide più ardue, fra quelle che si profilano all'orizzonte nell'ambito del rilievo e della restituzione digitale.

Capitolo III

Strumenti per il rilievo

…dessinés et mesurés très exactement

C. Quatremère de Quincy,
Dictionnaire historique de l'architecture, 1832

3.1 Misurare, disegnare

Se "misurare" e "disegnare" costituiscono i due momenti fondanti qualsiasi attività di rilievo, la precisione con cui i dati vengono raccolti e restituiti graficamente, agendo direttamente sulla qualità e, di conseguenza, sulla conformità dei risultati alle finalità e agli scopi prefissati, rappresenta di per se l'elemento discriminante della buona riuscita di un rilievo.

Come più volte ribadito, la registrazione delle caratteristiche dimensionali e plano-volumetriche di uno spazio fisico o di un manufatto antropico e la successiva traduzione grafica sono equiparabili ad un atto conoscitivo, propedeutico a qualsiasi intervento sul reale. Dai vantaggi derivati dalla disponibilità di tale base di conoscenza non è escluso il patrimonio culturale, nella complessità e varietà delle sue manifestazioni.

L'importanza non solo del rilievo di monumenti, edifici e siti, ma anche del livello di dettaglio e della qualità del risultato finale, fu ribadita con forza e in linea con quanto espresso dalla Carta del Restauro di Venezia del 1964[1], nei *Principles for the recording of monuments, groups of buildings and sites*, redatti nell'ambito dell'undicesima assemblea generale dell'*International Council Of MOnuments and Sites* (ICOMOS), svoltasi a Sofia nel 1996.

In modo significativo e in forma organica venne pertanto riconosciuta, in tale occasione, l'importanza della base di conoscenza derivata dall'attività di documentazione del patrimonio culturale[2], sia per la comprensione del va-

[1] L'articolo 16 della Carta del Restauro di Venezia afferma che «*i lavori di conservazione, di restauro e di scavo saranno sempre accompagnati da una rigorosa documentazione, con relazioni analitiche e critiche, illustrate da disegni e fotografie. Tutte le fasi di lavoro di liberazione, come gli elementi tecnici e formali identificati nel corso dei lavori, vi saranno inclusi. Tale documentazione sarà depositata in pubblici archivi e verrà messa a disposizione degli studiosi. La sua pubblicazione è vivamente raccomandabile*».

[2] Nell'articolo 1, dei *Principles* redatti dall'ICOMOS nel 1996, si riconosce che «*The recording of the cultural heritage is essential: a)*

lore storico, ma anche per i processi di tutela, restauro, conservazione e valorizzazione, da perseguirsi con un forte coinvolgimento dell'intera comunità, obiettivo al quale tendono le raccomandazioni espresse in tale occasione verso la divulgazione dei risultati ottenuti.

L'esigenza di giungere a norme e procedure codificate capaci di supportare le attività di rilievo e documentazione metrica nell'ambito del patrimonio culturale, ben avvertite nei *Principles* redatti nel 1996 dall'ICOMOS, che si soffermano sulle procedure, sui requisiti e sui contenuti essenziali che tale documentazione dovrebbe possedere, sebbene non abbia prodotto, allo stato attuale, standards condivisi a livello internazionale, è stata tuttavia alla base di molteplici iniziative intraprese, autonomamente, dai singoli Stati.

È il caso, ad esempio, degli *Standards for the Historic American Buildings Survey / Historic American Engineering Record* (Standards HABS/HAER), redatti nel 1983 e revisionati nel 1990 a cura del *National Park Service*[3] del Dipartimento degli Interni degli Stati Uniti d'America. Si tratta di linee guida per la redazione della documentazione utile per la catalogazione e per il censimento di edifici e monumenti storici[4] (Fig. 3.1).

Ben maggiori e più articolati sono gli aspetti presi in considerazione dal *Metric Survey Specification for English Heritage*, redatto nel 2000 dall'*Historic Buildings and Monuments Commission for England*[5] e oggetto di tre successive revisioni, l'ultima delle quali risalente al 2015.

Sebbene si tratti, com'è stato talvolta sottolineato, di «[…] *una serie di modelli a-critici e dogmatici che definiscono una serie di requisiti "a priori", certo commensurabili fra di loro, ma difficilmente applicabili a contesti differenti*»[6], il *Metric Survey Specification for English Heritage* ha l'indubbio vantaggio di aver fornito un modello organico, comprensivo dei molteplici aspetti di una documentazione che aspira ad essere esaustiva e capace di porsi come effettivo strumen-

To acquire knowledge in order to advance the understanding of cultural heritage, its values and its evolution; b) To promote the interest and involvement of the people in the preservation of the heritage through the dissemination of recorded information; c) To permit informed management and control of construction works and of all change to the cultural heritage; d) To ensure that the maintenance and conservation of the heritage is sensitive to its physical form, its materials, construction, and its historical and cultural significance».

[3] Il *National Park Service* è un'agenzia federale statunitense, istituita nel 1916 allo scopo di conservare, attraverso la gestione di Parchi naturali e riserve, il paesaggio e gli oggetti naturali e storici nonché la vita selvaggia in esso contenuti, consentendone forme di godimento pubblico compatibili con la sostenibilità futura.

[4] Originariamente destinate alla documentazione e al censimento dei numerosi edifici storici progressivamente compresi all'interno dell'area del Parco di Yellowstone, tali raccomandazioni, in virtù della loro genericità, consentirono la progressiva applicazione anche ad altri contesti. Ciascuna di tali norme, nel numero complessivo di quattro, prende in considerazione un peculiare aspetto della documentazione (*content, quality, materials, preservation*), che viene suddivisa, sulla base del grado d'importanza storica dell'edificio oggetto di registrazione, in quattro ulteriori livelli di approfondimento posti in un ordine decrescente e comprendenti: disegni metrici, fotografie, testimonianze scritte, rilievi sul campo.

[5] L'*Historic Buildings and Monuments Commission for England* è un ente pubblico non dipartimentale del governo britannico che svolge azione di supporto alla protezione dell'ambiente storico inglese, attraverso un'azione di censimento dell'edificato storico e monumentale e di consulenza agli interventi di salvaguardia e protezione operati a livello statale.

[6] Benedetti-Gaiani-Remondino 2010, p. 34.

HABS/HAER Standards

Standard I - Content

Requirement: Documentation shall adequately explicate and illustrate what is significant or valuable about the historic building, site, structure or object being documented.

Documentation Level I
Drawings: a full set of measured drawings depicting existing or historicconditions.
Photographs: photographs with large-format negatives of exterior and interior views; photocopies with large-format negatives of select existing drawings or historic views where available.
Written data: History and description.

Documentation Level II
Drawings: select existing drawings, where available, should be photographed with large-format negatives or photographically reproduced on mylar.
Photographs: photographs with large-format negatives of exterior and interior views, or historic views, where available.
Written data: history and description.

Documentation Level III
Drawings: sketch plan.
Photographs: photographs with large-format negatives of exterior and interior views.
Written data: architectural data form.

Documentation Level IV
HABS/HAER inventory card.

Standard II– Quality

Requirement: HABS and HAER documentation shall be prepared accurately from reliable sources with limitations clearly stated to permit independent verification of information.

Measured drawings: Measured drawings shall be produced from recorded, accurate measurements. Portions of the building that were not accessible for measurement should not be drawn on the measured drawings but clearly labeled as not accessible or drawn from available construction drawings and other sources and so identified. No part of the measured drawings shall be produced from hypothesis or non-measurement related activities. Documentation Level I measured drawings shall be accompanied by a set of field notebooks in which the measurements were first recorded. Other drawings prepared for Documentation Levels II and III, shall include a statement describing where the original drawings are located.

Large format photographs: Large format photographs shall clearly depict the appearance of the property and areas of significance of the recorded building, site, structure or object. Each view shall be perspective-corrected and fully captioned.

Written history: Written history and description for Documentation Levels I and II shall be based on primary sources to the greatest extent possible. For Levels III and IV, secondary sources may provide adequate information; if not, primary research will be necessary. A frank assessment of the reliability and limitations of sources shall be included. Within the written history, statements shall be footnoted as to their sources, where appropriate. The written data shall include a methodology section specifying name of researcher, date of research, sources searched, and limitations of the project.

Standard III– Materials

Requirement: HABS and HAER documentation shall be prepared on materials that are readily reproducible for ease of access; durable for long storage; and in standard sizes

Measured Drawings:
Readily Reproducible: Ink on translucent material.
Durable: Ink on archivally stable materials.
Standard Sizes: Two sizes: 19 X 24" or 24 X 36".

Large Format Photographs:
Readily Reproducible: Prints shall accompany all negatives.
Durable: Photography must be archivally processed and stored. Negatives are required on safety film only. Resin-coated paper is not accepted. Color photography is not acceptable.
Standard Sizes: Three sizes: 4 X 5", 5 X 7", 8 X 10".

Written History and Description:
Readily Reproducible: Clean copy for xeroxing.
Durable: Archival bond required.
Standard Sizes: 8½ X 11".

Field Records:
Readily Reproducible: Field notebooks may be xeroxed. Photo identification sheet will accompany 35 mm negatives and contact sheets.
Durable: No requirement
Standard Sizes: Only requirement is that they can be made to fit into a 9½ X
12" archival folding file.

Standard IV– Preservation

Requirement: HARBS and HAER documentation shall be clearly and concisely produced

Measured Drawings: Level I measured drawings will be lettered mechanically (i.e., Leroy or similar) or in a handprinted equivalent style. Adequate dimensions shall be included on all sheets. Level III sketch plans should be neat and orderly.

Large format photographs: Level I photographs shall include duplicate photographs that include a scale. Level II and III photographs shall include, at a minimum, at least one photograph with a scale, usually of the principal facade.

Written history and description: Data shall be typewritten on bond, following accepted rules of grammar.

Fig. 3.1. HABS/HAER Standard.

Metric survey specification for cultural heritage

Section I - General conditions and project information

Project brief: Name of project and reference number; Purpose of project; Location; Access arrangements; Health and safety statement; Copyright; Contract; Site clearance; Completeness of survey; Area and scale of survey; Delivery schedule.

Introduction: Pertinent legislation; Client's guidance on matters concerning survey.

The contract and other documentation: Contract; Method statement; Risk assessment; Site visits; Calibration certificates

Contractual details: Completion of survey; Right of rejection

Health and safety: Contractor's responsibilities for safety; Health and safety requirements; Health and Safety at Work Act 1974; Access equipment; Electrical equipment; Survey equipment .

Damage to site and fabric: Use of ground markers; Use of surface-mounted targets.

Survey material supplied: Copyright; Retention of survey documentation

Section II - General performance and control of metric survey

General performance requirements: Measurement performance; Scale tolerance and point density; Completeness of survey.

Control of Survey: Accuracy of site control; Control network; Existing coordinate system; New coordinate system; Vertical datum (height control); Establishment of permanent survey marks; Witnessing of stations; Use of ground marks; Use of targets on historic fabric.

Section III– Format, presentation and provision of survey data

Digital data: CAD and digital image filenames; CAD data format; Digital image format.

CAD requirements: Use of CAD coordinate systems; Insertion point; CAD drawing unit; Line type; Use of paper space.

Presentation: Drawing sheets; Standard views; Layout; Numbering of sheets; Data sheet for measured building and topographic survey; Plotting of drawing sheets; Printing of rectified photography and ortho-images.

Survey Report: Photo location diagram; Control prints; Imagery metadata.

Survey material to be supplied: Provision of survey material; Samples; Preliminary plots or PDFs; Delivery of material; Transfer medium.

Section IV– Standard specification for image-based survey

Image-based survey techniques: Photogrammetric survey; Orthophotographic survey; Rectified photographic survey.

Control for image-based surveys: Accuracy; Control of subject; Use of detail points.

Photogrammetric and orthophotographic surveys: Digital cameras; Digital image criteria.

Image acquisition for photogrammetry and orthophotography: Imagery arrangement; Ground sample distance; Coverage of prominent architectural features; Use of oblique imagery; High-level coverage; Use of small unmanned aircraft (SUA); Completeness of survey.

Photogrammetric processing: Accuracy of orientation; Accuracy of processing; Digitising; 3-D data; Output scale.

Drawing content: Level of detail; Specific details to be noted; Line styles; Curved features; Closed features; Recording of reveals; Provision of sectional information; CAD layer names; CAD layering – general notes; **Orthophotographic processing:** Accuracy of orientation; Digital elevation model; Mosaic generation; Output resolution; Presentation of orthophotographs.

Rectified photography: Digital cameras; Digital image criteria.

Image acquisition for rectified photography: Ground sample distance; High-level coverage; Use of oblique imagery; Definition of principal plane; Control of rectified photography.

Processing rectified photography: Accuracy of processing; Output resolution; Presentation of rectified photography.

Section V– Standard specification for measured building survey

Measured building survey: Definition of measured building survey.

Description of products: Plan; Section; Sectional elevation; Elevation.

Control for measured building surveys: Control of survey data; Local datum; Accuracy of survey data; Precision of detail measurement.

Drawing content: Detail required.

Drawing convention: Curved features; Depiction of cut-line (plan and section); Use of symbols; Point density and line quality; Use of 'best profile'; Assumed detail; Use of text; Overhead detail on plans; Floor detail on plans; Treatment of staircases on plans; Services; Levels; Roof survey.

Section VI – Standard specification for topographic survey

Topographic survey: Definition of topographic survey; Description of products.

Survey control: Coordinate system; Adequate site cover; Contours; Spot heights.

Precision of detail measurement: Detail required; Scale; Detail required; Obstructed ground.

Underground services: Extent of survey required; Services information; Derived information; Report.

Drawing convention: Landform, earthworks and surface terrain; Contouring and DTMs; Location of spot heights; Depiction of trees and

Section VII – Standard specification for the collection, registration and archiving of terrestrial laser scan data

Definitions of terms: Laser scanning; Point cloud; Point density.

Data collection: Pre-survey deliverables; Certification requirements; Health and safety; Point density and measurement precision; Window scans; Overlapping scans; Data voids; High level coverage; Weather; Control and coordinate systems.

Targets and registration: Provision of point cloud data; Deliverables Intensity/colour information; Additional image data. **Storage and archive of point cloud data:** Data format; File naming system; Scan metadata.

Section VIII - Standard specification for the supply of building information modelling (BIM)

Definitions of terms: What is BIM?; How can BIM be used within a heritage project?; Purpose and scope of this document.

BIM development: Level of detail; Modelling tolerance.

Supply of BIM data: BIM data formats; Deliverables.

BIM references: Existing standards.

Fig. 3.2. Metric Survey Specification for English Heritage.

to di conoscenza e di supporto all'azione[7] (Fig. 3.2).

Le iniziative appena ricordate sono solo due esempi, certamente fra i più significativi, di un'attenzione oggi sempre più diffusa verso la definizione di standards metodologici per il rilievo e la documentazione nell'ambito dei beni culturali, che si aggiungono all'esigenza, altrettanto legittima e ampiamente avvertita, della necessità di criteri condivisi per il controllo qualitativo delle strumentazioni, e della congruenza, delle potenzialità e degli eventuali limiti nel loro utilizzo in tale ambito ed in relazione con le peculiarità del contesto di studio e con le specifiche finalità del rilievo[8].

3.2 Strumenti per il rilievo

Se l'efficacia di un rilievo e della relativa documentazione nell'ambito dei beni culturali passa attraverso la quantità e la qualità dei dati raccolti, e se questi, com'è comprensibile, sono strettamente dipendenti dalle caratteristiche tecniche degli strumenti di misura e dalle metodologie con le quali vengono impiegati, riveste un ruolo fondamentale l'analisi delle attrezzature utilizzate[9].

Gli strumenti attualmente disponibili sul mercato e utilizzabili per la realizzazione di rilievi indiretti, soddisfano un'ampia gamma di richieste, con soluzioni estremamente variegate in termini di campi di applicazione, livello di precisione, costi per l'acquisto e per la successiva manutenzione, professionalità e sapere tecnico necessari al loro utilizzo. Limitando la presente analisi unicamente a sistemi di misura di superfici e oggetti tridimensionali la strumentazione attualmente disponibile può essere suddivisa, utilizzando

[7] Articolato in sette sezioni, il *Metric Survey Specification for English Heritage* affronta molteplici questioni legate non solo agli aspetti metodologici di un progetto di rilievo, analizzando le peculiari questioni procedurali connesse alle differenti tecniche e strumentazioni oggi disponibili (topografia, laser scanner e fotogrammetria) alla definizione delle finalità, al controllo qualitativo dei risultati ottenuti, ma si spinge nella propria analisi fino alla considerazione degli aspetti legislativi e contrattuali, o quelli squisitamente tecnico-gestionali ed esecutivi, quali ad esempio le questioni legate alla sicurezza sul cantiere, senza trascurare le problematiche legate alla proprietà intellettuale, alle licenze d'uso delle banche dati prodotte e, quindi, ai criteri e ai formati di pubblicazione dei risultati ottenuti.

[8] Fra le numerose iniziative volte alla definizione di standards per la definizione qualitativa degli strumenti di rilievo occorre ricordare le VDE/VDA 2634 - part 2, *Optical 3D-measuring systems multiple view systems based on area scanning* e le VDE/VDA 2634 – part 3, *Optical 3-D measuring systems—Multiple view systems based on area scanning* linee guida elaborate dal *Verein deutscher ingenieure e dal Verband der elektrotechnik elektronik informationstechnik*, nel 2002 e nel 2008 e dedicate, rispettivamente, agli strumenti operanti nel campo del *short-range 3-D imaging* (VDE/VDA 2634 - part 2) e *del multiple images* (VDE/VDA 2634 - part 3). A queste bisogna aggiungere il *Commitee E57* dell'*American Society for Testing Materials*, (ASTM) elaborato nel 2006 e dedicato principalmente alle strumentazioni rientranti nel *middle-range 3-D imaging*. Bisogna inoltre ricordare *il Technical Committe 213, working group 10, dell'International Organization of Standardization (ISO),* dedicato agli strumenti laser connessi a sistemi CMM, *Coordinate Measurement Machines*. A quelli sopra illustrati vanno, infine, aggiunti gli sforzi condotti dal CNR canadese e dal *National Institute for Standards and Technology* americano volti allo sviluppo di protocolli per la definizione di standards per l'acquisizione di modelli 3d da immagini.

[9] Non bisogna dimenticare lo stretto legame esistente fra strumentazioni, rilievi e documen-

come discrimine le differenti strategie adottate per il calcolo delle coordinate tridimensionali dei punti rilevati (Fig. 3.3). In tal modo diventa possibile distinguere fra: strumenti di misura a "contatto" e "senza contatto" diretto con l'oggetto da rilevare. Gli strumenti a "contatto diretto" utilizzano delle sonde, generalmente nella forma di piccoli aghi, che entrano in contatto con la superficie dell'oggetto da misurare, la cui morfologia è ricostruita sulla base delle coordinate *x, y* e *z* calcolate dalla sonda e riferite ad un piano di riferimento cartesiano solidale con lo strumento di misura. Tali apparecchiature, dette in virtù di tale schema di funzionamento *Coordinate Measurement Machine* (CMM), consentono letture molto accurate delle superfici rilevate, riuscendo ad apprezzare nei modelli con maggiore precisione, variazioni nell'ordine di 1 μm. Tuttavia l'estrema lentezza della lettura, unita all'inamovibilità dello strumento e ad una dimensione di campionamento sostanzialmente limitata a quella del piano di presa ne limitano l'impiego al rilievo, in laboratorio, di piccoli oggetti

Gli strumenti che fanno utilizzo di metodologie di misura che non necessitano di un contatto fisico con l'oggetto da rilevare si basano, anche se con differenti modalità, sull'utilizzo della luce[10] e sui fenomeni di riflessione diffusa o "lambertiana" a cui questa è soggetta quando entra in relazione con alcuni materiali di cui è composto l'oggetto da rilevare[11].

All'interno degli strumenti di rilievo senza contatto fisico, è possibile distinguere, per il differente ricorso alla luce nella stima della disposizione spaziale dei punti da rilevare, fra strumenti che impiegano sensori "passivi" e altri che invece fanno uso di sensori "attivi", riferendosi con tale espressione all'eventuale ruolo passivo o attivo rivestito dalla luce nel calcolo delle distanze fra punto di stazione e punto rilevato.

tazione, in special modo nel caso in cui dall'utilizzo di documentazione prodotta in epoche passate ci si attenda di trascorrere al sistema di conoscenze delle società che l'hanno prodotta. Infatti, nelle attività di misurazione di uno spazio fisico nelle sue tre componenti dimensionali, determinate da molteplici finalità connesse di volta in volta con esigenze di modifica, razionalizzazione, controllo, gestione del territorio, l'uomo ha nel corso dei secoli elaborato approcci teorici, su base geometrica, matematica, fisica, ottica e messo a punto strumenti di misura sempre più efficaci. La ricostruzione del progressivo sviluppo storico di tale complesso e articolato sistema di conoscenze teorico-pratiche, rappresenta uno strumento di grande importanza per la contestualizzazione ed esatta comprensione di molteplici manifestazioni materiali, strettamente connesse con il livello culturale, il sapere tecnico-scientifico, l'organizzazione socio-politica ed economica, delle comunità che le hanno prodotte. Uno studio complessivo, che partendo dal riesame di molteplici testimonianze dirette e indirette, tracci una storia dell'evoluzione degli strumenti di misura nelle società del mondo antico, medievale e moderno, è ancora intentata, sebbene da essa potrebbe derivare una maggiore comprensione di numerosi aspetti legati, solo per limitarsi a qualche esempio, alle capacità progettuali ed esecutive o al *problem solving* tramite l'utilizzo di tecniche applicate, tenendo sempre ben salda una prospettiva fortemente diacronica e un approccio di ampio respiro, capace di superare rigide periodizzazioni, che impediscono di cogliere le dinamiche di riesame e studio, ma anche di modifica e riutilizzo che su un monumento o un contesto hanno svolto le generazioni successive a quella che ha ideato e realizzato l'intervento, ed i cui effetti, siano essi costituite da aggiunte, alterazioni e distruzioni, o dalla semplice documentazione, costituiscono a pieno diritto parte integrante sia della storia del monumento o del contesto, sia della

Rientrano fra gli strumenti di rilievo passivo, sebbene utilizzati per finalità differenti rispetto alla creazione di modelli 3D di oggetti e contesti fisici, gli strumenti normalmente impiegati nel rilievo topografico di tipo tradizionale, come ad esempio il teodolite e il tacheometro. Questi si differenziano dagli altri strumenti di misura passivi, qui analizzati, per l'impiego di apparecchiature ottico-meccaniche e non di sensori optoelettronici, per la stima delle distanze, che vengono ottenute tramite procedimenti geometrici e a partire dalla costruzione di triangoli con dimensioni e angoli noti[12].

Fra gli strumenti di misura con sensori passivi quelli che fanno uso di tecniche fotogrammetriche occupano certamente un ruolo preponderante e in continua espansione. Tale diffusione è certamente da imputare ad un insieme concomitante di cause fra le quali bisogna annoverare lo sviluppo di software di elaborazione capace di soddisfare i livelli di precisione attesi nella resa del dato tridimensionale ed ottenuti tramite appositi algoritmi di *matching* delle immagini, a cui si aggiungono *tools* capaci di supportare l'utente nella generazione di *mesh*, e altri prodotti digitali quali, ad esempio i *Digital Surface Models* (DSM) o *Digital Elevation Models* (DEM), nonché i più tradizionali fotopiani, guidandolo l'utente fino all'esportazione dei risultati. Ciò ha fatto sì che negli ultimi anni l'utilizzo di strumentazioni basate su tecniche fotogrammetriche abbia registrato una grande diffusione anche nell'applicazione a contesti e per esigenze in cui, negli anni passati, si era generalmente operato ricorrendo a tecniche di rilievo laser scanner, ben più costose, in termini di attrezzature e di professionalità necessarie al loro impiego.

In modo estremamente sintetico un rilievo tramite tecniche fotogrammetriche, applicate sia in riprese aeree, oggi ampiamente rivoluzionate dall'utilizzo di droni a radiofrequenza, sia nel caso di rilievo da terra *close range*, si basa sull'analisi automatica o semi-automatica di immagini digitali dell'oggetto da rilevare, orientate nello spazio grazie all'identificazione di punti omologhi comuni su differenti fotogrammi (Fig. 3.4). Tale tecnica, in cui la luce veicola

società che lo riutilizzato, modificato, alterato o semplicemente documentato.

[10] Con il termine di "luce", in relazione agli strumenti di misura qui analizzati, ci si riferisce a radiazioni luminose non ionizzanti, che si estendono fino a comprendere frequenze elettromagnetiche non comprese fra i 770 nm e i 380 nm, che segnano il limite della porzione dello spettro visibile dall'occhio umano, ma che possono essere registrate invece dai sensori di cui sono dotati gli strumenti di misura qui analizzati. Vengono invece qui escluse le apparecchiature che fanno uso di radiazioni ionizzanti, come i raggi X, i quali, grazie alla capacità di penetrazione dei materiali, possono venire impiegati, come nel caso della Tomografia Assiale Computerizzata (TAC) per la registrazione e la successiva restituzione, anche in tre dimensioni, della conformazione interna di un oggetto.

[11] L'interazione fra luce e materiale può dare vita a tre differenti fenomeni: l'"assorbimento", quando la luce viene assorbita dal corpo e trasformata in calore; la "trasmissione", quando invece la luce attraversa un corpo trasparente, e infine la "riflessione", in occasione della quale la luce che colpisce l'oggetto viene re-inviata verso la sorgente, secondo due differenti modalità: specularmente, o in maniera diffusa. Guidi-Russo-Beraldin 2010, pp.4-9.

[12] Occupano una posizione differente le moderne stazioni totali, che uniscono alla stima su base ottico-geometrica e meccanica di angoli, la misura delle distanze tramite l'impiego di distanziometri laser, che riconducono le moderne stazioni totali fra gli strumenti di misura attivi.

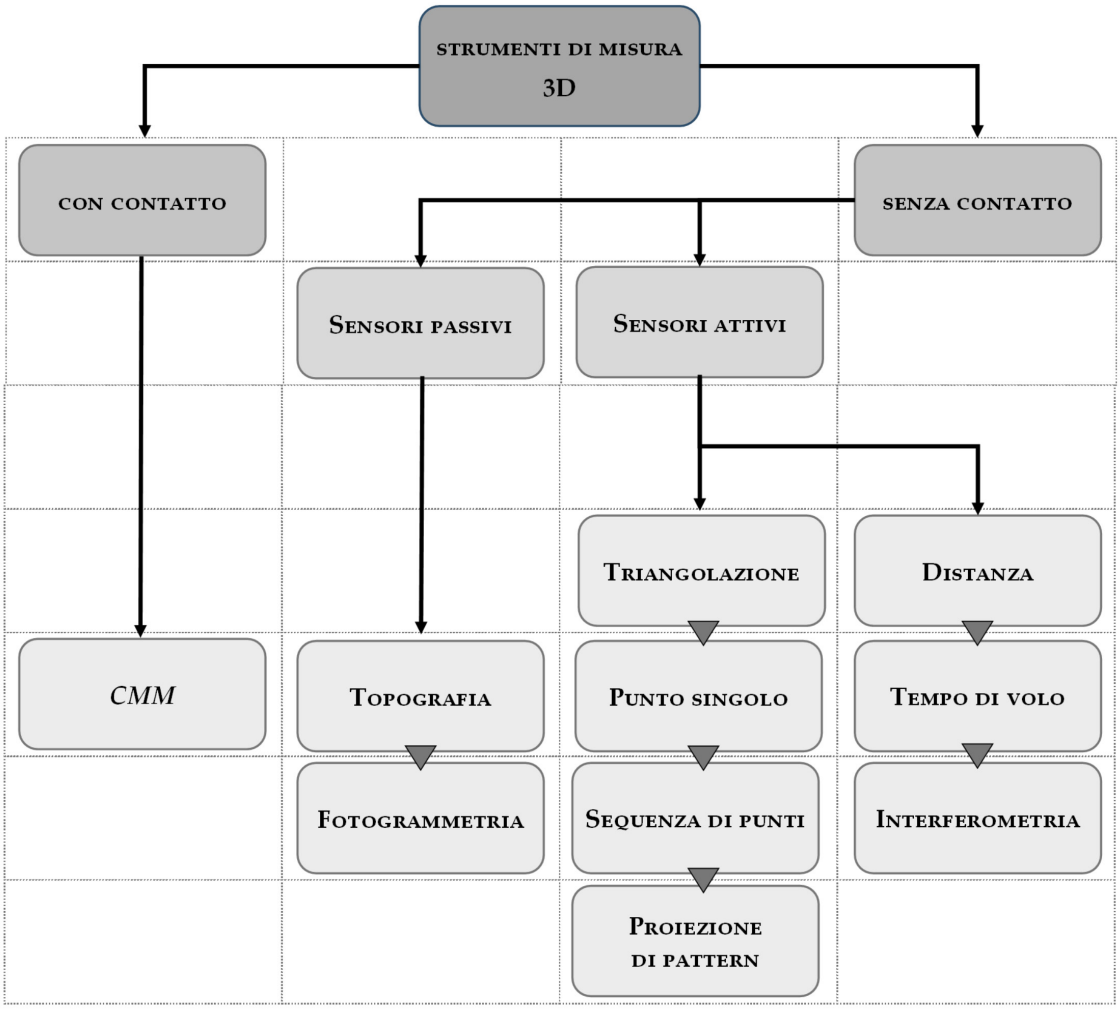


Fig. 3.3. Classificazione degli strumenti di misura 3D sulla base della tecnologia impiegata.

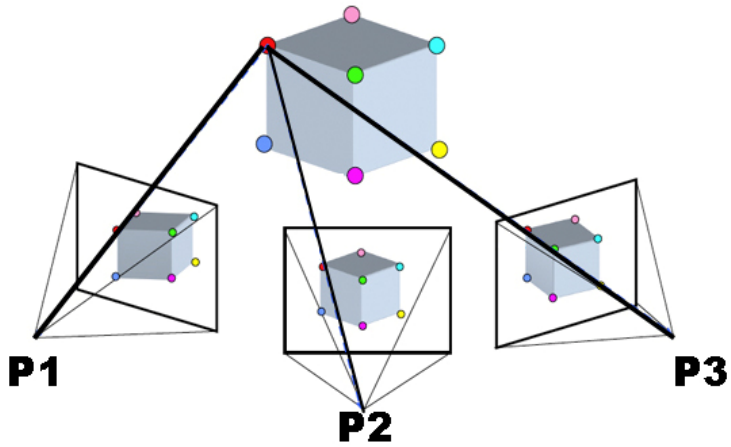


Fig. 3.4. Schema di rilievo tramite coppie di fotogrammi con punti omologi per la realizzazione di un modello 3D con tecnica Structure From Motion. (Da: Wikipedia).

passivamente informazioni cromatiche verso il sensore della fotocamera[13], si basa su alcuni principi della prospettiva inversa e della geometria descrittiva, che consentono di risalire da una rappresentazione prospettica alla determinazione della posizione spaziale dei punti significativi che compongono l'immagine.

Tale tecnica, ideata alla metà del XIX secolo proprio sotto lo stimolo della risoluzione di problemi legati al rilievo architettonico[14], ha avuto un notevole impulso a partire dalla metà degli anni cinquanta del secolo scorso, quando è stato possibile trarre vantaggio dall'utilizzo di elaboratori elettronici per l'esecuzione dei complessi calcoli matematici necessari alla stima della posizione dei punti rappresentati. Tuttavia si deve all'avvento della fotografia digitale, nella seconda metà degli anni novanta, il maggiore stimolo alla diffusione di tale tecnica, grazie all'abbattimento dei costi che la fotografia digitale ha comportato nei confronti dell'acquisto della strumentazione tecnica necessaria. Oggi, rispetto ad alcuni decenni fa, è pertanto possibile realizzare rilievi fotogrammetrici senza l'acquisto di fotocamere metriche e di costose attrezzature ottico-meccaniche per la restituzione delle immagini, ma è sufficiente utilizzare normali fotocamere digitali le cui caratteristiche tecnico-costruttive, rendono particolarmente adatte a tale scopo, grazie alla disponibilità di griglie di campionamento dell'immagine solidali con l'ottica della camera tali da garantire un piano di riferimento interno allo strumento di grande precisione.

Tuttavia a discapito dell'estrema versatilità della tecnica fotogrammetrica e del livello di precisione raggiunto dagli algoritmi di processamento automatico delle immagini messi a disposizione dai moderni software di *Structure From Motion*, la qualità dei risultati che possono ottenersi tramite rilievo fotogrammetrico dipende fortemente da molteplici fattori. Fra questi, oltre l'esperienza del rilevatore, su cui ricade la responsabilità della predisposizione ed esecuzione del progetto di riprese[15], un

[13] I sensori digitali, che si occupano sostanzialmente della trasformazione del segnale luminoso in segnale elettrico, oggi disponibili sul mercato e impiegati nelle fotocamere digitali si basano su due differenti tecnologie, che permettono di distinguere fra sensori CCD e CMOS. Un sensore CCD, *Charge Coupled Device*, è costituito da una matrice di pixel, ciascuna contenente un condensatore MOS (Meta-Oxide-Silicio), un fotodiodo che si occupa della generazione di una carica per effetto foto-elettrico. Parte integrante del sensore CCD sono i meccanismi di raccolta, trasferimento ed estrazione delle cariche generate, che vengono convogliate dal sensore verso un convertitore A/D, che le trasforma in dati binari. In un sensore CMOS, *Complementary Metal-Oxide Semiconductor*, ogni fotodiodo è accompagnato da differenti componenti, quali amplificatori di segnale, convertitori A/D, riduttori di rumore. In tal modo, a differenza del sistema precedente, il filtraggio e la conversione della fonte luminosa in dato digitale avviene all'interno di ogni singolo pixel del sensore CMOS. I due sistemi presentano entrambi vantaggi e svantaggi. Sotto l'aspetto della qualità dell'immagine, i sensori CCD producono un dato superiore rispetto ai sensori CMOS, che hanno per notevoli vantaggi in termini di costi, performance nei consumi e dimensione del sensore.

[14] L'idea dell'utilizzo di fotografie per la deduzione di misure architettoniche, si fa risalire all'architetto Albrecht Meydenbauer (1834-1921), che pensò di utilizzarle per far fronte alle difficoltà riscontrate durante le sue attività di rilievo della cattedrale di Wetzlar. V. Guidi-Russo-Beraldin 2010, pp.18-20.

[15] La realizzazione di riprese fotogrammetriche, richiede la predisposizione di una preci-

ruolo di fondamentale occupano le caratteristiche morfologiche dell'oggetto da rilevare[16], le condizioni di illuminazione della scena, che richiede la mancanza di forti contrasti e condizioni di luce diffusa, e l'accurata calibrazione della fotocamera, da effettuare preliminarmente all'esecuzione di una campagna di riprese[17].

Gli strumenti di misura con sensori "attivi", denominati anche *range camera*, si basano essenzialmente sull'utilizzo di un emissione di luce "strutturata", per la determinazione delle informazioni spaziali dei singoli punti dell'oggetto da rilevare[18] (Fig. 3.5). In tal modo diventa possibile superare il maggiore inconveniente dei sistemi di misurazione "passivi", strettamente legati alle condizioni di illuminazione ambientali e al cromatismo delle superfici da rilevare. Le differenti modalità con cui l'emissione di luce strutturata e le relative informazioni vengono inviate all'oggetto, insieme alle differenti strategie di ricezione e interpretazione dei dati ricevuti, sono alla base della distinzione oggi presente fra numerosi strumenti di misurazione a sensori attivi.

Una distinzione fondamentale può infatti essere fatta fra sistemi a triangolazione e a misurazione della distanza.

Gli strumenti a triangolazione ottengono la stima della posizione spaziale di un punto attraverso la risoluzione degli elementi di un triangolo i cui vertici coincidono con il centro di proiezione del raggio luminoso, il punto individuato sulla superficie da rilevare e il foro d'ingresso del dispositivo di ricezione, che a tal fine occupa una posizione parallela a quella del proiettore.

Esistono differenti modelli di *range camera* a triangolazione. Nelle versioni più semplici tali sistemi operano tramite la proiezione di un singolo raggio laser, che colpisce un unico punto della superficie dell'oggetto da rilevare e che, riflesso verso il ricevitore, viene

sa campagna di rilievo, che consenta di ritrarre l'intera scena, attraverso una sequenza di fotogrammi eseguiti con ben precisi criteri, strettamente dipendenti dalla conformazione fisica dell'oggetto e del contesto da rilevare e con una percentuale di sovrapposizione dell'area rilevata, fra un fotogramma e l'altro non inferiore, al 60% nel caso di riprese *close range*, che sale fino all'80% nel caso di riprese fotografiche aeree. Tale percentuale è quella consigliata, ad esempio, dall'Agisoft nel manuale di utilizzo del loro noto software Photoscan. V. Agisoft 2017, p.8. Per la predisposizione di una campagna di rilievo v. *infra* p.80, e Bacci-Manferdini -Masci 2010.

[16] Per le modalità di funzionamento descritte il processo fotogrammetrico si adatta particolarmente bene al rilievo di forme caratterizzate dalla presenza di punti significativi, quali ad esempio spigoli e vertici e lati ben evidenti.

[17] I processi di calibrazione della macchina da presa sono differenti e fra di loro indipendenti. Essi mirano ad intervenire e correggere aspetti differenti, ma tutti ugualmente importanti per la buona riuscita di un progetto di rilievo: il rilevamento del colore, il riferimento interno della fotocamera, le distorsioni nelle immagini provocate dalle ottiche utilizzate. Un primo processo di calibrazione, mira a correggere eventuali discrepanze fra le tonalità rilevate dal sensore della fotocamera e quelle reali, e si basa sulla misura e correzione, tramite appositi software di calibrazione, di eventuali scostamenti misurati su appositi colorchecker ripresi dalla camera fotografica. La calibrazione del riferimento interno, ha invece lo scopo di determinare l'eventuale margine di scostamento fra il centro di proiezione della fotocamera, determinato dalla normale al piano dell'immagine su cui è posto il sensore, e la posizione che esso dovrebbe assumere in una proiezione prospettica centrale, che costituisce il modello ideale sulla base del quale vengono eseguiti gli algoritmi per la determinazione spaziale dei punti notevoli dell'immagine. Tale processo pre-

interpretato da un sensore monodimensionale, il quale restituisce i valori delle coordinate *x* e *z* del punto. In tale sistema la determinazione della coordinata *y*, viene ricavata esternamente sulla base del punto di stazione della *range camera* rispetto all'oggetto da rilevare. Una variante rispetto al sistema appena descritto prevede l'utilizzo di uno specchio rotante, capace di proiettare il singolo raggio laser lungo un'unica traiettoria, generando una linea di punti che, interpretata da un sensore bidimensionale, consente la stima delle tre coordinate spaziali di un intero segmento. L'aggiunta di un sistema meccanico di rotazione del proiettore, lungo l'asse orizzontale, rende infine possibile la stima di singole aree.

Un metodo alternativo rispetto a quelli descritti, ma ugualmente basato sul principio della triangolazione, prevede la proiezione sulla superficie da rilevare di una sequenza di *pattern* luminosi di differente formato e disposizione che, registrati da un ricevitore, rendono possibile stimare la disposizione spaziale dei singoli punti componenti la superficie dell'oggetto d'interesse, sulla base delle deformazioni che essa produce sui singoli *pattern* proiettati[19].

I sistemi a triangolazione consentono di giungere ad una stima delle misure delle coordinate spaziali dei punti misurati, con un'incertezza che si aggira intorno al 0,1 mm, che è di gran lunga inferiore a quanto può essere desunto non solo dai sistemi di rilievo fotogrammetrico, ma anche da quelli che ricorrono ad una stima diretta delle distanze. Tuttavia, il limite maggiore, dei sistemi a triangolazione è costituito dal limitato volume di scansione e dalla distanza massima a cui deve essere posto lo strumento rispetto all'oggetto da rilevare, che si aggira nell'ordine di qualche metro.

I sistemi basati sulla misura della distanza, utilizzano direttamente

vede quindi, la determinazione di quindici variabili, nove relativi all'orientamento interno della fotocamera, sei relativi all'orientamento esterno. Infine la calibrazione delle aberrazioni e delle le distorsioni provocate dall'ottica utilizzata sono di differente tipologia. Alcune di queste come le aberrazioni possono essere mitigare, ma non eliminate del tutto, altre come le distorsioni dell'immagine, possono invece essere corrette tramite apposi algoritmi matematici. Per le questioni relative alla calibrazione cromatica v. Baldissini -Gaiani-Remondino 2010; per le questioni relative alla calibrazione del riferimento interno della fotocamera e per la correzione delle distorsioni v. Guidi-Russo-Beraldin 2010, pp. 20-70.

[18] Con il termine luce "strutturata" si intende un'emissione luminosa, che a differenza della semplice luce ambientale contiene informazioni, che possono essere lette e interpretate da un sensore elettronico alloggiato nel dispositivo di misura e che, nel caso in esame, contengono dati da cui è possibile desumere le coordinate spaziali, x, y, x, del punto da rilevare rispetto a quello di stazione, e altre eventuali informazioni relative al cromatismo della superficie o all'indice di riflettanza, dipendente strettamente dal materiale di cui è costituito l'oggetto. Generalmente, anche se non esclusivamente, per l'emissione di luce strutturata si fa ricorso a un'emissione laser, che presenta alcuni vantaggi. Il laser, infatti, essendo un'emissione monocromatica, consente di utilizzare sensori operanti su un'unica lunghezza d'onda, con risulta più efficaci, inoltre permette di ottenere una notevole concentrazione di energia per singola unità di superficie, aspetto particolarmente utile per mantenerne l'efficacia anche a notevole distanza.

[19] Nell'ambito dei sistemi con proiezione di *pattern*, esistono numerose varianti sulla base della conformazione, della sequenza, dell'orientamento e della distribuzione delle trame sulla superficie dell'oggetto da rilevare. Un metodo particolarmente utilizzato si basa sull'effetto Moirè, e le figure di interferenza ottenute dalla sovrapposizione di due *pattern* simili, ma non uguali. Guidi-Russo-Beraldin 2010, pp. 87-95; Guidi 2014, pp. 41-42.

un'emissione laser per ottenere una stima delle coordinate spaziali dei singoli punti appartenenti alla superficie dell'oggetto da rilevare, ricavandoli dal tempo impiegato da un'emissione luminosa di tipo impulsivo per compiere il percorso dalla fonte di emissione alla superficie dell'oggetto e da questa, per riflessione al sensore, che in tali strumentazioni è collocato nella medesima posizione della sorgente luminosa. Tale sistema, basato su una determinazione delle distanze del punto da rilevare ottenuta grazie ad una stima diretta del tempo di propagazione e riflessione del segnale, viene denominato *Time Of Flight* (TOF). (Fig.3.6). Tuttavia, all'interno di tale categoria, occorre distinguere differenti tipologie di strumentazione sulla base di ulteriori strategie messe a punti, per la determinazione delle coordinate dei punti dell'oggetto a partire dalla propagazione del segnale luminoso. Esistono infatti sistemi TOF, basati su fonti luminose a radiazione continua, di cui viene variata l'ampiezza (TOF-AMCW, *Time Of Flight – Amplitude Modulation, Continuous Wave*) o la frequenza (TOF-FMCW TOF-AM, *Time Of Flight – Frequency Modulation, Continuous Wave*). Tali sistemi misurano, nel primo caso lo sfasamento fra due sinusoidi generate dalla differente modulazione di ampiezza, nel secondo sulle informazioni derivate dalla modulazione/demodulazione del segnale[20].

Tutti i sistemi TOF, oggi disponibili sul mercato, consentono grazie all'impiego di specchi motorizzati e meccanismi di rotazione della *range camera* lungo il piano orizzontale riprese che coprono 360° lungo il piano azimutale e un range che va dai 180° ai 270° lungo il piano zenitale. Le *range camera* TOF consentono di superare le limitazioni in termini di distanza fra l'oggetto e il punto di stazione, che affliggono i sistemi a triangolazione. Tuttavia la precisione di tali strumentazioni dipende strettamente dalla misura del tempo di volo del segnale, la quale per limitazioni tecniche sia ottiche, che strumentali, incorre in un margine di errore riducibile, ma non eliminabile, che pone il limite di incertezza di tali strumenti al di sotto dei 2 mm, con variazioni anche considerevoli fra TOF a stima diretta, TOF-AM e TOF-FM, i quali consentono di ridurre notevolmente tale limite di incertezza. Il margine di errore insito in tali strumenti di misura, certamente trascurabile sulle grandi distanze e nel rilievo di contesti di considerevole dimensione, ambiti nel quale gli strumenti TOF vengono generalmente impiegati, è tuttavia non paragonabile alla precisione consentita dalle range camera a triangolazione[21].

Come per le fotocamere da impiegare nel rilievo fotogrammetrico, anche gli strumenti di misura con sensori "attivi" sono soggetti a procedure di calibrazione, volte a definirne il livello di

[20] Guidi 2014, pp. 42-44; Guidi-Russo-Beraldin 2010, pp. 95-102.

[21] Vengono qui tralasciati, pur rientrando fra gli strumenti a sensori attivi, sia le range camera TOF Flash 3D, basate una sorgente di luce modulata emessa da diodi laser e LED e registrata da un ricevitore elettro-ottico, sia sistemi interferometrici, come la conoscopia e *l'Optical Coherence Tomography* (COT), basate sulla misura delle interferenze fra onde prodotte a patire dalla medesima sorgente di lue coerente. V. Guidi-Russo-Beraldin 2010, pp. 108-114.

precisione o, eventualmente, a rilevare eventuali errori, talvolta connessi anche all'utilizzo prolungato. A differenza però delle fotocamere e degli altri strumenti impiegati per il rilievo fotogrammetrico, le apparecchiature dotate di sensori "attivi" richiedono l'intervento di personale specializzato da eseguire in laboratori attrezzati. Sebbene quindi, all'operatore addetto all'utilizzo di *range camera* non sia possibile effettuare autonomamente eventuali procedure di calibrazione, è però opportuno che abbia contezza di quali parametri interni, strettamente connessi alle caratteristiche tecniche, influiscano sia sulle prestazioni degli strumenti impiegati, sia sulla qualità dei risultati ottenuti. Fra questi occorre porre attenzione alla "risoluzione", all'"accuratezza" e alla "precisione" e dello strumento, nonché alla "velocità di acquisizione"[22].

La "risoluzione"[23] coincide con il livello di dettaglio massimo che, presente nell'oggetto come variazione morfologica, lo strumento riesce a cogliere ed è strettamente dipendente da molteplici fattori di natura fisico-materica, tecnico-costruttiva e funzionale. Nel caso specifico di strumenti equipaggiati con sensori 3D è possibile distinguere fra risoluzione "orizzontale" e in "profondità". Riguardo la risoluzione orizzontale, che a discapito del nome indica il piano ortogonale all'asse ottico dello strumento e coincide, pertanto, nel caso di strumenti di misurazione posti su treppiedi, con il piano verticale, esso è strettamente connesso con l'intervallo spaziale, sempre discreto per quanto piccolo, esistente fra un campionamento e il successivo. La risoluzione in profondità è influenzata dalle irregolarità della superficie dell'oggetto da rilevare, che crea effetti di rumore, denominati *laser speckle*, nel raggio riflesso e rilevato dal sensore. Inoltre un raggio laser, non solo possiede un proprio diametro, che generalmente si aggira intorno ai 100 μm, ma come qualsiasi fonte luminosa costretta a passare attraverso un foro subisce fenomeni di diffrazione, che portano ogni singola emissione a influenzare quella vicina, con risultati talvolta negativi in termini di distinguibilità reciproca.

L'"accuratezza"[24] esprime il margine di errore esistente fra la misura restituita dallo strumento e quella ritenuta reale.

La "precisione"[25] indica la dispersione spaziale di una misura rispetto alla media dei risultati ottenuti dalla ripetizione della medesima misura.

Infine la "velocità di acquisizione", pur non influendo direttamente sulla precisione o la qualità delle misurazio-

[22] Boehler-Vicent-Marbs 2003; Guidi-Russo-Beraldin 2010, p. 121-152 ; Ingensand 2006; Valkenburg-Mc Ivor 1996.

[23] Il Vocabolario Internazionale di Metrologia, UNI-CEI 70099, Concetti fondamentali e generali e termini correlati (VIM), definisce la "Risoluzione" come «*il più piccolo cambiamento della grandezza sottoposta a misurazione che provoca un cambiamento rilevabile nell'indicazione corrispondente*». ISO/IEC 2007.

[24] Il Vocabolario Internazionale di Metrologia, UNI-CEI 70099, Concetti fondamentali e generali e termini correlati (VIM), definisce l'"Accuratezza" come «*grado di concordanza tra un valore misurato e un valor vero di un misurando*». ISO/IEC 2007.

[25] Il Vocabolario Internazionale di Metrologia, UNI-CEI 70099, Concetti fondamentali e generali e termini correlati (VIM), definisce la "Precisione" come «*il grado di concordanza tra indicazioni o valori misurati ottenuti da un certo numero di misurazioni ripetute dello stesso oggetto o di oggetti similari, eseguite in condizioni specificate*». ISO/IEC 2007.

ni effettuate, tuttavia rappresenta una caratteristica dello strumento da tenere in estrema considerazione, perché contribuendo in modo determinante nei tempi di esecuzione e nei costi, influisce indirettamente sui risultati di un progetto di scansione[26].

I parametri sopra esposti determinano una serie di errori di cui occorre non solo considerare la natura, ma stimare, nei limiti del possibile, gli effetti e l'incidenza sul risultato finale. Alcuni di essi, come nel caso della "risoluzione" o dell'"accuratezza", sono strettamente connessi alle caratteristiche tecniche dello strumento e possono pertanto essere considerati come errori sistematici, tali da non poter essere eliminati, e pertanto occorre a maggior ragione valutarne l'incidenza sul risultato finale. Altri parametri, è il caso ad esempio, della "precisione" rientrano fra gli errori casuali, di cui è più difficile, proprio perché di natura aleatoria, valutare l'incidenza.

Inoltre se, come detto, i parametri sopra elencati sono strettamente dipendenti dalle caratteristiche tecniche dello strumento utilizzato e qualsiasi intervento di calibrazione, che richiede in ogni caso procedure, personale tecnico e strutture di laboratorio, non può che limitarsi alla stima della corrispondenza dei valori misurati, attraverso appositi test eseguiti su oggetti campione di forme e dimensioni note[27], con quelli dichiarati dal produttore, occorre aggiungere ad essi gli effetti derivati da circostanze e variabili esterne, come la natura del materiale di cui è fatto l'oggetto o le condizioni di illuminazione, capaci di generare o amplificare la portata di errori sistematici o aleatori, come nel caso degli artefatti, dovute a forti differenze cromatiche o a micro rilievi sulla superfice dell'oggetto da rilevare, capaci di indurre gli strumenti a false valutazioni in sede di analisi ed elaborazione dei dati[28].

3.3 Il progetto di rilievo

Risulta evidente, anche dalla semplice rassegna precedentemente condotta sulle differenti tipologie di strumenti di misura e rilievo tridimensionale oggi disponibili sul mercato, come i parametri di risoluzione, accuratezza, precisione, nonché la velocità di acquisizione, derivanti dalle caratteristiche tecniche e dalle differenti tecnologie impiegate, rendano tali strumenti applicabili a contesti e per finalità differenti.

Se, come detto, le *range camera* a triangolazione offrono la possibilità di un'alta risoluzione, ma dispongono di un piano di presa limitato e richiedono di operare ad una distanza dall'oggetto contenuta, compresa fra pochi centimetri e qualche metro, viceversa la tecnologia TOF consente di operare con distanze che coprono da qualche metro ai diversi chilometri, ma nonostante i progressi fatti verso una maggiore risoluzione, grazie alle tecnologie TOF-AM e TOF-FM, non possono ancora essere paragonati ai risultati ottenuti dall'impiego di range camera a triangolazione. Inoltre le une e le altre presentano indi-

[26] V. *infra* par. 3.3.

[27] Sulle questioni relative alla calibrazione v. Guidi-Russo-Beraldin 2010, p. 157-168.

[28] Per gli artefatti v. Guidi-Russo-Beraldin 2010, p. 152-154.

scutibili vantaggi nel rilievo di superfici *free-form*, mentre la resa è minore e maggiormente impegnativa in presenza di con superfici regolari delimitate da spigoli e lati. Tali oggetti dalle geometrie più regolari, hanno un'ottima resa tramite rilievo fotogrammetrico, basato proprio su punti notevoli individuabili su fotogrammi differenti, adattandosi molto bene anche ad un rilievo di inquadramento di varia estensione.

Purtroppo la qualità di un rilievo fotogrammetrico risente del cromatismo delle superfici e richiede, per giungere a risultati ottimali, di un'illuminazione ambientale omogenea. Ciò si lega inoltre al problema dei materiali di cui è fatto l'oggetto, che influenzano, anche se per differenti aspetti, entrambe le tecniche di ripresa. Se infatti la fotogrammetria, operando sul riconoscimento cromatico dei dettagli ripresi, necessita che questi siano nettamente e chiaramente identificabili, un rilievo laser, a prescindere dalla tecnologia utilizzata, permette di giungere a risultati ottimali con superfici "cooperanti", caratterizzate da un buon indice di riflessione[29]. Occorre infine ricordare come il rilievo fotogrammetrico e quello eseguito con l'impiego di laser scanner diano risultati differenti, in termini di quantità di dati, che richiedono strategie e tempi completamente differenti per il trasferimento, l'archiviazione di eventuali file di backup ed elaborazione, che devono essere tenuti in considerazione e messi in rapporto con le finalità progettuali, perché capaci di incidere notevolmente sui tempi e sui costi complessivi[30].

Più che in contrasto o in alternativa, quindi, i diversi strumenti a sensori "attivi" o "passivi" possono essere utilizzati in associazione e integrazione reciproca, specie quando, le specifiche finalità di un rilievo richiedono alti livelli di dettaglio e continui passaggi di scala, dal singolo oggetto, ad un intero edificio e da questo dalla scala urbana a extraurbana.

Come messo in evidenza da una riflessione scientifica che sul tema dell'integrazione di metodologie di rilevo, ha maturato nel corso dell'ultimo ventennio una riflessione considerevole, molteplici sono i vantaggi determinati dall'utilizzo sinergico e concomitante di più strumenti di rilievo con tecnologie differenti. Seguendo le considerazioni di Gabriele Guidi, Michele Russo e Jean-Angelo Beraldin[31], l'integrazione ha ricadute positive su:

- Aumento delle informazioni;
- Accrescimento del livello di accuratezza del modello complessivo;
- Verifica dei risultati conseguiti dalla singola metodologia.

La disponibilità dei dati ottenuti con differenti strumenti, metodologie e tecniche di rilievo consente, quindi, di accrescere i dati acquisiti, il che non significa in questo caso generare ridondanza, ma assicurarsi la possibilità di integrare le lacune presentate da una strumentazione, con i dati acquisiti da un'altra metodologia. A questo vantaggio non indifferente, si aggiunge

[29] E' questo il caso ad esempio di superfici traslucide come quelle marmoree, in cui la riflessione interna del raggio laser incidente, causa una notevole perdita di precisione. V. Guidi-Russo-Beraldin 2010, p. 156. e Amoruso-Apollonio-Remondino 2010.

[30] Boehler-Marbs 2004; Remondino-Vettore-Guarnieri 2005.

[31] Guidi-Russo-Beraldin 2010, pp. 173-194.

la possibilità di aumentare il livello di accuratezza globale del modello ottenuto, agendo sul controllo di procedimenti talvolta molto delicati, come l'allineamento delle diverse delle nuvole di punti acquisite, che generalmente è uno delle fasi in cui sono maggiori le possibilità di errori, anche con il ricorso di procedimenti automatici o semi automatici. Infatti l'integrazione di rilievi fotogrammetrici e laser scanner, con il supporto dei dati acquisiti anche da rilievi topografici, consentito di mettere in atto accurate procedure di controllo basate sul riconoscimento di punti notevoli, sulla base del rilievo fotogrammetrico, di trovarne l'equivalente sulle nuvole di punti ottenute da laser scanner ed utilizzare il risultato ottenuto dall'integrazione delle due tecniche, come riferimento vincolato, per l'allineamento dei rimanenti rilievi. Questo è un solo esempio, fra i molteplici che possono scaturire dall'applicazione concreta di differenti tecniche e strumenti di rilievo. Infine è proprio la disponibilità di dati ottenuti attraverso molteplici metodologie, che consente di giungere, tramite il confronto ad una verifica del livello di accuratezza di ognuna e la sua adattabilità al concreto e specifico caso di studio.

Sebbene la consapevolezza dell'utilità e dei vantaggi dell'applicazione integrata di differenti tecniche e metodologie sia ampiamente diffusa, tanto da aver reso possibile una sempre più ampia l'interoperabilità fra i dati ottenuti da differenti sistemi di acquisizione, grazie alla diffusione di formati di interscambio fra i molteplici software proprietari e open source a cui vengono demandati le cruciali procedure di analisi dei dati grezzi, molto ancora resta da fare. Nonostante non manchino perfino esempi di sviluppo di sistemi "multisensore", appositamente progettati per sfruttare i vantaggi derivati, dall'unione di differenti strumenti e tecnologie, come accade ad esempio con alcuni sistemi integrati laser e *CMM*, molti sono ancora i limiti che si frappongono ad un utilizzo congiunto di strumenti e metodologie differenti.

Fra questi un limite particolarmente sentito è costituito dalla mancanza di linee guida e standard ampiamente condivisi, capaci di fornire indicazioni e modelli operativi, che consentano la scelta delle strumentazioni più adeguate, sulla base dei scenari di applicazione e delle specifiche finalità di un progetto di rilievo delle peculiarità tecniche di ciascuna strumentazione. Limitandosi al solo ambito del patrimonio culturale, che tuttavia rappresenta uno dei settori, dove le peculiarità e la complessità dei contesti da rilevare si sono tradotti in uno stimolo costante verso la ricerca e la sperimentazione, mancano ancora, o scontano le limitazioni di un precoce invecchiamento in un settore in continuo e repentino sviluppo, opere d'insieme che possano mettere a sistema i risultati di molteplici esperienze, che almeno nell'ultimo ventennio non sono certo mancati, ma i cui resoconti nella poliedrica manifestazione di molteplici esperienze, diversificate per obiettivi, finalità, strumenti, metodologie, risultati ottenuti, non sono riusciti a tradursi in metodologie e linee guida condivisi, che se è giusto e doveroso che scaturiscano senza mortificare la ricchezza delle reali e concrete esperienze finora maturate, non possono avvenire solo

attraverso un naturale e spontaneo movimento dal basso.

Se è chiaro come un qualsiasi progetto di rilievo, solo a patto di ridurre la complessità della realtà dentro le strettoie di un'inutile astrazione può essere riassunto in una semplice sequenza di "misura" e "disegna", ma al pari di qualsiasi atto conoscitivo richiede una complessa iterazione fra il soggetto, nell'individualità della propria cultura, delle esperienze personali e del proprio sapere teorico-pratico, la società, vista come costante interlocutore e fruitore ultimo delle acquisizioni del singolo, e la realtà esterna, che con le proprie peculiarità, rappresenta "l'altro da se", l'oggetto di conoscenza, che attraverso l'atto del rilievo s'intende ricondurre dentro i più tranquilli confini di un dominio logico-razionale. In tale prospettiva, le scelte operate in merito all'applicazione di una ben determinata metodologia rivestono un'importanza cruciale. Le scelte che essa impone non solo in termini di definizione e rispetto di norme procedurali capaci di guidare la raccolta, l'interpretazione e la condivisione dei risultati, ma anche di strumentazioni da impiegare, non possono essere considerate come atto propedeutico dovuto e improntato al semplice buon senso, ma devono essere viste come momento fondante e cruciale di una qualsiasi attività di rilievo, che intenda porsi come processo conoscitivo.

Nella definizione di un progetto di rilievo Fig. 3.7) l'individuazione delle finalità e degli obiettivi da raggiungere costituisce certamente un elemento imprescindibile, in quanto influisce su tutte le successive fasi di un rilievo. Limitando le considerazioni che seguono al solo ambito del patrimonio culturale, molteplici possono essere le finalità di un progetto di rilievo. Le molteplici manifestazioni del patrimonio culturale che possono costituire oggetto di interesse per un'attività di rilievo spaziano, infatti, dai pochi centimetri di un piccolo reperto archeologico, ai molti chilometri di un'analisi territoriali, passando per una scala intermedia, come quella di un organismo urbano, ulteriormente divisibile fino a giungere al singolo palazzo storico o contesto archeologico. La variabilità nella scala di rappresentazione si accompagna ad esigenze di dettaglio della documentazione, altrettanto diversificate. Questo parametro è, naturalmente, strettamente dipendente dagli obiettivi e dalle finalità di un'attività di rilievo e documentazione, che può oscillare dalla semplice localizzazione e delimitazione spaziale di un'area d'interesse, alla rappresentazione, con altissima risoluzione, dei caratteri plano-volumetrici, dimensionali e cromatici di un singolo oggetto.

La finalità specifica alla base di un'attività di rilievo e documentazione nell'ambito del patrimonio culturale spaziano da esigenze conoscitive, alla tutela e alla valorizzazione, contemperando spesso esigenze derivate dalla commistione di più di un singolo elemento. La conoscenza e la tutela hanno bisogno, generalmente, di un elevato livello di dettaglio documentale, sia per ciò che concerne gli aspetti legati alla determinazione spaziale e fisico-materica, sia per ciò che riguarda aspetti meno "quantificabili" di un manufatto o un ecofatto, in quanto legati all'oggetto reale da relazioni che astraggono

dalle semplici manifestazioni materiali. Al contempo ad una documentazione per la conoscenza e la tutela, sia essa connessa ad esigenze di pianificazione o di restauro, è richiesto un alto livello di standardizzazione necessario per agevolare le operazioni di confronto e di analisi di reperti o di contesti differenti o di uno stesso reperto nell'evoluzione temporale di determinate caratteristiche, come talvolta accade, ad esempio nel monitoraggio dei parametri fisico-chimici o ambientali di un contesto.

Viceversa, la valorizzazione generalmente richiede un minore dettaglio informativo per mettere in atto strategie di condivisione e divulgazione che, facendo sempre maggiore uso di prodotti e risorse multimediali, necessitano di modelli estremante "leggeri" per consentire alte *performance* di fruizione. Ciò, ad esempio, accade giorno con la fruizione in *real time* di contesti virtualmente ricreati.

La definizione delle finalità che s'intende perseguire tramite l'esecuzione di un rilievo comporta, quindi la necessità di stabilire il livello di dettaglio (*Level Of Detail*, LOD) a cui occorre giungere. Si tratta di questioni non banali, perché maggiore è il grado di definizione che si intende ottenere, maggiore è la complessità delle attività da svolgere, con un notevole aumento dei tempi e dei relativi costi necessari alla raccolta e al processamento dei dati, all'analisi dei risultati, alla condivisione delle informazioni. Inoltre, l'elevato grado di complessità che, come detto, nella realtà concreta spesso si manifesta a causa della compresenza di molteplici esigenze, che possono interessare manufatti e contesti posti a differente scala, comporta, talvolta, la necessità di progettare campagne di rilievo capaci di prevedere una documentazione articolata su molteplici livelli di dettaglio, non solo per oggetti o contesti differenti, ma spesso per il medesimo oggetto. Ciò accade, per limitarsi ad un solo esempio, con modelli digitali realizzati per offrire un supporto ad un'attività di restauro, ma da cui al contempo si vogliano ottenere ricostruzioni 3D per la divulgazione. Infatti l'estrema "leggerezza", in termini di spazio fisico di archiviazione e, conseguentemente, di risorse hardware richieste per l'elaborazione, che i modelli realizzati per la divulgazione, contrasto con la "pensantezza" degli oggetti digitali finalizzati allo studio, alla ricerca, al restauro. Se il passaggio da un livello di dettaglio maggiore ad uno minore è generalmente possibile, anche se non viceversa, ciò richiede apposite strategie di semplificazione delle geometrie del modello, attraverso interventi sulle *mesh*, e di alleggerimento delle *texture*, il cui tempo e i cui costi vanno stimati in fase di progettazione del rilievo.

Nella pianificazione di un progetto di rilievo occorre acquisire, anche con sopralluoghi diretti, tutta la documentazione utile per giungere ad un quadro esaustivo delle caratteristiche geometriche e dimensionali dell'oggetto da rilevare, nonché delle peculiarità e dello stato di conservazione delle superfici. Il complesso di queste informazioni, influendo sugli strumenti da impiegare in funzione della geometria, dei caratteri plano-volumetrici, dell'estensione complessiva, della presenza di superfici caratterizzate da rivesti-

menti, decorazioni, o interessate da fenomeni di degrado, influiscono in maniera determinante sulla scelta sia degli strumenti, sia delle metodologie da impiegare, con conseguenze rilevanti nell'economia complessiva del progetto. Per limitarsi ad un solo esempio, fra i molteplici casi possibili, un manufatto la cui superficie presenta ampi e diffusi fenomeni di degrado manifestantisi in un articolato quadro fessurativo, richiede di decidere preliminarmente la tecnica di rilievo migliore per la resa di tali anomalie, che può rendersi sia attraverso la modellazione delle geometrie, sia attraverso delle *texture* ad alta definizione. La scelta che anche in questo caso dipende strettamente dipende strettamente dal livello di dettaglio che si intende raggiungere e dagli scopi per cui è necessario utilizzare il modello realizzato, influenza in modo determinante le strategie del rilievo che deve essere eseguito.

I materiali di cui è composto l'oggetto da rilevare, in special modo quelli che caratterizzano le superfici, rivestono una notevole importanza per operare le scelte più opportune relativamente alle tecniche che è maggiormente proficuo adottare. I caratteri cromatici, così come il comportamento di ciascun materiale nei confronti di un raggio luminoso che l'investe e che produce risposte fenomeni di riflessione anche molto differenti, hanno un'enorme importanza nella scelta degli strumenti di rilievo più adatti, alcuni risultando inapplicabili, altri garantendo una resa migliore.

Il contesto in cui l'oggetto del rilievo risulta inserito, riveste anch'esso un ruolo fondamentale, di cui è opportuno conoscere alcuni parametri, che più di altri influiscono sulle tecniche e gli strumenti da utilizzare. Fra questi, le condizioni di illuminazione hanno un peso determinante, specialmente sul rilievo fotogrammetrico, su cui, nel caso di ambienti esterni, è possibile intervenire solo limitatamente. Per questo motivo occorre conoscere e studiare il comportamento della luce nell'ambito del contesto di studio e il suo comportamento nelle differenti ore del giorno, in modo da giungere ad una stima del momento in cui è più opportuno eseguire i rilievi e con quali tecniche. Allo stesso modo, la collocazione rispetto al piano di campagna, l'accessibilità, eventuali aree di manovra, la presenza di elementi logistici capaci di favorire l'impiego della strumentazione, quali ad esempio la disponibilità di corrente elettrica per ricaricare gli strumenti, sono tutti elementi del contesto di rilievo la cui conoscenza preliminarmente alle fasi di rilievo, assume un ruolo strategico, consentendo di pianificare nel modo più opportuno, efficiente e razionale, le attività di rilievo.

Un riesame complessivo delle finalità che si intende perseguire con le attività di rilievo, le caratteristiche dell'oggetto e del contesto, costituisce la base di conoscenza necessaria ad operare le scelte sia in merito alla strumentazione che, per le caratteristiche tecniche, mostra maggiori vantaggi in termini di qualità di risultati, tempi di acquisizione e relativi costi, sia in termini di metodologie da adottare durante le operazioni di rilievo. Su queste influiscono, chiaramente sia le modalità operative consentite dallo strumento, sia l'abilità e l'esperienza dell'operatore, sia la pre-

senza di *pipeline* condivise e replicabili nello specifico contesto d'indagine.

Strettamente connessa con le metodologie scelte è la definizione del piano di prese, che richiede la stima del numero di punti di stazione da cui effettuare la lettura dello strumento e necessari per la copertura dell'intero oggetto da rilevare, compresa la loro dislocazione nello spazio. Naturalmente il piano di presa è strettamente legato alla tipologia di strumentazione impiegata e alla metodologia scelta, e richiede l'esecuzione di accurati sopralluoghi per la valutazione dell'oggetto e del contesto del rilievo. Il piano di presa, sebbene sia orientato a fornire una valutazione di massima delle stazioni necessarie e della loro distribuzione areale, e sia tanto più aderente alla realtà quanto più accurate sono le valutazioni preliminari e l'esperienza dell'operatore, tuttavia si rivela uno strumento prezioso, per la capacità di fornire una stima preliminare dei tempi necessari all'esecuzione del progetto e quindi anche dei relativi costi.

Un progetto di rilievo non può prescindere dalla definizione di un iter procedurale per l'archiviazione del materiale prodotto durante le attività di rilievo. La considerevole quantità di dati "grezzi" digitali e analogici, prodotti sia dalle strumentazioni (immagini digitali, nuvole di punti), sia dagli operatori (appunti, schizzi, schede di catalogo), necessitano un accurato piano di archiviazione e gestione, che consenta in modo razionale di gestire il flusso di dati, dal momento successivo all'acquisizione, a quello dell'archiviazione, dalla gestione dei metadati per il reperimento delle informazioni. Tale attività si rileva di estrema importanza, in quanto le grosse quantità di dati prodotti durante una singola giornata di rilievo, richiedono spazi di archiviazione su supporti fisici considerevoli e procedure di trasferimento non solo adeguate in termini di velocità, ma capaci di offrire garanzie di facile reperimento e di sicurezza del dato archiviato.

Infine occorre predisporre un sistema di verifica e controllo della coerenza interna ed esterna dell'interno progetto di rilievo. La coerenza interna deve assicurare, che tutte le singole fase della progettazione siano perfettamente integrate fra di loro, mentre la coerenza esterna assicura che l'intero progetto di rilievo sia aderente agli obiettivi complessivi del rilievo e alle ulteriori fasi in cui i risultati da esso prodotti devono essere integrati. Il sistema di controllo e verifica si rivela inoltre un prezioso strumento anche nelle fasi successive di esecuzione dei rilievi, in quanto consente di valutare costantemente il rispetto del programma e la corrispondenza delle attività svolte con quanto programmato in fase progettuale.

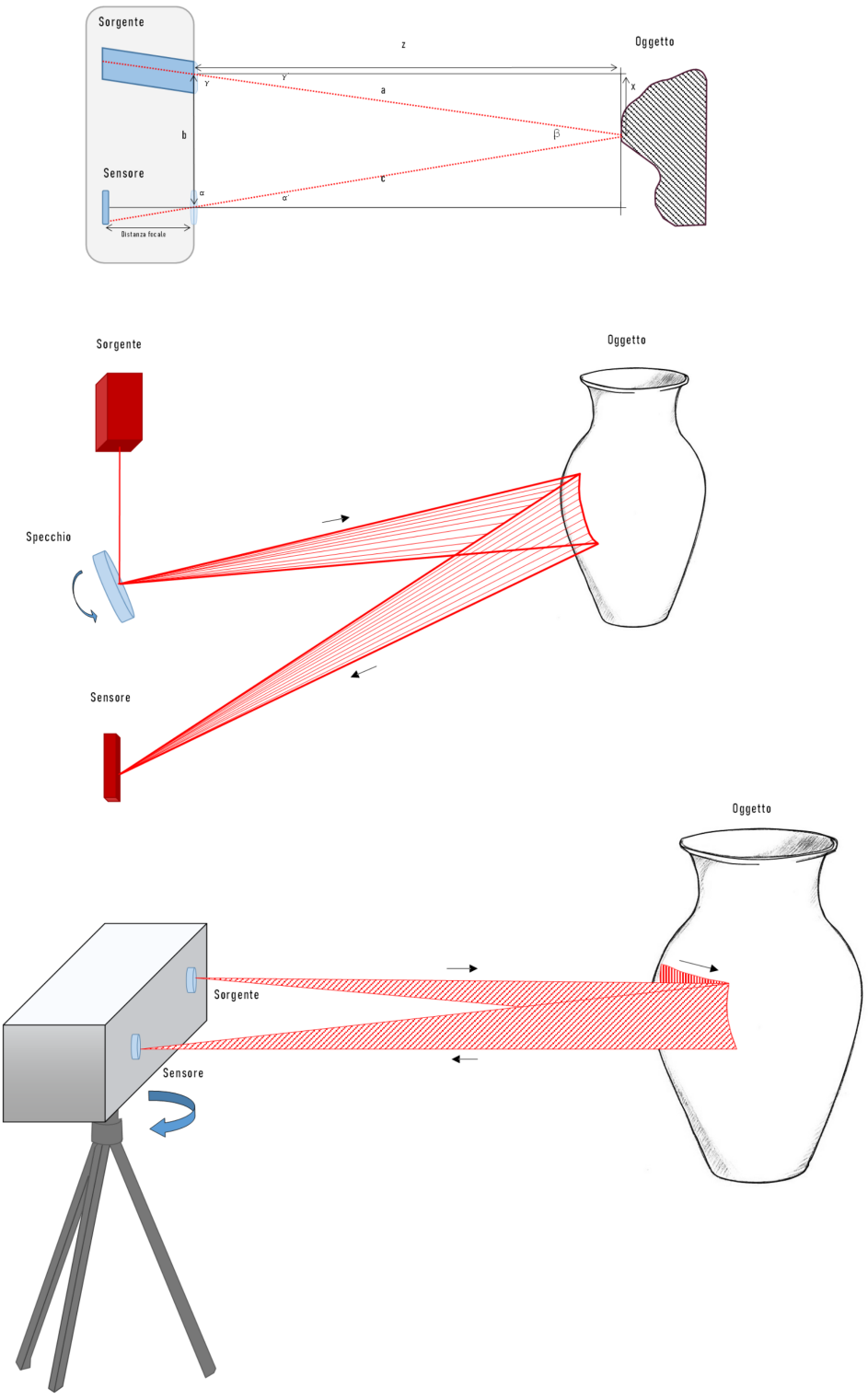


Fig. 3.5. Funzionamento di una range camera a triangolazione: a) schema di funzionamento; b) range camera a lama di luce; c) range camera di superficie. (elaborazione personale).

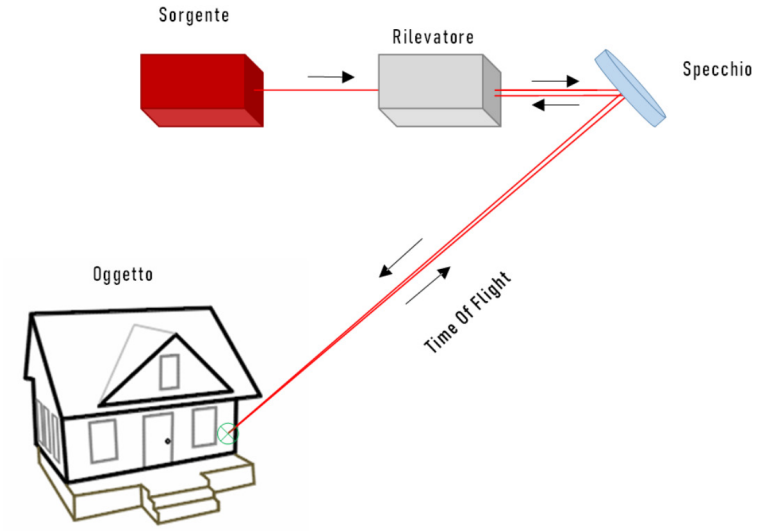


Fig. 3.6. Schema di funzionamento di un laser TOF (Time of Fligh). (elaborazione personale).

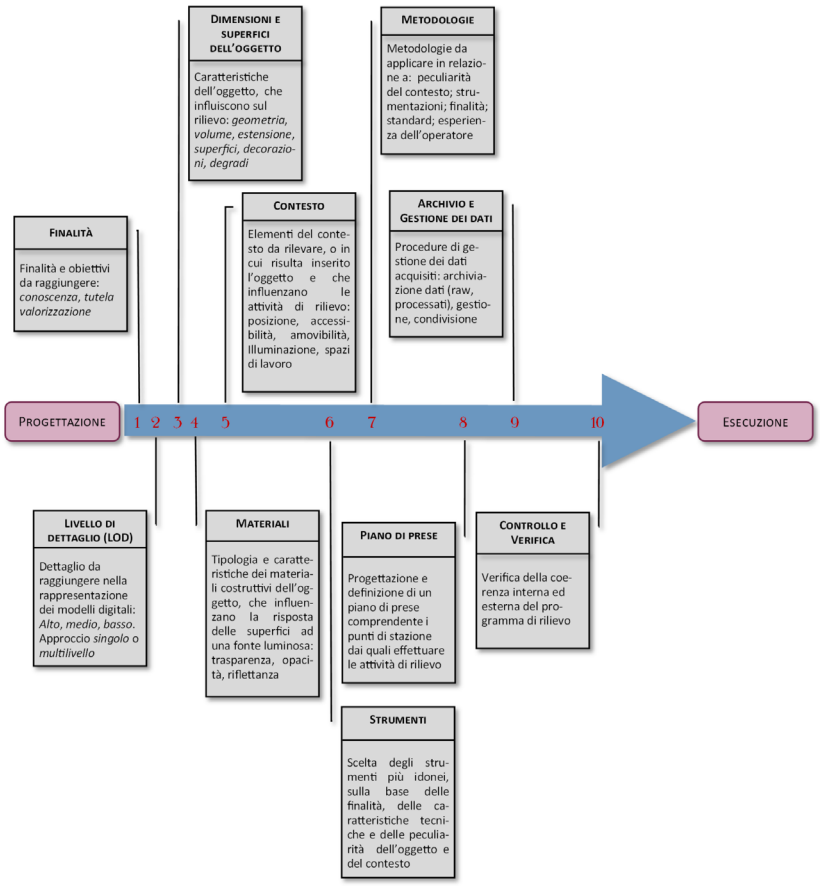


Fig. 3.7. Fasi della redazione di un progetto di rilievo. (elaborazione personale).

Capitolo IV

Modelli tridimensionali

«La distinzione fra spazio materiale e spazio virtuale e la loro rappresentazione come componenti reciprocamente indispensabili all'esistenza dello spazio reale vissuto dall'uomo consente di collocare i prodotti delle nuove tecnologie digitali fra gli elementi del reale».

Giorda 2000, p. 25.

4.1 Dal reale al virtuale

Qualunque sia la finalità per la quale un modello 3D viene realizzato, la sua connessione con un ambiente di "realtà virtuale" è ormai talmente diffusa, da avvenire quasi a livello inconscio. In tal modo la "realtà virtuale" diviene quasi una patria d'elezione, la dimensione naturale e congeniale di un oggetto digitale.

Le odierne conquiste nell'ambito della *computer graphics*, dell'elaborazione delle immagini, dei sistemi di localizzazione *indoor* e *outdoor*, del rilievo e della restituzione digitale di dati geospaziali, favorite dall'aumento progressivo della potenza di calcolo dei moderni elaboratori elettronici, adesso estesa fino a coinvolgere un'ampia gamma di *device* mobili, quali *smartphone* e *table*, hanno reso sempre più diffusa e concreata la possibilità di fruire di esperienze all'interno di spazi virtuali che ricreano non solo scenari fantastici, ma anche contesti reali, rappresentandoli con una fedeltà sempre maggiore, grazie ad una simulazione non solo delle caratteristiche esteriori degli elementi che la compongono, ma anche delle leggi fisiche che ne regolano i reciproci rapporti e l'eventuale iterazione con un utente.

Per rendere sempre più autentica e coinvolgente l'esperienza di fruizione sono stati sviluppati differenti dispositivi da indossare, quali lenti, caschi, guanti, tute, che producono stimoli sensoriali (uditivi, visivi, tattili) adattandosi dinamicamente alle risposte dell'utente. Raggiungere un livello di fedeltà elevato nella riproduzione dell'esperienza di fruizione è di fatto il principale requisito per l'applicazione, con differenti finalità, della realtà virtuale a molteplici settori.

Dalla sicurezza pubblica alla medicina, dall'architettura all'industria, dal patrimonio culturale a quello ambientale, sono, infatti, ormai molteplici i settori che condividono l'interesse alla simulazione di esperienze in ambienti virtuali ricreati appositamente come repliche di contesti reali, all'interno dei quali poter svolgere differenti attività. La realtà virtuale è stata, ad esempio,

impiegata con ottimi risultati nell'ambito dei beni culturali nell'esplorazione di contesti inaccessibili nella realtà concreta o la cui lacunosità delle evidenze viene superata tramite interventi di restauro e integrazione digitale. I ministeri della Difesa di qualsiasi Stato oggi utilizzano tali applicazioni per l'addestramento di piloti, soldati o astronauti, conducendoli a familiarizzare con contesti o all'interno degli scenari in cui dovranno in futuro operare. La visualizzazione e la fruizione di ambienti, di manufatti, prototipi, nell'ambito di progetti di arredo o design, è ormai una prassi assodata nell'ambito di qualsiasi produzione industriale. La visualizzazione di scenari urbani o ambientali ottenuti tramite la simulazione dei risultati di interventi si mostra particolarmente utile come strumento di supporti alle strategie di pianificazione urbana o territoriale.

Avendo ben presenti tali caratteristiche, si è in passato proposto di utilizzare espressioni come "*sistemi di ambiente virtuali*" o "*sistemi di realtà aumentata*"[1], per definire nel loro complesso gli elementi costituenti tal genere di esperienza, dove s'intrecciano gli apporti di molteplici discipline. Sebbene, al giorno d'oggi, con l'espressione "realtà virtuale" si intende comunemente riferirsi sia a tali riproduzioni altamente mimetiche nei confronti di contesti reali o immaginari, sia all'esperienza che ne trae il fruitore, cionondimeno tale significato non è assolutamente scontato e, in contrasto con l'apparente semplicità che lo caratterizza, si rivela alquanto complesso, a causa del costante e progressivo allargamento del suo ambito di pertinenza.

Ragionare quindi di oggetti digitali e di modelli 3D prodotti per la gestione, la tutela, il restauro, la valorizzazione del patrimonio culturale, richiede di affrontare in via preliminare la questione delle implicazioni e delle connessioni fra questi e la realtà virtuale, allo scopo di delimitarne l'ambito di pertinenza e sgomberare il campo da eventuali equivoci.

È significativo infatti come, quasi un ventennio fa in una situazione certamente meno complessa dell'attuale, in un saggio poi confluito a conclusione del suo libro «*Reale e virtuale*»[2], Tomás Maldonado, constatava come «*Virtuale e realtà virtuale appartengono a quelle espressioni che continuano a creare malintesi di ogni genere*»[3]. Aldilà dei significati differenti che caratterizzano, talvolta, il termine "virtuale"[4], le difficoltà a cui l'autore faceva cenno, affondano le proprie radici in questioni ben più complesse di quelle generate dalla polisemia del termine, poiché coinvolgono in una serrata contrapposizione ciò che

[1] Così furono definiti nel loro complesso gli elementi costituenti quella che comunemente viene definita "realtà virtuale" nell'ambito dei lavori del *Commettee on Virtual Reality*. Research and development, condotto dal *National Research Council* nel 1995, e che costituisce il primo lavoro di carattere scientifico rivolto alla definizione degli aspetti peculiari di tali sistemi. V. Durlach - Mavor 1995.

[2] Il saggio, pubblicato nel 1999 all'interno della rivista Telema, (n.9, 1999) è poi confluito in Maldonado 1992, p. 145-154.

[3] Maldonado 1992, p. 145.

[4] Lo stesso Maldonado, pur dichiarando di fare esplicitamente uso del termine "virtuale" nel senso di "illusorio", registra usi differenti del termine, come accade ad esempio nell'inglese parlato dove "*virtual*" assume il senso opposto di "*effettivo*", "*vero e proprio*" Maldonado 1992, p. 146-147.

potremmo definire, in modo estremamente generico, "realtà concreta" e ciò che può essere ricondotto all'interno di una dimensione "virtuale".

L'opposizione, che di per sè non avrebbe motivo alcuno di esistere, se ciò che è definibile come realtà virtuale rimanesse confinato in una dimensione priva di esistenza reale, si manifesta, talvolta, in tutta la sua irriducibilità nel momento in cui anche alla virtualità viene riconosciuto lo statuto di vera e propria realtà. In tali condizioni l'esistenza di una realtà non può più accettarsi senza una contemporanea limitazione del campo di esistenza di quella che diviene la sua concreta antagonista[5].

Dietro tali teorie, all'apparenza prive di un reale fondamento si celano ben precise motivazioni, strettamente legate ad aspetti peculiari che lo sviluppo scientifico e le rivoluzioni tecnologiche in atto, soprattutto nel settore dell'*Information and Communication Technologies,* hanno generato.

Come si cercherà di mostrare si tratta di argomenti complessi e per nulla banali, che coinvolgono, con molteplici implicazioni, svariati ambiti disciplinari: filosofia, gnoseologia, semiologia, fisica, informatica, architettura, storia dell'arte, scienze sociali.

Prima di relegare tal genere di tentate attribuzioni di realtà al "virtuale" fra i maldestri tentativi di chi, sedotto dalla bellezza di una ricostruzione o affascinato dalla possibilità di una comoda e tutto sommato economica alternativa alla realtà concreta, non riesce ad accettarne l'inesistenza, occorre soffermarsi su alcune questioni, le cui implicazioni rivestono un grande interesse. Ciò consentirà di porsi nella giusta prospettiva anche nei confronti di prodotti digitali, come quelli ottenuti tramite rilievo e modellazione tridimensionale per il patrimonio culturale, che costituiscono l'oggetto della presente trattazione.

4.2 Semiologia dell'immagine

Tralasciando la questione, estremamente interessante, relativa all'impulso, insito nell'essere umano, verso il ricorso alla dimensione del fantastico o dell'irrazionale, che nel corso dei secoli è stato al fondo di molteplici manifestazioni culturali perseguite con differenti finalità[6], e che potrebbe contribuire anch'esso a porre nella giusta prospettiva alcuni stimoli alla base delle esperienze di fruizione di realtà simulate, ciò che qui s'intende sottolineare riguarda le peculiarità e le implicazioni dell'utilizzo di segni e rappresentazioni grafiche, come forma di comunicazione non verbale.

[5] Ciò ad esempio accade nell'ambito di alcune teorie, a cui si farà cenno nel proseguo della trattazione, avanzate recentemente e nelle quali si ipotizza la progressiva virtualizzazione e smaterializzazione della realtà attuale. Per alcune considerazioni sulle connessioni fra informatica e smaterializzazione v. Negroponte 1999.

[6] Si pensi, solo per citare qualche esempio fra i molti possibili, alla fiaba o al teatro di età classica come strumento di educazione sociale collettiva; al racconto o al romanzo di fantasia, come prodotto "destinato al puro svago; ad una costruzione utopica come modello alternativo ad alcuni aspetti della realtà contemporanea. Gli studi e le riflessioni sull'argomento sono molteplici, anche se limitati a singoli aspetti, circoscritti nello spazio e nel tempo, o alle manifestazioni culturali di ben precise civiltà.V. ad esempio, solo per alcuni aspetti del mondo antico, Ceserani 1996; Dodds 2009; Frazer 2009 ; Nietzsche 2009 ; Sigmund 1978.

Se l'utilizzo di simboli grafici come veicolo di trasmissione di informazioni sembra avere, al pari del ricorso al fantastico o all'irrazionale, da sempre accompagnato l'essere umano, anticipando in tale funzione la comunicazione verbale, l'esame dei meccanismi che stanno al fondo dell'utilizzo delle immagini come strumento comunicativo, oggetto della semiotica[7], è un'acquisizione abbastanza recente, risalendo agli anni sessanta del secolo scorso, e legata agli sviluppi della moderna linguistica. Anzi furono proprio le conquiste della linguistica strutturalista di De Saussurre[8] ad aver fornito un primo impianto interpretativo alla semiologia, nel suo approccio allo studio delle funzioni cognitive dei segni iconici, finendo con l'innescare un vero e proprio dibattito sull'iconismo[9].

Infatti la particolare natura del segno iconico era solo parzialmente assimilabile alla parola e al suo corrispettivo grafico e mostrava tutte le difficoltà insite nei tentativi volti a ricondurla nell'ambito di quelle convenzioni socio-culturali chiamate in causa per lo studio e l'interpretazione del segno verbale. Inoltre la parola per essere correttamente interpretata, secondo l'approccio strutturalista, doveva richiamarsi ad un insieme di tipi cognitivi astratti, regolati da logiche di opposizione. Ciò non sembrava accadere con le immagini, in virtù della loro maggiore somiglianza con l'oggetto di cui erano segno[10].

La manifesta difficoltà determinò, negli anni settanta del secolo scorso, due reazioni parallele una di tipo "moderato" e l'altra di tipo "radicale". La prima può essere ricondotta ai lavori di Charles Pierce, il quale distinse i segni in "indici", "simboli" e "icone"[11], che pur con differenti processi di generazione, contribuivano tutti ai processi di semiosi, ovvero all'incessante e infinito generazione di segni da parte dell'essere umano[12].

[7] Ambito di studio della semiotica sono i segni nella loro funzione di strumento atto a veicolare informazioni. I "segni" oggetto della semiotica, possono essere distinti, sulla base del canale di percezione, in segni "verbali", ovvero parole, che sfruttano un canale di tipo uditivo-visivo e i segni "iconici", le immagini, dove prevale l'aspetto puramente visivo. I segni possono inoltre essere articolati sulla base della durata del fenomeno percettivo, in segni "permanenti", come testo scritto o immagini stampate, e segni "non permanenti", come nel caso di un discorso orale o di un'immagine frutto di una semplice percezione visiva. Infine i segni possono essere articolati in segni "isolati" o in "complessi di segni".

[8] De Saussurre 1967.

[9] Per una rapida sintesi degli argomenti di seguito trattati v. E. Ruggero, Immagine C. Semiologia dell'immagine, in F. Lever, P. C. Rivoltella, A. Zanacchi, La comunicazione. Dizionario di scienze e tecniche, www.lacomunicazione.it.

[10] In tal modo l'irriducibilità dell'immagine al modello elaborato dalla linguistica spinse, in una prima fase del dibattito sull'iconismo, a considerare quest'ultima come priva di pertinenza semiologica.

[11] Gli "indici" si formerebbero per contatto o calco, come l'impronta di una mano rispetto alla mano medesima; i "simboli", in linea con le teorie di De Saussurre, sarebbero generati per convenzioni socio-culturali, le "icone", all'interno delle quali Peirce ricondusse le immagini, per somiglianza con l'oggetto rappresentato. Peirce 1960.

[12] L'aspetto moderato di tale posizione derivava dal fatto che Peirce, non trovò una risposta al problema della convenzionalità o meno dell'immagine, ma tentò di integrarla nel sistema elaborato dalla linguistica strutturalista attraverso l'ipotesi dell'esistenza di tre tipi differenti di segni, distinti sulla base del processo generativo che li aveva prodotti e tutti indifferentemente impiegati nei processi di semiosi.

La posizione "radicale" tentò invece di estendere anche al segno iconico i caratteri convenzionali tipici di quelli verbali. Tale percorso, che richiedeva una modifica del rigido schema strutturalistico, fu tentato da Umberto Eco, il quale non solo si pronunciò sul complesso *iter* di interpretazione e adattamento alle convenzioni socio-culturali a cui era sottoposta anche la percezione dell'immagine iconica, ma propose un ampliamento del complesso di tipi percettivi astratti, fino ad includere anche segni iconici[13].

Se tali posizioni hanno avuto l'indiscutibile merito di tentare un'integrazione che non sacrificasse le peculiarità del simbolo iconico all'interno di una teoria coerente della comunicazione umana fino a quel momento modellata unicamente sul segno verbale, nei decenni successivi ci si interrogò su alcuni dei problemi rimasti insoluti e relativi al ruolo giocato sia dalle componenti biologiche e socio-culturali messe in atto dal soggetto durante la percezione, sia delle immagini mentali da questo prodotte[14].

Negli medesimi anni in cui erano condotte le ricerche sopra ricordate, venivano tentati ulteriori approcci volti alla risoluzione delle medesime questioni. Tali studi, nati per l'analisi di opere pittoriche, si fondavano sul presupposto dell'immagine come simbolo complesso e stratificato che occorreva leggere, alla stregua di un qualsiasi testo, attraverso metodologie di analisi appositamente elaborata[15]. Queste, tralasciando le differenze individuali apportate al singolo studioso, operano attraverso l'individuazione, la scomposizione e l'interpretazione di differenti livelli, posti in un ordine crescente di complessità: dai singoli segni (punto, linea, piano), dei livelli "plastici", a quelli "figurativi", dove i segni divengono elementi costituenti di singole figura da analizzare individualmente e nel rapporto reciproco con le altre figure e con lo spazio pittorico. in cui si trovano inserite[16]. L'aspetto saliente e importante ai fini della nostra analisi desumibile da tali teorie, oggi largamente impiegate nell'analisi di opere artistiche, è strettamente connesso al riconoscimento della stratificazione del un segno iconico e alla capacità di veicolare graficamente contenuti anche molto complessi, di cui esso si mostra capace.

4.3 Simboli e iconicità

Con simbolo iconico, sulla base della classificazione condotta da Charles

[13] Eco 1975.

[14] Riguardo questi temi, che hanno coinvolto illustri pensatori in ambito nazionale e internazionale vedi il resoconto in v.Eco 1997.

[15] Anche in tale approccio allo studio del simbolo iconico confluiscono apporti di differenti studiosi a livello nazionale e internazionale. Per gli esiti assunti in Italia da tale approccio v. Calabrese 1985.

[16] La possibilità di tenere distinti all'interno di tale approccio all'immagine il livello del "significante", costituito dai caratteri grafici e formali che potrebbero, per così dire, essere considerati "oggettivi", in quanto precedenti qualsiasi tentativo di analisi, da quelli prodotti dallo studioso e pertanto squisitamente "interpretativi", poteva in certo qual modo soddisfare le opposte esigenze del riconoscimento dell'immediatezza insita nel segno iconico, rispetto a quello verbale, salvaguardando al contempo il ruolo attivo del soggetto della percezione, che agirebbe in virtù di convezioni sociali e culturali, nella fase interpretativa.

Pierce e sopra richiamata[17], può, pertanto, indicarsi un segno caratterizzato da uno stretto rapporto di similarità con l'oggetto da esso rappresentato e in tale accezione si oppone all'astrattismo.

L'importanza dell'iconicità di un'immagine è strettamente connessa al valore e al ruolo di strumento comunicativo che essa può rivestire e al semplice assunto che tanto più alto è il grado di iconicità dell'immagine, tanto maggiore è la qualità e la quantità di informazioni trasmessa dall'oggetto e veicolata dall'immagine stessa, così come più immediata è la decodifica del messaggio comunicativo da parte del ricevente.

Non sorprende quindi come, aldilà delle difficoltà che la semiologia ha incontrato per giungere ad un'esatta definizione dei caratteri e del ruolo comunicativo dell'immagine, queste abbiano avuto una straordinaria importanza come veicolo di trasmissione delle informazioni e della conoscenza, intesa come sistema complesso di dati interrelati[18].

Tale funzione comunicativa del simbolo iconico può, inoltre, essere notevolmente amplificata dai recenti sviluppi tecnologici che consentono la realizzazione di oggetti digitali caratterizzati da un rapporto di stretta similarità con il corrispettivo reale, e mettono al contempo a disposizione potenti strumenti per la loro divulgazione e condivisione.

Occorre però approfondire, più di quanto fino ad ora si sia fatto, quali caratteristiche influiscono sul livello di iconicità di un segno o di un'immagine. Si tratta, a bene vedere, di distinguere i parametri che determinano differenti gradi di similarità fra oggetto e relativa manifestazione simbolica.

Una classificazione dell'iconicità, non è in realtà un'esigenza nuova, ma la sua necessità fu avvertita abbastanza per tempo, dopo che Charles Peirce ebbe avanzato la sua definizione di iconicità, come fondata su un principio di similarità. Ciò avvenne ad opera di Charles Morris, che ricorrendo al concetto di comunanza di proprietà per precisare il concetto di iconicità, lo impiegò come discrimine per una classificazione dei segni iconici[19].

Tale tentativo raggiunse il risultato più compiuto con Abraham Moles, che propose una scala di similarità basata su dodici livelli, in cima alla quale, al massimo grado di iconicità, collocò l'oggetto in se, al gradino inferiore, la parola scritta, che ne rappresenta, pertanto, il massimo livello di astrazione[20].

A questi, che possono considerarsi come i primi tentativi di classificazione iconica e, nel caso di Abraham Moles, anche il più famoso, se ne aggiunsero altri. Tuttavia molte delle proposte di arti-

[17] Peirce 1960, v. *supra* p.93. nota 11.

[18] Maldonado cita, in modo molto pregante come alla base della strenua difesa del culto delle immagini da parte della Chiesa in occasione della lotta iconoclasta, avviata dall'imperatore bizantino Leone III nel 730 d.C., vi sia la consapevolezza del ruolo fortemente comunicativo delle immagini. D'altronde, il fatto che le immagini possano, più di ogni altro strumento, porsi come veicolo diretto di trasmissione della conoscenza e di valori culturali lo dimostrano episodi ben più recenti di distruzione, avvenuti in Oriente e perpetrate, in nome del fanatismo religioso, ai danni di qualsiasi manufatto, la cui unica colpa era quella di offrire, tramite appunto un richiamo simbolico, un forte aggancio a manifestazioni culturali di civiltà del passato. Maldonado 1992, pp. 23-26.

[19] Morris 1988; Morris 1999.

[20] Moles 1972; Moles 1981.

colazione avanzate, fanno uso con modalità differenti di concetti quali "omologia", "analogia", e "isomorfismo".

Seguendo la distinzione proposta da Maldonado[21] basata sulla struttura, la funzione, la forma come elementi discriminanti di un rapporto di similarità, è possibile definire: l'omologia, una somiglianza fra oggetto e segno limitata solo alla coincidenza della struttura; l'analogia, come somiglianza di struttura e funzione; l'isomorfismo, come similarità nella struttura e nella forma a cui può aggiungersi, ma non necessariamente, una coincidenza di funzione (Fig. 4.1).

Mantenendo invariato il parametro funzionale e precisando tale articolazione con l'introduzione di elementi più congeniali ad una disamina di rappresentazioni sia tradizionali, sia digitali, legati al patrimonio culturale, all'aspetto formale potrebbe essere associato quello della dimensione, bidimensionale o tridimensionale[22] mentre il parametro strutturale potrebbe essere articolato attraverso la distinzione fra materiale interno e rivestimento superficiale (Fig. 4.2).

In tal modo diventa possibile sia confrontare oggetti e relative rappresentazioni dal punto di vista dimensionale, sia prestare maggiore attenzione alla caratterizzazione di superfici ed, eventualmente, di volumi interni che compongono un oggetto[23].

Fra le molteplici tipologie di segni iconici, rivestono particolare interesse per le connessioni con i modelli 3D e con il loro utilizzo nell'ambito del patrimonio culturale, le immagini prospettiche e i modelli materici, denominati con ampio ricorso di termini anche "plastici" o "*maquette*"[24].

Un'immagine prospettica, indipendentemente dalla differente tipologia di proiezione utilizzata[25], risponde all'esigenza di rappresentare uno spazio tridimensionale su una superficie bidimensionale, tramite opportuni procedimenti riconducibili nell'ambito della geometria descrittiva, campo di applicazione della prospettiva lineare, o tramite la resa del colore e delle ombreggiature, come nel caso della

[21] Maldonado 1992, p. 101.

[22] Tale parametro fa riferimento, ovviamente, sia alle caratteristiche dimensionali dell'oggetto sia a quelle della corrispettiva rappresentazione simbolica, parametri che possono, come spesso accade, non coincidere.

[23] Tale aspetto, spesso non tenuto in debito conto in tutte le sue implicazioni è invece di grande importanza ai fini della determinazione del grado di iconicità di una rappresentazione, specie quando questa si traduca nelle forme di un modello materico di tipo tradizionale, come un plastico, o assuma le caratteristiche di un oggetto tridimensionale con volumi ben definiti e texturizzazione delle superfici, o infine venga dotato di consistenza materica tramite un processo di prototipazione e stampa 3D a partire dal modello medesimo. Le riflessioni sul rapporto materico fra oggetto e immagine iconica, hanno generalmente preso in esame solo alcuni aspetti di una casistica che si rivela complessa e variegata. Fra questi hanno ricevuto particolare attenzione le questioni relative all'"indice di rarefazione" del materiale e alla "genuinità", misurata sulla resa superficiale dell'oggetto. Per la questione v. Maldonado 1987, p. 114; Maldonado 1992, p. 79-84; Manzini 1989b; Manzini 1989a e i lavori di Massimo Negrotti fra i quali Negrotti 1990; Negrotti 1997.

[24] Per una disamina del termine v. Maldonado 1992, p. 100; Limoncelli 2012, p. 120.

[25] Una rappresentazione prospettica lineare varia sulla base di alcuni parametri riconducibili alla posizione dell'oggetto rispetto sia al piano di proiezione, o "quadro", sia al piano geometrale, o "piano di terra", che possono presentare una superficie piana o assimilabile ad una curva (conica, cilindrica, sferica). A questi si deve aggiungere la posizione e il numero dei punti di vista.

ICONICITÀ

	Struttura	Funzione	Forma
Omologia	Si	No	No
Analogia	Si	Si	No
Isomorfismo	Si	Non necessaria	Si

Fig. 4.1. Iconicità, come omologia, analogia e isomorfismo.

ICONICITÀ

	Struttura		Funzione	Forma 2D/3D
	Interna	Esterna		
Omologia	Si	Si	No	No
Analogia	Si	Si	Si	No
Isomorfismo	Si	Si	Non necessaria	Si

Fig. 4.2. Iconicità, come omologia, analogia e isomorfismo, in relazione alla struttura interna ed esterna di un oggetto.

prospettiva aerea. Il problema della rappresentazione di uno spazio tridimensionale, che sta alla base della rappresentazione prospettica, fu avvertito fin dall'antichità. Ciò spiega come i primi tentativi di rendere la profondità dello spazio possono farsi risalire almeno all'età classica e proseguirono, empiricamente, fino al Rinascimento, periodo nel quale avvennero le prime organiche sistemazioni e la codifica delle esperienze fino ad allora acquisite. Bisogna però attendere la fine del XVIII secolo per giungere alla definitiva impostazione scientifica del problema, basata sui principi della geometria descrittiva elaborata da Gaspard Monge nel 1795[26]. La rappresentazione prospettica può quindi a ragione essere annoverata fra le più importanti forme di simbolizzazione iconica che l'uomo abbia elaborato per la rappresentazione dello spazio fisico, la cui codifica e il cui formalismo rappresentano un'acquisizione che può ritenersi abbastanza generalizzata e diffusa[27].

In virtù di tale ampio e diffuso utilizzo l'applicazione della rappresentazione prospettica nei processi di razionalizzazione dello spazio fisico è stata frequente, ed essa ha offerto un pieno supporto, favorendo l'ideazione, la progettazione, la simulazione, la condivisione di idee e di risultati, in tutte quelle attività umane, che proprio alla modifica dello spazio fisico, erano indirizzati.

Applicando ad essa il sistema di classificazione sopra illustrato e basato sul differente livello di iconicità, una rappresentazione prospettica potrebbe instaurare con l'oggetto da essa rappresentato un rapporto di omologia[28].

Il ricorso a modelli materici come supporto ad una fase ideativa e progettuale o come strumento di analisi, sintesi e divulgazione ha un'origine molto antica. Nella funzione illustrativa di un progetto architettonico, ad esempio, l'impiego di un modello materico divenne, stando alle acute osservazioni di R. A. Goldthwaite[29], riprese da Tomás Maldonado[30], molto diffuso in età rinascimentale. Ciò può essere imputato ad un sostanziale cambiamento, riscontrabile a partire da tale fase storica, fra una tendenza all'ideazione e all'esecuzione di grandi progetti architettonici dove l'apporto dell'ideatore e del committente poteva stemperarsi nel contributo di differenti generazioni, e l'esigenza di un legame più stretto fra committente e opera, che fece nascere in quest'ultimo il bisogno di un più serrato controllo

[26] Monge 1795.

[27] Si tralasciano di ricordare le complesse problematiche e il travaglio critico relativo al valore da conferire alla rappresentazione prospettica, che in passato, e a partire dal saggio fondamentale di Erwin Panovsky del 1927, hanno oscillato fra una rappresentazione fedele della realtà, che ormai si mostra poco sostenibile, e una riproduzione convenzionale dello spazio. Per una disamina della storia della rappresentazione prospettica e per un inquadramento del dibattito critico v Panofsky 1927 traduzione italiana Panofsky 1961; Maldonado 1992, p. 18-20; Gioseffi 1957; Gioseffi 1980; Damisch 1992.

[28] Se, infatti, sotto il profilo della struttura, una rappresentazione prospettica mostra un grado di iconicità estremamente variabile in quanto dipendente dalla maggiore o minore regolarità strutturale dell'oggetto riprodotto, impossibile appare invece un confronto sulla base della funzione e bassa la similarità nella resa formale di uno spazio tridimensionale, che tramite artifici grafici viene di fatto ricondotto all'interno di uno spazio bidimensionale.

[29] Goldthwaite 1980, p. 140.

[30] Maldonado 1992, pp. 100-105.

delle fasi progettuali, con la necessità dell'elaborazione da parte dell'architetto progettista di strumenti che consentissero un'immediata visualizzazione e comprensione del risultato finale.

Tale funzione, seppur certamente fra le prime ad essere soddisfatta tramite il ricorso ad un modello materico, non è certamente l'unica. Così la realizzazione di plastici ha trovato proficuo impiego in ambito industriale, per la valutazione, tramite riproduzione mimetica, del risultato dei processi di *design* di manufatti da avviare alle fasi di produzione, oppure, in ambiti maggiormente pertinenti al patrimonio culturale, ogniqualvolta la complessità di un contesto, derivato dalla lacunosità dei resti o dalla loro notevole estensione e distribuzione spaziale, poteva avvantaggiarsi della disponibilità di strumenti che consentissero uno sguardo d'insieme. Sono infatti numerosi i plastici ritraenti aree o monumenti archeologici nel loro stato attuale di conservazione o ricostruendone l'aspetto in una determinata fase della loro evoluzione storica[31].

Un plastico possiede certamente una maggiore iconicità rispetto ad una rappresentazione prospettica. Ciò avviene in virtù di un più stretto e complesso rapporto che un tale modello instaura con l'oggetto di cui costituisce una rappresentazione. Ciò avviene grazie al ricorso ad un supporto materico, che rende possibile una rappresentazione delle tre dimensione dell'oggetto nella sua esatta conformazione spaziale, pur con gli ovvi limiti determinati dalla riduzione in scala. Tuttavia è proprio il materiale impiegato per la realizzazione del modello, necessariamente differente rispetto all'originale, a costituire, al contempo, un limite nei confronti del reciproco rapporto di similarità[32].

Malgrado ciò e in virtù della similarità consentita dalla sua componente materiale un plastico rende possibile, chiaramente, instaurare processi di archiviazione e trasmissione di informazioni più efficienti sia in termini qualitativi, che quantitativi rispetto ad una rappresentazione prospettiva.

Se modelli materici e rappresentazioni prospettiche possono essere assunti come le due tipologie di simboli iconici, che hanno più stretti rapporti con la gestione e la trasmissione tridimensionale delle informazioni, diventa interessante porle a confronto con i modelli 3D, allo scopo di mettere in luce, attraverso eventuali analogie e contrasti, le potenzialità e i limiti del loro utilizzo come simbolo iconico di trasmissione della conoscenza.

[31] È questo, ad esempio, il caso di molti plastici ricostruttivi di contesti archeologici, fra i quali un posto di rilievo, anche per recenti progetti di acquisizione digitale di cui sono stati oggetto, spetta al plastico di Pompei o a quello riproducente Roma in età costantiniana. Il primo, attualmente ospitato al Museo Archeologico Nazionale di Napoli, fu realizzato, a più riprese, a partire dal 1861 e riproduce in scala 1:100 l'intera area urbana della città antica nelle condizioni in cui si trovavano le strutture dopo la scoperta. L'altro, attualmente ospitato all'interno del Museo della civiltà romana, iniziato nel 1933, riproduce in scala 1:250 l'immagine ipotetica della città durante l'età costantiniana. Il Plastico di Pompei è stato recentemente oggetto di un intervento di digitalizzazione ad opera dell'IBAM-CNR, v. Malfitana *et alii* 2017, quello romano, dal laboratorio di Reverse Engineering del Politecnico di Milano, nell'ambito del progetto internazionale Roma Reborn, v. Guidi-Russo-Beraldin 2010, pp. 443-457.

[32] Limoncelli 2012, pp. 120-121.

4.4 Modelli 3D come strumenti informativi

Per comprendere appieno le peculiarità che caratterizzano un modello tridimensionale differenziandolo da altri segni iconici si rivela utile passare in rassegna, brevemente, le differenti fasi necessarie alla sua realizzazione.

Come nel caso di un disegno bidimensionale, sia esso di tipo tradizionale o digitale, ma in forma certamente più complessa, anche per la realizzazione di un oggetto tridimensionale, qualsiasi software di modellazione 3D, mette a disposizione differenti tecniche e metodologie per ottenere il medesimo risultato.

Una distinzione preliminare, ma di grande importanza, va innanzitutto fatta fra oggetti tridimensionali costituiti da una semplice superficie esterna e oggetti solidi, in cui la superficie racchiude anche un volume interno.

Nel primo caso, l'oggetto digitale è composto unicamente da vertici, spigoli e lati, che compongono una superficie a delimitazione di uno spazio interno vuoto. Nel secondo caso, l'oggetto tridimensionale, è modellato a partire da un solido, che possiede un proprio volume.

Un'altra importante differenza deriva dalla forma complessiva, che consente di distinguere fra oggetti "geometrici", dotati di una certa regolarità, e oggetti "organici", che possiedono, come nel caso di un essere umano, forme estremamente complesse.

Tutti i principali software di modellazione 3D, permettono, attraverso un insieme di procedure più o meno automatizzate, la creazione di oggetti e superfici dal comportamento prestabilito. Tuttavia tali tecniche, consentendo la generazione di oggetti seriali, legati da variazioni di alcuni parametri formali, come ad esempio le dimensioni, si rivelano particolarmente utili per la simulazione tridimensionale di fluidi, per la resa di elementi vegetali o tessuti. Nel campo della modellazione architettonica o del design pertanto le tecniche di modellazione automatica, sono scarsamente impiegate e generalmente sempre a corredo e ad integrazione di quelle manuali[33].

Qualunque sia la forma da realizzare la modellazione manuale è certamente la tecnica che offre maggiore versatilità. Essa consente di giungere alla realizzazione della forma voluta attraverso molteplici strumenti di manipolazione, che si applicano su alcuni elementi di base, la cui differenza costituisce il principale discrimine all'interno di tale tecnica di modellazione[34].

La modellazione "parametrica", utilizza come base di partenza alcuni oggetti digitali, sia superfici bidimensionali, che solidi tridimensionali, indicati come "primitive" e ottenuti a partire da formule matematiche[35] (Fig. 4.3). La forma di ciascuna "primitiva" può essere variata agendo direttamente su alcuni parametri fondamentali, da cui il nome di tale tecnica, quali ad esempio le tre dimensioni o l'orientamento e la posizione nell'oggetto rispetto al sistema di riferimento adottato nello spazio di disegno. Oltre tali cambiamenti

[33] Limoncelli 2012, pp. 130-131.

[34] Limoncelli 2012, pp. 122-130.

[35] A prescindere da alcune differenze fra vari software di modellazione fra le primitive rientrano: il quadrato, il cerchio, il piano (2D); il cubo, la sfera, il cilindro, il cono, un anello circolare.

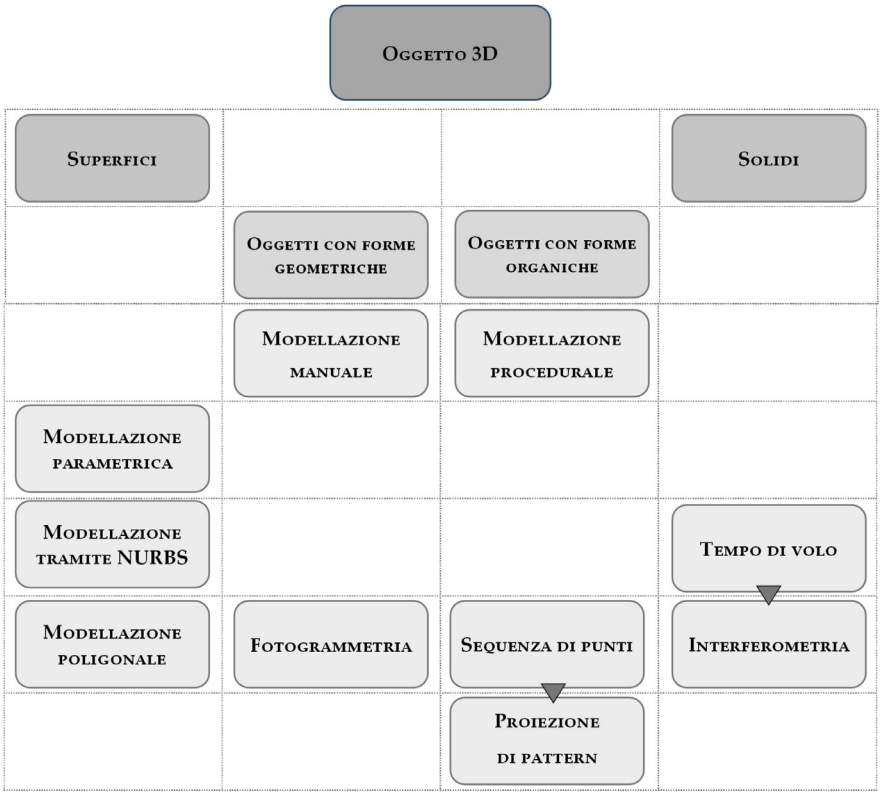


Fig. 4.3. Tecniche di modellazione 3D.

di tipo geometrico, ulteriori modifiche possono essere applicate alle primitive tramite l'impiego di particolari oggetti che, dalla loro funzione, vengono detti "deformanti". Grazie ad essi è, ad esempio, possibile agire sulla forma di una primitiva, piegandola o torcendola, oppure creare forme complesse a partire dall'unione, intersezione o sottrazione di forme semplici.

La modellazione NURBS prende il nome dalla tipologia di oggetti utilizzati per il disegno di curve e superfici. Le NURBS, acronimo di *Non Uniformal Rational B-Splines*, sono delle curve geometriche, risolvibili matematicamente[36], il cui andamento può essere controllato, come nel caso precedente, tramite l'immissione del valore di alcuni parametri o, direttamente, attraverso il disegno a mano libera. Ciò conferisce alle NURBS facilità e versatilità d'im-

[36] L'andamento di una NURBS dipende dal valore assunto da quattro parametri: grado, vertici di controllo, nodi e regola di stima. La definizione delle NURBS, nacque nell'ambito dell'industria automobilistica e aereospaziale per far fronte alla necessità di disporre di curve capaci di rappresentare forme complesse e superfici *free-form*. La risoluzione dei problemi geometrico-matematici, che ne sta alla base, si deve al contributo di differenti autori, fra i quali possono essere ricordati Casteljau (1959), Bézier (1966), Coons (1963), Ferguson (1963). che fra la fine degli anni sessanta e settanta del secolo scorso ne proposero una definizione basandosi sui principi della geometria descrittiva elaborata da Gauss v. Rogers 2001.

piego per la realizzazione di molteplici forme, sia regolari che complesse. Inoltre, come per le primitive parametriche, anche nel caso delle NURBS, i software di modellazione 3D mettono a disposizione differenti *tools* per la modifica delle forme di base, come l'estrusione e la rotazione.

La modellazione poligonale si basa sull'impiego di oggetti o di superfici poligonali, dette *mesh*, costruite tramite la successione di poligoni generalmente triangolari, i cui vertici (*nodi*) e relativi lati (*isoparms*), delimitano delle superfici (*patch*) orientate secondo l'andamento della normale, perpendicolare al rispettivo piano superficiale e passante per il suo baricentro. La possibilità di un aumento virtualmente infinito del numero di poligoni rende una *mesh* particolarmente adatta alla resa di oggetti e superfici caratterizzati da grande irregolarità.

Le "superfici implicite" e le "metaballs" costituiscono un'ulteriore tipologia di oggetti impiegata nella modellazione manuale di tipo organico. Caratterizzate, rispetto alle precedenti, dall'essere espressione di formule matematiche calcolate dinamicamente dai software di modellazione, tali oggetti basano la loro struttura su un'unità minima di volume, denominata *voxel*, costruita a partire da un punto geometrico centrale, intorno al quale si sviluppa una superficie capace di rispondere dinamicamente a sollecitazioni esterne[37].

Le tecniche a cui si è fatto rapidamente cenno costituiscono, senza esaurire un panorama complesso, vasto e articolato[38], le principali tecniche di modellazione 3D, distinte sulla base dell'utilizzo di superfici e oggetti di differente natura. Esse offrono un'ampia gamma di soluzioni a specifici problemi che riguardano, la forma, la resa superficiale, il comportamento fisico dell'oggetto da realizzare e presentano differenti caratteristiche in termini di carico computazionale per la loro gestione[39].

Un'ulteriore importante riflessione, nell'ambito della modellazione manuale, fa fatta a proposito del materiale di supporto che può essere utilizzato e degli interventi che possono essere condotti sui dati prodotti da rilievi fotogrammetrici o laser scanner.

Nel primo ambito rientrano tutte le tipologie di rappresentazione bidimensionale realizzate tramite software CAD o digitalizzate da supporto carta-

[37] Le caratteristiche delle *metaballs* e delle *superfici implicite* le rendono particolarmente adatte a simulare il comportamento fisico di sostanze fluide o viscose, v. Limoncelli 2012, p. 128.

[38] Alle tecniche sopra elencate potrebbero, ad esempio, aggiungersi, con funzione di modificatori degli oggetti a cui vengono applicate: le *subdivision surfaces*, particolarmente indicate per la modellazione organica, che uniscono alcune caratteristiche delle NURBS a quelle peculiari di oggetti poligonali; il *displacement mapping* che consente di produrre uno spostamento selettivo di alcune aree della superficie un oggetto poligonale. Differente è, infine, il principio su cui si basa il *3D sculpting*, che consente l'esecuzione di una modellazione manuale che ricalca quella che utilizzerebbe uno scultore, nell'esecuzione di un'opera, con un procedimento di eliminazione progressiva di materiale. Limoncelli 2012, pp. 126-130.

[39] Così, ad esempio, la principale differenza fra un oggetto o una superficie poligonale e una NURBS, risiede nella caratterizzazione delle superfici, che nel secondo caso, essendo derivate da curve si presentano prive di quelle sfaccettature che sono invece elemento caratterizzante delle prime. Tale differenza, naturalmente, non ha solo ripercussioni formali, ma determina, ad esempio, una differente risposta dell'oggetto alla luce.

ceo, come ad esempio delle rappresentazioni ortogonali, che scalate e opportunamente proiettate sugli opportuni piani di lavoro, offrono un valido supporto alla modellazione tridimensionale[40]. I dati ottenuti a partire da rilievi fotogrammetrici o laser scanner, richiedono, invece, apposite elaborazioni e ben precisi accorgimenti per essere utilizzate in processi di modellazione manuale.

I moderni software di *Structure From Motion* utilizzati per la generazione di dati tridimensionali a partire da *dataset* fotografici, consentono attraverso un *workflow* semi automatico di ottenere modelli tridimensionali, scalati, georiferiti e texturizzati, a cui si aggiungono una serie di prodotti intermedi, quali *mesh* poligonali e *Dense Point Clouds*, che rappresentano delle superfici complesse attraverso una nuvola di punti texturizzata, tramite il dato cromatico UVW ricavato dalle immagini fotografiche.

Il processo di elaborazione dei dati derivati dal rilievo effettuato tramite strumenti dotati di sensori attivi, è più lungo e articolato. La necessità di eseguire molteplici scansioni da differenti angolazioni per la copertura integrale di un oggetto o un contesto nelle sue tre dimensioni, porta alla produzione di molteplici nuvole di punti, che richiedono, dopo una preliminare operazione di pulizia per eliminare informazioni non rilevanti, alla necessità di allineare le diverse *range map*. Tale processo può essere eseguito con molteplici procedure, sia manuali, che semi automatiche, basate sul riconoscimento di punti omologhi, spesso costituiti da appositi *target* materializzati sul terreno e visibili in porzioni comuni fra due differenti *range map*[41].

Il processo di allineamento si conclude con la generazione di un'unica *range map* derivata dall'unione delle singole *point clouds,* dalla quale, tramite un processo automatico di *meshing*, viene ottenuta l'omonima superficie poligonale dell'oggetto, la quale può variare nella geometria del poligono di base, ma che generalmente, per i vantaggi offerti dalla stretta relazione esistente fra i lati di un triangolo in se e con i rispettivi angoli, utilizza tale geometria. La *mesh* così ottenuta è generalmente sottoposta ad una fase di *editing*, volta sia ad eliminare eventuali lacune derivate da zone non rilevate o rilevate in maniera insufficiente a causa, ad esempio, di zone d'ombra o ad intervenire su differenti parametri quali, ad esempio, la rugosità delle superfici, attenuata tramite processi di *smoothing*, o nella diminuzione del numero complessivo di poligoni della *mesh*. Quest'ultimo aspetto è particolarmente importante, perché direttamente legato sia al dettaglio complessivo dell'oggetto digitale, sia alle dimensioni finali da esso raggiunte, che influiscono, in termini

[40] Ciò avviene, ad esempio, con le *blueprints*, proiezione di rappresentazioni grafiche su piani ortogonali, impiegate per una modellazione tridimensionale effettuata per "ricalco" a partire dalle viste suddette. Limoncelli 2012, p. 126.

[41] L'allineamento delle differenti *range map* costituisce una delle fasi più delicate dell'intero processo volto alla restituzione di un oggetto digitale tridimensionale tramite sistemi di rilevamento a sensori attivi. Ciò è dovuto, in gran parte, alla possibilità del verificarsi di non perfette sovrapposizioni fra punti omologhi presenti in due differenti *range map* e alla necessità costante di stimare l'eventuale errore residuo. Per l'argomento e un illustrazione delle differenti metodologia, sia manuali, sia semi automatiche di allineamento v. Guidi-Russo-Beraldin 2010, pp. 227-277.

di potenza di calcolo necessarie e nelle modalità di condivisione e visualizzazione dell'oggetto.

Ottenuto l'oggetto tridimensionale, sia esso composto da superfici o costituito da volumi solidi, occorre procedere con le operazioni di *texture mapping*, volte a caratterizzarne le superfici in modo che riproducano in maniera mimetica l'aspetto dell'originale di cui esse sono una copia digitale. Ciò richiede di definire i caratteri cromatici e quei dettagli morfologici delle superfici, come ad esempio la tessitura di un apparecchio murario, i quali non vengono resi direttamente attraverso la modellazione geometrica, ma solo tramite la variazione e la distribuzione cromatica rappresentata da un'immagine.

Il processo di *texture mapping* non deve però essere inteso semplicemente come l'applicazione di un rivestimento superficiale al fine di aumentarne il realismo, ma equivale a conferire ad un'oggetto digitale una propria materialità, con specifici comportamenti nei confronti della luce. Infatti l'aspetto finale e le caratteristiche di una *texture*, indicata tecnicamente, e in modo significativo, proprio con il termine di "materiale", può essere controllata attraverso differenti canali, che permettono di variarne il colore, la diffusione, la luminanza, la trasparenza, la riflessione, il rilievo superficiale, l'opacità[42].

Vi sono differenti metodologie e strategie di *texture mapping* strettamente dipendenti sia dalla tipologia della *texture* da applicare, sia dalla natura (parametrica, NURBS, poligonale) dell'oggetto digitale, sia dalla morfologia delle superfici. Le *texture* infatti possono derivare sia da immagini digitali appositamente realizzate ritraendo l'oggetto reale, sia in modo procedurale attraverso appositi algoritmi matematici. La natura dell'oggetto influisce sul numero di *texture* contemporaneamente applicabili, mentre dalla morfologia dipende la scelta della procedura di applicazione più efficace. Questa si basa su due differenti criteri: la definizione di relazioni fra punti della superficie dell'oggetto e punti dell'immagine espressi in termini di coordinate *x*, *y*, *z*, oppure tramite differenti tipi di proiezione geometrica (cubica, sferica, cilindrica, piana) di un'immagine sulla superficie dell'oggetto[43].

Affinché un oggetto digitale *texturizzato* possa assumere una rappresentazione realistica deve essere collocato all'interno di uno spazio "virtuale" di rappresentazione, che deve simulare, nelle sue tre dimensioni, un ambiente reale. Ciò può avvenire definendo le caratteristiche e le interrelazioni fra differenti elementi, riconducibili essenzialmente alle componenti di un spazio fisico, compresi gli oggetti in esso contenuti, l'illuminazione e le ombre generate dall'interazione della luce con gli oggetti.

La definizione dello spazio fisico richiede la determinazione delle caratteristiche: del "piano di posa" su cui giacciono gli oggetti tridimensionali, rappresentato come un piano orizzontale con estensione infinita e passante per l'origine del sistema di coordinate assolute; del cielo, reso come una sfera di

[42] Limoncelli 2012, pp. 144-146.

[43] L'utilizzo di un sistema di applicazione tramite coordinate è utile nel caso di oggetti con superfici irregolari, le proiezioni si adattano ad oggetti caratterizzati da superfici regolari. Limoncelli 2012, pp. 143-148.

raggio infinito, il cui centro corrisponde anch'esso con l'origine del sistema di riferimento; dello sfondo, determinato da un piano verticale su cui proiettare un'immagine in funzione, appunto di fondo e di quinta scenica[44]. All'interno dello spazio fisico vengono collocati i differenti oggetti, da quelli il cui ruolo è essenziale, ai semplici oggetti di scena, utilizzati unicamente per fornire un contesto ai primi. Fondamentale è inoltre la gestione dell'illuminazione, poiché dall'interazione che essa instaura con le superfici degli oggetti, rese nella loro caratterizzazione materica, dipende gran parte del realismo finale. Ciò richiede la gestione di due differenti tipi di illuminazione: l'illuminazione "diretta", coincidente con quella che a partire dalla sorgente luminosa investe direttamente gli oggetti generando le relative ombre e l'illuminazione "indiretta", corrispondente alla porzione di luce riflessa da ciascun oggetto verso quelli circostanti. L'unione di entrambe genera l'illuminazione globale di una scena. La stima degli effetti generati dalla luce ambientale, richiede pertanto la determinazione dei percorsi effettuati da una sorgente luminosa a partire dalla determinazione del numero, della posizione e della tipologia delle fonti presenti nella scena[45]. Ciò è reso possibile da appositi algoritmi che calcolano l'interazione fra la sorgente luminosa e le superfici dell'oggetto in termini di illuminazione diffusa e riflessa, influenzata dall'interazione di molteplici aspetti, quali il materiale di cui è composto l'oggetto, la posizione che esso occupa nello spazio, l'intensità della sorgente luminosa, l'angolo di incidenza con cui essa colpisce le singole superfici[46]. Dall'illuminazione dipende sia il colore dell'oggetto, sia la generazione delle ombre, che possono distinguersi in ombre proprie e portate, quest'ultime coincidenti con quelle che un oggetto riceve per effetto della presenza di oggetti vicini. Anche nel caso delle ombre, come per le sorgenti luminose, una resa realistica dell'immagine finale richiede la definizione di alcuni parametri di diffusione delle ombre, che agiscono principalmente sulle modalità di trapasso fra aree illuminate e ombreggiate.

La generazione dell'immagine finale scaturisce dall'unione degli effetti prodotti al variare di uno o più dei parametri sopra esposti e che richiedono inoltre la definizione del punto o dei

[44] Limoncelli 2012, p. 151.

[45] Pur nelle differenze insite nei differenti software di modellazione e *rendering* 3D, le sorgenti luminose sono generalmente distinte sulla base della modalità di proiezione dei raggi luminosi. In tal modo sorgenti omnidirezionali, che proiettano i raggi in tutte le direzioni, si contrappongo a sorgenti Spot light, unidirezionali. Vi sono sorgenti di luce infinita, che proiettano raggi e generano ombre parallele, in virtù di una posizione posta all'infinito, equiparando in tal modo la luce solare. Agli effetti prodotti da tali sorgenti luminose devono essere aggiunte quelle derivate da differenti sorgenti luminose, costituite da corpi irraggianti o superfici riflettenti. Limoncelli 2012, p. 152; Coppola 2015, par. 3.28, *Lamps*.

[46] Sono oggi disponibili e largamente condivisi dai diversi software di *rendering* 3D, molteplici tipologie di algoritmi per la gestione dell'illuminazione, come il *raytrace* o il *raycasting*, che pur all'interno di differenze sostanziali, riproducono i percorsi e i relativi effetti prodotti da una sorgente luminosa, nei confronti dell'ambiente circostante. Allo stesso modo algoritmi come il *Radiosity*, il *Photon mapping*, o *l'ambiental occlusion*, consentono di gestire l'illuminazione indiretta. Limoncelli 2012, pp. 148-149; 154-156.

punti di vista che, nei programmi di modellazione e *rendering*, coincidono con quelle di camere da presa "virtuali" capaci di simulare le caratteristiche di apparecchiature reali.

La risoluzione dei complessi calcoli matematici necessari per ottenere l'immagine finale vengono svolti attraverso motori di *rendering*, disponibili sia come software che come hardware implementato, con differenti modalità, all'interno delle moderne schede grafiche[47].

Tenendo presente quanto fin qui esposto, diventa possibile confrontare un modello 3D con altre tipologie di immagini iconiche, a partire dalle rappresentazioni prospettiche o dai modelli materici, considerate, come detto sopra, le due tipologie di immagini iconiche più diffuse per la rappresentazione dei beni culturali. Un modello 3D nella sua duplice natura di superficie o di solido, può racchiudere entrambe le caratteristiche che contraddistinguono, singolarmente, rappresentazioni prospettiche e modelli materici. Inoltre a differenza della staticità del punto di vista offerto da una rappresentazione prospettica, un modello 3D offre la possibilità di una gestione dinamica del punto di vista. La possibilità di attribuire *texture* di qualità fotografica alle superfici di un modello ne rende inoltre estremamente realistico l'effetto visivo, a cui si possono aggiungere qualità spaziale e dimensionali legate alle superfici e alle volumetrie. Ciò se, com'è stato notato[48], richiede certamente lo sviluppo e l'adozione di convenzioni e logiche simbolico-interpretative nuove rispetto a quelle tradizionali, non diminuisce il valore comunicativo insito nei moderni oggetti digitali tridimensionali, la cui elevata iconicità, come detto, si accompagna a qualità e quantità elevate di informazioni veicolate.

La possibilità, insita in un modello 3D, dell'applicazione di logiche di suddivisione o di aggregazione di parti singole, legate insieme da stretti rapporti topologici, apre inoltre importanti prospettive, che sono state utilizzate negli ultimi anni per la creazione di modelli 3D semantici, in cui l'informazione non è contenuta unicamente nell'oggetto visto nel suo complesso e derivata dalle sue caratteristiche morfologiche o dalla resa delle sue superfici, ma anche e soprattutto dalla giustapposizione di parti, ciascuna contenente informazioni peculiari. L'arricchimento semantico, ottenuto attraverso strategie di granularità e una stratificazione multilivello delle informazioni, aumenta in maniera esponenziale le capacità comunicative di un modello 3D.

L'aumento di complessità però non genera ricadute negative in termini di efficienza nel recupero delle informazioni d'interesse, poiché ai vantaggi assicurati dall'alta iconicità del modello, si aggiunge l'aumento esponenziale dei possibili criteri di ricerca che, oltre ad indici direttamente deducibili dagli attributi insiti nei dati memorizzati, rendono possibile l'applicazione di logiche di tipo strettamente topologico, derivate dai reciproci rapporti spaziali fra i singoli elementi, ad analisi morfologiche, favorite anche dalla diffusione di potenti algoritmi capaci di operare con i medesimi criteri sul riconoscimento delle immagini. La stessa caratterizza-

[47] Limoncelli 2012, p. 158.
[48] Maldonado 1992, pp. 61-67.

zione cromatica delle superfici, espressione delle peculiarità materiche, può costituire un criterio di analisi e recupero di informazioni.

I vantaggi della realizzazione e dell'utilizzo di modelli 3D semantizzati, sebbene siano già da tempo evidenti, solo negli ultimi anni hanno determinato lo sviluppo di applicazioni capaci di sfruttarne in modo adeguato il potenziale informativo. Uno dei settori che ha tratto i maggiori benefici dalla modellazione semantica di oggetti tridimensionali è stato certamente quello edilizio, dove lo sviluppo di strumenti e procedure BIM, *Building Infomation Modeling*, ha raggiunto un livello di maturità tale da aver prodotto non solo *standard* nei formati di interscambio dei dati, ma aver generato una vera e propria rivoluzione, modificando aspetti salienti di procedure e metodologie di lavoro da lungo tempo affermate.

L'applicazione di metodologie BIM in campo edilizio ha determinato la razionalizzazione e l'efficienza in tutte le fasi che dalla progettazione, giungono alla realizzazione dell'opera finita e alla sua manutenzione nel tempo. Tale risultato deriva dalla possibilità offerta dagli strumenti BIM, al cui fondo risiede una piattaforma di lavoro condivisa strutturata su una modellazione parametrica e su logiche di attribuzione semantica ad oggetti digitali organizzati in famiglie e librerie tipologiche. I vantaggi derivati dall'applicazione di metodologie BIM in cantieri edilizi di un certo impegno, dove le attività di molteplici professionalità devono essere coordinate e costantemente orientate verso uno specifico obiettivo, si sono rivelate estremamente importanti, consentendo un notevole risparmio di tempo e di risorse[49].

Le potenzialità dell'estensione delle metodologie BIM alla conoscenza, gestione, tutela e valorizzazione del patrimonio culturale non hanno mancato negli ultimi anni di dar vita a diverse esperienze, che hanno esplorato le possibilità, i vantaggi e i limiti dell'utilizzo di strumenti nati per scopi differenti rispetto a quelli ai quali s'intendeva applicarli. I risultati conseguiti si sono mostrati incoraggianti, tanto che oggi l'HBIM, *Heritage Building Information Modeling* l'applicazione delle logiche BIM al patrimonio culturale, sta divenendo una pratica sempre più diffusa, stimolando la creazione di di metodologie, pratiche e strumenti appositamente progettati per la formalizzazione e gestione di dati relativi al patrimonio culturale.

Lo sviluppo di strumenti BIM rappresenta solo un esempio, certamente fra i più recenti e promettenti, delle potenzialità insite nell'utilizzo di modelli 3D semantizzati come sistema informativo applicabile ad un ampio spettro di esigenze legate al patrimonio culturale. Si tratta di un ambito in gran parte an-

[49] La recente emanazione del Decreto legge 560 del 01/12/2017 sancisce «*le modalità e i tempi di progressiva introduzione, da parte delle stazioni appaltanti, delle amministrazioni concedenti e degli operatori economici, dell'obbligatorietà dei metodi e degli strumenti elettronici specifici, quali quelli di modellazione per l'edilizia e per le infrastrutture, nelle fasi di progettazione, costruzione e gestione delle opere e relative verifiche*», può rappresentare una tappa importante per la definizione di metodologie comuni e condivise fra pubbliche amministrazioni, enti di tutela, professionisti e comunità in vista della creazione di innovativi e sempre più efficienti strumenti di previsione e programmazione urbana.

cora da esplorare in tutte le sue implicazioni e potenzialità, dove molteplici sono le limitazioni che devono essere superati, sui quali occorre a breve soffermarsi più distesamente.

4.5 Dal virtuale al reale

Si è già detto come esista nell'opinione comune un legame molto stretto fra modelli 3D e realtà virtuale che, aldilà dell'apparente semplicità, nasconde molteplici implicazioni legate a opposti significati attribuibili all'aggettivo "virtuale", su cui è opportuno soffermarsi a riflettere. Ciò si rivela particolarmente utile per porre nella giusta prospettiva il valore e le funzioni dei modelli 3D, che in tale ambito vengono più o meno esplicitamente ricondotti.

Si è fatto cenno alla necessità di collocare un oggetto 3D all'interno di uno spazio tridimensionale per poterne apprezzare le capacità mimetiche e il realismo[50]. Tale spazio, coincidente con l'area di lavoro all'interno di un qualsiasi software di modellazione 3D, eredita dal mondo fisico alcune caratteristiche, come un piano di posa e uno di fondo, entrambi racchiusi da una sfera celeste. Ma i legami fra spazio reale e spazio virtuale non si limitano a tale semplice trasposizione di caratteristiche, poiché all'interno della dimensione virtuale vengono simulati diversi fenomeni fisici, come quelli ottici, connessi alla diffusione, riflessione e rifrazione della luce generata da sorgenti opportunamente posizionate, o le proprietà e i comportamenti di differenti stati della materia, che attribuiti al singolo oggetto, ne determinano la natura, le caratteristiche e la risposta a sollecitazioni dello spazio circostante.

Tale dimensione virtuale esprime al massimo grado le proprie potenzialità quando, valicati i limiti del semplice spazio di lavoro, viene impiegata per la simulazione di un contesto reale. Sfruttando i risultati, in termini di realismo, derivati dai processi di *rendering* e grazie ad appositi sistemi di fruizione dinamica in *real time*, uno spazio virtuale può, in tal modo, diventare cornice e contesto di esperienze non solo estremamente realistiche, ma anche molto intense, in virtù dell'alto grado di coinvolgimento generato a livello multisensoriale da specifici ausili di amplificazione percettiva e d'interazione, quali lenti, caschi, guanti, ormai di comune impiego nell'ambito della *Virtual Reality*[51].

È sul ruolo da attribuire a tale dimensione che si sono registrate opinioni nettamente contrastanti. Una posizione apparentemente improntata a ragionevolezza e più vicina al senso comune interpreta l'illusione che caratterizzerebbe tale esperienza, fatta per gli scopi più disparati, che vanno dal semplice svago videoludico, all'interesse dettato da motivi culturali o professionali, in senso nettamente positivo. In tali circostanze, l'utente non solo è pienamente consapevole del carattere illusorio di ciò che sta fruendo, ma è pienamente e consciamente disposto ad attribuirgli un valore tanto più elevato, quanto maggiore è la capacità di mimesi reali-

[50] V. *supra*, p. 104.

[51] La realtà virtuale, intesa in tale prospettiva, si caratterizza per l'inclusività, l'interattività, la tridimensionalità e il movimento in tempo reale Forte 2006, p. 34.

stica, che tale dimensione possiede nei confronti del contesto riprodotto, che può essere realmente esistente, anche se lontano nello spazio e nel tempo, o totalmente inventato, anche se con caratteri di estrema verosimiglianza. Al fondo di tale posizione vi è quindi un'attribuzione di valore nei confronti dell'esperienza derivata da una dimensione virtuale, che non è sminuita dalla mancanza di realtà e consistenza di ciò che viene esperito.

Agli antipodi si colloca invece la posizione di chi attribuisce alla dimensione virtuale un carattere reale. Le maggiori difficoltà logiche, che contrastano evidentemente con il senso comune, insite in tale posizione richiederebbero un'analisi circostanziata e approfondita, che consenta di apprezzare dietro l'apparente illogicità di questa posizione, almeno le basi teoriche su cui essa si fonda, prima di un suo rifiuto. Non è questa certamente la sede per condurre una tale disamina, basti semplicemente osservare come al fondo di molteplici posizioni, dai presupposti teorici anche molto differenti, risieda un comune e stretto legame con le potenzialità dell'*information and comunication technologies*. Con tale accenno, ci si riferisce qui, non solo alla capacità quasi demiurgica che l'informatica possiede nel ricreare un contesto reale con tale grado di perfezione che diventa possibile farne esperienza come qualsiasi altro contesto reale, ma anche nell'aver chiaramente mostrato il ruolo centrale che informazione riveste nel mondo reale. Infatti, se molte delle teorie che vedono nel virtuale una dimensione parallela a quella comunemente considerata come reale si basano necessariamente su un tentativo di accorciare le distanze fra la materialità della realtà e l'astrattezza della virtualità, ciò viene fatto in nome dell'informazione, la cui presenza pervasiva sembra potersi scorgere al fondo di ogni manifestazione materiale, come dimostra chiaramente un qualsiasi processo di digitalizzazione con la netta separazione che essa genera fra informazione e supporto materiale[52].

Non è casuale, quindi, come il rapporto fra corporeità e sensibilità, informazione e conoscenza, sia alla base di due delle manifestazioni culturali che in forma maggiormente organica e matura hanno espresso teorie che nella critica alla realtà esistente, così come essa appare ai nostri sensi, hanno il loro fulcro: la cibernetica e la filosofia digitale.

Si tratta, in entrambi i casi, di manifestazioni culturali estremamente complesse per la vastità e l'eterogeneità degli ambiti culturali coinvolti, che spaziano dalle scienze esatte a quelle sociali: dalla filosofia, alla gnoseologica, dall'epistemologia, alla semiotica, dalla matematica alla psicologia.

Certe aspirazioni ad una fuga dal reale, propugnate da alcuni esponenti della cibernetica, fanno appello ad una sensorialità liberatasi della propria corporeità grazie alle potenzialità concesse dalle simulazioni informatiche, mentre la filosofia digitale ipotizza alla base del reale l'informazione, oggetto di un unico processo computazionale.

Come spesso accade nell'ambito di movimenti di pensiero estremamente

[52] Per alcune riflessioni ed esempi sui processi di dematerializzazione v. Longo 1998, in particolare pp. 95-102; Negroponte 1999; Maldonado 1992, pp. 79-84.

complessi, occorre andare aldilà di teorie singolarmente espresse, sforzandosi di cogliere anche in quelle posizioni che si mostrano meno probabili, le motivazioni plausibili che ne stanno alla base. Così aldilà di teorie universali alla cibernetica bisogna riconoscere il merito di aver espresso l'esigenza di una migliore comprensione dei processi cognitivi umani e dei cambiamenti che su di essa stanno esercitando le nuove tecnologie e gli strumenti informatici[53]. Poco importa se tale esigenza venga avvertita nell'ambito di studi rivolti all'intelligenza artificiale o allo sviluppo di reti neurali. Allo stesso modo, il ricorso agli automi cellulari come dimostrazione di un'evoluzione del mondo basata su regole semplici avanzata dalla filosofia digitale è estremamente affascinante.

Aldilà della netta contrapposizione fra "virtualità" come "illusione" o come "realtà alternativa", ciò che qui preme è riflettere sulle conseguenze che tali opposti punti di vista riverberano sulla natura e il modo di intendere l'oggetto digitale[54].

Anche riguardo ad esso, sarebbe possibile rintracciare esempi volti a sostenere la tesi opposta di una di una natura totalmente digitale e di un'esistenza reale. Chi si pronuncia sulla realtà e la materialità di un oggetto digitale, specie se tridimensionale, lo fa spesso avendo ben presenti le possibilità oggi offerte dalla prototipazione tramite stampe 3D, che costituiscono certamente uno degli esempi più concreti di come le nuove tecnologie abbiano assottigliato il confine fra materialità e immaterialità[55].

Aldilà delle questioni, certamente affascinanti, relative alla natura dell'oggetto digitale, ciò su cui occorre riflettere riguarda la sua funzione comunicativa e le nuove sfide che da essa derivano. Si è già detto come, solo a patto di profonde revisioni metodologiche, la semiotica abbia intrapreso un processo di analisi volta alla definizione delle peculiarità dell'immagine come strumento di comunicazione[56]. La questione, aldilà del modo con cui consideriamo la natura dell'oggetto digitale, si ripresenta ulteriormente complicata, perché richiede di trovare una risposta ad un quesito non bana-

[53] Il termine "*Cibernetica*", italianizzazione del termine *Cybernauta*, è connesso con l'inglese *Cyberspace* utilizzato nel romanzo *Neuromancer*, edito da William Gibson del 1984. Il termine è da connettere con «*quel gruppo, molto attivo specialmente nelle scuole di architettura e arte negli Stati Uniti e Canada, che hanno fatto del cosiddetto Cyberspace il nucleo teorico di un programma di vasta portata. Un programma che si presenta come una taumaturgica poetica (ma anche come un'estetica, un'etica, una teologia, un'antropologia, una filosofia, una scienza e perfino una politica) della nuova età dell'ambiente interattivo virtuale generato dal computer*». Maldonado 1992, pp. 54-55.

[54] «*Sappiamo invece che il mondo digitale non è affatto immateriale e che numeri, immagini, suoni e quant'altro viene prodotto su un computer sono parte di un nuovo tipo di materialità, che ha una sua consistenza fisica e un suo dominio di appartenenza e di circolazione. Proprio come gli oggetti reali, i modelli tridimensionali esprimono una spazialità misurabile, esprimono valori fisici e cromatici, si possono replicare all'infinito o trasformare in oggetti 'tangibili' attraverso le tecniche di prototipazione, ma quel che più importa, essi esistono*». Gabellone 2010, p. 497.

[55] Quale migliore esempio di un processo di dematerializzazione di una riflessione sulle potenzialità oggi offerte da un rilievo tridimensionale di un oggetto, che appena ultimato e convertito in un formato opportuno, può essere inviato tramite internet e quasi in tempo reale riprodotto da un utente a prescindere dalla distanza in cui egli si trovi?

[56] V. *supra* p. 94.

le: può una rappresentazione digitale prodotta da un computer e percepita da un utente all'interno di uno spazio virtuale essere equiparata dal punto di vista conoscitivo, ad una percezione di un oggetto reale?

Sebbene ormai siano in pochi a sostenerne l'incongruità e una sostanziale differenza rispetto ad una percezione reale, e le rappresentazioni digitali all'interno di ambienti virtuali siano diffusamente impiegati per una vasta e variegata tipologia di utilizzi che, per rimanere nel solo campo del patrimonio culturale, spaziano dal supporto conoscitivo, alla tutela e alla valorizzazione, fornendo un prezioso supporto a tutte le attività di conoscenza, restauro, manutenzione, progettazione e pianificazione, la questione della natura e delle peculiarità comunicative insite in un modello digitale permane ed esige una vera e propria revisione epistemologica.

«*Non esiste metodologia senza una teoria dell'informazione, non esiste un valore cognitivo assoluto della tecnologia senza un'adeguata riflessione epistemologica*»[57], avverte con estrema, ma purtroppo solitaria, lucidità Maurizio Forte, che a tale problema, da una prospettiva cibernetica e facendo tesoro sia del paradigma batersoniano[58] della conoscenza ha dedicato notevoli sforzi[59].

Ben lungi dal voler qui avanzare una soluzione al dibattuto problema della natura e consistenza del virtuale o della peculiare realtà di un oggetto digitale, si conclude questa rapida disamina ricordando l'opinione espressa riguardo al virtuale da Pierre Levy[60], riportata nel famoso, e ampiamente citato, saggio dedicato dal filosofo francese all'argomento. Si fa ciò, appunto, non con l'intento di aggiungere un punto di vista inedito, ma nella convinzione che la particolare prospettiva da cui il virtuale viene considerato abbia segnato, aldilà delle opposte opinioni, una tappa importante nella definizione del ruolo e della funzione del virtuale.

«*Il virtuale* […] *non si oppone al reale ma all'attuale. Contrariamente al possibile, statico e già costituito, il virtuale è come il complesso problematico, il nodo di tendenze e di forze che accompagna una situazione, un evento, un oggetto o un'entità qualsiasi, e che richiede un processo di trasformazione: l'attualizzazione*»[61]. Con tali parole, Pierre Levy, dopo aver richiamato il virtuale al suo senso etimologico di ciò che esiste in potenza e non in atto, distingue fra "possibile" e "virtuale", fra "attuale" e "reale".

Il possibile, secondo Levy, indica una condizione di fissità e di stabilità, propria di qualcosa già pienamente definito in tutte le sue caratteristiche, a cui manca solamente l'esistenza reale. Il virtuale, a differenza del possibile, non possiede uno stato ben definito, ma equivale piuttosto ad un nodo problematico, che deve definirsi, scegliendo fra differenti alternative e sulla base di molteplici condizionamenti. Ciò avviene con un processo di attualizzazione, che è «*ben altro dal conferimento di realtà ad un possibile o dalla scelta all'interno di un insieme predeterminato:* [l'attualizzazione è] *una produzione di qualità nuove,*

[57] Forte 2006, p.30.

[58] Bateson 1972 ; Bateson 1979.

[59] Gurdazzoli - Forte 1992; Forte - Beltrami 2000; Forte 2003; Forte 2004a; Forte 2004b; Forte 2006 .

[60] Levy 1997.

[61] Levy 1997, p. 6.

una trasformazione delle idee, un vero e proprio divenire che di rimando alimenta il virtuale stesso»[62].

Una realtà virtuale, con gli oggetti di cui è composta, può in tale prospettiva assumere nuovi significati e funzioni, che si aggiungono senza entrarne in conflitto, ma amplificandone il valore, al potenziale informativo che rappresenta la sua più importante funzione. Una rappresentazione virtuale equivarrebbe, quindi, alla risoluzione di un problema reale posto in un ben determinato contesto spazio-temporale. Una risposta la cui indubbia utilità nei confronti del reale rende superflua qualsiasi questione legata alla sua illusorietà o irrealtà.

[62] Levy 1997, p. 7.

Capitolo V

BANCHE DATI

«I resti archeologici non trasmettono in linea generale un messaggio diretto;
La loro interpretazione richiede un complesso percorso di indagine
scandito dalle tappe della individuazione, della raccolta, della descrizione e dell'organizzazione dei dati,
che possono garantire il raggiungimento di un'interpretazione storicamente validata»

Manacorda 2002

5.1 Dati, informazione e conoscenza

Si era concluso da pochi anni il secondo conflitto mondiale, quando l'economista austriaco Fritz Machlup, emigrato negli Stati Uniti, iniziò i suoi studi dedicati al valore economico della conoscenza, che agli inizi degli anni sessanta confluirono nell'opera *The production and distribution of knowledge in the United States*[1], all'interno della quale trovò una prima formulazione l'espressione "*società dell'informazione*", destinata ad avere enorme successo negli anni a venire tanto da essere ripresa e sviluppata da numerosi studiosi[2].

Quanto tali previsioni fossero corrette sta a dimostrarlo l'enorme sviluppo che hanno avuto, dal secondo dopoguerra ad oggi, sia l'informatica che le telecomunicazioni, le quali non esisterebbero se l'informazione non rivestisse un ruolo cruciale, tale da richiedere lo sviluppo di apposite tecnologie per la sua produzione, conservazione e trasmissione.

Tuttavia il legame con l'informatica appena richiamato non deve trarre in inganno, spingendo a ritenere che l'informazione sia in qualche modo riconducibile e totalmente assimilabile alla codifica digitale che oggi ne rappresenta di certo la forma più diffusa e pervasiva, stando al fondo di gran parte delle informazioni che vengono scambiate all'interno della società contemporanea. L'informazione precede l'avvento dell'informatica, come precede la scrittura e qualsiasi altro mezzo inventato dall'uomo nel corso della sua evoluzione storica, per dare forma ed espressione concreta alla propria conoscenza della realtà esterna e di quella interiore.

Essa riveste un ruolo fondamentale in quanto è ciò che guida l'agire umano nella sua costante azione di modifica della realtà esterna per il soddisfacimento dei propri bisogni, ma è al con-

[1] Machlup 1962.

[2] Si vedano ad esempio gli studi dedicati da Daniel Bell alla Società Post-Industriale e al ruolo riconosciuto dallo studioso all'informazione, strettamente connessa al potere. V. Bell 1973.

tempo ciò che consente lo sviluppo di una cultura e l'instaurarsi di rapporti sociali.

L'informazione sta quindi alla base della conoscenza, permettendone l'acquisizione, la crescita e la condivisione.

Tuttavia quando parliamo di informazioni ci riferiamo al prodotto di un complesso processo, che si fonda sulla quantità e qualità di dati disponibili, sulle capacità di analisi del singolo individuo e della comunità con cui esso si rapporta, con gli strumenti a disposizione per l'analisi, con le finalità che si intende perseguire.

Qualsiasi dato, quindi, deve essere sempre distinto dalle informazioni che permette di dedurre. Queste dipendono da una molteplicità di elementi strettamente connessi alle capacità, agli interessi, alla formazione culturale, all'estrazione sociale di chi li esamina, il quale non può non risentire in egual modo dei condizionamenti e del contesto culturale e sociale in cui si trova a vivere ed agire. Se ne deduce, che il passaggio dal dato all'informazione non è un processo univoco, in quanto a partire da un singolo dato o da un gruppo interrelato di dati, sul piano teorico, si potrebbero ottenere tante informazioni quanti sono i soggetti responsabili del processo di analisi (Fig. 5.1).

Al contempo un qualsiasi dato può, quindi, essere considerato alla stregua di un vero e proprio "generatore" di informazioni, che scaturiscono dalle interrelazioni che è possibile instaurare fra i dati e il soggetto che li analizza.

5.2 Basi di dati

Se la generazione delle informazioni è strettamente dipendente dalla quantità e dalla qualità dei dati disponibili e l'utilizzo di un dato non ne esaurisce il potenziale informativo, assume un'importanza cruciale ai fini della generazione di informazione e della relativa conoscenza poter disporre di strumenti adeguati per archiviare, accrescere, recuperare e condividere dati, nonché di adeguate strategie di analisi basate sulla possibilità di instaurare legami reciproci fra dati, contesti e utilizzatori.

Se un qualsiasi elaboratore elettronico possiede grandi capacità di archiviazione ed elevate potenzialità di calcolo, queste possono essere proficuamente impiegate per generare informazioni a partire da *dataset* o collezioni di dati, purché si disponga di appositi *software* deputati a tale specifica finalità.

Questo ruolo è svolto dai *DataBase Management Systems* (DBMS) software che permettono di creare e gestire banche dati, soddisfacendo tutte le necessità di archiviazione, recupero, aggiornamento, analisi e condivisione. La complessità delle funzioni svolte dai moderni DBMS spiega perché spesso si è reputato riduttivo parlare per tale categoria di *software* di semplici "applicativi", termine con il quale si indica un qualsiasi programma che, a differenza del Sistema Operativo deputato al corretto funzionamento dei dispositivi *hardware* e *software* di un computer, sono sviluppati per svolgere un ben preciso compito.

Prima di riflettere sulle specifiche peculiarità che rendono un DBMS un potente "generatore" di conoscenza, occorre soffermarsi sulle caratteristiche insite nei dati, che rendono proficuo l'impiego di applicativi informatici per

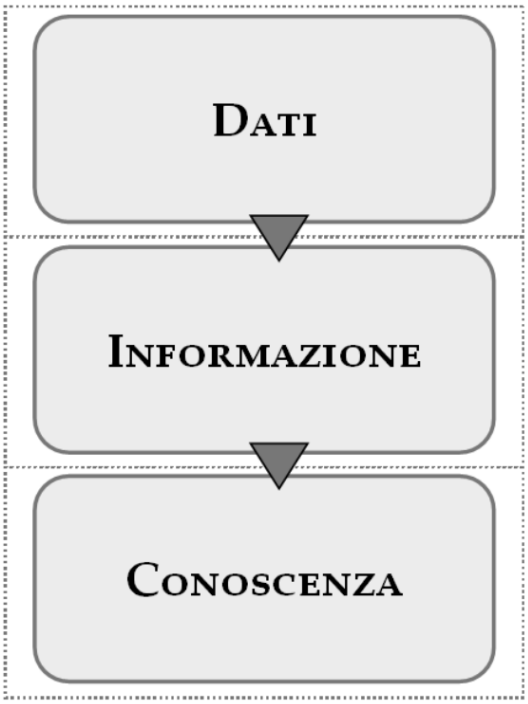


Fig. 5.1. Dati, informazioni, conoscenza.

la loro gestione[3].

Le banche dati gestite tramite DBMS sono generalmente "grandi" o comunque tali che diventa di fatto estremamente dispendiosa in termini di tempo e di risorse, quando non impossibile, la loro archiviazione, il recupero e la gestione con strumenti di tipo tradizionale o tramite mezzi puramente manuali[4].

Le banche dati gestite tramite DBMS sono generalmente "condivise", ovvero oggetto d'interesse concomitante di più soggetti, il che rende necessario predisporre apposite strategie che consentano accessi simultanei a più utenti, le cui azioni sulla banca dati possono essere gestite e governate attraverso una logica di privilegi, che abilitano determinate funzioni come, ad esempio, l'aggiornamento, potendone al contempo limitare altre, come l'accesso all'intera banca dati.

I complessi di dati oggetto di gestione da parte di un DBMS sono infine "persistenti", in quanto, rivestendo un

[3] Atzeni *et alii* 2014, pp. 4-5.

[4] La questione della quantità di dati sta assumendo un rilievo sempre maggiore in stretta dipendenza con l'aumento delle capacità di archiviazione e delle potenzialità di calcolo dei moderni elaboratori elettronici, a cui fa riscontro un parallelo incremento dei dati prodotti in molteplici ambiti della ricerca, grazie all'impiego di strumenti e metodologie di analisi tipiche delle scienze c.d. "scienze esatte". Da ciò non è esente neppure la ricerca applicata al patrimonio culturale, che con l'impiego sempre più diffuso di strumenti di rilievo di ultima generazione o grazie all'utilizzo dei dati derivati dall'esecuzione di analisi archeometriche (solo per limitarsi a due aspetti di un insieme complesso di interscambi disciplinari) deve confrontarsi anch'essa con la disponibilità di quantità di dati neppure immaginabili qualche decennio addietro. La stessa ricerca archeologica, inoltre, in virtù della progressiva estensione dell'ambito d'indagine, sia sotto l'aspetto cronologico, sia dal punto di vista della tipologia dei manufatti o degli ecofatti esaminati, ampliati fino a comprendere molteplici manifestazioni della "cultura materiale" delle società del passato o delle condizioni ambientali in cui si è di volta in volta trovata ad operare, deve sempre più confrontarsi con grandi quantità di dati. Come quest'ultimo aspetto rivesta un ruolo cruciale, richiedendo apposite strategie e metodologie di gestione, è rivelato dal fenomeno dei "*Big Data*", con il quale, seppur in mancanza di una definizione universalmente accettata, condizione tipica dei processi in atto e in costante divenire, s'intende il progressivo aumento della quantità di dati prodotti, che va misurato sulle capacità di gestione dei sistemi informatici attuali. "*Big data*" stando al report pubblicato dal McKinsey Global Institute nel 2011 «*refers to datasets whose size is beyond the ability of typical database software tools to capture, store, manage, and analyze*». Manyika *et al.* 2011, p. 1. Il che equivale a dire che ci si trova di fronte a "*Big data*", quando la capacità dei moderni elaboratori elettronici di fornire risposte sulla base dei dati ricevuti eccede un tempo soddisfacente.

interesse che va ben al di là del singolo utilizzo, la loro durata deve essere assicurata nel tempo.

Se le banche dati che offrono vantaggi nell'utilizzo tramite software di gestione informatico hanno come caratteristiche fondamentali la "grandezza", la "condivisione" e la "persistenza", occorre parallelamente riflettere su quelli che possono essere i vantaggi derivati dalla loro gestione tramite DBMS. Quello che infatti generalmente si richiede ad un software di gestione di banche dati è che sia "affidabile", ovvero che metta al riparo dalla perdita accidentale di tutta o di una parte dei dati archiviati[5]. Da un DBMS si ci attende inoltre che garantisca la "riservatezza" dei dati archiviati, consentendo la consultazione solo a utenti autorizzati. I DBMS devono infine essere "efficienti" e "efficaci", intendendosi con il primo termine la capacità di svolgere le operazioni richieste in tempi adeguati, con il secondo il vantaggio derivato all'utente dall'impiego di un software per la gestione dei dati (Fig. 5.2).

A differenza degli altri applicativi, fortemente limitati ad un utilizzo per così dire "univoco" e "standardizzato", un software DBMS non è limitato ad un approccio unico ai dati che è chiamato a gestire. L'interrelazione, i modi in cui i dati vengono connessi, come detto in precedenza, è parte costitutiva del processo di generazione delle informazioni e della conoscenza. Il modo in cui i dati vengono organizzati tramite un software di gestione è pertanto estremamente variabile e intimamente connesso con la tipologia di dati raccolti, con le finalità, gli obiettivi e gli interessi degli utenti, con la qualità e la quantità dei dati da archiviare, con le specifiche strategie di archiviazione, accesso e condivisione.

Tali considerazioni rendono evidente come da una parte la medesima banca dati possa essere modellata e strutturata in modi estremamente differenti pur impiegando il medesimo *software*, dall'altra come dalla differente organizzazione e strutturazione dei dati dipenda l'informazione che ne può essere desunta. Per questo, nel caso di applicativi DBMS diventa possibile parlare di veri e propri "catalizzatori" di informazioni, strumenti necessari per lo sviluppo di conoscenze a partire dai dati raccolti.

Un *Database Management System* consente di ottenere ciò tramite un "modello di dati", che può essere definito come «*un insieme di concetti utilizzati per organizzare i dati di interesse e descriverne la struttura in modo che essa risulti comprensibile ad un elaboratore*»[6].

La stretta connessione che lega un DBMS alle necessità che stanno al fondo dello sviluppo stesso dell'informatica, ovvero la produzione di informazioni, ha comportato non solo che i software per la gestione dei dati siano fra gli applicativi che avendo accompagnato fin dalle origini lo sviluppo dell'informatica, possono oggi vantare un livello di maturità comune a pochi altri applicativi, ma ha determinato anche l'avvicendarsi di differenti "modelli di dati".

Il primo modello ad essere sviluppa-

[5] Ciò generalmente avviene tramite la creazione di copie di *backup* dei dati, ottenute tramite procedure programmate e svolte in maniera automatica dal *software* di gestione DBMS.

[6] Atzeni *et alii* 2014, p. 6.

Caratteristiche dei dati che rendono utile l'impiego di DBMS	
Grandezza	La "grandezza" è connessa con i costi e i tempi necessari per le procedure di archiviazione e gestione dei dati, nonché per la produzione di informazioni
Condivisione	La "condivisione" è connessa l'esistenza di molteplici interessi che spingono all'accesso e consultazione multiutente dei dati
Persistenza	La "persistenza" è connessa con il permanere nel tempo di un valore informativo di una collezione di di dati, che ne rende utile e vantaggiosa la conservazione.
Requisiti di un DBMS	
Affidabilità	Un DataBase Management System deve assicurare la conservazione dei dati contro i rischi di eventuali perdite accidentali.
Sicurezza	Un DataBase Management System deve assicurare la riservatezza dei dati
Efficienza	L'"efficienza" è rappresentata dal rapporto fra operazione richiesta e tempi necessari ad ottenere l'informazione desiderata.
Efficacia	L'"efficacia " è connessa con i vantaggi derivati dall'utilizzo di un DataBase Management System

Fig. 5.2. Caratteristiche dei dati che rendono utile l'impiego di DBMS e relativi vantaggi.

to, intorno agli anni sessanta del secolo scorso, è stato il modello "gerarchico"[7], che come si deduce facilmente dal nome, si basava su un'organizzazione gerarchica, dove ciascuno dato poteva condividere con gli altri un rapporto simile a quello esistente in natura fra un padre e i suoi figli. La relazione che in tal modo s'instaura fra i dati è riconducibile ad una ben precisa tipologia, definita "*uno a molti*" (I:N)[8]. Tale modello, com'è facile intuire, si adatta solamente ad una piccola porzione di dati, che per loro natura sono strutturati gerarchicamente secondo una disposizione ad albero, come appunto nel caso di un rapporto di parentela. Oltre ciò il modello gerarchico presentava altre forti limitazioni, richiedendo che la strutturazione logica dei dati avesse perfetta corrispondenza con la struttura fisica

[7] Atzeni *et alii* 2014, p. 6; Camagni-Nikolassy 2014, p. 15.

[8] Infatti un padre (I) può non avere figli (0), può averne uno (I) oppure molti (N). Viceversa un figlio (I) può avere un solo padre (I).

di memorizzazione all'interno dell'elaboratore. Ciò determinava un'estrema lentezza nelle fasi di ricerca e recupero delle informazioni[9] e uno schema rigido, difficilmente adattabile ad eventuali cambiamenti (Fig. 5.3).

Il modello "reticolare" nacque per offrire una risposta alle limitazioni presenti nel modello precedente, scarsamente applicabile alla formalizzazione di dati non strutturati naturalmente secondo un modello gerarchico, e per consentire la messa a punto di strumenti di ricerca più efficienti. In tale modello ogni nodo contenente i dati è parte di un grafo, costruito tramite connessioni che lo legano potenzialmente con tutti gli altri. Ciò equivale ad una relazione del tipo "*molti a molti*" (N:N)[10]. I vantaggi del modello reticolare sono legati ad una maggiore versatilità nella formalizzazione di dati che non hanno, per natura, una struttura gerarchica, e consente un sistema efficiente per il recupero delle informazioni, in quanto è possibile a partire da un nodo raggiungere tutti gli altri in modo diretto o con un numero limitato di passaggi. La maggiore limitazione risiede, come nel caso del precedente modello, in una stretta dipendenza del livello logico con quello fisico della memorizzazione permanente dei dati all'interno dell'elaboratore. Ogni relazione infatti deve essere creata tramite un sistema di "puntamento" ottenuto grazie a dei record che svolgono la funzione di connettori fra i nodi. La struttura rigida che ne deriva impedisce di apportare cambiamenti al sistema di connessioni, pena la ridefinizione dell'intero schema[11] (Fig. 5.4).

Il modello "relazionale" sviluppato negli anni settanta da Edgar F. Codd[12] si basa sulla teoria degli insiemi e usa i principi dell'algebra relazionale come mezzo per organizzare i dati, i quali prendono la forma di *record* a struttura fissa. Una relazione può pertanto essere rappresentata da una tabella in cui ogni *record* o *tupla* è costituito da una riga, mentre le colonne rappresentano gli attributi di ogni singolo *record.* Il modello prevede la possibilità di definire il tipo di dato che dovrà essere memorizzato (dato testuale, numerico intero, numerico decimale, ...) all'interno di ciascun record della tabella, che può far parte di tre differenti tipologie di relazione: "*uno a uno*" (I:I), "*uno a molti*" (I:N), "*molti a molti*" (N:N), sulla base di un sistema di chiavi primarie e di chiavi esterne ricavate a partire dai valori contenuti in alcuni campi dei *record* fra i quali si desidera instaurare la relazione. I vantaggi del modello relazionale consistono in un'ampia versatilità, applicabile alla modellazione di qualsiasi insieme di dati, e soprattutto nella completa indipendenza del modello logico, dallo schema fisico di strutturazione dei dati[13], con enormi vantaggi

[9] Il recupero di un'informazione in un database gerarchico, come in una vera e propria struttura ad albero, richiede, per giungere al dato d'interesse, di percorrere l'intero *iter* che dalla radice porta al ramo desiderato, attraverso tutti i rami intermedi.

[10] Infatti il nodo x (I) può non avere relazioni con nessun altro nodo (0); può essere in relazione con un solo altro nodo y (I) oppure con molti altri nodi y, z, … (N). Tale sistema di relazione è perfettamente biunivoco caratterizzando allo stesso modo tutti gli altri nodi y, z, … nei confronti di x.

[11] Atzeni *et alii* 2014, p. 6; Camagni-Nikolassy 2014, pp. 16-17.

[12] Codd 1970.

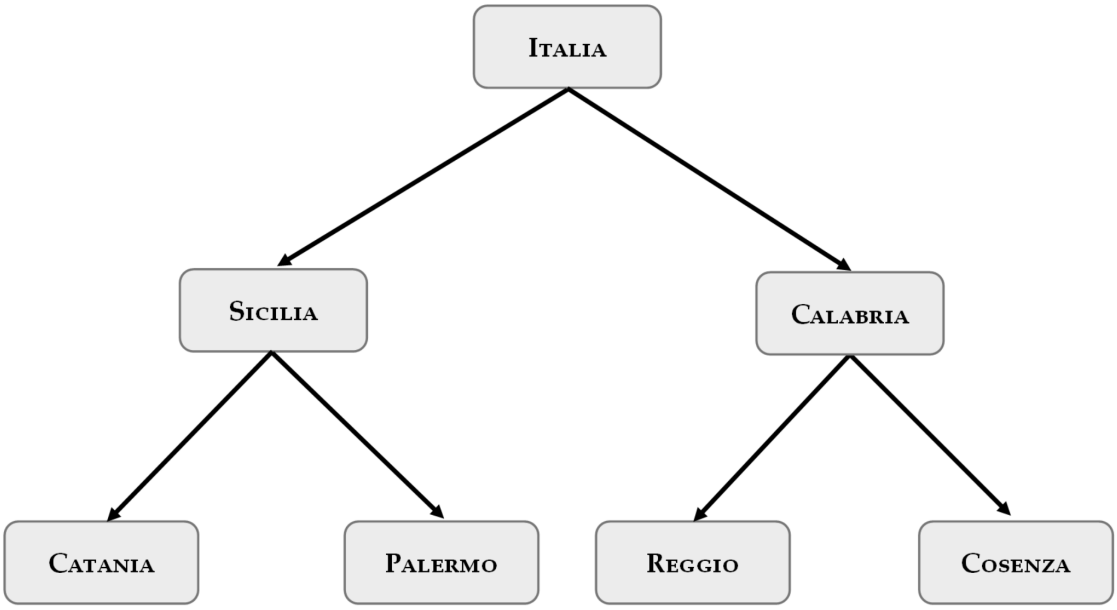


Fig. 5.3. Esempio di schema gerarchico.

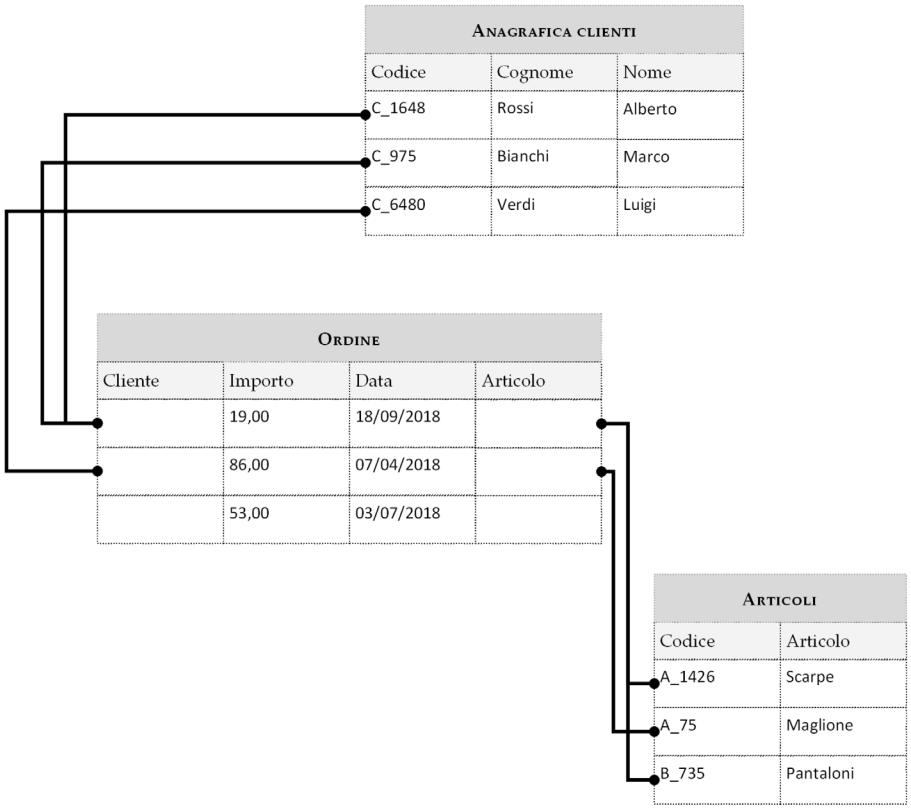


Fig. 5.4. Esempio di schema reticolare.

in termini di possibilità di modifica del modello al presentarsi di un'esigenza di adeguamento e nell'efficienza nel recupero delle informazioni che esso assicura[14] (Fig. 5.5). Tali vantaggi hanno determinato l'enorme diffusione del modello relazionale, che costituisce quello oggi maggiormente in uso.

L'aumento vertiginoso della quantità e della complessità delle collezioni di dati che devono essere gestiti e sottoposti ad analisi per la produzione di nuova conoscenza, insieme ad un panorama ampiamente variegato di strumenti e contesti in cui è possibile la fruizione di dati, all'interno del quale un ruolo sempre maggiore è rivestito da internet e dagli strumenti di accesso e condivisione delle informazioni che esso consente, hanno determinato una rivoluzione nelle strategie di recupero e di analisi dei dati, facendo emergere esigenze, non avvertite in precedenza.

Le collezioni di dati oggetto di strategie di archiviazione, analisi e condivisione dei risultati, sono oggi sempre più formati da dati multimediali, e presentano differenti livelli di strutturazione. Le logiche di accesso e condivisione di dati che internet mette oggi a disposizione di comunità sempre più vaste di utenti, richiedono di gestire altissimi volumi di operazioni di accesso ai dati, con bassa complessità di elaborazione a carico di dati a basso livello di strutturazione.

Tali esigenze hanno fatto sempre più emergere le criticità che l'utilizzo di database relazionali comportano in determinati contesti d'utilizzo, dov'è richiesta, ad esempio, la gestione unitaria di dati relativi ad un singolo oggetto, o dove il basso livello di strutturazione di un *dataset* non necessita di strutture di gestione particolarmente robuste e atte ad assicurarne la consistenza e l'integrità, essendo l'interesse rivolto principalmente ad alte prestazioni in termini di gestione[15].

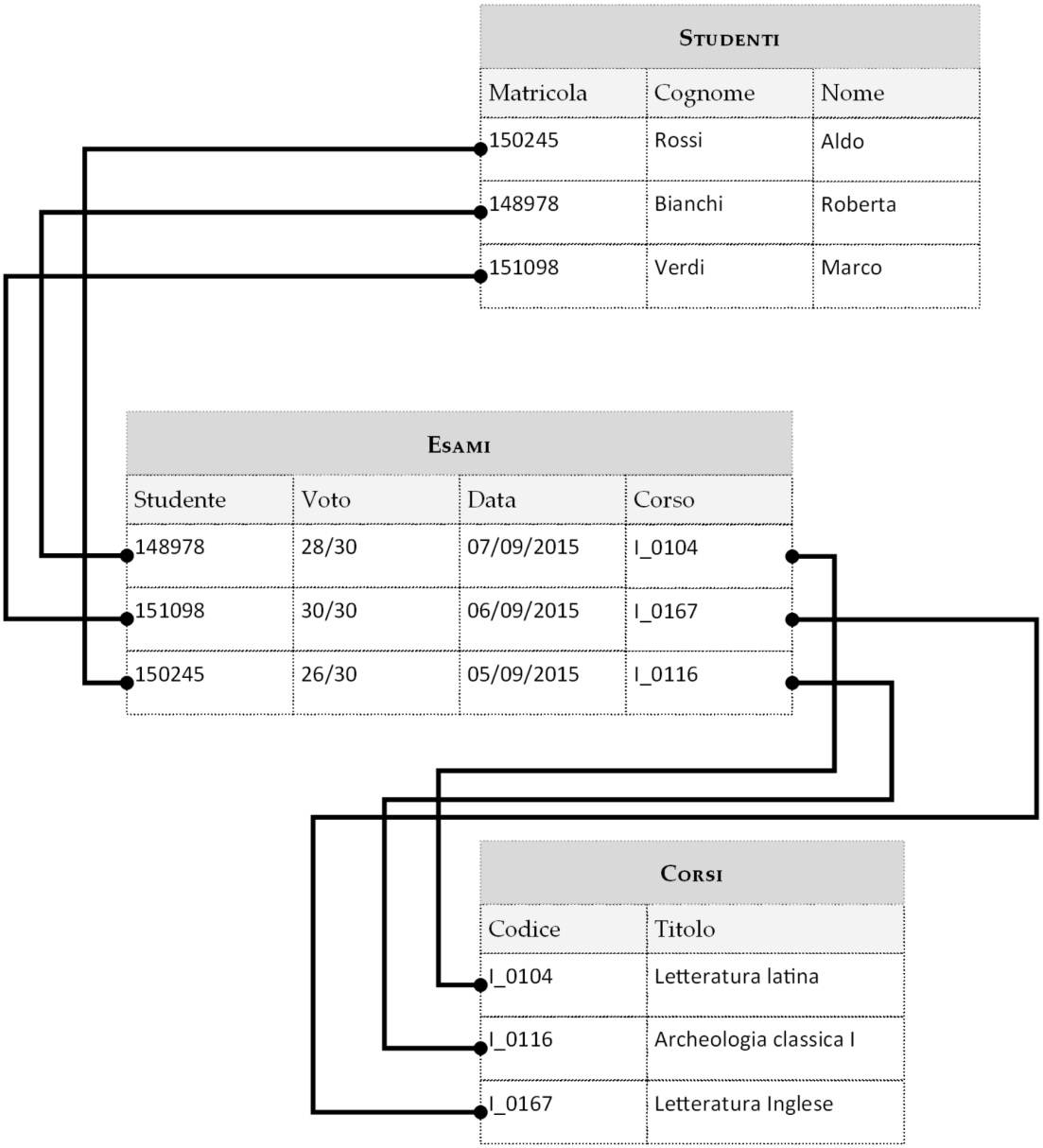
In tale contesto si collocano numerose tipologie di DBMS, caratterizzati dall'utilizzo di modelli di dati differenti rispetto al modello relazionale. Il modello "ad oggetti" deriva dai principi della omonima programmazione che, sebbene ampiamente diffusa a partire dal decennio precedente, fu applicata alla modellazione di software DBMS solo a partire dagli anni ottanta del secolo scorso[16]. I OODBMS, *Object Oriented DataBase Management System*, sono oggi ampiamente diffusi e si basano sul concetto di "oggetto", il quale oltre a svolgere il ruolo di contenitore di dati possiede anche la capacità in "incapsulare" al suo interno le regole che si intende applicare su di essi, consentendo quindi il massimo grado di separazione fra il livello logico e quello fisico, permettendo di operare qualsiasi modifica sul singolo oggetto o su una classe di oggetti, della quale quello desiderato fa parte e di cui eredita le rela-

[13] Ciò deriva dal fatto che le relazioni fra le tabelle non necessitano di una strutturazione fisica basata su un sistema di puntamenti, come nel modello reticolare, ma è ottenuta stabilendo delle semplici regole fra campi chiave primarie e le chiavi esterne, che si verificano sulla base della corrispondenza di valori dinamicamente immessi.

[14] Atzeni *et alii* 2014, p. 6; Camagni-Nikolassy 2014, p. 17-18.

[15] Atzeni *et alii* 2014, p. 481.

[16] Per I caratteri distintivi del modello a oggetti v. Atkinson *et alii* 1990; Atzeni *et alii* 2014, p. 7; Camagni-Nikolassy 2014, p. 18.



Studenti

Matricola	Cognome	Nome
150245	Rossi	Aldo
148978	Bianchi	Roberta
151098	Verdi	Marco

Esami

Studente	Voto	Data	Corso
148978	28/30	07/09/2015	I_0104
151098	30/30	06/09/2015	I_0167
150245	26/30	05/09/2015	I_0116

Corsi

Codice	Titolo
I_0104	Letteratura latina
I_0116	Archeologia classica I
I_0167	Letteratura Inglese

Fig. 5.5. Esempio di schema relazionale.

tive proprietà[17].

I modelli di dati fino ad ora descritti sono tutti accomunati dall'utilizzo dello *Structured Query Language* (SQL), come comune linguaggio d'interrogazione.

Alla fine degli anni novanta prese avvio lo sviluppo e l'utilizzo di modelli di dati che, proprio per la dichiarata volontà di porsi come alternativa al modello relazionale allora imperante, presero il nome di *NoSQL*[18]. Dietro tale etichetta oggi si raccolgono differenti tipologie di software di gestione di dati, accomunati dalla rinuncia al rigido formalismo dell'algebra relazionale in nome di modelli meno astratti e più aderenti alla natura del contesto da rappresentare e capaci, al contempo, offrire maggiore garanzia di flessibilità.

Occorre infine ricordare l'*eXtensible Markup Language* (XML), elaborato da W3C[19] e ormai divenuto uno standard universalmente riconosciuto. Sviluppato a partire dal 1998 come estensione dell'*Hypertext Markup Language* (HTML), l'uno e l'altro linguaggi marcatori appartenenti allo *Standard Generalized Markup Language* (SGML), l'XML può essere definito un "metalinguaggio" ovvero un linguaggio che può essere impiegato non solo per la strutturazione di nuove informazioni, ma anche per la definizione di nuovi linguaggi.

Costituendo al contempo un modello concettuale per la rappresentazione dei dati, un modello logico per la loro formalizzazione e un formato di memorizzazione[20], l'XML si mostra uno strumento estremamente versatile, che può farsi rientrare, non riducendosi naturalmente solo ad esso, fra i modelli di dati precedentemente definiti NoSQL. Le potenzialità e l'estrema versatilità dell'XML, specialmente nella gestione di dati a basso livello di strutturazione, ne giustifica il sempre maggiore utilizzo in svariati ambiti, alcuni dei quali strettamente connessi con la rappresentazione delle informazioni tramite la modellazione di spazi tridimensionali. Basti ricordare come l'XML sia alla base di molteplici formati di memorizzazione e interscambio di dati e modelli 3D, che dal singolo oggetto, come nel caso dei formati COLLADA[21] e IFC[22], si spinge fino a comprendere un territo-

[17] Uno dei vantaggi di un database ad oggetti rispetto ad uno basato sul modello relazionale risiede nella possibilità che il primo possiede nella gestione unitaria di dati legati ad un singolo oggetto reale o ad un singolo contesto, che nel modello relazionale sarebbe riparti in differenti entità e relazioni, sulla base della complessità che lo caratterizza.

[18] A differenza di quello che comunemente si crede l'acronimo "*NoSQL*", non va inteso come "*No–SQL*", ma bensì come "*Not Only SQL*" a ribadire la volontà di creare non un'opposizione, ma bensì un'alternativa capace di ovviare ad alcune limitazioni, che i modelli di dati basati su logiche SQL, presentano in determinati contesti di applicazione.

[19] Il W3C, *World Wide Web Consortium*, è un'organizzazione internazionale fondata da Tim Berners-Lee per la definizione degli standard per il Web.

[20] Costamagna 2012, p. 46.

[21] COLLADA, *COLLAborative Design Activity*, è un formato file *open source* per l'interscambio fra applicazioni 3D, scritto in XML e sviluppato dalla fondazione no-profit Khronos group inc.

[22] L'IFC, *Industry Fondation Classes*, è un formato file appositamente pensato per l'interscambio di dati relativi ai processi edilizi e originariamente rivolto all'industria delle costruzioni. Sviluppato da *BuildingSmart International*, un'associazione industriale no-profit, l'IFC si è largamente imposto come formato di interscambio fra software BIM, *Building Information Modelling*, la cui specifica, aperta e disponibile, è stata riconosciuta e registrata dalla ISO come norma internazionale ISO 16739:2013. L'IFC comprende vari formati di file, fra i quali anche un IFC-XML definito dalla ISO 10303-28 "STEP-XML".

rio o una intera città, nella molteplicità e complessità dei suoi aspetti, come accade con il linguaggio GML[23] e la sua estensione CiTyGML[24].

Tali caratteristiche, unite allo sviluppo di un apposito linguaggio di interrogazione di dati espressi in XML[25], rendono tale modello non solo una potente e reale alternativa ai database relazionali o ad oggetti, ma ne hanno determinato la diffusione come principale formato di interscambio di *dataset* fra DBMS differenti per modelli di dati adottati.

5.3 Progetto di una Banca dati

La progettazione di una banca dati costituisce un momento cruciale del passaggio da una raccolta di dati alla generazione d'informazione e conoscenza. Tale processo, pur fondandosi su strumenti e metodologie standardizzate e ampiamente condivise, costituisce un momento estremante creativo, aperto a molteplici possibilità, dipendenti dalle specifiche finalità per le quali i dati vengono analizzati.

Come un qualsiasi processo di ingegnerizzazione, inoltre, la progettazione di una banca dati, aldilà delle specifiche conoscenze tecniche necessarie alla sua strutturazione fisica, richiede la capacità di ridurre la complessità insita nella realtà oggetto di rappresentazione, formalizzandola in modelli semplificati capaci di ricondurre entro schemi di funzionamento generali la molteplicità delle manifestazioni materiali.

Lo sviluppo di una banca dati passa, quindi, attraverso alcune tappe fondamentali che vanno dallo studio della fattibilità, nell'ambito del quale si effettua una stima dei costi e dei tempi di realizzazione, all'analisi dei requisiti, in termini di proprietà e funzionalità che la banca dati deve possedere. Le informazioni raccolte costituiscono la base sulla quale avviare la fase di progettazione, che può essere distinta su due differenti livelli: la progettazione dei dati e la progettazione delle applicazioni che su di essi dovranno svolgere le operazioni richieste. Durante l'implementazione la banca dati viene fisicamente realizzata e sottoposta ad una successiva fase di collaudo, che si conclude con il completo funzionamento[26] (Fig. 5.6).

La progettazione a sua volta può

[23] Il *Geographic Markup Language* è sia un linguaggio di modellazione per sistemi geografici, sia un formato aperto di interscambio di dati 3D, sviluppato dall'*Open Geospatial Consortium* (OGC).

[24] CiTyGML, *City Geographic Markup Language,* è sia un modello di dati standardizzato ed orientato alla descrizione di organismi urbani, sia un formato aperto di interscambio di dati 3D. Originariamente sviluppato dai membri dello *Special Interest Group 3D* (SIG 3D), un network indipendente di esperti di modelli urbani 3D, formatosi in seno all'iniziativa *Geodata Infrastructure North-Rhine Westphalia*, CiTyGML è attualmente gestito dall'*Open Geospatial Consortium* (OGC).

[25] Il consorzio W3C ha avviato fin dal 1998 lo sviluppo di XQuery, un linguaggio di interrogazione per dati formalizzali secondo il modello XML, che è stato riconosciuto come standard nel 2007, nella versione 1.0, oggi giunta alla 3.1, rilasciata a marzo del 2017. Il linguaggio XQuery, richiede ed integra le funzionalità di altri due linguaggi sviluppati anch'essi per operare su formati di dati XML: XPath e XSL. Il primo permette la navigazione all'interno del documento XML, il secondo condivide con l'XML la capacità di manipolare dati, ma nell'ottica di una loro formattazione per una presentazione.

[26] Atzeni *et alii*. 2014, p. 164.

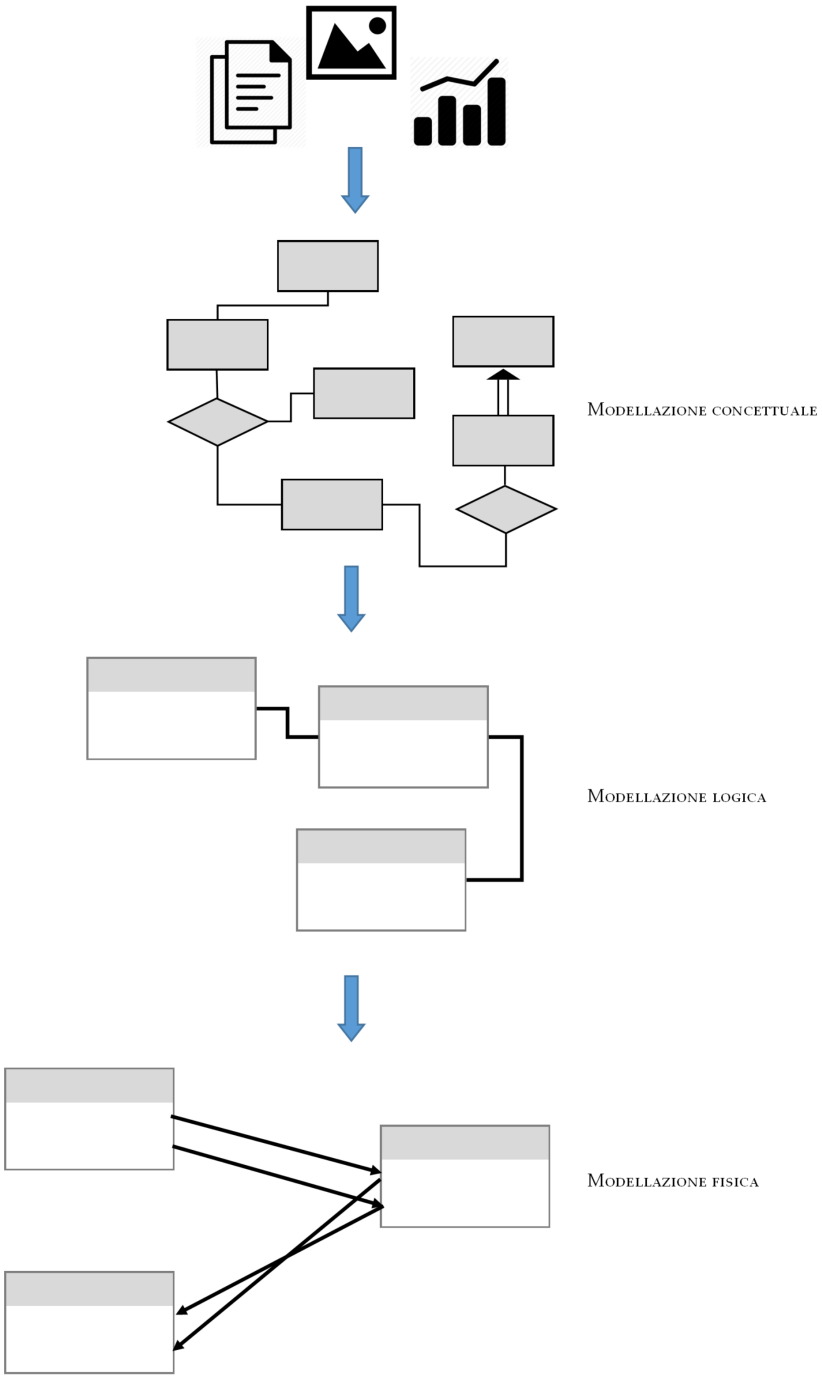


Fig. 5.6. Fasi della progettazione di una banca dati. Da Atzeni *et alii 2014, p.169, rielaborazione dell'autore.*

essere articolata, secondo un modello di sviluppo abbasta diffuso, in tre fasi, denominate: modellazione concettuale, logica e fisica. Durante la prima fase, la modellazione concettuale, la specifica realtà oggetto di formalizzazione viene esaminata e descritta con un alto livello di astrazione, ricorrendo ad uno schema concettuale che ne metta in rilievo la natura e le specifiche caratteristiche, a prescindere dal modello di dati che sarà utilizzato nella fase successiva per la progettazione logica. Tale processo può seguire due differenti strategie. L'una, *top-down*, giunge allo schema concettuale definitivo attraverso un progressivo affinamento di uno schema iniziale contenente un'articolazione estremamente generale della realtà da formalizzare. L'altra, *bottom-up*, prevede la scomposizione di uno schema generale in unità più piccole sulla base di specifiche caratteristiche della realtà da rappresentare, un progressivo affinamento di ciascuna di tali componenti e una re-integrazione finale delle singole parti in uno schema generale[27].

Aldilà di tali differenti strategie i processi di formalizzazione concettuale si avvalgono dell'utilizzo di modelli che favoriscano, attraverso l'impiego di specifici costrutti, il processo di astrazione, che deve concludersi con la realizzazione di uno schema concettuale che sia corretto, completo, leggibile e minimale[28]. Sebbene in questa fase, come detto, la realizzazione dello schema concettuale definitivo prescinda dal modello di dati che sarà successivamente impiegato per la sua realizzazione logica, i differenti modelli concettuali oggi largamente impiegati presentano specifiche peculiarità che si adattano maggiormente ad una traduzione verso l'uno o l'altro modello di dati.

Così il "Modello E-R" o "Modello Entità-Relazione" si adatta alla realizzazione di schemi concettuali che favoriscono una successiva traduzione verso il modello relazionale. I costrutti su cui si basa il modello E-R, veri e propri strumenti di formalizzazione concettuale sono: l'"Entità", con la quale viene descritto uno specifico oggetto della realtà da rappresentare, sia esso un essere vivente, un oggetto o una realtà astratta; la "Relazione", che rappresenta uno specifico legame logico fra due entità; gli "Attributi" che descrivono le proprietà fondamentali di un'entità o di una relazione, la "Cardinalità", che indica il numero di "occorrenze", ovvero di presenze, con cui un'entità può prendere parte ad una relazione[29]; gli

[27] Esistono inoltre due varianti che contaminano o sviluppano singole caratteristiche dei due modelli generali. Una strategia "*mista*", prevede infatti il ricorso a tecniche di segmentazione e approfondimento tipiche della strategia *bottom-up*, parallelamente alla redazione di schemi concettuali di massima comprendenti le caratteristiche generali della realtà da rappresentare. La strategia denominata "*inside-out*", utilizza la segmentazione del metodo *bottom-up* applicato ad una logica di progressivo approfondimento che si estende a "macchia d'olio" da un concetto o da una caratteristica a quella vicina. V. Atzeni *et alii* 2014, pp. 207-212.

[28] La "correttezza" di uno schema concettuale deriva dall'uso appropriato dei costrutti previsti dal modello adottato; la "completezza" esprime l'esaustività nell'integrazione, all'interno dello schema, di tutti i dati oggetto di formalizzazione e delle relative procedure; la "leggibilità" esprime il grado di semplicità nella lettura e comprensione dello schema; la "minimalità" si raggiunge eliminando le ridondanze e le ripetizioni di caratteristiche e specifiche dei dati. Atzeni *et alii* 2014, p. 212.

"Identificatori", che indicano particolari attributi di un'entità o una relazione capaci di fornire un'identificazione univoca; la "Generalizzazione" con cui si esprime una particolare relazione logica fra due o più entità, in cui è possibile distinguere un'entità padre, da alcune entità figlie, che ne rappresentano casi particolari[30] (Fig. 5.7).

L'*Unified Modeling Language* (UML), definito nel 1996 dall'*Object Management Group* (OMG), è il linguaggio oggi più diffuso per la rappresentazione e lo sviluppo di applicazioni secondo la programmazione orientata agli oggetti[31].

Come l'XML esso può essere definito un metamodello che consente di definire le modalità con cui può essere organizzato un modello, come rappresentazione astratta di una realtà oggetto d'interesse. La grande versatilità del linguaggio UML ha fatto si che esso oggi trovi largo impiego nella definizione dei requisiti e nel campo di applicazione di sistemi, nell'ingegnerizzazione del software, nella descrizione di procedure, nella rappresentazione della conoscenza in uno specifico dominio e nell'organizzazione, gestione e accesso a banche dati. In quest'ultimo ambito l'UML è molto utilizzato per la traduzione, in un linguaggio di alto livello e tramite una rappresentazione grafica, di strutture di dati, e delle relative operazioni e procedure che s'intende applicare per la loro gestione e analisi[32].

Ideato come metamodello e come linguaggio per lo sviluppo di applicazioni *object-oriented*, l'UML offre la possibilità di rappresentare secondo prospettive diverse, dette "viste", l'applicazione che s'intende sviluppare. Per la modellazione concettuale di una banca dati risulta particolarmente utile la "vista" o "diagramma" delle classi, che illustra le caratteristiche statiche e dinamiche delle componenti fondamentali di un'applicazione: le "Classi" e le "Relazioni", che intercorrono fra di esse. Tale formalismo, come nel caso del Modello E-R con cui presenta numerosi punti di contatto, offre differenti costrutti per la rappresentazione di realtà ad alto livello di complessità. La "Classe" rappresenta, insieme alla "Relazione", indicata anche come "Associazione", il costrutto fondamentale che l'UML offre per la rappresentazione di una banca dati. La Classe coincide con l'Entità del modello E-R, con la differenza che rappresentando un oggetto consente di includere nella sua definizione, secondo il principio dell'incapsulamento proprio della programmazione ad oggetti, i relativi metodi, ossia le regole e i comportamenti che caratterizzano l'oggetto specifico. Anche le

[29] Le occorrenze possibili fra un'entità e una relazione sono riconducibili a tre casi: "uno a uno" (I : I), una singola entità partecipa ad una singola relazione; "uno a molti", (I : N) una singola entità partecipa a molte relazioni; "molti a molti" (N:N), più entità partecipano a più relazioni.

[30] In una generalizzazione ogni occorrenza dell'entità figlia è anche occorrenza dell'entità padre e ogni attributo dell'entità padre è anche attributo dell'entità figlia. Una generalizzazione, inoltre, è detta "totale", quando un'occorrenza del padre coinvolge almeno una delle figlie, altrimenti è "parziale". "Esclusiva" è una generalizzazione in cui un'occorrenza del padre è al massimo un'occorrenza di una figlia, altrimenti è "sovrapposta".

[31] Booch-Rumbaugh-Jacobson 1998; Booch-Rumbaugh-Jacobson 1999.

[32] Atzeni *et alii* 2014, p. 218-233 ; Costamagna 2012, pp. 39-43.

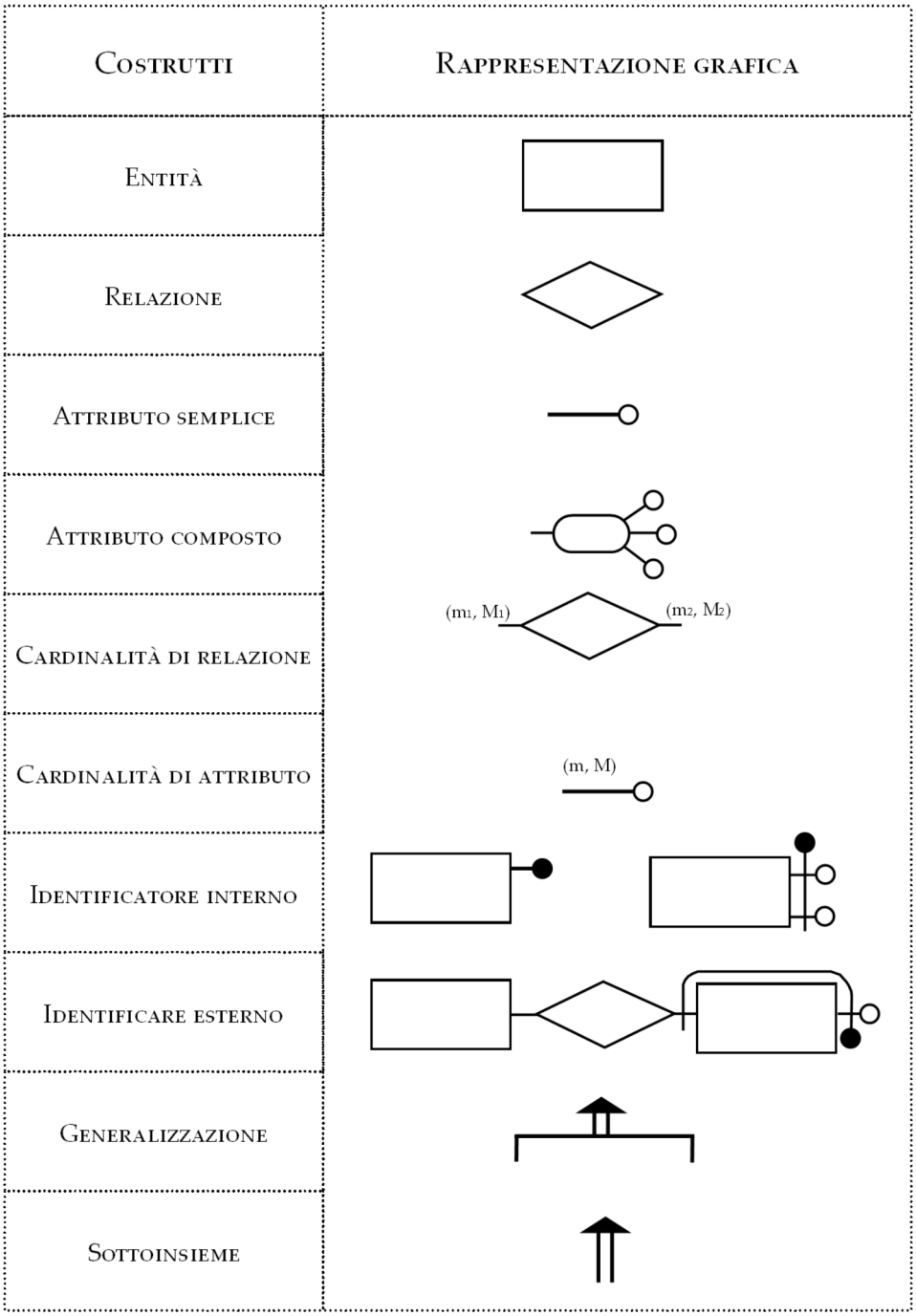


Fig. 5.7. Costrutti e relativa annotazione grafica del Modello E-R. Da Atzeni et alii 2014, p.198.

Relazioni, o Associazioni, corrispondono con l'omonimo costrutto disponibile nel Modello E-R, anche se sono presenti alcune differenze che non consentono, ad esempio, in UML di assegnare attributi alle relazioni, procedura invece consentita nel Modello E-R. Un aspetto molto utile delle relazioni in UML è invece rappresentato dalla possibilità di formare aggregazioni di classi, particolarmente vantaggioso per l'espressione di concetti complessi. Anche nella formalizzazione tramite UML è possibile definire, con le opportune differenze di codifica, la cardinalità di un'associazione ed esprimere un rapporto di generalizzazione fra più classi. Una differenza sostanziale invece intercorre nella gestione degli identificatori, in quanto secondo il paradigma della modellazione ad oggetti, ciascuno di essi è implicitamente dotato di un identificatore, che ne rende pertanto superflua la sua indicazione nella formalizzazione delle classi. Tuttavia nell'ottica di giungere a rappresentazioni che offrissero punti di contatto con il Modello E-R e con la logica relazionale, è possibile nel modello UML indicare e rendere espliciti degli attributi che possono svolgere la funzione di identificatori (Fig.5.8-5.9).

La fase successiva alla modellazione concettuale prevede la realizzazione, sulla base dello schema prodotto durante la fase precedente, di uno schema logico, che possa essere adattato ad uno specifico modello di dati. Come afferma a tal proposito Paolo Atzeni[33] non si tratta di una semplice "traduzione" da uno schema ad un altro, ma piuttosto di una vera e propria opera di rielaborazione, che segue due differenti finalità: l'ottimizzazione del progetto e la semplificazione dello schema di partenza. La prima finalità prevede la ristrutturazione dello schema concettuale per adeguare la banca dati da realizzare alle effettive esigenze dell'utenza in modo da giungere ad un equilibrio ottimale fra la tipologia e la quantità di richieste di accesso alle informazioni e le elaborazioni necessarie per ottenerle a partire dai dati archiviati, in modo da assicurare tempi di risposta soddisfacenti in rapporto alla potenza di calcolo dell'elaboratore e ad una stima del volume complessivo di richieste da soddisfare.

Il processo di ottimizzazione e ristrutturazione del modello concettuale non dipende pertanto dal modello di dati che verrà utilizzato, quanto piuttosto dalla stima di alcuni indici di prestazione, come il "costo di un'operazione", ovvero il numero medio di entità e associazioni coinvolte in una richiesta di informazioni, e il "carico di memoria", ovvero lo spazio di memoria richiesto per memorizzare i dati dello schema. Tali indici vanno valutati sulla base della stima del volume dei dati, ovvero il numero complessivo di occorrenze di ogni entità e relazione, delle dimensioni dei relativi attributi e delle caratteristiche delle operazioni effettuate in termini di frequenta e numero di dati coinvolti.

Lo schema concettuale "ristrutturato" ottenuto alla fine del processo di ottimizzazione, deve essere tradotto in modo da adattarsi al modello di dati scelto. Tale operazione richiede di effettuare un processo di analisi volto ad adattare alcune delle caratteristiche

[33] Atzeni *et alii* 2014, p. 277.

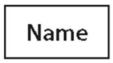
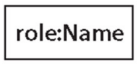
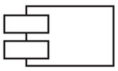
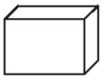
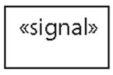
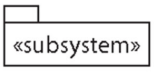
Classifier	*Function*	*Notation*
actor	An outside user of a system	
class	A concept from the modeled system	
class-in-state	A class restricted to being in a given state	
classifier role	A classifier restricted to a particular usage in a collaboration	
component	A physical piece of a system	
data type	A descriptor of a set of primitive values that lack identity	Name
interface	A named set of operations that characterize behavior	
node	A computational resource	
signal	An asynchronous communication among objects	
subsystem	A package that is treated as a unit with a specification, implementation, and identity	
use case	A specification of the behavior of an entity in its interaction with outside agents	

Fig. 5.8. Costrutti e relativa annotazione grafica del Modello UML. Da Booch-Rumbaugh-Jacobson *1999, p. 43.*

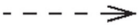
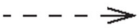
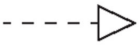
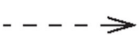
Relationship	*Function*	*Notation*
association	A description of a connection among instances of classes	
dependency	A relationship between two model elements	
flow	A relationship between two versions of an object at successive times	
generalization	A relationship between a more general description and a more specific variety of the general thing, used for inheritance	
realization	Relationship between a specification and its implementation	
usage	A situation in which one element requires another for its correct functioning	

Fig. 5.9. Relazioni e relativa annotazione grafica del Modello UML. Da Booch-Rumbaugh-Jacobson *1999, p.46.*

dello schema concettuale alle specifiche peculiarità del modello di dati prescelto. Ad esempio nella traduzione da uno schema E-R allo schema logico di una base di dati sviluppata secondo il modello relazionale occorre: eliminare le eventuali ridondanze, ovvero la ripetizione di dati già contenuti o desumibili attraverso operazioni di analisi; ristrutturare le generalizzazioni, in quanto tale tipologia di relazione fra entità può essere rappresentata in modo differente nell'ambito di uno schema logico, accorpando le entità figlie all'interno dell'entità genitore, o viceversa, oppure procedendo alla sostituzione di una generalizzazione con delle relazioni. Spesso un'attività di traduzione di uno schema concettuale in uno schema logico richiede di accorpare o separare entità e relazioni e di scegliere fra differenti attributi di un'entità quello che con maggiore profitto possa essere impiegato come identificatore primario.

Risulta evidente come la traduzione da un uno schema concettuale ad uno schema logico richieda una serie di valutazioni, scelte e interventi da effettuare al fine di rendere la base di dati oggetto di sviluppo capace di rispondere in modo efficiente alle esigenze degli utenti, fornendo informazioni adeguate attraverso opportune analisi dei dati. Per ottenere ciò occorre che lo schema logico rispetti determinati requisiti in termini di qualità, che assicurino nei confronti di eventuali ridondanze dei dati e di comportamenti anomali in fase di analisi e restituzione delle informazioni. A tal fine si rivelano particolarmente utili alcune procedure di verifica della coerenza di uno schema logico, che consentono di valutarne la correttezza sulla base del confronto con schemi ritenuti "normali". Tali, ad esempio, sono le procedure di "normalizzazione" applicate a modelli di dati relazionali, che attraverso l'impiego di ben definite regole e del concetto di dipendenza funzionale[34] permettono, in modo più o meno standardizzato, di effettuare opportuni controlli di coerenza e consistenza della base di dati[35].

Lo schema logico corredato, come nel caso del precedente schema concettuale, di tutta la documentazione utile ad una migliore comprensione, costituisce la base per la modellazione fisica della banca dati, che sarà effettuata tramite l'utilizzo di DBMS coerenti con lo il modello di dati prescelto.

5.4 Banche dati geospaziali

Qualsiasi studio di fenomeni antropici e naturali non può prescindere da uno stretto legame con lo spazio fisico. L'informazione spaziale costituisce, in tale ambito di studi, una componente essenziale per dare coerenza e valore ad una collezione di dati relativa ad un evento naturale o ad un'azione umana avvenute in un dato momento storico all'interno un ben determinato e circoscritto spazio fisico.

Astraendo al massimo, una qualsiasi analisi spaziale su una collezione di dati richiede la formalizzazione dell'elemento fisico e l'attribuzione ad esso di informazioni tematiche atte a descriverne le caratteristiche nella loro evoluzione temporale. Ciò può avvenire sulla base di due differenti e opposti modelli di formalizzazione, che descrivono lo spazio fisico e le sue relazioni

[34] La dipendenza funzionale esprime un particolare vincolo di integrità referenziale che lega ogni attributo della colonna y di una tabella R ad uno ed uno solo attributo della colonna x della medesima tabella. In tal modo si può affermare che «*nella tabella relazionale R la colonna x determina funzionalmente i valori della colonna y*». Camagni-Nikolassy 2014, p. 107. Per la dipendenza funzionale v. anche Atzeni *et alii* 2014, pp. 325-326.

[35] Sulla base della teoria della normalizzazione elaborata da Boyce e Codd è possibile distinguere tre forme normali di relazione. Secondo la prima forma una relazione si dice normale se e solo se tutti i suoi attributi sono valori atomici, ovvero non ulteriormente scomponibili. La seconda forma normale prevede che in una relazione tutte le colonne non chiave siano completamente dipendenti dall'intera chiave primaria. Ovvero che non vi siano colonne dipendenti solo da una parte della chiave primaria composta. La terza forma normale si applica a tabelle che rispettano già la forma precedente e richiede che tutte le colonne siano dipendenti solamente dalla chiave primaria. Codd 1970; Codd 1972; Camagni-Nikolassy 2014, pp. 104-114; Atzeni *et alii* 2014, pp. 327-350.

con il dato tematico[36].

Un primo modello si basa su un approccio "continuo" allo spazio fisico. Questo, pur avendo necessariamente dei confini, può in questa prospettiva essere considerato come una successione ininterrotta di elementi spaziali. Lo studio di un qualsiasi fenomeno all'interno di uno spazio così definito può avvenire attraverso un collegamento continuo, e non discreto, fra variazione spaziale e dato tematico ad essa relativo. Un tale genere di modello, formalizzabile con relativa semplicità attraverso modelli matematici, è particolarmente adatto alla descrizione di fenomeni naturali.

Un secondo modello, opposto al precedente, considera lo spazio fisico come una successione "discreta" e finita di elementi, delimitati ciascuno da confini netti. Ciò comporta una maggiore complessità nelle relazioni fra la componente fisica e quella tematica, non essendo, in questo modello, possibile instaurare un semplice collegamento fra la variazione continua nello spazio fisico e la variazione dei dati tematici ad esso relativi. Tale secondo modello interpretativo dello fisico si adatta maggiormente alla descrizione e formalizzazione di fenomeni antropici.

All'interno di questi due differenti modelli, lo spazio fisico può assumere, inoltre, molteplici formalizzazioni in stretta connessione con la natura dei fenomeni analizzati, gli specifici interessi e i campi di applicazione per i quali una data analisi viene condotta. Uno spazio fisico può essere rappresentato come una superficie bidimensionale o tridimensionale. In quest'ultimo caso, un oggetto posto in uno spazio 3D può venire rappresentato tramite la semplice superficie esterna, che delimita uno spazio vuoto, non caratterizzato internamente, oppure, all'opposto, come un oggetto solido, dotato di caratteristiche e qualità anche in relazione al suo volume interno.

In un'analisi volta allo studio della distribuzione spaziale di un fenomeno naturale o antropico, come potrebbe, ad esempio, verificarsi con un'indagine volta a studiare la quantità di pioggia annua in un determinato territorio o la distribuzione spaziale di un manufatto antropico, la formalizzazione dello spazio fisico come una semplice superficie bidimensionale risulta più che sufficiente. Al contrario una ricerca volta alla definizione della conformazione urbanistica di una città, mettendo in relazione la geomorfologia del territorio, con la realizzazione di manufatti antropici, richiede la gestione di uno spazio tridimensionale, all'interno del quale i singoli elementi, siano essi relativi ad un edificio, ad una rete infrastrutturale o ad un elemento naturale, possono venire formalizzati unicamente attraverso la caratterizzazione delle loro superfici, definite da ben precisi rapporti topologici, e non dai volumi interni. Un'analisi geologica e morfologia di un territorio, come lo studio di una stratigrafia all'interno di un sito archeologico, comporta invece la caratterizzazione oltre delle superfici, anche del volumi interni, in cui è necessario distinguere le differenti stratigrafie sulla base dei reperti naturali o antropici in esse contenute[37].

Anche dal punto di vista delle ana-

[36] Molenaar 1998.
[37] Breunig-Zatlanova 2011, p. 792.

lisi che possono essere condotte su oggetti e spazi fisici è possibile operare delle distinzioni, fra indagini di tipo geometrico, strettamente dipendenti quindi dalla forma dell'oggetto, e analisi di tipo topologico, basate sulle relazioni spaziali fra oggetti differenti.

Esaminando dal punto di vista tipologico e del formato dei dati le due componenti costitutive di un'indagine spaziale, l'elemento fisico-spaziale e quello degli attributi, si potrebbe notare come il dato fisico-spaziale sia generalmente formalizzato attraverso l'utilizzo di dati raster o vettoriali, con una maggiore frequenza del primo formato nel caso di cartografie di base o tematiche, del secondo per la rappresentazione spaziale, 2D e 3D, di singoli oggetti, di natura antropica o naturale. Invece, gli attributi vengono generalmente espressi tramite il ricorso a banche dati collegate alle *features* grafiche.

In tale sistema, in cui la gestione integrata delle due componenti viene demandata a software GIS, vi sono alcuni evidenti limiti, determinati essenzialmente dalla mancanza di un collegamento diretto e stringente fra elemento spaziale e dato tematico.

Per fornire una risposta a tale limite che agisse nell'ottica di una forte integrazione, fin dagli inizi degli anni ottanta del secolo scorso si è avviato uno sforzo collettivo, anche se non unitario, che ha visto coinvolti ricercatori e studiosi differenti per nazionalità e istituzioni di appartenenza[38].

Se li scopi e i vantaggi alla base dello sviluppo di database con estensione spaziale sono evidenti, l'integrazione di tale informazione all'interno di una banca dati ha fatto emergere molteplici difficoltà che in alcuni casi, ancora oggi, a quasi un trentennio dai primi contributi, non hanno avuto una risoluzione univoca.

Innanzitutto un database geospaziale richiede la traduzione matematica di una forma geometrica nella sua esatta collocazione spaziale. Una questione sulla cui risoluzione, com'è comprensibile, gravano questioni legate sia all'articolazione dell'oggetto tridimensionale, sia alla sua complessità formale. Se infatti qualsiasi oggetto, aldilà della sua origine antropica o naturale[39], può essere espresso dal punto di vista geometrico-morfologico come un insieme di vertici, spigoli e poligoni, delimitanti uno spazio interno, la sua rappresentazione è soggetta ad un alto grado di variabilità per ciò che concerne il numero degli elementi costitutivi, in relazione al livello di complessità formale che lo caratterizza e che richiede la gestione di un elevato numero di relazioni fra i singoli elementi geometrici che costituiscono l'oggetto, lo spazio fisico da esso occupato e i dati tematici che lo caratterizzano, nelle singole parti o nel suo complesso.

Lo sviluppo e l'utilizzo da parte di tutti i DBMS con estensione geospaziale[40] di *features* grafiche quali *multipoint*, *multilinestring*, e *multipolygon*[41],

[38] Per una rapida sintesi delle tappe fondamentali dello sviluppo di database con estensione geospaziale, nonché per la relativa bibliografia, v. Breunig-Zatlanova 2011, p.791.

[39] Per un esempio di modellazione integrata di oggetti naturali e antropici v. Penninga-Van Oosterom 2008.

[40] Fra i DBMS, sia *Open Source* sia commerciali, che hanno implementato un'estensione geospaziale possono essere annoverati: Oracle, IBM DB2, Informix, Ingres, Postgres SQL e MySql.

quest'ultima a sua volta articolata sulla base della tipologia e del numero di facce in *polyhedron*, *triangulated polyhedron* e *tetrahedron*[42], ha certamente rappresentato una tappa importante, anche se non risolutiva, in merito alle problematiche legate alla formalizzazione matematica di oggetti tridimensionali[43].

La necessità di rappresentare oggetti caratterizzati da superfici che solo con un elevato margine di approssimazione possono essere rappresentati tramite le *features* sopra descritte ha già da tempo spinto verso la definizione di metodologie d'integrazione di superfici *Nurbs* o di *Point Clouds* ottenute da rilievi laser[44].

Alle questioni legate alla rappresentazione geometrico-formale, si aggiungono quelle relative alla caratterizzazione delle superfici, tramite *texture*, essenziali per ottenere una resa realistica dell'oggetto e del contesto, elementi che vengono trattati dai software DBMS alla stregua dei dati tematici che caratterizzano un oggetto.

Ciò che invece rappresenta allo stato attuale il maggiore elemento di criticità è costituito dalla mancanza, nei DBMS oggi disponibili, di strumenti di analisi spaziale, sia geometrica, che topologica, capace di operare in uno spazio tridimensionale[45].

In quest'ambito che pur avendo ottenuto notevoli successi, è ancora caratterizzato da un alto grado di sperimentazione, rivestono un ruolo fondamentale la disponibilità di linee guida, che riconducano la molteplicità di esperienze verso un unico obiettivo. In tal senso un ruolo fondamentale rivestono gli sforzi compiuti dall'*Open Geospatial Consortium* (OGC). Particolarmente importanti sono le *abstract* e le *implementation specifications* emanate nel 2001, all'interno delle quali un ruolo fondamentale riveste la questione dello schema spaziale di rappresentazione delle *features*[46]. Sebbene, come ha recentemente affermato Sisi Zatlanova, l'obiettivo da raggiungere dotando i moderni DBMS di funzionalità sempre più evolute nell'ambito dell'analisi spaziale, non ha come scopo quello di privare gli applicativi GIS del ruolo fondamentale che in tal specifico ambito hanno da sempre rivestito, ma solo quello di conferire ai software DBMS la capacità di compiere analisi spaziale e

[41] Si tratta di *features* grafiche basate sulle primitive geometriche, punto, linea e piano, associate ad un sistema di coordinate tridimensionali.

[42] Il *Polyhedron* è una superficie solida con un numero indefinito (sempre comunque maggiore a quattro) di facce poligonali; il *Triangulated Polyhedron*, differisce dal precedente unicamente per l'impiego di facce triangolari; il *Tetrahedon* è invece un solido con quattro facce triangolari. V. Abdul-Rahman-Zatlanova-Coors 2006, p. 3

[43] Permangono, infatti, notevoli problematiche legate sia al grado di approssimazione che tali *features* consentono di ottenere nei confronti dell'originale, sia quelle relative alla gestione dei complessi rapporti fra dato spaziale, dato tematico e features, caratterizzate da un numero di poligoni, che non può essere definito a priori.

[44] Abdul-Rahman-Zatlanova-Coors 2006, p. 7-10

[45] Tali limitazioni accomunano allo stato attuale i DBMS con estensione geospaziale e i software GIS a cui è demandata la loro gestione. V. Zatlanova-Stoter 1980.

[46] È da notare come oltre alle *features* sopra ricordate, derivate dalle primitive geometriche, l'OGC abbia puntato l'attenzione sull'implementazione di geometrie complesse come quelle utilizzate in ambiente CAD, fra cui, ad esempio, le coniche e le superfici *free form*, come *B-spline* e *Nurbs*.

topologiche di base[47].

Seguendo quanto espresso dalla medesima studiosa[48], gli obiettivi futuri, a cui i moderni DBMS dotati di estensione spaziale dovranno tendere, sono molteplici. Occorre giungere all'integrazione di ulteriori *features* dotate di differenti schemi spaziali (come, ad esempio, le superfici *free form*, o quelle coniche), nell'ottica di una rappresentazione sempre più aderente alla realtà. Tale obiettivo si rivela particolarmente importante anche in vista di una integrazione di oggetti naturali e antropici in un unico modello di formalizzazione geometrico e topologico.

È necessario, inoltre, ottenere una maggiore integrazione di dati 2D e 3D, superando le attuali divisioni, che vengono incentivate e favorite dalle differenze esistenti fra le diverse tipologie dati[49].

La stessa visualizzazione e l'esplorazione di scenari tridimensionali richiede ancora notevoli sforzi per giungere a risultati ottimali, non solo all'interno dei sistemi GIS, ma anche con soluzioni *web-oriented*. I sistemi di fruizione potrebbero inoltre trarre vantaggi non indifferenti dall'applicazione di strumenti di *Virtual Reality*[50].

Una sfida futura, ancora in gran parte da affrontare, anche nella semplice definizione delle implicazioni che potrebbero derivarne, riguarda l'introduzione, all'interno degli scenari 3D, di un'ulteriore dimensione costituita dall'elemento temporale, con le alterazioni e le modiche che esso con il suo trascorrere ha determinato, tanto sul contesto generale, quanto sui singoli elementi che lo compongono.

Si tratta, naturalmente, solo di alcune delle sfide future, che lo sviluppo di DBMS con estensione geospaziale potrebbero contribuire ad affrontare, nell'ottica di una sempre crescente integrazione di dati per la realizzazione di sistemi informativi in cui la conoscenza possa realmente tramutarsi in strumento di supporto per l'azione, sia essa orientata alla pianificazione, alla tutela o alla valorizzazione.

5.5 Banche dati e archeologia

La moderna ricerca archeologica, nella sua quotidiana attività di ricostruzione delle civiltà del passato alla luce delle testimonianze materiali giunte fino a noi e interpretabili come espressione concreta di fenomeni culturali[51], opera su collezioni di dati le quali possiedono, nel loro insieme, tutte le caratteristiche che ne rendono estremamente vantaggiosa la loro gestione informatizzata.

Dall'indagine di superficie allo sca-

[47] Abdul-Rahman-Zatlanova-Coors 2006, p. 12

[48] Breunig-Zatlanova 2011.

[49] Particolarmente importanti risultano in tal senso gli sforzi compiuti, ad esempio, per l'integrazione, in un unico modello 3D, delle zone di contatto fra le superficie 2D rappresentate dal terreno e quelle 3D degli oggetti che vi insistono sopra. v. Penninga- Van Oosterom 2008.

[50] Harbola-Coors 2018 ; Portalés-Lerma -Navarro 2010.

[51] Per una definizione di "cultura materiale" come interazione di manufatti, significati e comportamenti, insieme all'importanza che essa riveste come materiale fondativo i processi di ricostruzione storico-archeologica v. Carandini 1979; Mannoni-Cabona-Ferrando 1988; Mannoni-Giannichedda 1996; Prown1982; Giannichedda 2002, p. 116-119.

vo archeologico, dalle attività di classificazione crono-tipologica, alle indagini archeometriche su impasti e materie prime, dal rilievo all'analisi delle tecniche costruttive, l'archeologia produce grandi quantità di dati. Il progressivo ampliarsi dei confini cronologici e dello specifico ambito di studio della disciplina, insieme all'approfondirsi del livello di dettaglio grazie all'apporto delle scienze matematiche, chimiche, fisiche e dalle tecnologie che si aggiungono, integrandole, ai risultati delle indagini su aspetti socio-culturali, economici e politici, rendono tale quantità di dati in costante aumento.

L'eterogeneità, non solo riguardo la qualità delle informazioni desumibili, ma anche e soprattutto in riferimento alla tipologia dei contenuti, alla natura, alla provenienza e ai formati in cui essa viene prodotta, archiviata e condivisa, caratterizza oltre all'aspetto quantitativo l'insieme dei dati prodotti dalla moderna ricerca archeologica.

Una base di dati che, nell'imperante e pur necessario processo di specializzazione che ha caratterizzato la disciplina con un'intensità tale da averne determinato cambiamenti metodologici ormai profondamente radicati, richiede, aldilà di esigenze più o meno avvertite e dichiarati approcci multidisciplinari, una forte integrazione, necessaria per proiettare la ricerca archeologica da una dimensione "limitata" e da una visione "ristretta", relativa alla singola questione storica, ad un ad una dimensione più vasta, nell'ambito della quale le prospettive parziali, i singoli contributi nelle loro peculiari specializzazioni, si fondono, integrandosi in una prospettiva unitaria capace di contemperare, ponderandone l'apporto, tutti gli elementi costituenti quel complesso insieme, in dinamico equilibrio, a cui la cultura può essere equiparata.

Inoltre le modalità stesse dei processi di indagine archeologica, per il carattere in gran parte distruttivo che essi hanno nei confronti dei giacimenti stratigrafici, principale fonte d'informazione contestuale, rendono di fatto la conservazione dei dati raccolti una questione di prioritaria importanza in seno alla disciplina, a cui si lega indissolubilmente un forte interesse all'accesso e alla consultazione, che va ben aldilà dell'interesse episodico, configurando un peculiare rapporto con i dati proprio in virtù del potenziale informativo che essi possiedono, il quale più che scemare viene rinnovato e amplificato dal costante confronto fra dati antichi e recenti, fra vecchie e nuove ricerche.

Quantità, interesse diffuso e persistente, insieme all'estrema importanza della conservazione dei *dataset* prodotti dalla ricerca archeologica, rendono necessarie opportune strategie di integrazione, archiviazione, recupero e analisi dei dati. In tale sforzo, certamente non semplice, l'informatica, con gli strumenti di cui essa dispone e le opportunità offerte, in termini di integrazione, dai processi di digitalizzazione, possono offrire un valido contributo.

Se il dato costituisce, probabilmente, il fulcro dell'intera ricerca archeologica, le possibilità d'integrazione e di produzione di nuova conoscenza, insieme alla facilità di condivisione e divulgazione dei risultati, offerta dalle tecnologie dell'informazione, rendono sempre più concreta e meno astratta l'aspira-

zione ad un'archeologia, che sappia porsi in prospettiva "globale" sia attraverso l'armonizzazione delle differenti specializzazioni, sia tramite un apporto che dalla conoscenza sappia ampliarsi fino ad includere le necessità della tutela, della valorizzazione, senza ignorare le legittime spinte allo sviluppo[52].

Se l'apporto dell'informatica, con le sue capacità di gestione dei dati e di produzione di nuova conoscenza può pertanto rivestire un ruolo importante nell'ambito della moderna ricerca archeologica, è necessario avviare insieme ad una riflessione sulle caratteristiche, la struttura, i requisiti hardware e software delle banche dati chiamate a gestire il record archeologico, anche una riflessione sulle potenzialità e i limiti dei processi di digitalizzazione dei dati e sulla loro adattabilità a tradurre nel modello digitale le specifiche peculiarità dell'oggetto reale.

Occorre innanzitutto riflettere sulla particolare natura del dato archeologico come manifestazione concreta di complessi processi socio-culturali, dove l'apporto dell'azione compiuta dal singolo nei confronti dell'ambiente e delle risorse in esso disponibili si richiama ad un vasto ambito di conoscenze tecniche, artigianali, di tradizioni, credenze, usi, valori, che fanno capo ad una comunità in una specifica fase del proprio sviluppo storico. Al contempo i processi di raccolta dei dati sono anch'essi strettamente influenzati dal contesto socio-culturale, storico e politico in cui vive il soggetto che compie le attività di raccolta, dal livello di conoscenza tecnica raggiunto, dagli strumenti tecnologici impiegati, dal paradigma scientifico dominante. Ciò rende estremamente storicizzato non solo il processo di generazione di informazioni a partire dai dati raccolti, ma anche la stessa acquisizione dei dati. Se l'oggettività nella registrazione del dato, come hanno dimostrato i maggiori studiosi post-processuali, è da considerare più come un obiettivo a cui tendere costantemente, che una meta da poter raggiungere definitivamente, diventa discutibile qualsiasi tentativo intrapreso dall'archeologia processuale e volto a definire un *set* minimo di attributi capaci di assicurare una registrazione obiettiva del dato archeologico[53].

Tali peculiarità se per un verso giustificano, almeno parzialmente, la polisemia insita nel *record* archeologico, dall'altro vanno considerate insieme alla condizione di estrema lacunosità con cui i dati giungono spesso fino a noi, esito di lunghi processi storici, in

[52] Per il concetto di archeologia globale v. Mannoni-Cabona-Ferrando 1988; Volpe 2008; Volpe 2015.

[53] L'approccio ipotetico-deduttivo, proposto dai teorici processuali per il raggiungimento di leggi universali dell'agire umano attraverso lo studio dei giacimenti archeologici, aveva nell'analisi obiettiva dei dati uno dei suoi punti di forza. Questa sarebbe stata assicurata dalla registrazione di un set minimo di attributi, passibili di misurazione e quantificazione, che si ponevano, nell'ottica di questi studiosi, a monte di ogni interpretazione teorica. Per uno dei maggiori esempi di approccio matematico-statistico all'analisi del record archeologico, v. Clark 1972. Opposte in tal senso le posizioni dei post-processuali, raccolti intorno all'archeologo britannico Jan Hodder, per i quali a proposito della registrazione del dato archeologico si sono significativamente espressi nei termini di un "*theoretical approach*" (Shanks-Tilley 1987), ovvero di un approccio intimamente connesso e pertanto inscindibile nei confronti del quadro teorico e culturale contemporaneo rispetto a chi esegue le indagini.

cui cause oggettive di degrado e distruzione si mescolano ad una forte componente aleatoria. S'impone, quindi, come esigenza non banale ogniqualvolta si s'intendano applicare strategie d'informatizzazione del *record* archeologico, la necessità di una riflessione sui possibili risultati che tale azione possa comportare, commisurandola non solo con i palesi vantaggi che quest'ultima offre in termini di potenza di gestione e produzione di nuove informazioni, ma anche e soprattutto sulla legittimità di tale operazione condotta su collezioni di dati, in cui è connaturata una buona dose di parzialità e di polisemia e che solo a patto di evidenti semplificazioni possono essere intesi sempre uguali a stessi, alla stregua di un qualsiasi altro dato alfanumerico.

Alcuni tentativi volti ad avviare una tale proficua, oltre che doverosa, riflessione vi sono stati e hanno spinto alcuni studiosi ad interrogarsi, ad esempio, sulla legittimità dell'estensione del modello relazionale all'archiviazione e alla gestione del *record* archeologico[54]. I recenti tentativi d'applicazione della logica *fuzzy* o del modello bayesiano[55] nascono dalla medesima esigenza volta a valutare sia gli effetti che la formazione culturale e l'insieme delle conoscenze pregresse hanno nel processo di analisi e registrazione dei dati, sia di offrire una risposta ai problemi d'incertezza e lacunosità insiti nel *record* archeologico.

A quanto fino ad ora detto in merito alla natura del dato archeologico e alle questioni insite nella sua gestione informatizzata, devono aggiungersi quelle relative sia allo strumento di formalizzazione e traduzione dei dati, sia ai processi di discretizzazione, omologazione e standardizzazione dei contenuti. Perché aldilà dell'ovvio apporto di immagini, disegni, fotografie ed altre simili tipologie di segni iconici la formalizzazione del dato archeologico funzionale ai processi di informatizzazione e gestione all'interno di una banca dati passa attraverso un processo di codifica linguistica, che risulta anch'esso espressione sociale e culturale di un universo conosciuto e interpretato attraverso paradigmi scientifici dominanti, ma il cui utilizzo per la descrizione di realtà sconosciute è in linea di principio problematico[56].

Inoltre qualsiasi descrizione in linguaggio naturale non consente se non limitate strategie di analisi, richiedendo l'individuazione e l'articolazione dei contenuti in nuclei minimi di significato. Tale processo di discretizzazione dei dati raccolti merita molta attenzione nella progettazione di una base di

[54] Sulla particolare natura del dato archeologico e sul continuo mutare dei suoi significati in rapporto al progredire della ricerca ed alla diversità delle analisi e degli approcci di cui può essere oggetto V. D'Andrea 2004, pp. 219-238.

[55] Il record archeologico, come molti aspetti della realtà, si adatta difficilmente alla logica aristotelica del vero/falso. La logica *fuzzy*, si basa sulla considerazione di un continuum di stati di verità a minore o maggiore probabilità. Sulla logica fuzzy v. Zadeh 1965, pp.338-353; sulle applicazioni informatiche di tale approccio all'archeologia v. D'Andrea 2006, pp.61-73; il modello bayesiano si basa sugli studi del matematico inglese Thomas Bayes (1702-1761), affidati ad un'opera pubblicata postuma nel 1763. V. Bayes 1763.

[56] Sulle problematiche sottese all'utilizzo del linguaggio nella codifica del dato archeologico e sui rischi legati alla sua informatizzazione v. i lavori di J. C. Gardin, il cui primo scritto sull'argomento risale al 1952. V. Gardin 1955, pp. 107-124.

dati, in quanto non solo è strettamente legato alle scelte metodologiche adottate e agli obiettivi prefissati, e quindi scarsamente gestibile, con risultati soddisfacenti, tramite procedure automatiche o semi-automatiche di *data mining*, ma anche perché si rivela capace d'influire sui risultati ottenuti attraverso i processi di selezione e analisi dei dati[57].

Oltre alla predisposizione di opportune strategie di discretizzazione e parallelamente ad esse la gestione informatica di *dataset* archeologici richiede una standardizzazione ed una omologazione nella registrazione del *record* archeologico. Tale problematica si rivela solo apparentemente banale o di facile soluzione, in quanto la ricerca di standard condivisi nella descrizione dei dati o di uno specifico ambito d'indagine ha accompagnato l'archeologia lungo un processo di maturazione scientifica e di emancipazione da un'impostazione storico-erudita della disciplina. Infatti parlare di standard condivisi, equivale ad affrontare questioni legate non solo alla necessità di predisporre vocabolari, lessici o *thesausos* atti a descrivere in modo univoco e condiviso e facilmente comprensibile lo specifico dominio di pertinenza, ma anche di affrontare delicate questioni metodologiche, nella misura in cui la descrizione di una realtà oggetto di studio non può essere separata dalle metodologie di analisi e interpretazione. In un ambito come quello della ricerca archeologica, caratterizzato da un'alta specializzazione e fortemente segmentato non solo per l'articolazione interna dell'ambito della ricerca, e il ruolo fondamentale ricoperto dall'apporto di molteplici discipline, ma anche e soprattutto per lunghe tradizioni di studio, con metodologie, tecniche di analisi e interpretazione e di conseguenza di descrizione, difficilmente conciliabili.

In Italia spetta all'Istituto Centrale per il Catalogo e la Documentazione (ICCD), istituito nel 1975, il compito di dettare le regole in questo delicato processo di standardizzazione, che ha tanto maggiore possibilità di successo, quanto più riesce ad armonizzare, senza imposizioni unidirezionali, ciò che di meglio le diverse tradizioni di studio hanno elaborato nel loro specifico ambito di ricerca. Nonostante l'attività dell'ICCD si sia concretizzata nella pubblicazione, fra il 1984 ed il 1987, delle schede relative alla gestione dei dati di scavo, dei beni mobili e storico-artistici a cui dal 2004 si è aggiunto anche il SIGEC, Sistema Informativo Generale del Catalogo, erede di precedenti esperienze software miranti alla creazione di un archivio unitario a livello nazionale, molta strada deve essere ancora fatta verso la realizzazione di uno standard pienamente condiviso e capace di integrarsi e dialogare in prospettiva internazionale con equivalenti sistemi di catalogazione.

Occorre infine richiamare un'ultima questione, la cui importanza è cruciale in quanto direttamente legata alla conservazione di una banca dati, al suo aggiornamento, alla sua compatibilità nel tempo, come alla possibilità di condivisione. Si tratta di questioni legate alla scelta delle soluzioni informatiche più opportune in merito al software da utilizzare per la realizzazione di una

[57] D'Andrea 2001, pp.337-342.

banca dati.

Se i vantaggi dell'utilizzo di database nella memorizzazione e gestione di banche dati archeologiche sono ormai indiscutibili e il progressivo abbandono dei supporti di memorizzazione tradizionali costituisce un processo inevitabile, come la parallela digitalizzazione degli archivi cartacei esistenti, occorre riflettere sulla necessità di predisporre opportune strategie atte ad assicurare la *long-term preservation* dei dati digitali, che richiedono scelte opportune in termini di software e formati di dati per l'archiviazione, nonché di supporti fisici per la memorizzazione. L'obsolescenza del software e dell'hardware, caratterizzati da un ritmo di aggiornamento e sviluppo estremamente sostenuto, occorre orientare le scelte verso formati di dati, software e hardware capaci di garantire la maggiore durata nel tempo e architetture modulari, di più facile manutenzione o aggiornamento. Se fino a pochi anni fa il software proprietario costituiva l'unica scelta possibile per applicazioni capaci di garantire elevate prestazioni, l'odierna disponibilità di software *Open Source*, si configura come una valida alternativa. Nell'ottica della medesima facilità d'utilizzo e di un eguale potenza di calcolo, i software *Open Source* offrono maggiori garanzie di compatibilità, con la divulgazione del codice sorgente, che rende espliciti, a differenza dei sistemi proprietari, le logiche degli algoritmi alla base del processamento dei dati.

Capitolo VI

Geographic Information Systems. La conoscenza fra lo spazio e il tempo

«Il GIS e le sue potenzialità predittivo-simulative che, ignorate o bollate talvolta come eccesso d'uso e di fiducia nella macchina, in realtà sono a pieno titolo strumenti metodologici»

Valenti 2003

6.1 Conoscere attraverso lo spazio

L'intera esistenza umana si svolge nell'ambito di uno spazio fisico e lungo una dimensione temporale. Difficile dire cosa sia lo spazio, com'è difficile giungere ad definizione soddisfacente del tempo.

Ragion per cui nell'evoluzione storica del pensiero, anche limitandosi solo a quello occidentale, si sono affastellate numerose e spesso contrastanti definizioni del tempo e dello spazio, senza contare che esiste una definizione del tempo e dello spazio quasi per ogni disciplina umana. La fisica, la matematica, la geometria, la geografia hanno uno spazio, talvolta strettamente e inscindibilmente legato al tempo, come accade, significativamente, nelle teorie della relatività generale e ristretta elaborate da Albert Einstein.

Fra le varie teorie proposte, riveste un certo fascino e una grande importanza per comprendere il valore conoscitivo dello spazio e del tempo la definizione che di esse diede nel 1781 Immanuel Kant nell'opera *Kritik der reinen Vernunft*[1]. Com'è risaputo l'illustre pensatore tedesco affrontò la definizione dello spazio e del tempo all'interno di una teoria generale della conoscenza umana, definendole le "forme a priori", veri e propri schemi mentali attraverso i quali il soggetto senziente ordina qualsiasi dato relativo al suo senso interno, tramite il tempo, o al senso esterno, tramite lo spazio. Di fronte all'annosa e per nulla semplice definizione dello spazio e del tempo, Kant ne riconduce, con un'originale inversione di prospettiva e in funzione prettamente e squisitamente epistemologica, l'essenza all'uomo che percepisce e non alla realtà esterna percepita.

Lo spazio e il tempo, quindi, aldilà delle innumerevoli e ugualmente valide definizioni rivestono un'importanza fondamentale nei processi epistemologici e nella necessità, umana, di porre razionalmente ordine nel mondo esterno.

Un utilizzo, almeno per lo spazio, che ha accompagnato l'uomo nel corso dei secoli, forse fin dalla preistoria, se si po-

[1] Kant 1781.

tesse trovare fondamento ad alcune affascinanti teorie che nell'attenzione alla riproduzione di dettagli naturalisti, posti in uno spazio fisico e collegati da quelli che potrebbero essere interpretati come sentieri presenti in alcune manifestazioni d'arte rupestre, come quelle databili al Paleolitico superiore presenti nelle Grotte di Lascaux, in Francia, nelle quali si è proposto di vedere vere e proprie mappe, tracciate con l'intento di razionalizzare lo spazio fisico con l'indicazione di percorsi funzionali alle esigenze della caccia[2].

Manifestazioni di tal genere potrebbero continuare con esempi distribuiti lungo un ampio arco temporale e provenienti da differenti civiltà, ma ciò che qui importa è sottolineare lo stretto legame che l'uomo ha da sempre posto fra lo spazio e la conoscenza umana.

È questa esigenza ad aver precocemente determinato la necessità di giungere a forme di rappresentazione, più o meno realistica o simbolica, che consentissero una più agevole visualizzazione d'insieme dello spazio fisico, da impiegare come strumento di conoscenza e di comunicazione di informazioni, che proprio in virtù di quella rappresentazione spaziale trovano il loro reciproco legame.

La celebre affermazione di Alfred Korzybski[3] «*la mappa non è il territorio*» racchiude al fondo l'importante consapevolezza che qualsiasi rappresentazione del territorio non nasce con lo scopo di giungere ad una restituzione realistica di uno spazio fisico, spinta fino alla resa del minimo dettaglio, ma piuttosto di disporre di uno strumento che di quel territorio possa agevolare la comprensione e guidare l'azione umana verso qualsivoglia finalità essa fosse diretta: dalla gestione, alla tutela, alla valorizzazione. La mappa non è territorio, quindi, ma serve a comprenderlo, gestirlo e in ultima analisi dominarlo, riducendone l'estensione e la complessità all'interno di una dimensione umana.

I moderni GIS, *Geographic Information Systems*, condividono con una qualsiasi mappa una finalità conoscitiva, volta ad un ampio e variegato spetto di possibili utilizzi. Se un GIS, in estrema sintesi, consente di collegare, come una qualsiasi mappa, dati riferendoli ad una rappresentazione dello spazio fisico, un GIS non è una mappa, così come un GIS non è un applicativo software. Anche nel caso di un GIS, come per lo spazio e per il tempo, molteplici sono state le definizioni proposte e nessuna delle discipline in cui un GIS trova applicazione ha mancato di fornire la propria[4].

Ciò che sembra comunque indiscutibile, anche alla luce dell'ampia diffusio-

[2] Forte 2002, p.3.

[3] Korzybski 1941.

[4] Seguendo l'articolazione proposta da Michael P. Peterson, professore dell'Università del Nebraska, le differenti definizioni di GIS, si sono nel corso del tempo concentrate su alcuni particolari aspetto. Oltre che un affare da milioni di dollari, come qualche volta un GIS è stato definito, in esso si è visto «*a powerful set of tools for storing and retrieving at will, transforming and displaying spatial data from the real world for a particular set of purposes*», Borrough 1986, p.6. Particolarmente forte, nell'ambito degli studi geografici, è stata invece la tendenza a vedere nel GIS, una Geographic Information Science, un vero e proprio strumento capace di aumentare il rigore scientifico della disciplina. Infine un GIS secondo un'interpretazione che ha avuto maggiore diffusione, può essere considerato «*a special case of information systems where the database consists of observations on spatially distributed features, activities or events, which are definable in space as points, lines, or areas. A geographic information system manipulates data about these points, lines, and areas to retrieve data for ad hoc queries and analyses*» Ducker 1979, p.106.

ne e dei molteplici settori disciplinari in cui è stato proficuamente impiegato, e il fatto che un GIS derivi dall'interazione di differenti componenti: software, hardware, dati, persone e metodi. Un GIS quindi non può essere ridotto ad un mero applicativo software, ma debba essere considerato alla stregua di un vero e proprio strumento metodologico, capace di offrire molteplici modalità di analisi geospaziale di dati per generare nuova conoscenza utile alla risoluzione di specifiche questioni.

Il ruolo dell'informatica, considerata sia per la componente hardware, sia per quella software, rimane certamente fondamentale. Senza la potenza di calcolo dei moderni computer e lo sviluppo di software per la gestione di cartografia digitale, non sarebbe stato possibile giungere alla creazione di un GIS, ma si sarebbe rimasti legati alla realizzazione di mappe "tradizionali", fortemente limitate dai vicoli del supporto fisico su cui lo spazio veniva rappresentato[5].

Non è un caso, quindi, come solamente dopo che il geografo americano di origine svizzera Waldo Tobler ebbe messo a punto nel 1959 il primo algoritmo di visualizzazione cartografica, il MIMO - *Map In/Map Out*, che consentiva com'è desumibile dal nome stesso, di visualizzare un'immagine attraverso una variazione dinamica della scala gestita dall'elaboratore elettronico, furono poste le basi per la realizzazione del primo GIS.

Grazie all'utilizzo del MIMO, Roger Tomlinson, un geografo anglo-canadese, incaricato dal proprio governo della realizzazione di uno strumento per il monitoraggio del territorio realizzò nel 1963 quella che può essere considerata la prima piattaforma GIS.

Essenziale fu infine per lo sviluppo del GIS la base teorica elaborata proprio in quegli anni dall'architetto Jan McHarg e pubblicata nell'opera del 1967 *Design with Nature*. In essa l'autore dimostrò come la tecnica del "*map overlays*", divenuta successivamente basilare fra le tecniche di *geoprocessing* in ambiente GIS, offrisse enormi vantaggi nell'applicazione alla pianificazione urbana e territoriale.

Dalla metà degli anni sessanta del secolo scorso, l'utilizzo di metodologie GIS si è progressivamente diffuso fino a coprire molteplici ambiti disciplinari, divenendo uno strumento ormai insostituibile per la ricerca, la pianificazione, la tutela e la valorizzazione del territorio, dell'ambiente e del paesaggio.

Per comprendere le ragioni di tale inarrestabile diffusione occorre soffermarsi sulle capacità che un GIS offre generando informazione e conoscenza strutturata a partire da collezioni di dati collocati in uno spazio virtuale, ma capace di conservare determinate caratteristiche rispetto a quello reale.

A ciascun dato gestito all'interno di un GIS è richiesto di conservare, infatti, l'esatto riferimento geografico, espresso secondo un sistema di coordinate assolute, che l'oggetto, il fenomeno, o il contesto reale di cui esso è l'equivalente digitale, occupa nello spazio fisico reale.

[5] Giovanni Azzena riflettendo sulle differenze fra i moderni GIS e gli strumenti cartografici tradizionali osservava come «*il salto di qualità sta nel poter trasformare una mappa topografica a finalità generica in "n" mappe tematiche, di quantità e qualità dipendenti solo dal numero e dal tipo di informazioni che sono state associate agli "oggetti grafici" archiviati nella memoria del calcolatore. E questo è possibile solo a condizione che quella mappa sia numerica*», Azzena 1997.

In tal modo, a differenza di una semplice banca dati, ogni elemento all'interno di un ambiente GIS, deve assumere un'estensione spaziale, sia essa costituta da un singolo punto, una polilinea, o un poligono. Tale elemento grafico, o feature, acquisisce pertanto una duplice natura, divenendo al contempo oggetto grafico dotato di un'estensione e veicolo di dati, che possono acquisire dinamicamente nuovi significati dalle relazioni topologiche che l'oggetto intrattiene con lo spazio e gli elementi circostanti.

Ogni *feature* può essere organizzata su differenti livelli informativi, o *layers*, che accomunano molteplici *features* sulla base del formato, della tipologia della tipologia di estensione spaziale o dei dati ad essa collegati.

Due sono i formati con cui è possibile rappresentare e gestire in ambiente GIS un elemento della realtà: "raster" e "vettoriali". Ciascuno di essi possiede caratteristiche peculiari e in un certo qual modo complementari, le quali determinano sia il differente modo con cui possono essere impiegati per rappresentare oggetti reali, sia le strategie alle quali possono essere sottoposti per la gestione e per l'analisi dei dati che ad essi si riferiscono.

Il formato raster è un formato immagine, basato su una matrice di celle, dette *pixel*, che possono contenere oltre ai valori che ne determinano il colore, anche altri dati, relativi ad esempio a coordinate nello spazio, sia bidimensionale, che tridimensionale. Come tutti i file immagine i file raster hanno una risoluzione, determinata dalle dimensioni dei *pixel* e misurata sulla base di unità di misura come il DPI, "*Dots Per Inch*", ovvero "*punti per pollice*", che indica la quantità di pixel presenti all'interno di un'area corrispondente all'estensione di un pollice. Naturalmente all'aumentare della risoluzione, aumenta la quantità di informazioni che possono essere associati ad un file raster, che influiscono direttamente sul peso in termini di spazio di memorizzazione e sulle risorse computazionali eventualmente richieste per la sua analisi. Un file raster per la sua natura si rivela particolarmente adatto alla rappresentazione di fenomeni o di oggetti caratterizzati da una variazione continua in relazione allo spazio, la cui rappresentazione può avvenire tramite delle superfici statistiche, ottenute per interpolazione[6].

Infatti nel formato raster vengono rappresentate le risorse cartografiche, come le ortofoto o le carte tecniche regionali, tuttavia assumono particolare importanza un'ampia varietà di carte tematiche, che possono essere ottenute tramite apposite analisi di *geoprocessing*.

Fra questi, oltre ad analisi di *overlapping*, derivate dalla semplice sovrapposizione di livelli informativi differenti, i file raster possono esser oggetto di algoritmi di analisi geospaziale identificati nel loro complesso con il termine di "*map alge-*

[6] Gli algoritmi di interpolazione consentono di stimare il comportamento di un fenomeno che possiede una distribuzione continua nello spazio, a partire dalla conoscenza di alcuni dati parziali. Così ad esempio è possibile stimare la pendenza di un terreno sulla base della conoscenza di alcuni punti quotati. I più comuni algoritmi di interpolazione di dati geografici si basano su due differenti approcci. L'approccio "deterministico", che presuppone l'esistenza di una legge che regola la dipendenza di una variabile in un determinato punto al valore della stessa variabile nel punto misurato. L'approccio "geostatistico" si basa invece sulla struttura spaziale della variabile, ignorata dall'approccio precedente. V. Noti 2014, pp. 237-277.

bra", espressione che richiama la base essenzialmente matematica di tali algoritmi e il risultato consistente in una nuova mappa, ovvero in un nuovo raster, che è possibile ottenere attribuendo, secondo criteri spaziali, alle singole celle costituenti un raster, i risultati di un'attività di analisi[7].

Particolarmente importanti, fra le superfici statistiche ottenute tramite algoritmi di Map Algebra, sono i modelli digitali del terreno, che risultano fondamentali nello studio di fenomeni il cui comportamento è influenzato da uno spazio tridimensionale[8].

Il formato vettoriale si basa, su una logica di rappresentazione per certi versi antitetica rispetto a quella impiegata per la rappresentazione di dati raster. Un dato vettoriale è costituito essenzialmente da una *feature* geometrica, rappresentata attraverso la determinazione delle coordinate *x, y, z* dei vertici che ne definiscono la forma e l'orientamento nello spazio rispetto ad un sistema di riferimento assoluto. Una *feature* vettoriale può rappresentare differenti geometrie, con alcune variazioni dipendenti dallo specifico software in uso, che nel complesso comprendono: punti (*points*), una polilinea (*polylines*), poligoni (*polygons*), superfici tridimensionali ottenute dall'unione di più superfici bidimensionali (*multipatchs*) o collezioni di punti (*multipoints*), trattati come un oggetto singolo avente caratteristiche comuni a tutti.

Se ne deduce che un formato vettoriale è più adatto alla rappresentazione di oggetti posti in uno spazio discreto e non continuo. Inoltre a differenza di un formato raster, un vettoriale può essere caratterizzato da una serie di attributi gestiti tramite le risorse intere della piattaforma GIS o collegate a banche dati esterne, che se provviste di estensione spaziale, contengono già fra gli attributi del record le informazioni per una corretta geolocalizzazione e rappresentazione spaziale.

Come per il formato raster anche i vettoriali possono essere sottoposti ad algoritmi di processamento e *query* geospaziali che generano nuove informa-

[7] Gli algoritmi di "*Map algebra*" sono molteplici, potendosi esprimere tramite essi, il comportamento di differenti fenomeni, naturali e antropici, nella loro interrelazione spaziale e topologica con gli elementi costituenti il contesto di riferimento. Fra le analisi più comuni, ottenute grazie all'impiego di operatori aritmetici, relazionali, booleani, logici e statistici, rientrano certamente le analisi dell'esposizione di un versante (*aspect*), della pendenza (*slope*), dell'illuminazione relativa (*hillshade*), dell'intervisibilità fra due punti (*Viewshed*), di bacino (*Catchment Area*), accomunate dallo studio di fenomeni strettamente interrelati alla geomorfologia del territorio, reso sia come superficie bidimensionale, che tridimensionale. Noti 2014, p. 209-235.

[8] I *Digital Elevation Models* (DEM) costituiscono certamente la classe più diffusa di modelli tridimensionali applicati allo studio di un contesto territoriale, pur non essendo gli unici, in quanto con lo stesso principio della costruzione di un DEM a partire dalla stima della distribuzione areale dell'elevazione, è possibile rappresentare molteplici fenomeni, sia di origine naturale, che antropica. Essa comprende differenti modelli come i Digital Surface Model (DSM) modelli che restituiscono il profilo di una superficie comprendendo la copertura vegetale, i manufatti antropici e tutti gli altri elementi che giacciono su di essa. I *Digital Terrain Models* (DTM), forniscono il profilo del terreno, privo di qualsiasi sovrastruttura. I DEM, possono essere esportati e archiviati secondo due modalità, basate su differenti criteri di articolazione della superficie di riferimento: i "grid", che dividono la superficie in celle dotate di estensione areale costante, e i *Triangular Irregular Network* (TIN), che fanno ricorso ad una rete di triangoli irregolari. Noti 2014, pp. 244-251.

zioni operando sui dati disponibili sia a livello di attributi spaziali e relazioni topologiche, sia a livello di attributi della singola *feature*[9].

L'interazione fra dati raster e vettoriali, contenenti ciascuno gli attributi costitutivi dell'oggetto, del fenomeno o del contesto di rappresentano il sostituto digitale, permette di rappresentare, simulandone gli effetti, la complessa trama di relazioni che lega insieme gli elementi costituitivi di un contesto. L'esatto riferimento spaziale e la conservazione delle relazioni topologiche dei singoli elementi conferisce, inoltre, all'ambiente ricreato tramite GIS la funzione di vero e proprio modello di un contesto reale, capace di sostituirsi ad esso nel sopportare l'esecuzione di molteplici "esperimenti", mostrandone l'esito futuro sulla base di processi di simulazione.

Un modello dinamicamente selettivo, le cui potenzialità derivano dalla possibilità di ridurre e controllare la complessità dell'oggetto reale, isolando e analizzando, come fossero singoli "campioni", oggetti, fenomeni, relazioni al fine di comprenderne le leggi e i comportanti, materiale utile per strutturare una base di conoscenza capace di supportare qualsiasi azione futura.

6.2 Ricerca, metodologie e condivisione

Soltanto considerando un Sistema Informativo Territoriale[10], ottenuto tramite strategie e strumentazioni GIS nella prospettiva sopra esposta, ovvero di un modello virtuale, dinamicamente selettivo, capace di generare conoscenza strutturata utile per supportare le decisioni e l'azione futura, diventa possibile apprezzare tutte le potenzialità di quello che deve essere considerato non un semplice applicativo, ma un vero e proprio strumento metodologico, per le possibilità che mette a disposizione di integrare in modo dinamico, adattandosi al variare degli obiettivi e delle finalità di una ricerca, metodologie, potenza di calcolo dei moderni elaboratori, capacità di gestione e di analisi specifici software, rispondendo alle necessità conoscitive di una collettività variegata di utenti, che in quel modello trova una cartina di tornasole per valutare la bontà di strategie condivise sulla gestione, sulla tutela e sulla valorizzazione sostenibile del territorio.

Ciò che occorre allora ribadire è soprattutto la necessità di utilizzare strumentazioni GIS solo a seguito di un'attenta valutazione e definizione degli obiettivi e delle strategie utili per perseguirli. Infatti il discrimine fra la progettazione, l'utilizzo appropriato e proficuo di un sistema informativo territoriale e quella che potrebbe essere definita come una semplice concessione ad una moda tecnologia imperante in molti settori della ricerca e della pianificazione territoria-

[10] Si usa qui l'espressione "*Sistema Informativo Territoriale*" (SIT) in un senso pregnante e non legato da una relazione con l'espressione "*Sistema Informativo Geografico*" (traduzione italiana dell'acronimo inglese GIS) basata su una differenza di scala, come potrebbe desumersi dalla diversa estensione insita nell'aggettivo "territoriale" rispetto a "geografico". Con il termine SIT, s'intende in questa sede piuttosto indicare una concreta realizzazione di un sistema informativo, tramite l'applicazione ad un caso concreto e in risposta a specifiche finalità, di strumentazioni e metodologie GIS.

le e paesaggistica, all'interno del quale un ruolo considerevole è assunto dal patrimonio culturale.

Un GIS si trova nel punto di confluenza di molteplici elementi fin qui discussi: patrimonio culturale; territorio; ambiente; paesaggio; sistemi e tecniche di rilievo e restituzione digitale; banche dati; informazione. Tutti elementi che, grazie all'integrazione resa possibile da strumenti GIS possono generare nuova conoscenza utile a sostenere l'azione nella costante necessità di fornire strumenti di governo dell'inarrestabile cambiamento, che per cause naturali, (degradi, calamità, …) o antropiche (interessi economici, politici, sviluppo urbano e territoriale, …) incide sulla conservazione del territorio, visto nella complessità ambientale paesaggistica che lo caratterizzano.

Se un GIS può essere considerato uno strumento metodologico, tale metodo deve prima di tutto essere applicato alla raccolta e gestione dei dati, dalla cui precisione, affidabilità e conformità alle specifiche finalità di una ricerca, deriva il valore e la reale possibilità per un Sistema Informativo Territoriale di porsi come modello virtuale e valido sostituto di quello reale.

L'affidabilità dei dati, in un sistema totalmente incentrato sul riferimento spaziale, che le potenzialità della moderna cartografia digitale liberano dalle costrizioni determinate dal rispetto di una scala grafica di rappresentazione[11], richiede innanzitutto un livello di precisione nella determinazione dei valori spaziali degli elementi che costituiscono lo specifico contesto di studio, coerente con finalità da prefissate. Ciò comporta precise scelte che coinvolgono la base di riferimento adottata, le metodologie di rilievo e di restituzione digitale dei dati, la gestione della terza dimensione tanto del singolo oggetto, quanto dell'ambiente in cui esso si trova inserito, la gestione degli eventuali errori e il controllo dell'affidabilità dei risultati.

Medesima attenzione va posta nella modellazione della banca dati, destinata ad accogliere e gestire in forma integrata e all'interno della piattaforma GIS i dataset raccolti. Si tratta, come più volte ribadito, di un processo solo in minima parte automatizzato, richiedendo scelte strettamente correlate con le metodologie adottate e capaci di influire sulla conoscenza che da tale base di dati deve necessariamente scaturire.

I dati acquisiti, come le informazioni prodotte attraverso un Sistema Informativo Territoriale, al di là delle specifiche finalità che stanno dietro la loro raccolta rivestono generalmente un interesse più ampio, destinato a perpetrarsi nel tempo e capace di suscitare l'interesse di un'utenza ben più vasta rispetto a quella a cui il sistema informativo era originariamente destinato. Questa è una caratteristica che accomuna tutti i dati in qualche modo legati al territorio, inteso come spazio fisico, determinato politicamente e amministrativamente da un potere costituito all'interno del quale si svolge in forma associata la vita di una comunità. Discorso analogo naturalmente può essere fatto per i dati relativi al patrimonio culturale, il cui valore è strettamente connesso

[11] Ciò avveniva, con evidenti limitazioni nella possibilità di associare informazioni, con l'utilizzo di cartografia "tradizionale", che in opposizione a quella digitale potremmo definire "analogica".

all'interesse collettivo che esso possiede in quanto testimonianza di civiltà.

Non sorprende quindi come la predisposizione di opportune strategie volte alla condivisione di dati e conoscenze archiviate o ottenute tramite un Sistema Informativo Territoriale rivesta un'importanza tale da non poter essere trascurato.

Al di là di singole questioni che fanno appello oltre che al senso del dovere, anche alla correttezza professionale e che spingono alla pubblicazione e alla condivisione dei risultati della ricerca, da cui non dovrebbe essere disgiunta quella relativa ai dati da cui quelle conoscenze sono desunte, è la stessa Unione Europea ad aver preso chiaramente posizione a favore dell'opportunità e della necessità di una piena condivisione dei dati territoriali a partire da quelli prodotti da enti statati e quindi con risorse pubbliche, come dimostra la direttiva INSPIRE del Parlamento Europeo, che istituisce un'infrastruttura per l'archiviazione e la gestione dell'informazione territoriale fra gli stati membri dell'Unione Europea[12].

La direttiva INSPIRE soffermandosi sulla necessità di condividere i dati territoriali, chiama in causa aspetti cruciali relativi alla necessità di standardizzazione e metadatazione, affinché un qualsiasi processo di condivisione possa realizzarsi fondandosi sull'effettiva possibilità di reperire e confrontare dati sulla base di caratteristiche condivise.

Occorre a riguardo ricordare come dal 1994 sia disponibile *Technical Committee* dell'ISO, ISO/TC211 che si occupa della definizione di standard per la redazione e condivisione di informazioni geografiche e la geomatica. Nell'ambito di tale *Technical Committee*, gli International Standard (IS) pubblicati ammontano a 79, che salgono al 106 se si considerano anche quelli in corso di pubblicazione. Si tratta a ben vedere di uno sforzo considerevole, giustificato solamente dalla grande importanza che i dati geografici hanno assunto nell'ultimo ventennio. È significativo che proprio l'ultimo standard pubblicato l'ISO 19165-1:2018, abbia come oggetto "*the preservation of digital data and metadata*", che integra quanto gia disposto in precedenza tramite gli standard: ISO 19113, che fornisce le linee guida e i principi per la descrizione della qualità dei dati geografici; ISO 19114, sulla valutazione del livello qualitativo di dati e metadati; ISO 19115, e ISOTS-19139 per la redazione delle schede descrittive[13].

L'Italia ha negli anni scorsi recepito, tramite l'emanazione delle relative UNI, molte delle norme emanata dall'ISO ed ha preso posizione tramite appositi interventi legislativi in materia di diffusione dei dati geografici secondo standard condivisi. In tale processo, lungo e non privo di ripensamenti, va ricordata l'intesa Stato-Regioni ed Enti locali per la realizzazione di un Sistema Informativo Geografico di interesse generale, basato su principi condivisi[14], le attività e i do-

[12] Direttiva 2007/2/CE del 14 marzo 2007, recepita in Italia con il Regolamento (CE) n.1205/2008 del 3 dicembre 2008.

[13] Le prime tre norme sono state recepite a livello nazionale tramite le UNI-EN-ISO19113, le UNI-EN-19114 e le UNI-EN-19115.

[14] Nell'ambito di tale Conferenza Stato-Regioni e Provincie Autonome è stato approvato nella seduta del 26 settembre 1996 il documento che va sotto il nome di "Intesa GIS", a cui si è già fatto cenno a proposito dello standard CiTyGML. V. *supra*, p. 124.

cumenti prodotti sui sistemi informativi territoriali dal CISIS[15], dall'AGID[16] e dal Codice dell'Amministrazione digitale[17], che ha istituito il Repertorio Nazionale Dati Territoriali (RNDT), cha si propone come banca dati per il reperimento attraverso i relativi metadati di tutti i dati territoriali prodotti dalle pubbliche amministrazioni[18].

Oltre agli standard ISO occorre infine ricordare anche il *Dublin Core*, che sebbene sia nato per l'archiviazione e gestione di metadati in ambito bibliotecario, per la semplicità e l'essenzialità dei campi descrittivi ha avuto ampio utilizzo anche nella descrizione di dati geografici.

Poter disporre di informazioni che accompagnino, corredandolo, ogni singolo dato prodotto o collezione di dati, così come, nel caso specifico di dati territoriali, i livelli informativi che sono stati prodotti attraverso successive rielaborazioni dai dati di partenza, è infatti condizione necessaria non solo per una corretta archiviazione che voglia avvantaggiare le successive fasi di reperimento, ma anche e soprattutto per un riutilizzo adeguato dei dati, che s'intende o si deve condividere, agevolandone la comprensione e un riuso confacente alle caratteristiche che ne hanno determinato l'originaria realizzazione. Conoscere chi ha prodotto una collezione di dati, per quali finalità, con quali strumenti, quali informazioni ne ha tratto, permette di attribuire un valore adeguato ai dati che si intende riutilizzare. Consente di conoscere quali sono i limiti tecnici e il margine di errore e approssimazione, informazioni preziose per valutarne l'affidabilità nell'ottica dell'eventuale reimpiego. Infine non devono mancare mai le informazioni relative ad eventuali proprietà intellettuali, espresse tramite il riferimento a precise licenze, che ne regolano l'eventuale riutilizzo.

L'insieme di queste informazioni, denominate complessivamente "metadati", fornisce, per così dire, delle vere e proprie "condizioni d'uso", capaci di validare un set di dati. Ponendosi in questa prospettiva appare chiaro come la perdita, la corruzione o anche la disponibilità solo parziale dei metadati può, in casi estremi, determinare l'inutilizzabilità dei dati ad essi pertinenti e giustifica la grande attenzione che è stata ad essi attribuita, a livello internazionale, ed in ambito legislativo per la creazione di standard e norme che ne regolassero la creazione e l'utilizzo a partire da archivi nazionali e internazionali, verso la creazione e manutenzione dei quali spingono la direttiva INSPIRE del Parlamento europeo o il Repertorio Nazionale per i Dati Territoriali, prima citati.

Produrre dati di qualità e con il massimo rigore scientifico consentito dalle metodologie e dalle tecnologie disponibili, dichiararne le caratteristiche evidenziandone eventuali limiti, non è solo un dovere che fa appello al senso critico e alla deontologia professionale di chi conduce ricerca, ma diventa un obbligo verso l'intera comunità, nel momento in cui tali dati vengono prodotti con fondi pubblici. Allo stesso modo la condivisione e il riutilizzo dei dati prodotti, nel pieno rispetto delle eventuali licenze d'uso e

[15] Centro Interregionale per i Sistemi Informatici, geografici e Statistici.

[16] L'AGenzia per l'Itala Digitale (ex DigitPA, ex CNIPA).

[17] Decreto Legislativo 7 marzo 2005, n. 82 e successive modifiche.

[18] http://www.rndt.gov.it/

senza ledere legittime proprietà intellettuali, che in ogni caso devono riguardare unicamente le informazioni e le interpretazioni e mai dati di partenza, significa costruire un'idea di ricerca democratica, economica e sostenibile. Il che in tempi di continui tagli e carenze di fondi, non può non costituire l'unica strada percorribile.

Un'ultima questione va affrontata riguardo i dati territoriali e le possibili strategie per la loro condivisione. Allo stato attuale per la produzione e realizzazione di Sistemi Informativi Territoriali sono disponibili differenti tipologie di software, che offrono una discreta possibilità di scelta fra soluzioni diversificate soprattutto in termini di investimenti necessari per l'acquisto degli applicativi.

Fino a pochi anni fa, realizzare un sistema informativo territoriale imponeva l'acquisto di costose licenze per l'utilizzo di software proprietari, mentre oggi grazie all'enorme diffusione che i software GIS hanno avuto sono disponibili soluzioni *open source*, supportate da una comunità di sviluppatori molto attiva a livello internazionale, che offre prodotti capaci di assicurare le medesime prestazioni garantite dai più blasonati software commerciali.

Aldilà dei notevoli vantaggi in termini di riduzione dei costi, l'utilizzo di software *open source* nell'ambito della ricerca scientifica assicura di fatto maggiori garanzie sotto molteplici punti di vista. Un software open source offre sempre la possibilità di esplorare il codice sorgente, consentendo, con le opportune conoscenze, di verificare le logiche che stanno dietro determinate elaborazioni. Inoltre i software open source, non condizionati da logiche di mercato, offrono maggiori garanzie contro l'obsolescenza del software, mantenendo un maggiore livello di compatibilità nel tempo e rispetto alle versioni precedenti del medesimo software.

Eventuali criticità legate alla compatibilità del software in realtà non affliggono solamente software e hardware nel loro costante sviluppo nel tempo, ma coinvolgono allo stesso tempo l'interoperabilità fra differenti software contemporaneamente disponibili sul mercato, qualora utilizzino differenti formati di codifica dei dati. Ancora una volta sono i *software* commerciali a nutrire evidenti interessi nello sviluppo e nella diffusione di formati proprietari, salvo poi, talvolta, rilasciarne le specifiche consentendone l'utilizzo anche da parte di altri software concorrenti a tutto vantaggio della maggiore diffusione e dell'affermazione del formato, com'è di fatto accaduto con lo *shapefile*, formato di dati vettoriale prodotto agli inizi degli anni novanta dall'azienda americana ESRI, leader nel settore dei software GIS.

Oggi esistono molteplici formati per la memorizzazione di dati geografici, alcuni proprietari, come nel caso dei geodatabase della ESRI, altri open source, come ad esempio il GeoJSON o, al pari dello, sviluppati in ambito commerciale e poi diffusi con il rilascio delle specifiche, com'è accaduto, ad esempio, oltre che con lo *shapefile* anche con il formato dxf sviluppato dall'Autodesk.

In tale variegato panorama, in cui si collocano le iniziative di standardizzazione di portate avanti da organizzazioni internazionali come l'OGC, occorre riflettere su un'ultima questione. A differenza di molteplici applicativi che dispongono di formati di esportazione e condivisione di progetti fortemente aggregati, un

progetto GIS aldilà dei formati utilizzati per la memorizzazione, possiede una struttura fortemente disaggregata, limitandosi a registrare nel file di salvataggio del progetto i percorsi relativi o assoluti di ciascuna risorsa. Ciò rende la condivisione di interi progetti estremamente difficoltosa. Ciò è alla base della diffusione di WebGIS, che sfruttando le potenzialità di internet e il paradigma client/server in termini di comunicazione e trasmissione di dati, permette di condividere direttamente online un progetto GIS, consentendone la completa esplorazione e l'interrogazione anche da remoto. Anche riguardo un WebGIS esistono soluzioni open source, che non sfigurano in termini di prestazioni e di velocità d'accesso e risposta e nei confronti delle soluzioni commerciali.

6.3 GIS e archeologia

Le prime applicazioni GIS possono farsi risalire, come già affermato, alla fine degli anni cinquanta o all'inizio degli anni sessanta del secolo scorso, quando furono per la prima volta disponibili strumentazioni hardware e soluzioni software capaci di supportare lo sviluppo delle teorie allora elaborate dalla geografia sociale ed economica. Tuttavia i GIS rimasero appannaggio di gruppi ristretti di ricercatori operanti in seno alle università americane, come nel caso del *Canada Geographic Information System*[19].

Le prime applicazioni di software e strumentazioni GIS in ambito archeologico può farsi, invece, risalire alla metà degli anni ottanta, quando furono disponibili *Personal Computer* dotati di buone capacità di elaborazione a prezzi più contenuti, insieme a software di elaborazione GIS[20]. Da quel momento gli esempi dell'utilizzo di strumentazioni GIS a supporto della ricerca archeologica crebbe in maniera esponenziale e oggi il trattamento di dati in ambiente GIS, siano essi provenienti da un'indagine di scavo o da una ricognizione sul territorio, rappresenta una prassi assodata[21].

Tale diffusione costituisce la migliore conferma dei vantaggi che l'utilizzo di soluzioni GIS può apportare alla disciplina archeologica supportando sia le attività d'indagine, che quelle della gestione, della tutela e della valorizzazione.

L'archeologia fra tutte le attività di ricerca perseguite dall'uomo è certamente quella che ha instaurato un più stretto e solido legame con il contesto[22]. Qualsiasi testimonianza materiale prodotta dall'uomo possiede oltre ai significati storici insiti nell'oggetto in sé, legati alla sua materialità, alle tecniche di fabbri-

[19] Il *Canada Geographic Information System*, sviluppato agli inizi degli anni '60 da Roger Tomlinson per volere del Governo canadese, può essere considerato il primo Sistema Informativo. Esso era dedicato alla pianificazione territoriale e gestiva molteplici dati relativi soprattutto alla componente ambientale. Marble 1990.

[20] Forte 2002, p. 18.

[21] Emblematiche nei confronti di un fenomeno che alla metà degli anni '90 aveva già assunto dimensioni considerevoli, le affermazioni di Irwin Schollar in occasione del 25° anniversario dell'Organizzazione *Computer Applications in Archaeology*, il quale notava come i Sistemi Informativi Territoriali, avessero costituto l'argomento più discusso nei convegni di informatica applicata all'archeologia, e il fenomeno era destinato a crescere negli anni a venire. SCOLLAR 1999. Sul finire dello stesso decennio Barceló e Pallarés affermarono che gli anni novanta sarebbero stati ricordati come la "decade dei GIS". Barcelo - Pallarés 1996.

[22] Sull'importanza del contesto nell'indagine archeologica v, da ultimo Carandini 2017.

cazione, ai suoi caratteri morfologici, ai valori estetici, un insieme di significati derivati dal contesto di appartenenza. Solo tramite esso l'archeologia può tentare quella difficile ricostruzione dei fenomeni culturali, sociali, economici, politici, che costituiscono la trama e il fondamento su cui ricostruire una visione organica e unitaria delle società del passato nel loro agire storico, volto allo sfruttamento delle risorse naturali e ambientali al fine di accrescere e aumentare il proprio benessere, tanto quello della collettività, quanto quello del singolo che in essa vive e agisce.

La sfida dell'archeologia è sempre più una sfida alla complessità, tanto quella insita nell'estrema eterogeneità e polisemia delle manifestazioni materiali oggetto della propria indagine, quanto quella che caratterizza le società di cui essa intende ricostruire la storia. La complessità va però affrontata su un duplice livello analitico e sintetico. Vi è, infatti il momento dell'analisi, dell'articolazione, dell'approfondimento specialistico; vi è il momento della sintesi, dell'integrazione, e armonizzazione in una visione unitaria, l'unica capace di garantire una conoscenza scientificamente rigorosa e utile, non solo per la nostra comprensione delle società del passato, ma per una migliore organizzazione del nostro futuro. È in questo senso che oggi si parla sempre più di un approccio "globale"[23] che l'archeologia deve maturare, una globalità nella visione delle società del passato, da perseguire attraverso il superamento delle, pur necessarie, specializzazioni; una globalità nella visione delle società future, da costruire attraverso una ricerca che produca conoscenza, non come mera acquisizione fine a se stessa, ma come strumento di progresso collettivo.

I moderni GIS, a ben vedere, offrono un pieno supporto ad entrambe le sfide che l'archeologia deve affrontare, complessità e globalità, ed è questa la ragione che ne ha determinato il grande sviluppo.

Le possibilità derivate dalla gestione integrata di grandi quantità di dati, salvaguardandone la polisemia, e superandone l'eterogeneità attraverso il comune denominatore spaziale, consente agevolmente di passare dal livello dell'analisi a quello della sintesi e della visione complessiva. L'integrazione della base di conoscenza acquisita con quanto prodotto in altri ambiti e specializzazioni, a partire dai settori più direttamente coinvolti nei processi di gestione amministrativa, di tutela e valorizzazione del territorio, rende di fatto possibile generare quel circuito virtuoso nel quale la ricerca prodotta diviene strumento a supporto dell'azione futura.

Se le potenzialità dell'utilizzo di sistemi di gestione GIS applicati all'archeologia sono pertanto evidenti e tali da agire su molteplici piani, tuttavia le peculiarità del dato archeologico richiedono apposite strategie al fine di consentirne un utilizzo compatibile con le loro specifiche peculiarità.

Innanzitutto occorre riflettere come un GIS non costituisca uno strumento appositamente predisposto per la gestione di dataset archeologici, ma sia sviluppato fin dall'origine come un sistema per l'analisi di dati geografici.

[23] Volpe 2015.

Ciò implica che gli algoritmi di processamento geospaziale, tanto quelli di "map algebra" sui dati raster, quanto quelli applicabili a dati vettoriali, di cui i software GIS dispongono, siano strettamente legati a metodologie proprie degli studi geografici, applicabili alla modellazione di fenomeni antropici e naturali, ambito di studio specifico della moderna geomatica.

Nel suo ormai consolidato rapporto con gli strumenti GIS l'archeologia ha operato secondo differenti modalità. Talvolta la ricerca archeologica ha sfruttato, applicandoli a proprio vantaggio, quegli algoritmi di analisi geospaziale che, pur nati per finalità differenti, già da tempo sono stati proficuamente applicati all'indagine archeologica, o viceversa, pur essendo stati elaborati a supporto della ricerca archeologica, si basano su semplici relazioni geospaziali, come ad esempio un'analisi di buffer, che calcola l'estensione areale di un fenomeno a partire da una posizione iniziale. Fra i più comuni metodi di analisi mutuate dalla geografia rientrano certamente i poligoni di *Voronoi* o di *Thiessen*[24], mentre strategie di analisi elaborate in ambito archeologico, ma facilmente gestibili con gli algoritmi presenti in un GIS sono la *site catchment analysis* (SCA), la *site exploitation territory* (SET)[25] e la *trend surface analysis* (TSA)[26], tutte le tipologie di analisi che l'archeologia, specie nell'ambito della ricostruzione delle società preistoriche e protostoriche ha sviluppato applicandole al territorio.

Non sono tuttavia mancati neppure tentativi di sviluppare, specialmente in ambito open source, *plug-in* modellati per la risoluzione di determinate problematiche in ambito archeologico, ma rimangono numericamente esigui, né tali comunque da rendere plausibile

[24] La tecnica basata sui poligoni di Thiessen, sviluppata nell'ambito degli studi geometrici di George Voronoi e applicata all'analisi di modelli metereologici da Alfred Thiessen, è stata usata e talvolta anche abusata per la determinazione di modelli di insediamento di un determinato territorio. Attraverso infatti la delimitazione di un territorio attraverso dei poligoni nel cui centro giace il sito s'interesse, realizzata per via puramente geometrica a partire dalla determinazione di punti medi lungo i segmenti congiungenti sue siti vicini, mira a determinare l'area d'influenza di un sito rispetto a quello vicino. Tale analisi presenta differenti limiti, non permettendo di tenere conto della differente estenzione di un sito e trattando il territorio in forma astratta. Sulla definizione del metodo nei sui ambiti di applicazioni originari v. Thiessen 1911 ; Voronoi 1908 Per una descrizione del metodo applicato alla ricerca archeologica v. Renfrew - Bahn 1995, p. 157-158; Per un approccio critico al metodo applicato alla ricerca archeologica v. Angell - Moore 1984.

[25] La *Site Catchment Analysis* (SCA) o analisi del bacino di approvvigionamento, si basa sull'assunto che l'essere umano nel costante agire all'interno di un territorio, tende a trasportare e accumulare all'interno del sito in cui risiede più o meno stabilmente una serie di oggetti, materie prime, derrate alimentari, che provengono dall'area circostante. La *Site Catchment Analysis*, mira quindi a stabilire l'area di approvvigionamento di un sito e quindi indirettamente la sua influenza sul territorio, sulla base della determinazione della provenienza originaria di alcuni manufatti presenti in un sito. Simile, ma caratterizzata da un'inversione di prospettive rispetto alla SCA, la *Site Exploitation Territory* (SET) basandosi sul semplice assunto, che all'aumentare della distanza da un sito una qualsiasi risorsa perde progressivamente appetibilità in quanto diviene economicamente svantaggioso il suo sfruttamento, prende le mosse da un'analisi del territorio intorno ad un sito per stabilire l'estensione areale di quello realmente sfruttato, in modo da dedurne sulla base delle sue caratteristiche la tipologia dell'insediamento in questione. Le prime applicazioni di analisi territoriali, sia SCA, che SET, possono farsi risalire agli studi di Claudio Vita Finzi ed Eric Higgs, applicate al sito di Monte Carmelo in Palestina. Non sono mancate anche delle varianti, che hanno cercato di integrare i due differenti approcci, di cui il caso più noto è quello delle ricerche svolte da

parlare di GIS specificatamente sviluppati per la ricerca archeologica[27].

Se il dato archeologico nella sua dimensione spaziale può trovare una piena ed efficace gestione all'interno di un ambiente GIS, usufruendo di differenti tipologie di algoritmi di analisi che, nella maggioranza dei casi, anche se non sviluppati appositamente per la risoluzione di questioni archeologiche possono trovare un utile impiego anche in tale ambito, è la natura polisemica del dato archeologico, più volte messa in evidenza, insieme a problemi legati ad un certo grado di approssimazione con cui esso si presenta a determinare la necessità di mettere in atto apposite strategie per una gestione efficace[28].

Essendo libero da limitazioni di scala, grazie alle possibilità offerte dalla cartografia numerica un GIS consente di passare agevolmente dalle indagini di macro a quelle di micro area, dall'*extra-site* delle ricognizioni di superficie estese a vasti comprensori, all'*inter-site*, di uno scavo stratigrafico. Ciò naturalmente impone differenti metodologie d'analisi, strettamente legate al livello di dettaglio e precisione richiesti.

Riprendendo la divisione operata anni or sono da Djindjian, i settori di applicazione dei GIS in archeologia possono essere articolati in: survey, indagini territoriali, indagini di scavo, applicazioni di *Cultural Resource Management*.

Lo scopo precipuo di un survey consiste nella determinazione della presenza di siti archeologici, dell'eventuale loro dislocazione all'interno di un territorio a partire dalle tracce visibili sul terreno o dalla concentrazione areale dei reperti, come supporto a strategie di analisi ad alta intensità.

Tali indagini, basandosi principalmente sulla dislocazione spaziale e la concentrazione di reperti, trovano nel

Kent Flannery a Oaxaca. Flannery 1976; Higgs 1972; Higgs 1975; Vita-Finzi-Higgs 1970. Per la base teorica v. anche Renfrew-Bahn 1995, pp. 224-225; Renfrew-Bahn 2005, p.p172-175.

[26] La *Trend surface analysis* o "analisi della distribuzione di superficie" è una delle tipologie di analisi di superfice maggiormente impiegata dalla ricerca archeologica in ambito preistorico e protostorico. Essa mira all'analisi della distribuzione spaziale di un fenomeno attraverso le attestazioni di elementi ritenuti significativi, come ad esempio quelle relative ad un determinato manufatto. Tale tipologia di analisi presenta differenti varianti e correttivi volti a diminuire l'effetto di eventuali rumori di fondo. Un esempio in tal senso è costituito dalla *Fall-out analysis* o "analisi della diminuzione", che cerca di contemperare i risultati della *trend surface analysis* considerando la fisiologica diminuzione delle attestazioni di un fenomeno all'aumentare della distanza dal centro di irragiamento. Per gli aspetti metodologici v. Renfrew-Bahn1995, pp. 328-334.

[27] Uno dei plug-in più usati ed appositamente sviluppato a supporto della ricerca archeologica è *Pyarchinit*, il quale scritto in Python e perfettamente integrato all'interno del software GIS Desktop QGIS, consente la gestione di dati scavo e della relativa documentazione schedografica. V Mandolesi 2009; Mandolesi-Cocca 2013.

[28] La necessità di disporre di attributi certi nei processi di archiviazione e gestione di un'entità all'interno di una base di dati o in un ambiente GIS, si scontra spesso con un margine d'incertezza insito nel record archeologico e derivato da differenti fattori, quali la lacunosità o la parziale conservazione dell'evidenza oppure differenti ipotesi interpretative. Allo stesso modo anche la cronologia, raramente espressa in modo preciso, pone molteplici questioni sul modo più adatto alla sua formalizzazione. Ma ciò che maggiormente influisce nell'ambito di una gestione GIS di un dato archeologico riguarda il grado di approssimazione dell'informazione spaziale. Anche in questo caso non è raro il verificarsi di incertezze o approssimazioni nella collocazione spaziale di determinate evidenze per l'assenza o l'insufficienza di documentazione, per l'impossibilità di effettuare verifiche di controllo, come accade in contesti distrutti o non più visibili. Per tali criticità legate alla gestione del record archeologico in ambiente GIS v. Mazzaglia 2016.

GIS un'intera serie di strumenti già perfettamente integrati, in quanto tali strategie di analisi costituiscono un patrimonio condiviso con altre aree disciplinari.

Le indagini di scavo comportano la registrazione sia dei dati stratigrafici nella loro articolazione spaziale e nei loro reciproci rapporti, sia dei reperti inseriti all'interno di una stratigrafia. Nel medesimo ambito è inoltre possibile annoverare anche le indagini stratigrafiche sull'elevato storico, che pur con le differenze determinate dall'applicazione ad un diverso oggetto di studio, che comportano anche diversità metodologiche, possono essere equiparate ad un'indagine di scavo, comportando la medesima determinazione della distribuzione spaziale delle stratigrafie e del loro reciproco rapporto[29]. Al contrario delle analisi *extra-site*, le indagini di scavo, così come l'analisi stratigrafica del costruito, presentano ancora i maggiori limiti all'applicazione efficiente, proficua e condivisa del GIS e ciò per due ordini di motivi. Il primo è legato alle particolari problematiche e alle peculiarità metodologie dello scavo stratigrafico o dell'analisi degli elevati; il secondo alla mancanza di approcci teorici comuni, fra gli "addetti ai lavori", in vista della creazione *tools* che, operando in ambiente GIS, permettano di soddisfare i particolari requisiti di registrazione del dato presentati da tali specifici settori d'indagine, che nel caso dello scavo archeologico richiede la gestione tridimensionale di volumi, superfici di strato e reperti, e, nel caso della stratigrafia del costruito, la gestione su di un piano verticale delle superfici di strato e dei relativi rapporti topologici.

Il *Cultural Resource Management* (CRM) finalizzato alla gestione, tutela e valorizzazione del patrimonio culturale rappresenta un importante campo di applicazione dei GIS. In tale ambito diventano particolarmente preziose le capacità di interpolazione dei dati che un GIS offre, essenziali per la redazione di carte del potenziale archeologico. Tali strumenti, capaci di effettuare previsioni sulla possibile presenza di giacimenti archeologici in una determinata area d'interesse, desunti sulla base dei dati derivati dalle aree limitrofe, possono offrire un concreto supporto decisionale nelle operazioni di pianificazione dello sviluppo urbano o territoriale, permettendo, in tempo reale, di prevedere le conseguenze delle azioni umane sul patrimonio archeologico sepolto, attraverso quanto è invece conosciuto ed esattamente collocato nel suo contesto spaziale.

Si è ribadito più volte come il GIS possa essere considerato uno strumento metodologico. In tal modo, come un qualsiasi metodo esso dipende tanto dalla formazione scientifica di chi progetta un GIS, quanto dagli obiettivi della ricerca a cui il prodotto deve essere applicato. Tale caratteristica può divenire un criterio discriminante per distinguere all'interno di una produzione sempre più vasta di progetti GIS in ambito archeologico, prodotti che possiedono una valenza scientifica da altri che invece sembrano solo essere il frutto di una moda giocata sulla malcelata equazione che lega il GIS ad un'idea

[29] La differenza principale riguarda semmai la limitata possibilità di indagare in profondità uno strato architettonico, che impone di ragionare esclusivamente nei termini di superfici visibili. Ciò influisce naturalmente sia nella determinazione dei rapporti stratigrafici, sia sulla mancanza di dati relativi alla composizione dello strato oltre quelli visibili in superficie.

di scientificità, di precisione e di affidabilità. Nei casi limite un GIS diventa un semplice visualizzatore di dati, i quali spesso non presentano nessun vantaggio da un trattamento spaziale. Tutto ciò porta quindi a riflettere e rigettare l'immagine diffusa di un GIS come un ambiente "neutro", capace di archiviare e processare in modo oggettivo l'insieme di dati in esso contenuti. Il GIS è un ambiente di lavoro fortemente condizionato dalle metodologie e dalle finalità di chi lo ha progettato ed in ciò va visto più che un limite, il suo maggiore punto di forza, a patto di essere consapevoli di alcuni rischi connessi al suo utilizzo e di alcuni condizionamenti che esso impone.

La forte componente geografica che predomina, come comune denominatore, all'interno del GIS non deve spingere a conferire un ruolo preponderante allo spazio sull'uomo, che in esso agisce, e sulla sua cultura, che ne rappresenta la particolare e contingente modalità del suo essere nel mondo: qualsiasi forma di determinismo geografico, in quanto approccio parziale allo studio di una realtà complessa è sempre da evitare. In secondo luogo, come gli archeologi cognitivi hanno contribuito a chiarire è di fondamentale importanza riflettere sul ruolo dei processi mentali nell'azione umana, tanto nella produzione materiale di oggetti, quanto in quella immateriale di comportamenti e credenze, ambiti nei quali la sfera dei significati può avere pari importanza rispetto a quella del significante, che ne sta alla base. Lo spazio ed il territorio, caricandosi di significati e valori condivisi all'interno della comunità che li ha elaborati, non costituiscono certamente un'eccezione, in quanto il passaggio da "territorio" a "paesaggio" non può prescindere dai valori che l'uomo vi ha introdotto nel corso del tempo.

6.4 GIS. Limiti e prospettive future

Le possibilità introdotte dall'implementazione di applicativi DBSM capaci di archiviare oltre a dati di carattere descrittivo anche informazioni di tipo spaziale, espressione diretta della geometria di un oggetto e della sua esatta posizione all'interno di uno spazio georiferito, aprono ad importanti prospettive, consentendo di disporre di strumenti capaci di offrire una forte integrazione fra l'archiviazione, la gestione e l'analisi, su base geospaziale e topologica, dei dati raccolti[30].

Altrettanta importanza acquisisce, nella medesima prospettiva, la disponibilità di oggetti digitali tridimensionali, scomponibili in sottoinsiemi di elementi regolati da logiche funzionali e legate da un alto grado di iconicità con l'oggetto reale di cui rappresentano una copia digitale, sia dal punto di vista dimensionale e volumetrico, che nella resa superficiale.

L'integrazione fra DBMS con estensione spaziale e oggetti 3D semanticamente strutturati e fortemente iconici, rappresenta certamente una delle prospettive più interessanti nell'ottica dello sviluppo di strumenti conoscitivi altamente performanti[31].

Anche in questo caso il dato spaziale, inteso come elemento capace di garantire un'accurata localizzazione delle informa-

[30] V. al riguardo, *supra*, paragrafo 5.4 e Abdul-Rahman-Zatlanova-Coors 2006; Breunig-Zatlanova 2011 ; Zatlanova-Stoter 2006; Zatlanova-Stoter 1980.

[31] Harbola-Coors 2018.

zioni all'interno di una copia tridimensionale, replica esatta di un contesto reale, costituisce l'unico comune denominatore che leghi insieme dati e oggetti digitali nella medesima piattaforma conoscitiva. Gli unici strumenti che, allo stato attuale, hanno i requisiti per poter svoltare tale integrazione sono i software GIS. Tuttavia le attuali piattaforme GIS 3D, sebbene abbiano convogliato da più di un ventennio gli sforzi, necessariamente multidisciplinari, di differenti gruppi di ricerca, e pur mostrando potenzialità estremante interessanti, continuano ad essere afflitti da notevoli limitazioni[32].

La gestione della terza dimensione introduce di fatto, sotto molteplici punti di vista, una crescita esponenziale nella complessità e nella quantità di dati che devono essere gestiti. Dal punto di vista della rappresentazione spaziale un oggetto tridimensionale, richiede la definizione delle tre coordinate x, y, z di ciascun vertice che, associato a spigoli e lati, permette di rappresentarne la superficie esterna. Tanto più complessa e irregolare sarà tale superficie, tanto maggiore sarà il numero dei vertici necessari per crearne una copia digitale. Ciò ha implicazioni non trascurabili sia riguardo le tecniche di rappresentazione, sia riguardo la quantità di dati da memorizzare su supporto informatico, con conseguenze notevoli in termini di potenza di calcolo richiesta dalla loro gestione.

Se la rappresentazione di un oggetto tridimensionale morfologicamente semplice può infatti essere eseguita manualmente tramite la definizione di un numero limitato di vertici, l'aumento progressivo della complessità geometrica, impone l'utilizzo di strumenti automatici in fase di rilievo, durante la restituzione digitale delle informazioni sotto forma di nuvole di punti, e nella creazione delle *mesh* poligonali.

Anche sotto l'aspetto della gestione degli oggetti digitali, ambito all'interno del quale ricade tanto la questione della visualizzazione dinamica dell'oggetto in uno spazio tridimensionale, quanto quella di un'eventuale interrogazione dei dati e delle informazioni che esso può contenere, la crescente complessità formale si accompagna ad un progressivo l'aumento della quantità di dati che è necessario archiviare e, sulla base di specifiche necessità, processare.

In ciò trova motivazione l'esigenza di semplificare e alleggerire oggetti digitali complessi, tramite processi, necessariamente automatizzati, di riduzione del numero dei vertici e conseguentemente delle facce dei poligoni che ne compongono le superfici. In tale *iter*, in cui alle problematiche derivate dalla complessità morfologica dell'oggetto andrebbero aggiunte quelle relative alla caratterizzazione delle superfici tramite applicazione di *textures* fotografiche, diventa estremamente importante la definizione delle finalità da perseguire e di conseguenza la scala più opportuna a cui si intende operare.

Alle criticità connesse con la complessa gestione di modelli tridimensionali, si aggiunge quella derivata dall'applicazione di analisi spaziali e topologiche agli oggetti digitali posti all'interno di uno spazio georiferito. Anche sotto questo aspetto, all'aumento di una dimensione corrisponde una crescita esponenziale in termini di complessità di calcolo, per

[32] Zatlanova-Rahman-Aias Abdul Piloukc 2002.

indentificare e connotare ogni singolo punto, superficie o volume d'interesse all'interno di uno spazio tridimensionale. Il passaggio di scala che potrebbe, ad esempio, avvenire, estendendo l'ambito d'interesse da una singola struttura muraria all'intero complesso storico o archeologico di cui essa è parte, e da questo al contesto naturale o urbano, richiede pertanto l'adozione di opportune strategie, che operino sull'aumento o sulla riduzione del livello di dettaglio nella rappresentazione dei modelli, con conseguenze dirette sulla precisione e sulla qualità dei dati ad essi associati[33] (Fig. 6.1).

Le ragioni sopra rapidamente esposte sono alla base delle attuali limitazioni nell'utilizzo, per scopi e finalità connesse ad attività di ricerca, di piattaforme GIS capaci di gestire dati tridimensionali. Sebbene ormai da alcuni anni siano disponibili software GIS in grado di offrire soluzioni per l'archiviazione, la gestione e la visualizzazione di dati 3D, questi non presentano allo stato attuale un livello di sviluppo e una maturità tale da proporre soluzioni capaci di soddisfare le molteplici e disparate esigenze di una conoscenza che, nel livello di dettaglio, nella resa dimensionale e nella collocazione spaziale dei modelli e dei dati ad essi relativi trova concreta possibilità di fornire un supporto alla ricerca, alla tutela e alla valorizzazione.

Le ultime release di software GIS, sia commerciali, che open source, cosi come i principali DBMS con estensione geospaziale offrono piena integrazione di tipologie di *features* grafiche capaci di archiviare dati tridimensionali, sotto forma di *multipoint*, *multilinestring* e *multipolygon*[34]. Tuttavia la loro gestione all'interno di una piattaforma GIS continua ancora ad essere abbastanza complessa e fortemente limitata, sia dal punto di vista degli algoritmi di analisi tridimensionale dei dati su base geometrica e topologica, sia per la loro visualizzazione, che è generalmente demandata a semplici viewer o applicativi esterni rispetto alla piattaforma GIS, che rimane fortemente legata alle due dimensioni.

Le stesse possibilità di disegno e creazione di oggetti tridimensionali all'interno di ambienti GIS è limitata ad alcune semplici *tools* che consentono una modellazione di base, mentre la creazione di oggetti 3D con morfologie complesse è al momento possibile unicamente tramite

[33] Diventa a tal riguardo cruciale sia stabilire dei livelli di dettaglio in fase di modellazione, che strategie di visualizzazione basate su logiche multilivello, che consentano di visualizzare in modo dinamico e sulla base al rapporto di scala il massimo livello di dati possibile. Tale esigenza ha portato alla definizione di differenti livelli di dettaglio LOD, che trovano largo impiego sia nell'ambito dello standard CiTyGML, che nella modellazione tramite strumenti CAD e BIM. L'attuale standard CiTyGML, versione 2.0, prevede, ad esempio, cinque livelli di dettaglio: LoD0, adatto ad una scala di rappresentazione a livello regionale e territoriale, con un margine di errore nei modelli 3D maggiore di 5 m; LoD1, adatto ad una scala di rappresentazione a livello urbano, con un margine di errore nei modelli 3D compreso fra i 2 e i 5 m; LoD2, adatto ad una scala di rappresentazione delle suddivisioni urbane, con un margine di errore nei modelli 3D compreso fra i 0,50 e i 2 m; LoD3, adatto ad una scala di rappresentazione dei dettagli architettonici esterni del singolo edificio, con un margine di errore nei modelli 3D compreso fra i 0,20 e i 0,5 m; LoD4, adatto ad una scala di rappresentazione dei dettagli architettonici interni al singolo edificio, con un margine di errore nei modelli 3D inferiore ai 0,20 m. V. Gröger *et alii* 2012, p. 12.

[34] Le *Multipoints*, le *Multilinestrings* e le *Multipolygons* sono features che consentono rispettivamente di gestire e rappresentare punti, linee e poligono la cui posizione nello spazio dei vertici avviene attraverso tre coordinate *x, y, z*.

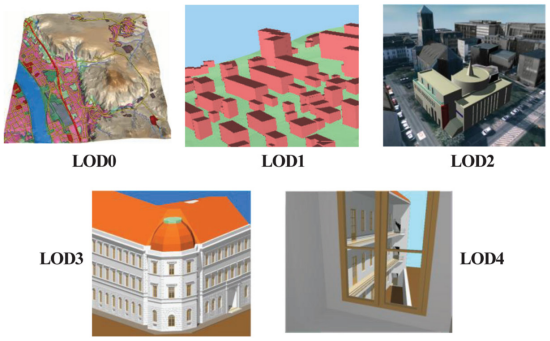


Fig. 6.1. I cinque livelli di dettaglio LoD previsti dallo standard CiTyGML, da Gröger *et alii 2012, p.12.*

una modellazione con software esterni e una successiva importazione all'interno dell'ambiente GIS, tramite opportuni formati di interscambio.

I recenti tentativi di modellazione tridimensionale di intere città, di cui sono disponibili numerosi esempi provenienti da differenti contesti internazionali, realizzate seguendo lo standard CiTyGML e specificatamente orientate alla gestione e pianificazione urbana[35], hanno certamente avuto molteplici meriti. Esse hanno stimolato e convogliato gli sforzi di università e centri di ricerca, enti amministrativi e organismi politici, case produttrici di software e libere comunità di sviluppatori, verso la risoluzione di problemi legati all'integrazione, su una comune base geospaziale e attraverso piattaforme GIS, di molteplici tipologie e formati di dati, sia 2D che 3D, necessari per la descrizione e la formalizzazione delle differenti componenti di una citta: dall'edificato alla rete infrastrutturale, dalla geomorfologia, alle differenti componenti antropiche e ambientali (Fig. 6.2).

La realizzazione di modelli digitali estesi fino a coprire l'area di interi organismi urbani, lascia intuire gli enormi vantaggi che l'integrazione di dati può comportare in termini di pianificazione e gestione dello spazio urbano, con la possibilità di effettuare svariate applicazioni in differenti ambiti[36]. Sarebbe altrettanto interessante valutare le conseguenze dell'estensione di tali modelli alla gestione di contesti archeologici o di centri storici, caratterizzati dalla presenza di monumenti e di edifici di grande rilievo storico-artistico, la cui presenza nei modelli digitali fino a questo momento realizzati applicando gli standard CiTyGML ha avuto uno spazio fortemente limitato e relativo perlopiù a singoli contesti monumentali, pur non essendo mancati diverse proposte, anche di estensione dello schema concettuale per una più efficiente integrazione e gestione del dato storico all'interno del modello[37].



Fig. 6.2. Modello digitale della città di Berlino realizzato secondo lo standard CiTyGML, da Döllner *et alii 2006, p.12.*

[35] Per un esempio relativo alla città di Berlino v. Döllner *et alii* 2006. Per un elenco aggiornato dei modelli urbani disponibili v. www.citygml.org/3dcities/

[36] V. fra gli esempi di applicazione, utilizzato per efficientamento energetico Sihombing-Coors 2018.

[37] Vedi in particolare: Costamagna 2012; Scianna-Ammoscato-Corsale 2008; Zalamea-Van Orshoven-Steenberghen 2016.

Parte Seconda

CONTESTI



I defunti accoglievano, sulle strade che portavano a Pompei, tutti coloro che giungevano al porto del Sarno: a ciascuna delle porte montavano una guardia eterna, come per ricordare che una città è fatta anche del prestigio antico dei suoi grandi antenati.

R. Étienne, *La vita quotidiana a Pompei*, 1973, p. 349.

Capitolo VII

La necropoli di porta nocera a Pompei

«E posso finalmente uscire dall'antica Porta Nuceria, al di fuori della città, sulla via che conduceva a Nuceria […]. Negata, ammessa, più negata che ammessa […]*, ecco riemergere la vecchia porta dopo il gigantesco sgombero delle terre che l'avevano sepolta e occlusa di dentro e di fuori* […] *e appena fuori dalla Porta ecco riapparire , sotto l'alta coltre di ceneri e lapilli, le prime tombe allinenate lungo i margini della strada. Sarà, dopo la famosa via dei Sepolcri al di fuori della Porta di Ercolano, la seconda grande via della Necropoli pompeiana* […]*. La vita di Pompei si ricostruisce dalle case e dalle tombe».*

Maiuri 1993, pp. 148-149.

7.1 Necropoli di Porta Nocera

7.1.1 Storia degli scavi

«*In uno scavo come quello di Pompei in cui l'aspetto dominante imposto dalla ricerca è quello della casa antica le necropoli appaiono generalmente oggi all'occhio del visitatore come un aspetto marginale, secondario, nel complesso della città*». Con queste considerazioni Stefano De Caro introduceva la descrizione della Necropoli di Porta Nocera, nell'opera che, insieme ad Antonio D'ambrosio, dedicò all'edizione di questo importante settore della città, scavato, ma mai pubblicato, da Amedeo Mauri fra il 1954 e il 1956[1].

Che i resti di una necropoli dove si conservano monumenti funerari di straordinario valore e, al momento della scoperta, in ottimo stato di conservazione, siano rimasti inediti per tre decenni, trascurati e scarsamente conosciuti sia dagli studiosi, che da gran parte delle migliaia di turisti che ogni giorno visitano Pompei, è certamente un elemento su cui riflettere. La ragione di ciò non è unica, né riconducibile semplicemente a fattori di gusto, che poterebbero a prediligere determinate tipologie di monumenti piuttosto che altri. Influiscono, piuttosto quelli che, qualche anno addietro, Andreina Ricci, proprio a proposito dei beni culturali del nostro paese, definì come "*I mali dell'abbondanza*"[2].

Nello straordinario contesto di Pompei, dove per le circostanze storiche universalmente note e connesse all'eruzione del Vesuvio del 79 d.C., un'intera città, insieme al suo territorio extraurbano e al vicino centro di Ercolano, rimase sepolta sotto una spessa coltre di ceneri e lapilli, la quantità e la qualità dei resti archeologici giunti fino a noi, fa sì che un intero settore funerario con più di settanta monumenti possa, dopo la scoperta, rimanere nella penombra per diverso tempo e solo in anni recenti ricevere quell'attenzione che esso merita.

[1] D'Ambrosio-De Caro 1983, p. 23.
[2] Ricci 1996.

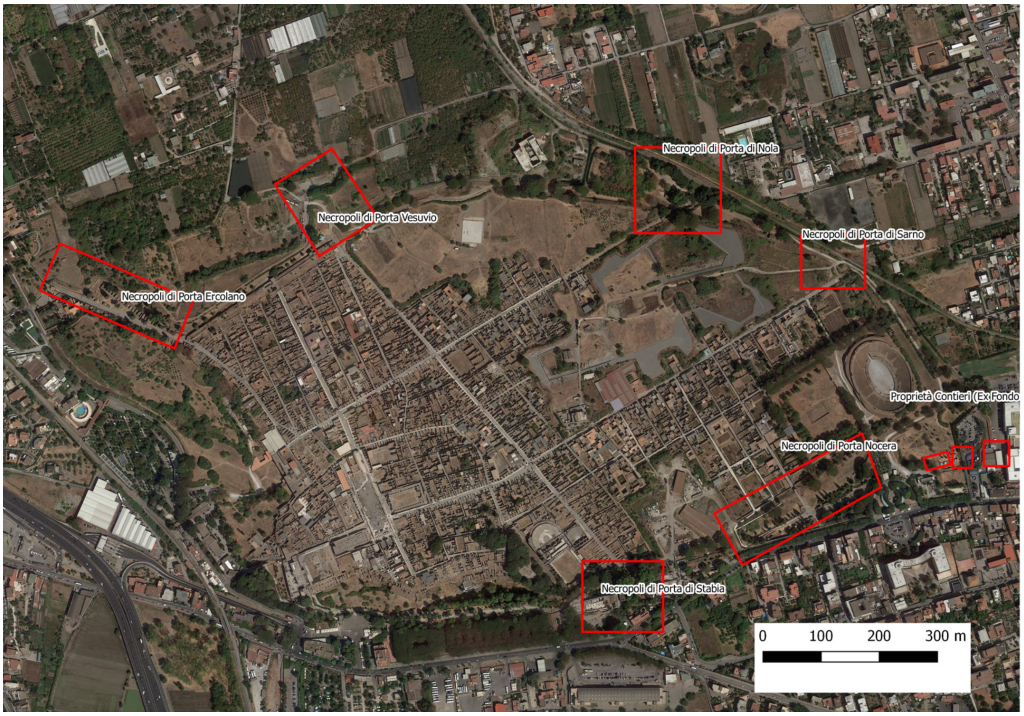


Fig. 7.1. Pompei, area archeologica. Foto satellitare con l'indicazione delle aree funerarie. (Fonte cartografica Google Earth).

La Necropoli di Porta Nocera è la seconda area funeraria per ordine di importanza rinvenuta a Pompei, la prima se si considera il numero di monumenti funerari conservati. Essa si aggiunge alla necropoli di Porta Ercolano, la prima ad essere stata individuata, riportata alla luce e conosciuta dal grande pubblico, e a quelle di Porta Vesuvio, Porta di Nola e Porta di Stabia[3], a cui vanno aggiunti alcuni ritrovamenti, effettuati fra 1754 e 1757, da Karl Weber[4], di alcune sepolture successivamente interrate in un'area non meglio precisabile fra Porta Marina e porta di Stabia (Figg. 7.1-7.3).

Alle aree funerarie sviluppatesi lungo le principali arterie stradali, che dalla città conducevano verso i maggiori centri dell'*interland*, vanno aggiunti diversi ritrovamenti sporadici di sepolture, che nel corso degli anni, in modo casuale, sono stati rinvenuti a seguito

[3] La necropoli di Porta Ercolano fu la prima ad essere stata scavata fra il 1763 e il 1838 e, avendo costituito per diversi decenni il principale punto di accesso alla città, ha lasciato un segno nell'immaginario collettivo dei visitatori fino ai primi decenni dell'Ottocento, quando la quantità e la qualità delle testimonianze rinvenute con il progredire degli scavi insieme all'apertura di altri punti di accesso, fecero irrimediabilmente perdere a tale necropoli l'originario primato, come ricordava S. De Caro nel passo sopra citato. Le rimanenti aree funerarie, tutte in connessione con le porte urbiche e le principali arterie extraurbane, furono scavate fra gli ultimi decenni del XIX secolo e il primo decennio del XX. La prima in successione fu la necropoli di Porta di Stabia (1889-1900), seguita da quella di Porta di Nola (1907-1908), Porta Vesuvio (1907-1910). Pensando-Guidobaldi 2006, p. 246-259. V. da ultimo Campbell 2014.

[4] Emmerson 2010, p.77; Fiorelli 1850, pp. 11-14; Fiorelli 1860, pp. 11-12.

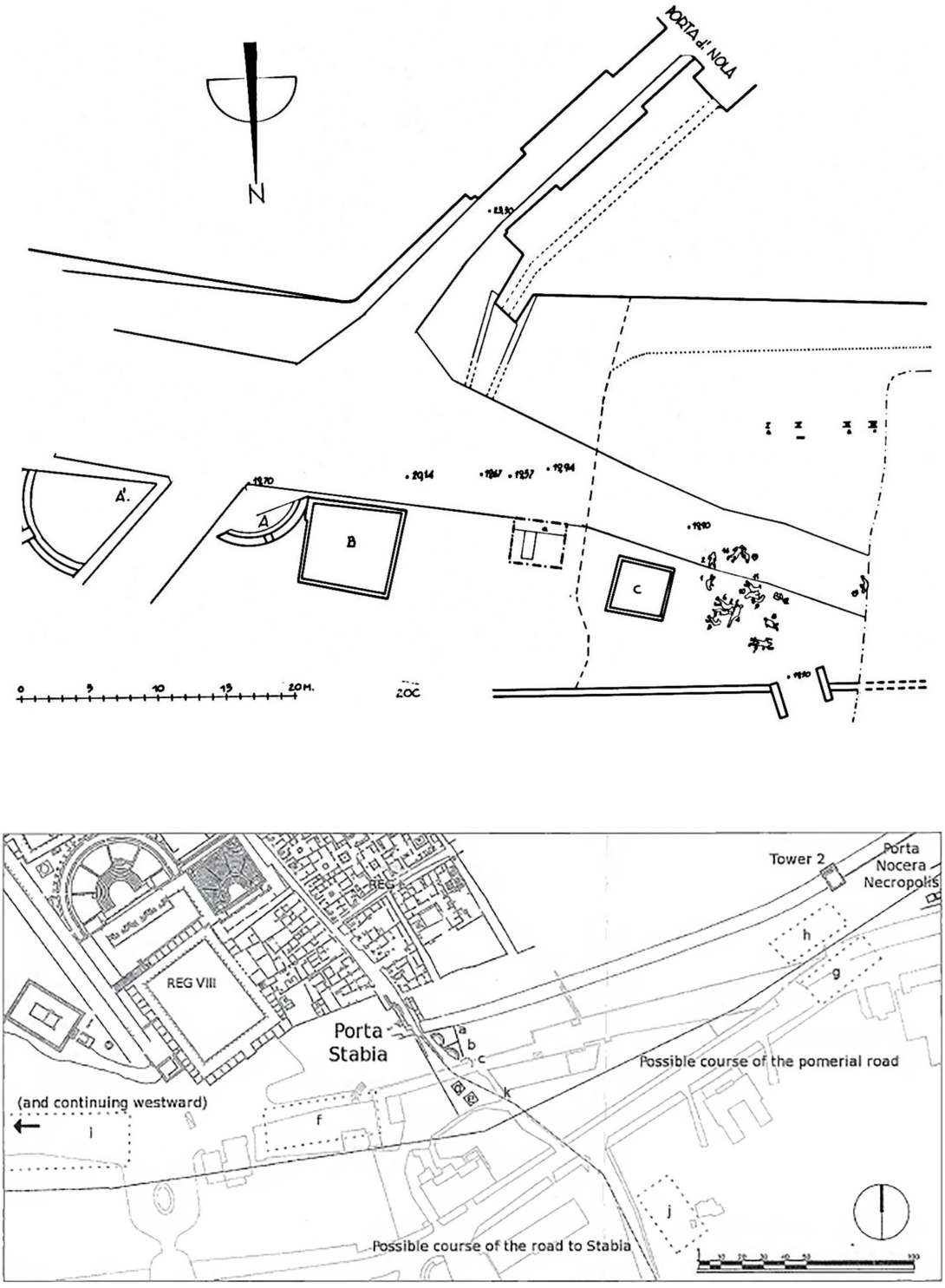


Fig. 7.2. Pompei. In alto planimetria della Necropoli di Porta Nola. (da Cormack *2007); in basso planimetria della Necropoli di Porta Stabia (da* Emmerson *2010).*

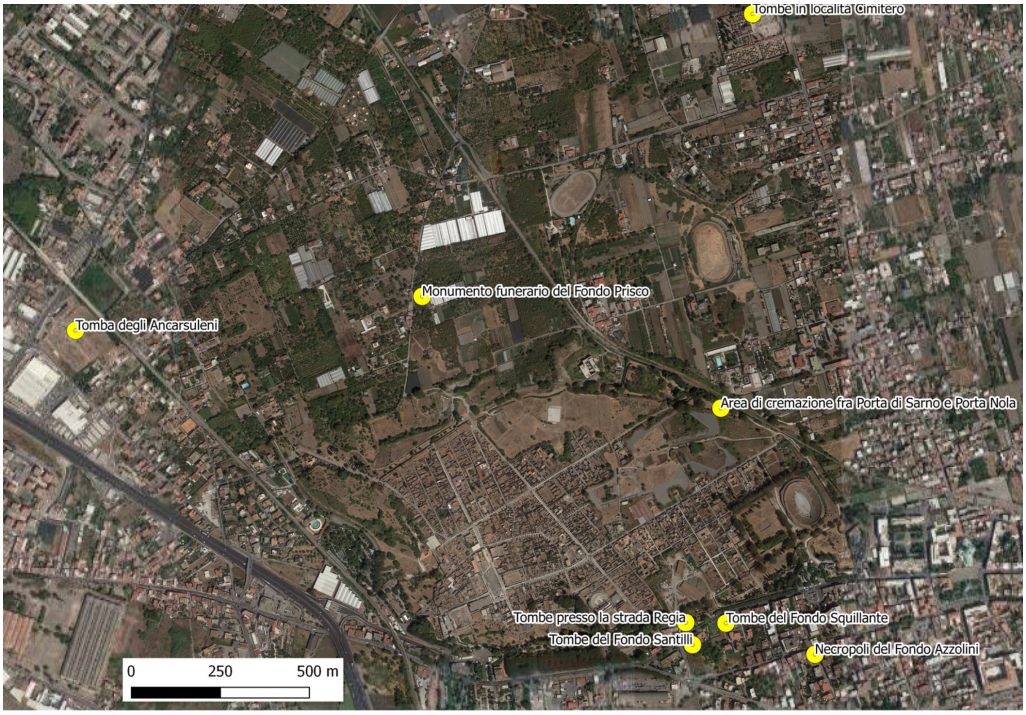


Fig. 7.3. Pompei, Localizzazione delle sepolture in area extraurbana (rielaborazione da Stefani *1998, p.90).*

di interventi di scavo di differente tipologia e che consentono, pur nella lacunosità e frammentarietà delle informazioni che li caratterizza, di ampliare il quadro della dislocazione delle aree funerarie nell'immediato entroterra della città (Fig. 7.4).

La presenza e la dislocazione di tali sepolture e monumenti funerari, connessa con le principali necropoli dislocate ai margini della città, si rivela particolarmente utile al fine di ricostruire le logiche dell'utilizzo e dell'occupazione fisica e mentale del territorio, nei quali l'aspetto cultuale e quello funerario rivestirono sempre un ruolo considerevole, non solo nelle società del passato.

Infatti un'importanza fondamentale dovettero assumere nei processi di occupazione del territorio intorno alla città, fin almeno dal VI secolo a.C., la creazione di alcuni luoghi di culto, che in funzione strategica ne assicuravano il controllo e talvolta, per le peculiari tipologie in cui il sentimento religioso si manifestava, svolgevano un ruolo di potente attrattore nei confronti delle aree da destinare ai riti funerari[5].

Dei tre santuari extraurbani oggi conosciuti[6] (Fig. 7.5), quello localizzato nei pressi del Fondo Bottaro, generalmente attribuito, pur nell'estrema esiguità dei dati disponibili, al culto di Nettuno, aveva probabilmente un'importanza strategica per il controllo della foce del Sarno[7].

[5] Guzzo 2007, pp.43-44; Osanna-Pellegrino 2017, pp. 373-375.

[6] Barnabei 2007; D'Alessio 2009; Van Andringa 2009.

[7] La località Fondo Bottaro si trova a circa 750 mt in direzione sud-ovest rispetto all'in-

Dei due rimanenti santuari, quello localizzato presso il Fondo Iozzino, le cui recenti indagini sembrano confermare nell'identificazione della dedica a Giove Meilichio e alla sua paredra Cerere-Ecate[8], ha fornito importanti testimonianze di un luogo di culto frequentato dal VI sec. a.C. fino almeno al I sec. a.C.[9], nelle cui vicinanze si colloca il recinto funerario degli Epidii, che ha restituito la maggiore testimonianza, per estensione e numero si inumati, di un'area di sepoltura sannitica nel territorio di Pompei[10]. Il santuario dionisiaco di S. Abbondio[11], costituisce infine un ulteriore esempio di luogo di culto che, posto su una bassa collina a controllo del sottostante corso del Sarno, aveva funzioni strategiche. La costruzione dell'edificio templare, di cui sono stati messi in luce le porzioni inferiori dei muri i può essere datata fra la fine del III sec. e l'inizio del II secolo a.C., momento a partire dal quale e senza soluzione di continuità l'edificio permase in uso fino all'eruzione del 79 d.C.

L'importanza dei luoghi di culto di Fondo Iozzino e di S. Abbondio, non è disgiunta da quella della Necropoli di porta Nocera, in quanto un'arteria stradale, superata la porta urbica, proseguiva verso sud in direzione delle due aree sacre. Tale arteria stradale, da identificare con la via pompeiana citata da un'iscrizione in lingua osca[12], doveva intercettare e superare, servendosi di un ponte, il corso del fiume Sarno che procedendo verso su avrebbe inevitabilmente incontrato[13].

La Necropoli di Porta Nocera, che com'è consuetudine nella toponomastica moderna di Pompei, prende il nome dall'omonima Porta urbica, si sviluppò pertanto in tale settore cruciale per la viabilità extraurbana della città, in un'area interessata da una strada pomeriale che, proseguendo parallelamente alle mura, proveniva da occidente e, convogliato il traffico della vicina Porta Stabia, si dirigeva ad oriente in direzione di Nuceria, dopo aver intercettato, determinandone un incrocio, la via "pompeiana" sopra descritta.

gresso di Porta Marina. L'area, a causa di rinvenimenti fortuiti, fu oggetto di due interventi di scavo nel 1975-1977 e nel 1981, che riportarono alla luce alcune strutture numerarie e una discreta quantità di frammento, databili fra il VI sec. a.C: e l'età augustea, comprendenti anche terrecotte architettoniche, frammenti di statuette fittili e più esigui frammenti di statuaria. L'attribuzione del santuario al culto dei dio Nettuno si deve al rinvenimento nel 1877 di un'iscrizione dedicatoria (CIL X, 8157) a tale divinità che, stando a quanto riporta Giuseppe Fiorelli nel 1881 (Fiorelli 1881, p.121), fu rinvenuta in una non meglio definita località fra il mulino Bottaro e il mulino Rosa. v. D'Ambrosio 1984; Kockel 1985, p. 585; D'Alessio 2009, pp. 98-103.

[8] L'attribuzione fatta sulla base dell'iscrizione osca rinvenuta all'esterno di Porta di Stabia, nella quale si fa riferimento al santuario di Giove *Meilichios*, come riferimento topografico per il calcolo delle distanze, potrebbe trovare conferma, sebbene indiretta dalla tipologie e dal contenuto delle numerose incisioni dedicatorie in lingua etrusca graffite sui frammenti di vasi utilizzati con funzione cultuare all'interno del *temenos* del santuario di Fondo Iozzino, Osanna-Pellegrino 2017, p. 388. Per l'iscrizione v. De Caro 1991, pp. 39-42.

[9] Il santuario scoperto nel 1960 in occasione di lavori di edificazione, fu oggetto di interventi di scavo eseguiti, oltre che nel momento della scoperta, anche nel 1992 e, recentemente, nel 2014-2015. Tali interventi hanno portato alla luce un muro angolare relativo alla porzione sud-orientale di un temenos, contenente all'interno un recinto con un due podi e un basamento funzionale all'alloggiamento di statue. V. D'Ambrosio 1994; Guzzo 2007, pp. 43-44.



Fig. 7.4. Pompei, Localizzazione dei santuari extraurbani. (Ortofoto da BingMap).

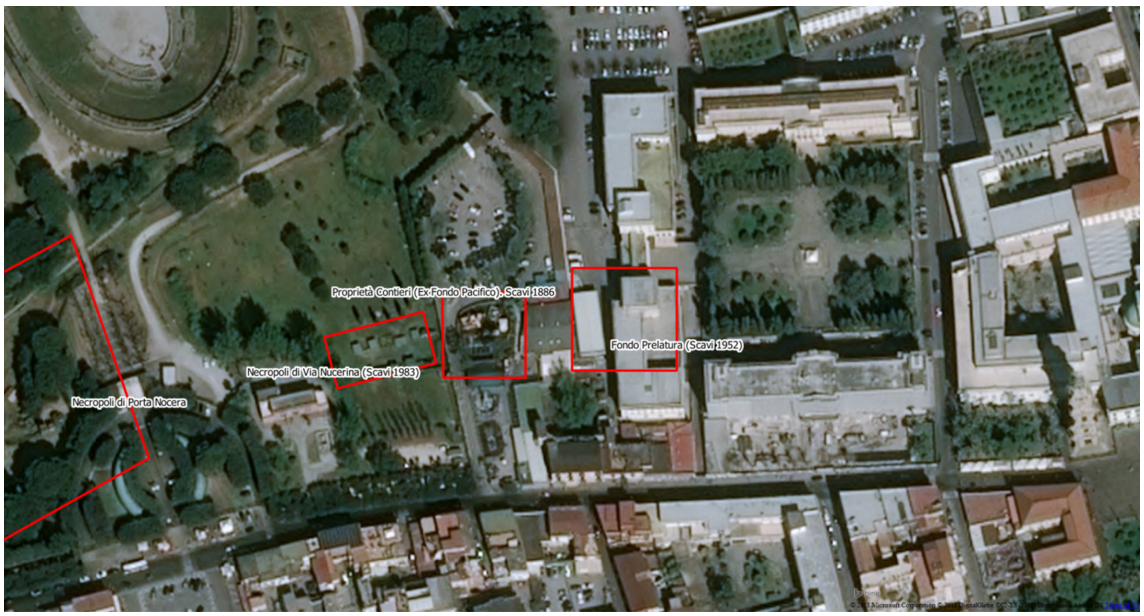


Fig. 7.5. Pompei, localizzazione degli ulteriori settori connessi alla necropoli di Porta Nocera. (Ortofoto da BingMap).

I resti però oggi visibili nell'area immediatamente all'esterno di Porta Nocera, sebbene costituiscano la parte più consistente ed estesa della necropoli, non esauriscono le testimonianze ad essa attribuibili, a cui vanno aggiunti altri tre settori che, separati dal primo, sono stati rinvenuti, a più riprese, dalla fine del XIX sec. (Fig. 7.6).

Risale al 1886, ben prima degli scavi di liberazione condotti dal Maiuri presso Porta Nocera, il rinvenimento, in un'area posta immediatamente a margine del confine orientale del sito archeologico, di una porzione attribuibile alla medesima necropoli, come dimostrerà l'allineamento che le sei tombe allora rinvenute, insieme alla porzione di altre due di cui fu possibile esplorare solamente la facciata, condividevamo con quell'arteria stradale extraurbana che conduceva verso *Nuceria* (Fig. 7.7). Tale lembo sepolcrale, indicato in letteratura talvolta come "ex-fondo Pacifico", dal nome dell'antico proprietario dei terreni, talaltra come "proprietà Arpaia", fu scavato e pubblicato fra il 1886 e il 1887 da Antonio Sogliano[14]. Rimasto in luce fino al 1980, è stato successivamente reinterrato.

Nel 1952, in occasione di lavori per la costruzione della sede dell'Istituto per la specializzazione industriale (IPSI), fu rinvenuto a circa 63 metri ad est del precedente, un altro lembo sepolcrale. Anche in questo caso i due edifici funerari, che allora si rinvennero, erano stati costruiti in relazione all'arteria stradale, che qui conservata parte del battuto in blocchi lavici. I rinvenimenti fatti in questo settore, denominato "fondo prelatura", richiamo alla proprietà ecclesiastica dei terreni, furono pubblicati da Pietro Soprano[15], prima di essere definitivamente distrutti (Fig. 7.8).

Tali rinvenimenti integravano le conoscenze pregresse e rappresentarono

[10] Posto a poco più di 300 metri a sud rispetto all'ingresso di Porta Nocera tale recinto, scoperto nel 1911 nel Fondo Azzolini, ha restituito 44 sepolture ad inumazione, databili fra il IV e il II sec. a.C., sostituite, a partire dal secolo successivo da 119 cremazioni, molte delle quali appartenenti ad esponenti dell'antica famiglia di origine nocerina degli Elpidii. L'area funeraria, in cui sono presenti una tomba a camera a duplice cella e molteplici sepolture in cassa litica di travertino, mostra in modo emblematico il cambiamento nel rituale funerario dall'inumazione alla cremazione avvenuto all'indomani della deduzione della colonia romana nell'80 a.C.V. Della Corte 1911; Della Corte 1916; Pensando-Guidobaldi 2006, pp. 246-247.

[11] Il Santuario, posto a circa 700 metri in direzione sud-est rispetto all'ingresso di Porta Nocera, prende il nome da un'omonima cappella edificata nelle immediate vicinanze dei resti archeologici. La sua scoperta si deve all'apertura di un cratere provocato da una bomba sganciata sulla città durante la seconda guerra mondiale. V.García y García 2006, p. 26.
Episodici interventi di scavo effettuati nel 1947, nel 1973 e nel 2008, hanno riportato alla luce i resti di un piccolo tempio dorico, tetrastilo *in antis*, con tre colonne laterali e intercolumnia chiusi da un basso muro divisorio. All'edificio si accedeva attraverso una breve rampa, preceduta da un altare e fiancheggiata da un doppio triclinio con tavola centrale. Lungo in lato meridionale del *pronaos* è presente un monumento funenario a "schola". Il tempio era dedicato al culto dionisiaco, la cui continuità nel tempo, nonostante fosse stato ufficialmente bandito dal *senatus consultus de Bacchanalibus* del 186 a.C., è testimonianza significativa dell'attaccamento ad una tradizione che nella coltivazione dell'uva ebbe uno dei suoi elementi di coesione. Sul culto v. Pugliese Caratelli-Elia 1975; Sull'edificio v. Bielfeldt 2007 e da ultimo Van Andringa 2013.

[12] Vetter 1953, n.8.

[14] Sogliano 1886; Sogliano 1887. V. anche Mau 1888; Meier 1886 Stefani 1998, pp. 51-55.

[15] Soprano 1961.

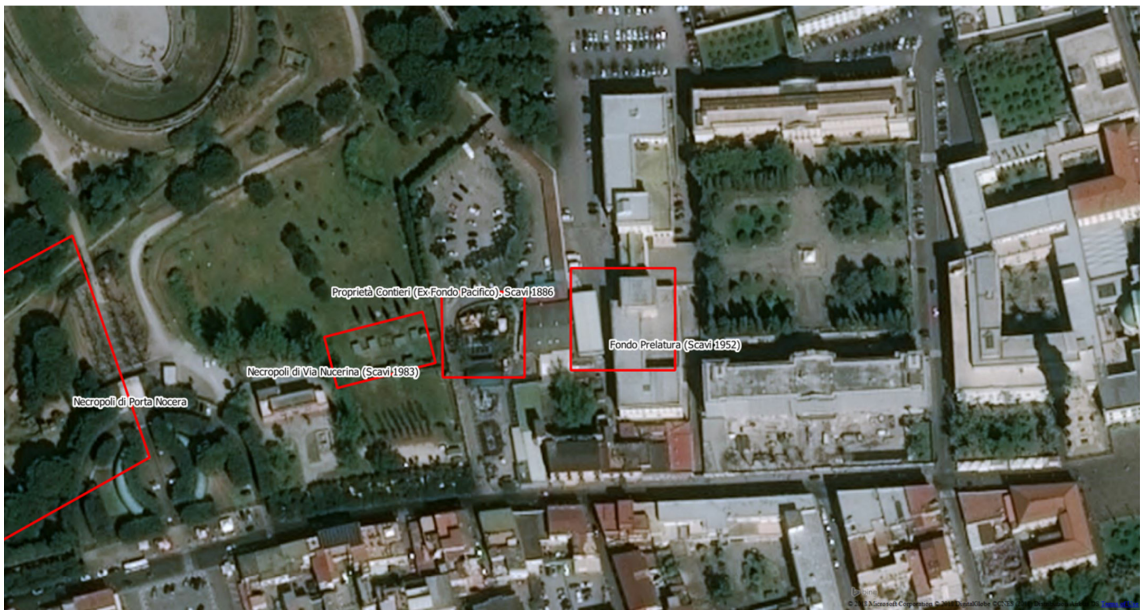


Fig. 7.6. Pompei, localizzazione degli ulteriori settori connessi alla necropoli di Porta Nocera. (Ortofoto da BingMap).

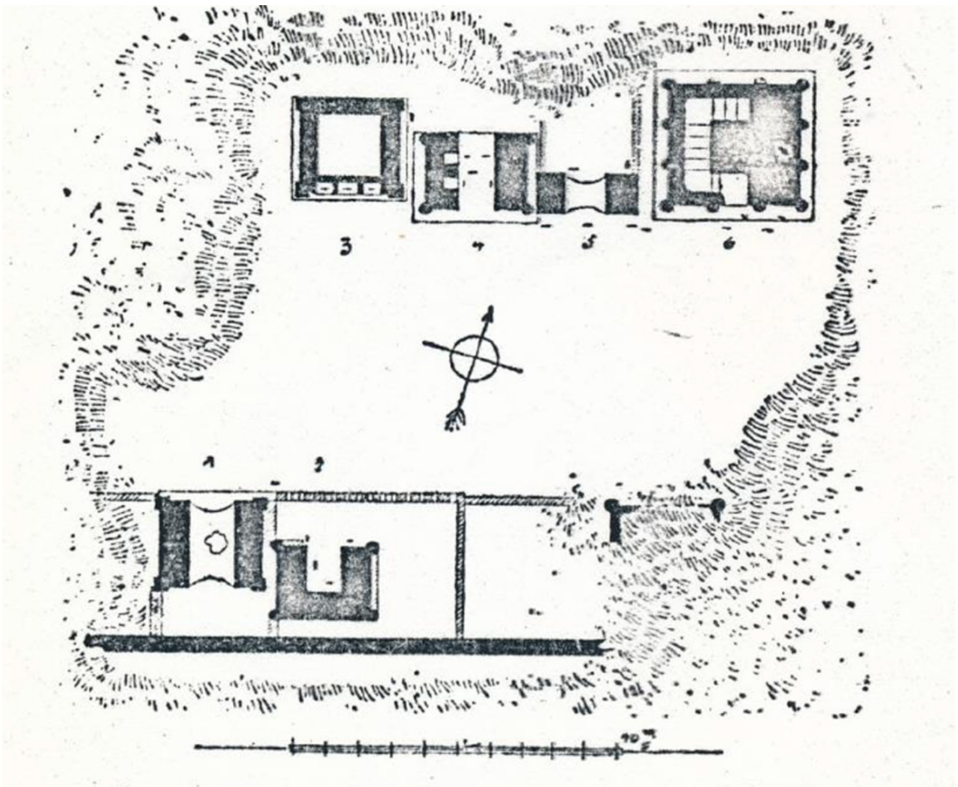


Fig. 7.7. Pompei, Planimetria del settore di necropoli "Ex Fondo Pacifico". (Da Mau 1888, p.122).

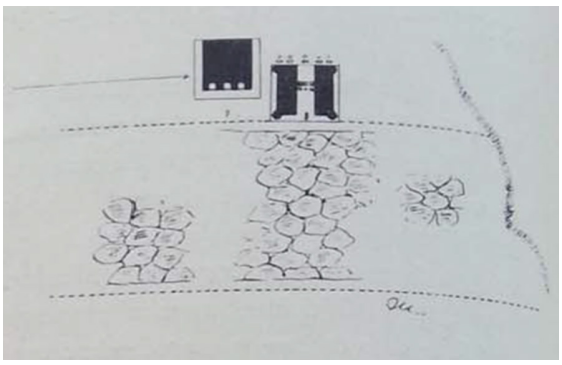


Fig. 7.8. Pompei, Planimetria del settore di necropoli "Fondo Prelatura". (Da Sogliano *1961, p.190).*

un'ulteriore conferma della presenza di una area funeraria articolata lungo il percorso dell'arteria stradale.

Appena due anni dopo, Amedeo Maiuri iniziò i lavori di scavo per la liberazione dell'area esterna al tracciato delle fortificazioni lungo il margine meridionale della città. In questa zona, come affermò lo stesso Maiuri, «*si erano venuti accumulando gli scarichi dei due precedenti secoli di scavo, creando dune e barriere, che oltre che seppellire sotto enormi cumuli di terra le naturali propaggini dell'abitato, avevano finito per occultare il profilo esterno della città*»[16] (Figg. 7.9-7.10).

Non solo le mura non erano visibili, ma la stessa esistenza della porta urbica era da tempo fonte di discussione fra gli studiosi[17].

Potendo usufruire dei fondi della Cassa del Mezzogiorno, che intendeva utilizzare i terreni di risulta per bonificare la foce del Sarno o per costruire i rilevanti dell'autostrada Pompei-Salerno[18], fu effettuata una vera e propria operazione di sterro, per l'esecuzione della quale furono istituiti numerosi cantieri-scuola. In tal modo nel maggio del 1954, Amedeo Maiuri rinveniva la porta urbica e proseguiva mettendo in luce la parte meridionale del tracciato viario, che dalla porta proseguiva fino ad incrociare la strada pomeriale proveniente da Porta Stabia. Lo scavo, pur avendo comportato l'asportazione di circa 8000 mq di terreno, fu ultimato con estrema velocità nell'autunno del 1956, a tutto discapito di una documentazione scientifica che non fu certamente adeguata all'importanza dei rinvenimenti[19], ulteriormente complicata dalla mancata pubblicazione da parte di Maiuri, morto nel 1963.

L'ultimo settore ad essere stato scoperto si data al 1983, quando in occasione di alcune indagini svolte dalla Soprintendenza per l'individuazione di uno spazio da destinare alla costruzione di un padiglione museale, per il quale si era individuato un settore esterno a perimetro urbano dell'antica città, posto a sud dell'anfiteatro, in un'area libera da costruzioni e rientrante all'interno del perimetro del parco. Le indagini misero alla luce nuovi edifici funerari e tombe a recinto, che come nei casi precedenti si allineano lungo il tracciato stradale, anche qui come per il settore rinvenuto nel 1886 privo di basolato lavico. Lo scavo e l'edizione

[16] Maiuri 1956, p. 86.

[17] Maiuri 1951, p. nota 2.

[18] D'Ambrosio-De Caro 1983, p. 23; Maiuri 1951.

[19] Essa consiste in una documentazione fotografica, i diari di scavo e una planimetria generale dell'area a scala 1:200. Solamente l'edizione delle iscrizioni, dei graffiti trovò una rapida edizione ad opera di Della Corte, che ne seguì costantemente il rinvenimento. Della Corte 1958; Della Corte 1970.

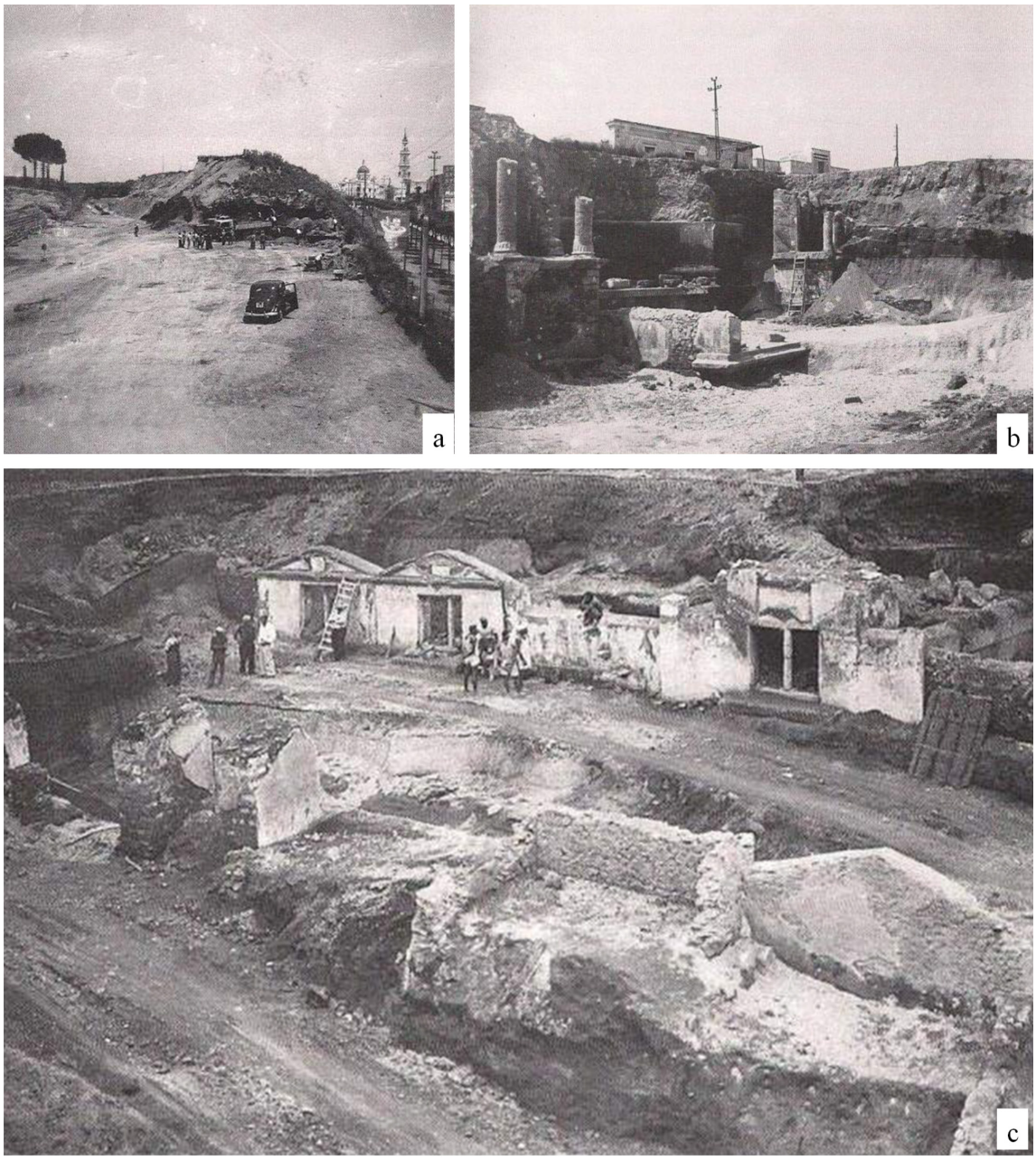


Fig. 7.9. Pompei. Porta Nocera. a) cumuli determinati dal materiale di risulta degli scavi borbonici; b) liberazione del mausoleo di Eumachia; c) Liberazione del settore ES . (Da Van Andringa *2013, fig.9 p.19; figg.12-13, p.22).*

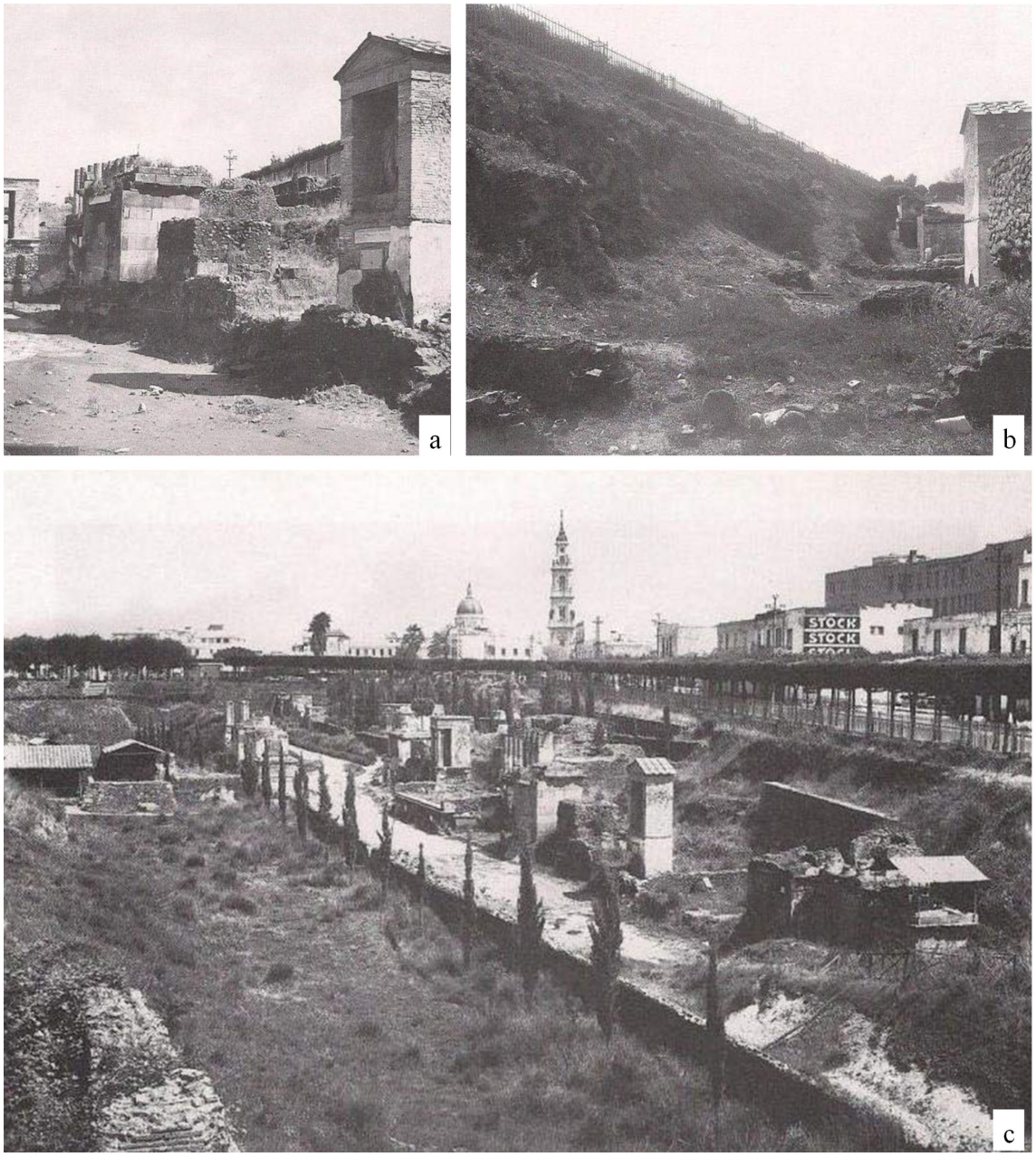


Fig. 7.10. Pompei. Porta Nocera. a) Monumenti 21, 23, 25 OS, al momento della liberazione dell'area; b) Limite meridionale dell'area funeraria, prima della costruzione del muro di contenimento della via Plinio. Si nota il salto di quota, fra i livelli del tracciato stradale antico e la città moderna; c) Veduta generale della necropoli alla fine degli anni cinquanta (Da Van Andringa *2013, fig.17 p.24; figg.14-15, p.23).*

di tale settore, c.d. di "via Nucerina" si deve ad Antonio D'Ambrosio e Stefano De Caro che che ne pubblicarono i risultati nel 1987 [20] (Fig. 7.11).

In anni recenti ulteriori indagini di scavo sono state condotte, allo scopo di prendere in riesame singole questioni storiche, nell'area già riportata alla luce da Maiuri fra il 1954 e il 1954 e nel settore indagato nel 1983, ad opera sia della Soprintendenza archeologica di Pompei, che gruppi di ricerca, come quelle condotte dal Van Andringa dell'Università di Lille e volte ad indagare gli aspetti sociali e i rituali funerari[21].

[20] D'Ambrosio-De Caro 1987.

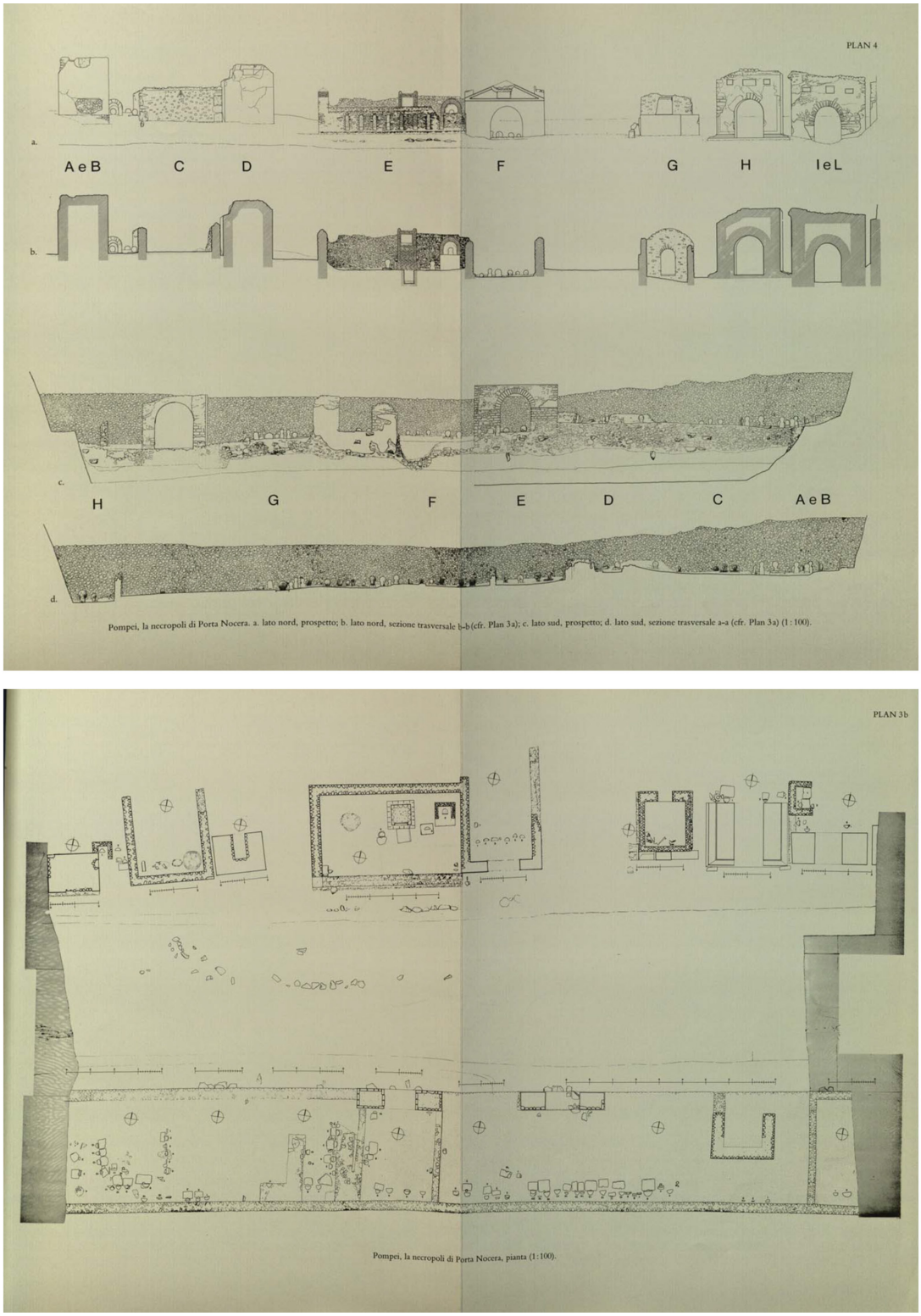


Fig. 7.11. Necropoli di via Nucerina. Planimetria (Da D'Ambrosio-De Caro 1987, plan 3b plan 4).

Capitolo VIII

Pompeii Sustainable Preservation Project

Creare un futuro per Pompei

Pompeii Sustainable Preservation Projecy.

8.1 Grande Progetto Pompei e il piano della conoscenza

Con un'estensione di 66 ettari, di cui 45 scavati e 33 aperti al pubblico, Pompei costituisce a buon diritto il più grande sito archeologico del mondo, oltre ad essere uno dei più visitati[1]. Ciò che rende Pompei un *unicum*, non è naturalmente solo l'estensione areale, che per le vicende storiche universalmente conosciute si estende fino a coprire l'area di un'intera città antica, ma soprattutto la quantità e la qualità delle testimonianze archeologiche che il sito ha restituito e che comprendono un'amplissima gamma di reperti mobili, dalle suppellettili di uso quotidiano, ai più raffinati e preziosi gioielli, ma soprattutto lacerti di mura, superfici di rivestimento, piani pavimentali, che costituiscono ciò che oggi rimane delle antiche abitazioni civili, degli edifici pubblici o sacri, delle strade, delle necropoli, che non potendo, ovviamente, essere rimossi, restano in situ, divenendo la principale attrazione del sito e richiedendo straordinari sforzi di restauro e manutenzione, per conservare e preservare alle generazioni future un patrimonio unico e inestimabile[2].

Anche volendosi limitare al solo anno appena trascorso, appare significativo come questo possa essere quasi scandito, all'inizio e alla fine, da due tragiche notizie di crolli verificatisi a Pompei[3], che si aggiungono ai numerosi altri che nel corso degli ultimi anni hanno occupato le pagine dei giornali,

[1] Secondo i dati ufficiali pubblicati dal Parco archeologico di Pompei il numero totale dei visitatori per l'anno 2017 ammonta a 3.418.733. Fonte:www.pompeiisites.org/Sezione.jsp?idSezione=9

[2] Secondo le ultime stime Pompei conserva 2.000.000 di mc di strutture murarie estese per 242.000 mq di superfici, 17.777 mq di dipinti, 20.000 mq di intonaci, 12.000 mq di pavimenti e 20.000 mq di coperture protettive. Da Fichera-Malnati-Mancinelli 2015, p.27.

[3] Ci si riferisce al crollo di un muro della casa del Citarista (Regio I, Insula 4, civico 25) avvenuto il 28 gennaio del 2017, e quello del 19 dicembre 2017 con l'ennesimo crollo avvenuto nella Casa della caccia ai tori (Regio VI, Insula 16, civico 28).

lasciando un segno indelebile nell'opinione pubblica nazionale e internazionale, come avvenne la notte fra il 5 e il 6 novembre 2010, con in occasione del crollo della *schola armaturarum*, (Regio III, Insula 3, Civico 6) i cui muri rovinarono irreparabilmente a seguito delle piogge torrenziali che avevano investito il sito nei giorni precedenti (Fig. 8.1).

Il rischio del verificarsi di crolli, così come di altre simili perdite per eventi accidentali o per l'incuria umana, che caratterizza inevitabilmente qualsiasi sito o contesto archeologico, diventa a Pompei una questione particolarmente gravosa, a causa dell'estensione del sito, del numero di strutture, estremamente diversificate per materiali e tecniche costruttive ed esposte, talvolta senza poter contare su coperture e strutture di protezione, agli agenti atmosferici e alle continue sollecitazioni di migliaia di turisti[4]. Se anche i moderni certi storici, dove la vita continua ininterrotta, talvolta rovinano, è impensabile che ciò non possa avvenire per una città antica, deprivata di gran parte degli originari strumenti di protezione e sottoposta ad un utilizzo, talvolta eccessivo, di spazi e strutture.

Se bastano semplici considerazioni di tal fatta per considerare il rischio ineliminabile l'unica strategia possibile diventa quella basata sulla prevenzione, e non su interventi di emergenza da effettuare con azioni eclatanti, quanto convulse e, purtroppo, spesso limitate ed episodiche.

È sulla base di tale consapevolezza e dell'esperienza maturata a livello nazionale con studi e progetti di manutenzione e prevenzione, anche in questo caso dettati da situazioni di grave emergenza a carico di siti e contesti di grande rilevanza, come Roma, Ostia antica e la stessa Pompei[5], la e confluiti nelle "*Linee guida per la conservazione delle architetture di interesse archeologico*", che prese avvio nel 2012 il "*Grande Progetto Pompei*" (GPP)[6]. Finanziato dall'Unione Europea[7], il progetto, la cui conclusione dalla fine del 2015 e stata prorogata alla fine del 2019, si articola su una struttura di *governance* fondata sulla stretta collaborazione di differenti soggetti, che hanno il compito di assicurare un alto rigore scientifico nell'esecuzione di tutte le attività progettuali, la trasparenza delle operazioni, la coerenza e congruità dei risultati rispetto ai tempi e agli obiettivi prefissati. Tale struttura è organizzata intorno ad una *Steering Commitee*[8], con compiti decisionali, un organismo di controllo e vigi-

[4] I casi di paventati pericoli o di gravi situazioni di crisi per l'area archeologica di Pompei non sono nuovi e risalgono naturalmente ben addietro rispetto all'episodio, purtroppo divenuto emblematico a causa della gravità del danno, del crollo della *Schola armaturarum*. Basti pensare come proprio per far fronte a gravi rischi di perdite del patrimonio archeologico della città vesuviana, si dovette fare ricorso alla nomina di un Commissario Delegato tramite l'ordinanza n.3692 dell'11 luglio 2008 emanata dal Presidente del Consiglio dei Ministri, visto il parere favorevole del Ministro per i beni e le attività culturali.

[5] Cecchi-Gasparoli 2010; Cecchi-Gasparoli 2011

[6] Lo schema delle "Linee guida" è stato approvato dal Consiglio Superiore per i Beni Culturali e Paesaggistici nella seduta del 13 dicembre 2010. V. Cecchi 2014.

[7] Il progetto fu approvato con un finanziamento di 105 milioni di euro (41,8 milioni di fondi UE, 63,2 di fondi nazionali) con la decisione n.C(2012) 2154 del 29 marzo 2012.

[8] Ad essa prendono parte la Commissione Europea, il Ministro per i Beni e le attività culturali e quello per la Coesione territoriale.



Fig. 8.1. Pompei, in alto: crollo della Schola armaturarum (da ansa.it); in basso: i medesimi ambienti durante le attività di scavo avvenute fra il 1915 e il 1916.

lanza per la legalità, stretto intorno ad un protocollo d'intesa interistituzionale[9], e da un gruppo di coordinamento operativo istituito presso il Segretariato generale del Ministero per i beni culturali. Con un approccio sicuramente innovativo, e con un programma pluriennale di ampio respiro il GPP ha riconosciuto alla conoscenza un ruolo centrale nei processi di tutela, gestione e valorizzazione di un intero territorio, che dalla presenza di un sito archeologico di straordinaria importanza come Pompei, deve riuscire a trarre i maggiori benefici ed occasione di crescita culturale ed economica. L'estrema importanza riconosciutale nell'ambito del GPP fa sì che alla conoscenza del sito archeologico di Pompei, vista sotto molteplici aspetti, sia stata dedicata una grande attenzione. In tal senso son stati compiuti notevoli sforzi non solo per giungere ad un quadro aggiornato dello stato di conservazione delle evidenze archeologiche e monumentali, attraverso un'accurata attività di rilievo e documentazione dei degradi in atto, messi in relazione con la geomorfologia del sito e con eventuali cause di dissesto idrogeologico in atto, ma anche per la creazione di un sistema informatico dinamico e aggiornabile, capace di fornire un reale e concreto supporto ad un programma di interventi, che da una logica di azioni straordinarie, e generalmente *post eventum*, potesse tramutarsi in "conservazione programmata".

È su tali presupposti, che non possono non tenere in considerazione anche le esigenze della fruizione e della valorizzazione di uno dei siti più visitati al mondo, e da cui, in ultima analisi, derivano sia risorse, sia anche gran parte dei destinatari per i quali la conoscenza e la conservazione del sito trova la propria ragione ultima di esistenza, che trovano fondamento i cinque "*Piani operativi*" su cui si articola il GPP: Il "*Piano della conoscenza per rilievi e diagnostica*", il "*Piano delle opere per il consolidamento e il restauro*", il "*Piano della fruizione, valorizzazione e comunicazione per l'adeguamento dei servizi per i visitatori e l'implementazione di strumenti di comunicazione anche interattivi*", il "*Il Piano operativo per la sicurezza, e per il potenziamento dei sistemi di sicurezza e di telesorveglianza*", il "*Piano operativo per la capacity building e per il rafforzamento della struttura organizzativa e tecnologica della SANP (oggi Parco Archeologico di Pompei)*".

Si tratta, a ben vedere, di un sistema fortemente integrato di elementi che nella costruzione di un quadro conoscitivo aggiornato e attendibile, ottenuto attraverso interventi di rilievo e di valutazione diagnostica volti alla definizione sia dello stato di conservazione del patrimonio archeologico e monumentale, sia della distribuzione del rischio all'interno del sito, ha trovato il fondamento su cui avviare gli interventi di restauro e di manutenzione, e di calibrare quelli di monitoraggio e fruizione, applicando strategie di pianificazione, le cui priorità sono costruite a partire da una solida base scientifica (Fig. 8.2).

[9] Il protocollo d'intesa è stato firmato il 20 gennaio del 2012, dai Ministri dell'Interno, dei Beni e delle Attività culturali, dal Ministro per la Coesione economica, e da quello dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca e, infine, dall'Autorità per la vigilanza sui contratti pubblici per la sicurezza degli appalti.

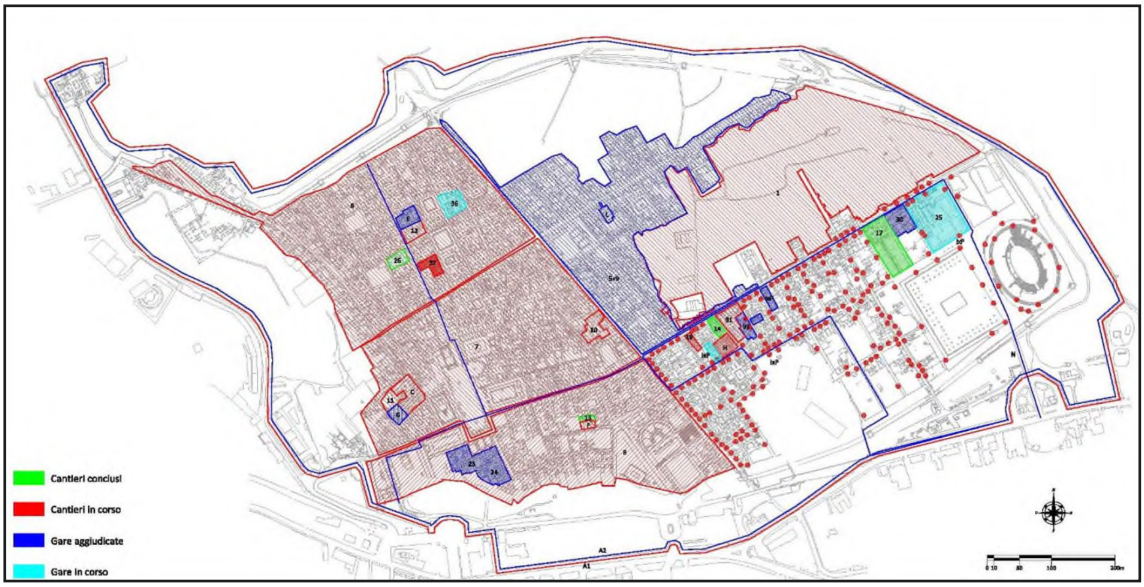


Fig. 8.2. Grande Progetto Pompei. Localizzazione delle aree oggetto di interventi di restauro, conclusi e ancora in corso alla fine del 2015.

8.2 PSPP. Scopi e obiettivi

Il *Pompeii Sustainable Preservation Project* (PSPP) è un progetto internazionale, interamente basato sul *fundraising* e sul finanziamento diretto da parte di investitori privati, che operando all'interno dello straordinario contesto della necropoli di Porta Nocera a Pompei, mira alla ricerca e sperimentazione di metodologie, tecniche e materiali per la conservazione e il restauro dei monumenti antichi (Fig. 8.3).

L'attività di ricerca, tuttavia, rappresenta solamente uno degli scopi del PSPP, in quanto è intesa solo come un aspetto necessario, ma propedeutico, ad interventi diretti di restauro e conservazione, dove i risultati delle indagini compiute possano trovare concreta applicazione, per tradursi infine, in una base di conoscenza utile non solo per una conservazione sostenibile del patrimonio archeologico pompeiano, ma anche come oggetto di trasmissione e formazione per le generazioni future. In tal modo ricerca, conservazione e formazione, rappresentano i tre capisaldi del *Pompeii Sustainable Preservation Project*[10] (Fig 8.4).

Facendo tesoro dell'esempio e della proficua esperienza maturata nell'ambito del *Herculaneum Conservation Project*[11], il PSPP opera attraverso un consorzio internazionale di istituzioni pubbliche e private, sotto il coordina-

[10] www.pompeii-sustainable-preservation-project.org

[11] L'*Herculaneum Conservation Project*, è un progetto internazionale di ricerca, orientato alla conoscenza, tutela e valorizzazione del sito archeologico di Ercolano. Frutto di una *partnership* pubblico-privata, sostenuta dalla fondazione filantropica *Packard Humanities Institute*, che opera in Italia attraverso l'Istituto Packard per i Beni culturali, il progetto, avviato nel 2001, vede coinvolti in una continua e stretta collabo-



Fig. 8.3. Homepage del sito web del progetto. www.pompeii-sustainable-preservation-project.org

mento scientifico del Parco Archeologico di Pompei. Insieme al *Fraunhofer-Institut für Bauphysik* (IBP), a cui si deve l'ideazione e la direzione del progetto operano la *Technische Universität di München* (TUM), *International Center for the Study of the Preservation and Restoration of Cultural Property* (ICCROM) e l'*Istituto per i Beni Archeologici e Monumentali del Consiglio Nazionale delle Ricerche* (IBAM-CNR). A queste istituzioni si aggiungono, sostenendo il PSPP con singoli progetti di ricerca, *School of Geography. and Environment* dell'Università di Oxford, l'*Istituto Superiore per la Conservazione ed il Restauro del Ministero per i Beni e le Attività Culturali* (ISCR), il *Dipartimento di Storia Antica, Ludwig-Maximilians-Universität di Monaco di Baviera* (Lmu München), il *Deutsches Archäologisches Institut* di Roma (Dai), l'Università di Pisa.

Il *Pompeii Sustainable Preservation Project* ha avuto inizio nel 2014 e prosegue le sue attività con programmi annuali, dove le tre componenti fondamentali, ricerca, conservazione e formazione procedono in parallelo, grazie all'apporto di tutti i gruppi di ricerca[12].

La scelta di operare nell'ambito di una Necopoli, nel caso specifico i due settori della Necropoli di Porta Nocera e via Nucerina, si è rivelata una scelta stimolante e avvincente per differenti motivi. Innanzitutto, come emerge dal rapido resoconto effettuato nel presente lavoro, si tratta di due contesti, che sebbene indagati a più riprese a partire dalla metà del secolo scorso, hanno avuto solo in anni recenti un approfondimento adeguato all'importanza delle

razione funzionari pubblici dell'ente di tutela, oggi Parco archeologico di Ercolano, ed esperti in varie discipline connessi al patrimonio culturale, appartenenti a differenti istituzioni pubbliche e private nonché ad enti di ricerca italiani e stranieri. Per maggiori informazioni sul progetto v. Pesaresi 2013; Thompson 2007; Thompson-D'Andrea 2009; Wallace-Hadrill *et alii* 2008; Wallace-Hadrill 2009. Matthaei *et alii* 2016.

[12] Matthaei *et alii* 2016.

evidenze emerse, che consentono non solo di ricostruire aspetti tecnico-costruttivi legati alle evidenze monumentali riportate alla luce, ma di approfondire importanti questioni connesse a molteplici aspetti legati alla vita politica, sociale, culturale ed economica della comunità che nella città ha operato è vissuta e si è presa cura dei propri defunti. Le indagini condotte negli ultimi anni all'interno della necropoli di Porta Nocera stanno rivelando enormi possibilità, consentendo di cogliere molteplici aspetti connessi all'occupazione del suolo, in parte pubblico, per la costruzione dei monumenti funerari, alle personalità che, viste nel loro ruolo sociale ed economico, nei rapporti di parentela e amicizia, hanno scelto di seppellire i propri morti in questa particolare area della città o hanno con significativa lungimiranza progettato e costruito il proprio monumento funerario. Lo studio della necropoli sta consentendo di cogliere importanti aspetti legati ai rituali funerari, alle credenze religiose, alle connessioni molto forti, che pur dopo la morte e in una logica comprensibile solo in termini di gens e non di singolo individuo, legano ancora il defunto attraverso il proprio monumento funerario, al mondo dei vivi, quel mondo, quella società che ha trovato spesso, aldilà di messaggi propagandistici costruiti sulla manifestazione del ruolo sociale e politico avuto dal defunto e affidati a molteplici aspetti del monumento funerario, dalle decorazioni architettoniche, a quelle figurate, dalle statue alle iscrizioni, la via per instaurare con tali monumenti logiche e strategie di riutilizzo, meno nobili, ma certamente ugualmente significativi, affidando ad essi messaggi politici, pubblicitari propagandistici, segnando, talvolta deturpando con graffiti o



Fig. 8.4. Ricerca, conservazione, formazione. Gli obiettivi del PSPP.

rubricaturae, delle superfici che nell'intenzione dei defunti o dei parenti erano destinati a ricordo perenne dell'antenato e della famiglia. La grande varietà di manifestazioni tipologiche, la presenza di un'enorme quantità di elementi architettonici, di superfici di rivestimento o decorative, la molteplicità dei materiali impiegati, le differenti cause di degrado in atto, gli stessi interventi di restauro e le strutture di protezione approntate, costituiscono nel loro insieme un complesso di elementi, che si prestano a molteplici letture, a innumerevoli sperimentazioni, ma che richiedono, sempre e comunque una raccolta sistematica e un'organizzazione meticolosa dei dati, nonché una loro adeguata conservazione nel tempo, affinché attraverso gli opportuni processi di analisi si possa giungere a ricostruzioni d'insieme, dove la singola informazione possa acquisire nuovi significati in un legame complessivo con tutti gli altri. Solo così l'affermazione a suo tempo fatta da Amedeo Maiuri, proprio in riferimento alla scoperta della necropoli di Porta Nocera, a lungo disattesa, potrà trovare realizzazione, consentendo anche attraverso le tombe di conoscere il mondo dei vivi.

La principale necessità a cui il PSPP ha dovuto far fonte durante le prime fasi di attività è stata la creazione di una base di conoscenza aggiornata e affidabile, che consentisse di poter rispondere ad alcuni importanti quesiti attraverso il censimento accurato di tutti i monumenti e dei beni mobili presenti nelle due aree funerarie di Porta Nocera e di Via Nucerina. Tale analisi condotta in parallelo con un riesame dei documenti d'archivio prodotti durante le attività di scavo ha consentito di conoscere e definire con precisione, quantità, la tipologia, la distribuzione dei monumenti funerari e dei manufatti mobili legati dall'appartenenza al medesimo contesto. Ciò ha ad esempio consentito di valutare la presenza e l'eventuale quantità di manufatti spostati dal luogo di origine, per essere conservati in luoghi più consoni alla loro conservazione[13].

In parallelo è stato avviato nel primo anno di attività uno studio rivolto ad un'analisi materica e tecnico-costruttiva dei monumenti funerari, allo scopo di censire i materiali utilizzati in antico, individuare, attraverso gli effetti visibili, eventuali fenomeni di degrado in atto e le relative cause, mettendo le une e le altre in correlazione con eventuali interventi di restauro pregressi o con gli attuali apparati di protezione presenti[14].

La base di conoscenza acquisita ha consentito di isolare le cause di degrado che compromettono la conservazione futura dei monumenti, mettendole

[13] L'indagine storica e le ricerche d'archivio sulla Necropoli di Porta Nocera e di via Nucerina sono state condotte da Pia Kastenmeier, responsabile delle ricerche archeologiche, d'archivio e della storia degli studi e consulente scientifico del PSPP e sono confluiti in un Final report on research history and archive research on earlier restorations, da lei elaborato alla fine della prima campagna di attività del PSPP a dicembre del 2014.

[14] Le indagine sulle condizioni materico-costruttive e sullo stato di conservazione dei monumenti, sulla presenza e le tipologie di interventi conservativi, degli apprestamenti di protezione, sono state condotte da Monica Martelli Castaldi, responsabile della documentazione dei restauri e sono confluiti in un report finale, prodotto a conclusione della prima campagna di attività.



Fig. 8.5. Pompei, Necropoli di Porta Nocera, settore est. In primo piano la presenza di ristagni di acqua meteorica, favorita dalla natura del terreno e della posizione della necropoli rispetto al contesto circostante.

in correlazione sia con gli attuali apprestamenti impiegati per la loro conservazione, sia con le condizioni ambientali e con le modifiche a cui queste sono soggette a causa della costante interazione con la componente antropica rappresentata dalle migliaia di visitatori che giornalmente fruiscono del sito archeologico.

È stato cosi possibile isolare differenti tipologie di degrado causate da agenti biogeni o dagli effetti della peculiare condizione climatica e ambientale del contesto, legata dalla temperatura, al tasso di umidità e alla presenza dell'acqua.

Particolarmente severi si sono mostrati fin dalle prime indagini gli effetti causati dall'acqua di risalita, favorita dalla posizione in cui si trovano i due settori della necropoli di Porta Nocera e di via Nucerina, posti in uno dei punti più bassi dell'intera area archeologica, incastonati fra il pendio delle mura urbiche a nord e i livelli della città moderna che, con il corso dell'attuale via Plinio, posto a circa cinque metri di altezza rispetto al piano di calpestio della necropoli attuale, la cingono da sud (Fig. 8.5).

Gli effetti provocati dall'acqua di risalita, uniti a quelli determinati dalle acque meteoriche, vanno messi in correlazione con la natura dei terreni, con i materiali costruttivi degli edifici funerari e con i sistemi di protezione attualmente impiegati, che consistono, talvolta, in semplici tettoie di protezione realizzate con supporti metalli, in pannelli in vetro fissati tramite grappe verticalmente alle pareti delle strutture come sistema di protezione di superfici decorative e in vecchi interventi di restauro delle creste murarie, realizzati tramite l'impiego di bitume e cocciopesto.

Le informazioni raccolte durante la prima campagna di attività dai vari specialisti coinvolti nel PSPP, unite alla redazione di linee guida per la futura documentazione[15], hanno fornito la necessaria base conoscitiva per le successive attività, svoltesi a partire dal 2015, consentendo di stilare una prima

[15] Le linee guida redatte a conclusione della prima campagna di attività hanno riguardato in particolare, la nomenclatura dei luoghi, dei fenomeni di degrado, e dell'archiviazione della documentazione, in special modo fotografica.

classifica degli interventi più urgenti, sulla base della stima della maggiore o minore vulnerabilità dei monumenti, effettuata sulla base di differenti parametri[16].

Le attività svolte nell'anno successivo si sono concentrate sulla raccolta di informazioni microclimatiche tramite l'installazione di *data-loggers* capaci di effettuare misurazioni di temperatura e umidità in differenti punti della necropoli, sotto le tettoie di copertura, in aree aperte, all'interno di camere funerarie, dietro i pannelli di protezione[17].

Contemporaneamente è stato avviato un progetto per l'ideazione di un innovativo sistema di copertura degli edifici funerari, che unisse alla necessità del minore impatto sulla superficie del terreno, l'utilizzo di materiali compatibili con l'ambiente circostante e prive di effetti nocivi sul monumento[18].

Le attività sono proseguite nei due anni successivi (2016-2017), attraverso uno stretto connubio fra attività di ricerca multidisciplinare e sperimentazione pratica, come testimoniano la prosecuzione di campagne di raccolta di dati ambientali tramite l'impiego di differenti strumentazioni e metodologie o lo studio comparativo di differenti tipologie di malte, base teorica e conoscitiva a cui tengono dietro diverse realizzazioni pratiche con la realizzazione del primo prototipo di copertura, e con la sperimentazione di nuovi materiali per la conservazione e il restauro[19].

Alle attività di ricerca e conservazione, come previsto dagli obiettivi del PSPP, si sono costantemente affiancate differenti attività di divulgazione e formazione, queste ultime concretizzatesi nell'organizzazione, con cadenza annuale, di una *Summer school* orientata alla formazione, direttamente sul campo e attraverso l'affiancamento di specialisti del settore, di nuove generazioni di restauratori, capaci di operare attraverso l'impiego di un approccio multidisciplinare e delle nuove tecnologie (Fig. 8.6).

8.3 Le attività dell'IBAM-CNR

Le attività dell'IBAM-CRN nell'ambito del PSPP forniscono un supporto alle attività di restauro attraverso due differenti tipologie di interventi: l'acquisizione, tramite indagini non invasive, di una maggiore conoscenza delle

[16] I parametri individuati prendono in considerazione, oltre l'importanza archeologica e storico-artistica del monumento: i rischi per la sicurezza dei visitatori, delle superfici, degli eventuali elementi decorativi; lo stato di conservazione degli intonaci, degli stucchi, dei dipinti murali, della muratura, nonché la valutazione della vulnerabilità statica delle strutture; la stima economica dei costi d'intervento; la tipologia di opere provvisorie e di puntellatura da approntare; l'eventuale presenza di sistemi di protezione quali tettoie e vetri. Matthaei *et alii* 2016, p.9.

[17] Le misurazioni sono state effettuate sotto il coordinamento di Ralf Kilian, del Frauhnofer IBP, responsabile delle indagini microclimatiche e direttore del PSPP.

[18] La progettazione della copertura è stata eseguita dalla Roberta Fonti sotto la direzione di Erwin Emmerling del TUM.

[19] Si ricordano qui le sperimentazioni volte all'impiego di argilla per l'isolamento delle fondazioni degli edifici funerari, e i promettenti risultati conseguiti dall'applicazione di una particolare schiuma di malta, originariamente messa proficuamente appunto da Klaus Klarner per il restauro di soffitti barocchi e proficuamente impiegata per i restauro di intonaci.Matthaei *et alii* 2016, p. 9.

Attività	*Pompeii Sustainable Preservation Project*
2014	Le attività si sono rivolte alla creazione di una base di conoscenza utile per supportare i futuri interventi di restauro, tramite un censimento degli edifici funerari e dei reperti mobili ad essi connessi, attraverso un controllo incrociato fra evidenze *in situ* e documentazione d'archivio. Si è ripercorsa, attraverso la documentazione disponibile, la storia degli interventi di scavo e degli studi effettuati nel particolare contesto di studio (necropoli di Porta Nocera e di via Nucerina). Si è in parallelo condotta una prima campagna di analisi valutativa dello stato di degrado degli edifici funerari, considerando le differenti tipologie di materiali impiegati e isolando le principali cause di degrado in relazione al contesto ambientale, agli interventi pregressi di restauro e agli strumenti di protezione attualmente in uso. Si sono stabilite norme e nomenclature di classificazione univoca da adottare nell'ambito del progetto e si sono stilati dei parametri utili alla classificazione dei monumenti sulla base del grado, serietà e peculiare tipologia di deterioramento.
2015	La base di conoscenza acquisita è stata impiegata per la programmazione di interventi di approfondimento, tramite l'impiego di *data-loggers* per il monitoraggio di dati microclimatici applicati a differenti contesti presenti all'interno della necropoli (camere funerarie, strutture dotate di sistemi di copertura o di pannelli verticali di protezione degli apparecchi murari, aree non edificate). La valutazione dei dati raccolti durante la precedente campagna ha inoltre permesso di focalizzare l'attenzione verso la gestione e risoluzione di peculiari tipologie di degrado, che minacciano la conservazione dei monumenti funerari. Fra queste particolarmente gravi sono apparsi gli effetti causati dalla presenza di acqua di risalita, unita a quella meteorica. Ne è emersa la necessità di avviare una fase di progettazione di un sistema di copertura innovativo sotto l'aspetto materico e tecnico funzionale.
2016	Si sono avviate ricerche volte alla sperimentazione di nuovi materiali utili per le attività di restauro, che permettessero di superare i limiti di alcuni metodi e materiali tradizionali, che erano stati impiegati nei decenni precedenti ed i cui risultati, sulla base delle analisi condotte si erano rivelati incapaci di contrastare i fenomeni di degrado in atto. Particolare importanza hanno rivestito le ricerche condotte su differenti tipologie di malte.
2017	Si è proceduto all'installazione di un prototipo di nuova copertura, e si sono proficuamente impiegati i risultati delle analisi precedentemente condotte per la sperimentazione di nuovi materiali utili per specifici interventi di restauro. Si sono inoltre avviate indagini volte a valutare la possibilità dell'utilizzo di strati di argilla per l'isolamento delle fondazioni degli edifici.

Fig. 8.6. Descrizione delle principali attività condotte nell'ambito del Pompeii Sustainable Preservation Project (2014-2017).

condizioni geofisiche e ambientali dello specifico contesto oggetto di studio; la realizzazione di una base documentaria sufficientemente precisa e affidabile nella resa dei caratteri dimensionali e plano-volumetrici attraverso attività di rilievo e restituzione digitale a differente scala, dal reperto mobile al contesto ambientale.

Ciò giustifica la partecipazione dell'Istituto alle attività dell'PSPP con due differenti gruppi di ricerca: il Laboratorio di Archeologia Immersiva e Multimedia (LAIM) della sede di Catania e il Laboratorio di geofisica applicata all'Archeologia e ai beni monumentali della sede di Lecce[20].

[20] Il Laboratorio di Archeologia Immersiva e Multimedia, vede coinvolti sul campo e in laboratorio: Samuele Barone, Giovanni Fragalà, Danilo P. Pavone, Salvatore Russo, mentre le indagini non invasive del Laboratorio di Geofisica applicata all'archeologia, sono eseguite da Giovanni Leucci e Lara de Giorgi. La responsabilità scientifica delle attività è di Daniele Malfitana, il coordinamento sul campo dello scrivente.

8.3.1 Attività del laboratorio di Geofisica applicata all'archeologia e ai beni monumentali

Le moderne indagini geofisiche possono offrire molteplici apporti alle attività di ricerca archeologica con l'acquisizione di dati e la produzione di conoscenze capaci di supportare in vario modo gli interventi di restauro dei monumenti antichi.

Le indagini non invasive condotte a Pompei dal *Laboratorio di Geofisica applicata all'archeologia e ai beni monumentali*, hanno visto l'utilizzo di differenti strumentazioni e metodologie, i cui risultati si sono rivelati particolarmente preziosi sia per valutare alcuni parametri fisici relativi allo stato di conservazione di singoli edifici funerari, sia per l'acquisizione di informazioni più generali sulle condizioni geofisiche e stratigrafiche del contesto di Porta Nocera e di via Nucerina[21].

Riguardo quest'ultimo aspetto nel 2014, durante la prima campagna di attività, la realizzazione di indagini non invasive tramite l'impiego di strumentazioni *Ground Penetrating Radar* (GPR)[22] e *Electrical Resistivity Tomography* (ERT)[23] in tre differenti settori della necropoli hanno permesso di conseguire importanti risultati. Tutta l'area della necropoli è stata suddivisa in tre settori sottoposti ad indagini non invasive tramite l'impiego integrato delle due differenti tecniche (Fig. 8.7).

Le anomalie registrate dalle strumentazioni hanno permesso di acquisire informazioni relative alla presenza di strutture ancora sepolte compatibili sia con sepolture di differente tipologia, sia dell'esistenza e della prosecuzione di una strada pomeriale che, correndo parallelamente alle mura ed in posizione di fondovalle, è da connettere con il tracciato in parte conosciuto dell'arteria extraurbana, che conduceva verso *Nuceria*. La determinazione, inoltre, dei livelli di fondazione degli edifici funerari e del profilo stratigrafico dell'area ha consentito di mettere in evidenza differenti cause di degrado in atto, imputabili alle caratteristiche geomorfologiche del suolo. (Fig. 8.8).

In occasione delle attività svolte nel 2017, fra le quali rientrava la sperimentazione di soluzioni per l'impermeabilizzazione delle fondazioni tramite l'applicazione di materiale argilloso, è stata selezionata come caso studio la tomba N-D di via Nucerina, la quale era stata dotata fin dal momento della scoperta di una tettoia e di lastre di protezione degli intonaci di rivestimento, che presentavano segni di *rubricaturae* e incisioni (Fig. 8.9).

La preliminare raccolta di dati microclimatici volti a misurare la temperatura e l'umidita dell'area sotto la copertura e sulle superfici murarie, prevedeva inoltre delle misurazioni anche dell'umidità del terreno attraverso la collocazione di sonde TDR lungo il perimetro della tomba, che dovevano raggiungere la profondità di 1,20 mt. Si è pertanto reso necessario procedere ad una stima preliminare, tramite l'esecu-

[21] Malfitana *et alii* 2018b; Malfitana *et alii* 2018a

[22] Per l'acquisizione dei profili è stato utilizzato un georadar Ris Hi Mod con una coppia di antenne con frequenza centrale pari a 200MHz e 600MHz.

[23] Per l'esecuzione dei rilievi è stato impiegato un Syscal Kid con 24 canali attivi.



Fig. 8.7. Pompei, Necropoli di Porta Nocera. Localizzazione delle aree sottoposte ad indagini GPR e ERT.

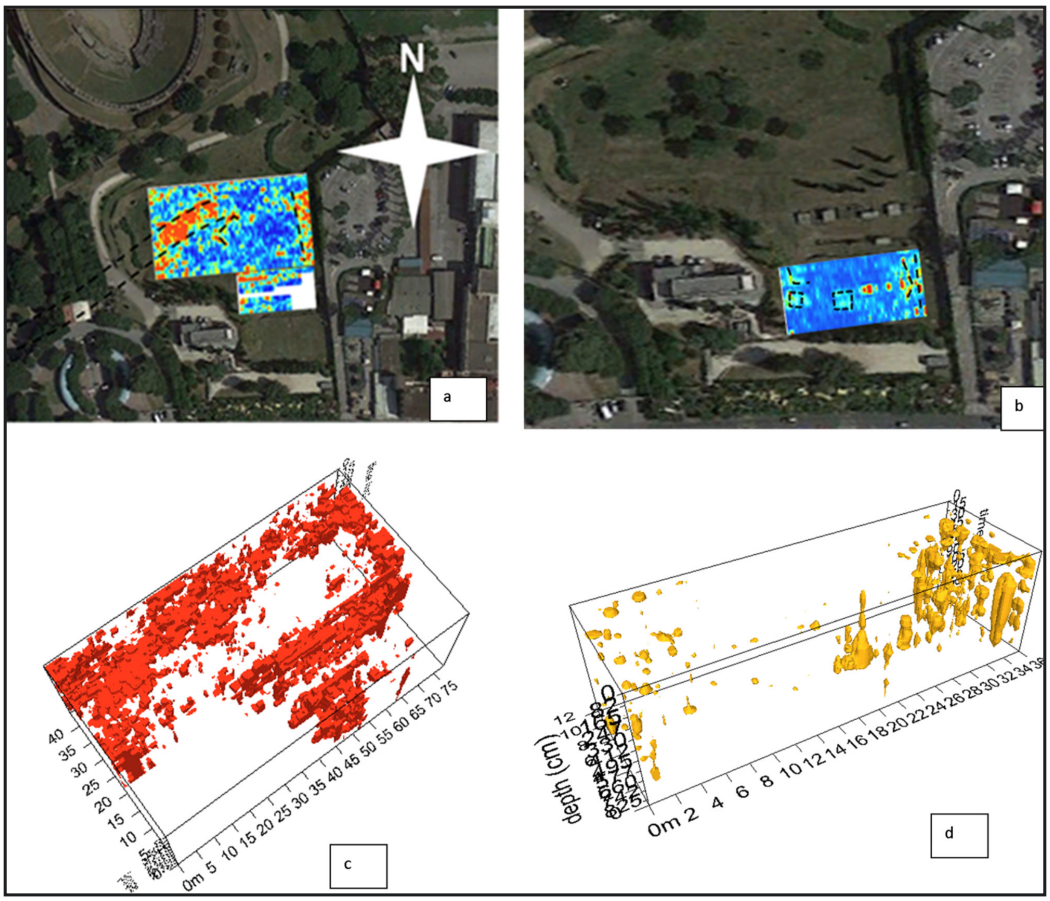


Fig. 8.8. Pompei, Necropoli di Via Nucerina. Sono visibili: a) il tracciato ipotetico di un'arteria stradale pomeriale, indicata dall'anomalia in rosso; b) anomalie imputabili alla presenza di strutture sepolte. Restituzione 3D delle anomalie registrate.



Fig. 8.9. Pompei, necropoli di via Nucerina, tomba D-N da sud-est. Sono visibili la tettoia e le lastre verticali di protezione.

zione di nuove indagini non invasive, dell'eventuale presenza e dislocazione di strutture sepolte, in modo da poter valutare la possibilità e l'eventuale migliore posizione del l'inserimento delle sonde Le indagini GPR e ERT eseguite hanno permesso di acquisire nuovi dati sulla presenza e la profondità relativa di strutture sepolte consentendo di guidare la collocazione delle sonde in punti appropriati (Fig. 8.10).

In tale occasione la stima da valutazione della resistività del terreno ha permesso di giungere ad un modello della conduttività idraulica del terreno in relazione alla differente composizione stratigrafica (Fig. 8.11).

L'utilizzo di un micro-georesistimetro[24] e di strumentazione ultrasonica[25] applicate alle pareti della tomba D-N, hanno inoltre permesso di valutare i valori resistività lungo le superfici, necessari per ottenere una stima del contenuto volumetrico in acqua lungo la parete e la loro risposta fisico-meccanica a sollecitazioni esterne, quali ad esempio eventi tellurici.

[24] Per le misurazione è stato utilizzato un micro-georesistivimetro proceq (PASI).

[25] Per le misurazioni è stato utilizzato un Tdas (Boviar) con 16 canali attivi.

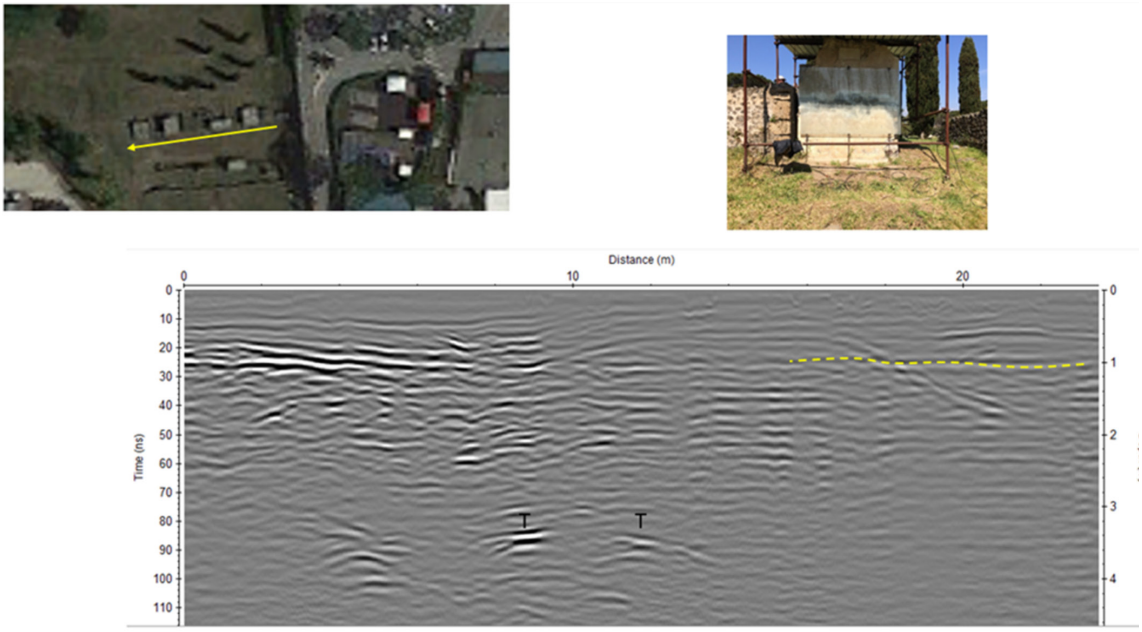


Fig. 8.10. Pompei, necropoli di via Nucerina. Tomba D-D, sezione radar 2D elaborata con l'indicazione della profondità raggiunta dalle fondazioni e della presenza di anomalie attribuibili a sepolture (T).

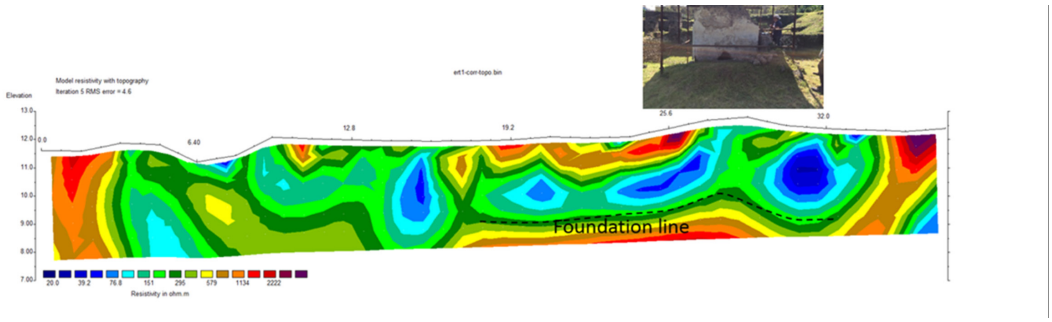


Fig. 8.11. Pompei, necropoli di via Nucerina. Tomba N-D, Distribuzione 2D della resistività legata al profilo ERT1.

8.3.2 Attività del Laboratorio di Archeologia Immersiva e Multimedia

Il Laboratorio di Archeologia Immersiva e Multimedia si è occupato di produrre una documentazione tale da poter soddisfare le necessità connesse alle molteplici indagini condotte nell'ambito del PSPP, che richiedono una precisione elevata sia nella resa del dato dimensionale e plano-volumetrico, sia nella restituzione dei dettagli.

Le indagini geofisiche, quelle microclimatiche, la mappatura delle aree interessate da un fenomeno di degrado o da sottoporre a nuovi interventi di restauro, sono infatti tutte accomunate dalla necessità di disporre di rappresentazioni grafiche capaci veicolare informazioni che dall'esatta determinazione spaziale ricevono particolare valore e significato.

L'estrema variabilità degli oggetti d'interesse, che spaziano dal quadro micro-fessurativo di uno strato d'intonaco, alla restituzione della conformazione geomorfologica di un terreno, hanno richiesto al LAIM la messa a punto di tecniche di rilievo e metodologie di restituzione grafica capaci di integrare differenti approcci e soddisfare l'estrema variabilità di scala degli oggetti e dei contesti di studio, che richiedono di operare con la medesima facilità e con i gli stessi livelli qualitativi dall'estremamente piccolo al notevolmente grande.

La necessità di soddisfare differenti richieste avanzate dai vari gruppi di lavoro hanno inoltre stimolato una riflessione sulle migliori strategie di esportazione e di condivisione dei risultati, che ha comportato un riesame dei formati di interscambio oggi disponibili, i quali, se nella restituzione di dati bidimensionali possono contare su standard ampiamente condivisi, nel passaggio alla terza dimensione presentano ancora un campo di variabilità molto elevato per la quantità di formati disponibili, spesso con differenti caratteristiche e privi di reali possibilità d'interoperabilità fra molteplici software di gestione di dati tridimensionali, nell'ambito dei quali, oltretutto, le soluzioni open *source* sono al momento alquanto limitate. Inoltre l'estrema "pesantezza" in termini di memoria fisica ed "esosità" di risorse computazionali richieste da modelli digitali tridimensionali di alta definizione, che si accresce in maniera esponenziale qualora dal singolo oggetto si passi a contesti più ampi, limita fortemente le reali possibilità di condivisione o di fruizione attraverso gli ormai diffusi canali di comunicazione web, che risentono ancora oggi delle forti limitazioni presenti negli attuali motori grafici *web-based.*

Tale situazione costituisce il maggiore limite, che impedisce ad oggetti digitali tridimensionali di esprimere tutto il loro potenziale informativo ed essere ampiamente utilizzati come strumenti di documentazione, esigendo non solo specifiche conoscenze tecniche per la loro realizzazione, ma anche e soprattutto per il loro utilizzo[26].

[26] Si pensi ad esempio ai problemi, in mancanza di software adeguati e di specifiche conoscenze dell'utilizzo di Point clouds generati da rilievi laser scanner.

Pienamente consapevoli di tali limiti il LAIM, insieme all'attenzione rivolta alla realizzazione di una documentazione affidabile sotto il punto di vista della precisione e dell'accuratezza del dato, ha posto particolare cura nell'impiego di soluzioni capaci di assicurare allo specialista facilità di utilizzo ed ampia versatilità per la risoluzione di specifiche problematiche. Ciò è stato reso possibile dall'utilizzo integrato di differenti formati di esportazione e condivisione di dati, capaci di variare dall'oggetto bidimensionale a quello tridimensionale.

Parte Terza

RISULTATI



«I resti archeologici non trasmettono in linea generale un messaggio diretto; la loro interpretazione richiede un complesso percorso di indagine scandito dalle tappe della individuazione, della raccolta, della descrizione e dell'organizzazione dei dati, che possono garantire il raggiungimento di un'interpretazione storicamente validata»

Daniele Manacorda, *Il Mondo dell'archeologia*, Roma, 2002

Capitolo IX

Le attività di rilievo

«La mappa non è il territorio».

Alfred Korzybski 1941

9.1 Pompei fra cartografia storica e carte digitali

«La mappa non è il territorio», sosteneva Alfred Korzybski in un'affermazione divenuta celebre. Nonostante ciò, anzi proprio in virtù di tale diversità, una mappa è estremamente utile per orientarsi in un territorio, per comprenderne le caratteristiche, in ultima istanza per operare e agire in esso.

Tale rapporto, fra mappa e territorio, è così stringente e, per certi versi, naturale da essere dato quasi per scontato, complice l'enorme quantità e la facile reperibilità di rappresentazioni relative a qualsiasi luogo del nostro pianeta. Solo quando tale importante risorsa, la cui diffusione è stata ulteriormente incentivata dallo sviluppo della cartografia digitale, viene meno, si è in condizione di comprenderne appieno l'importanza.

Un esempio del valore conoscitivo e delle funzioni pratiche insite in una rappresentazione cartografica di un territorio o di un luogo è fornita proprio dalla storia delle rappresentazioni cartografiche dell'antica città di Pompei.

All'indomani della scoperta del sito archeologico e dell'inizio degli scavi, il governo borbonico vietò categoricamente qualsiasi esecuzione di disegni o rilievi delle evidenze archeologiche, che gli scavi stavano riportando alla luce, limitandone l'esecuzione alle sole rappresentazioni "ufficiali" redatte a scopo documentario dal personale addetto alle attività di scavo.

Tale divieto trovava, certamente, le sue motivazioni nella volontà, da parte del governo, di mantenere per così dire il controllo non solo sul sito e sui materiali che da esso provenivano, ma anche sulla conoscenza che poteva derivarne.

Se non mancarono le lamentele e le avversioni a tale provvedimento[1], che incentivò, talvolta, l'esecuzione clandestina e, di conseguenza, la circolazione

[1] *«Non esiste una descrizione di viaggio del XVIII o dei primi del XIX secolo ad Ercolano e Pompei, un racconto di una visita nel Museo Reale di Portici, o una corrispondenza a casa con i propri cari che non riporti un cenno di disappunto a causa del divieto di copiare tramite disegno».* Kockel 2018, p. 59.

di schizzi e rappresentazioni da parte dei viaggiatori che giungevano per esplorare le vestigie dell'antica città, l'estrema lentezza e la pressoché totale assenza di diffusione di rappresentazioni "ufficiali" almeno durante gli anni successivi all'inizio delle attività di scavo, contribuirono ad accrescere e diffondere opinioni false e talvolta prime di reale fondamento circa la natura e l'entità di ciò che veniva riportato alla luce.

Sebbene l'esecuzione di rilievi delle strutture che venivano riportare alla luce accompagnò sempre le attività di scavo a Pompei, l'esigenza di disporre di una pianta generale, comprensiva di tutti i resti monumentali fini a quel momento rinvenuti, è testimoniata solo a partire dal 1765. L'idea fu concepita da Francesco la Vega, direttore degli scavi di Pompei dal 1764 al 1804, che realizzò una prima cartografia d'insieme, comprendente le due aree di scavo da cui aveva avuto inizio l'esplorazione dell'antica città, opera concepita fra il 1780 e il 1787 e continuata dopo la morte di Francesco La Vega, dal fratello Pietro[2] (Fig. 9.1).

Tale pianta, con gli errori di orientamento e posizionamento reciproco dei due settori della città fino a quel momento indagati[3], con l'indicazione dell'ubicazione e dei confini dei terreni sotto i quali si estendevano presumibilmente i resti dell'antica città, con quel supporto cartaceo costituito dalla giustapposizione di due coppie di fogli dalle dimensioni differenti, contiene *in nuce* alcune delle delle criticità a cui la successiva produzione cartografica fino almeno alla metà del XIX secolo dovette far fronte e che ne caratterizzò i risultati.

Com'è stato recentemente ribadito, in modo pienamente condivisibile, da Valentin Kockel[4] lo studio di tali forme di rappresentazione, che applicate a Pompei in virtù dell'eccezionalità del sito assumono connotazioni peculiari, ma che possono essere estese a qualsiasi rappresentazione cartografica d'interesse storico, costituisce uno strumento di estremo interesse non solo come testimonianza dell'oggetto specifico della rappresentazione, ma anche e soprattutto come testimonianza della civiltà e della cultura del periodo in cui tale rappresentazione venne realizzata.

Infatti, se alla base della realizzazione delle piante dell'antica città di Pompei, che seguirono, convogliando gli sforzi e i contributi di illustri personalità[5], quella realizzata da Francesco e Pietro La Vega, vi è un indubbio interesse documentario, gli errori compiuti in fase di rilievo e connessi alle tecniche e alle strumentazioni impiegate, la scala di riduzione con i relativi problemi di resa dei dettagli e del supporto fisico della rappresentazione, le necessarie scelte sulla tipologia di informazioni da rappresentare, il problema non indifferente non solo dal punto di vista della correttezza professionale, ma an-

[2] García y García 2018, p. 22-23; Kockel 2018, p. 66-69 e 78-80.

[3] Gli scavi a Pompei, iniziati nel 1748, erano proseguiti con due interventi che interessarono l'area di Porta Ercolano le insulae immediatamente a sud-ovest della porta urbica, e l'area del teatro con il relativo portico.

[4] Kockel 2018, p. 60.

[5] Per una ricostruzione storica della produzione cartografica di Pompei, si rimanda ai recenti contributi di García y García 2018; Kockel 2018, già citati.

che dell'affidabilità delle informazioni derivate dall'uso diffuso di riproduzioni e alterazioni di cartografie precedenti senza la citazione della fonte originaria, rappresentano sono alcune delle questioni che deve affrontare chi si accinge allo studio di tali riproduzioni cartografiche.

Limitando l'interesse al solo aspetto connesso alla precisione della riproduzione, una tappa fondamentale nella storia della riproduzione cartografica di Pompei occupa la Pianta di Pompei eseguita fra il 1870 e il 1885 dall'ingegnere Giacomo Tascone, su esplicito incarico dell'allora Soprintendente generale degli scavi e direttore del Museo di Napoli, Giuseppe Fiorelli. La pianta, basata su un accurato rilievo geodetico fu realizzata da Tascone, con una scala di riduzione di 1:400[6].

Tale pianta, pur rappresentando per quasi un secolo la più precisa restituzione cartografica dell'antica città, rimase in gran parte inedita nella sua versione originale, venendo invece ampiamente utilizzata una riduzione in scala 1:1000 che, fatta aggiornare per volere di August Mau con i rinvenimenti intercorsi nel periodo compreso fra il 1885 e il 1908, fu utilizzata dallo studioso per il suo monumentale studio sulle iscrizioni della città, pubblicato nel quattro volume del CIL edito l'anno successivo[7] (Fig.9.2).

Della pianta del Tascone, dopo l'aggiornamento operato da Mau su una riduzione in scala 1:1000, furono tentati diversi aggiornamenti, l'ultimo, prima della rivoluzione tecnologica rappresentata dalla restituzione cartografica a realizzata a partire da rilievi orto-fotogrammetrici effettuati tramite riprese aree, fu più volte annunciata da Amedeo Maiuri, ma mai realizzata.

Dopo alcune restituzioni operate a partire da rilievi aerei effettuati in diverse occasioni, durante la prima metà del secolo scorso, ma i cui risultati dal punto di vista della qualità necessaria per un impiego consono alle finalità della ricerca furono scadenti, si dovette attendere la pianta realizzata, anch'essa su base aerofotogrammetrica, dall'architetto Hans Eschebach, a scala 1:1000 ed edita nel 1970[8] (Fig.9.3).

Un ulteriore tappa nella storia della rappresentazione cartografica dell'antica città di Pompei è costituto dalle cosiddette "*RICA maps*", realizzate dal gruppo RICA "*Research In Campanian Archeology*" che ha operato per la realizzazione di un "*Corpus Topographicum Pompeianum*"[9]. Anche in questo caso, alla base delle "*RICA Maps*" vi è un rilievo fotogrammetrico realizzato nel 1979 tramite apposito volo, a cui fece seguito una restituzione grafica, tramite integrazione con verifica diretta sul terreno, di precedenti cartografie e piante di dettaglio. Sebbene pubblicate, anche in questo caso, parzialmente fra il 1984 e il 1986, le "*RICA maps*", annoverano oltre il rilievo fotogramme-

[6] García y García 2018, pp. 46-48.
[7] Mau 1909.
[8] Eschebach 1970.
[9] Il *Corpus Topographicum Pompeianum* intendeva porsi come uno strumento di riferimento nell'ambito degli studi di pompeianistica, fornendo indici di ricerca tematici e riferimenti bibliografici aggiornati e su base topografica. Il progetto internazionale, ha avuto inizio nel 1958 grazie all'impegno di Matteo Della Corte, Tatiana Warscher e Axel Boëthius, ed è proseguito fino agli anni novanta, con la pubblicazione curata da parte di B. Vander Poel dell'università del Texas, di cinque volumi.



Fig. 9.1. Francesco e Pietro La Vega, Pianta di parte della città ed adiacenze di Pompei. Quale si fa scavare dal re delle due Sicilie Ferdinando IV (1780-1809). Napoli, Museo archeologico Nazionale, inv.2615 (Da Kockel *2018, p. 93).*



Fig. 9.2. Pompeiorum quae effosa sunt. Pianta elaborata da August Mau, sulla base della Pianta di Giacomo Tascone. Scala 1:1000 (Da Mau *1909).*

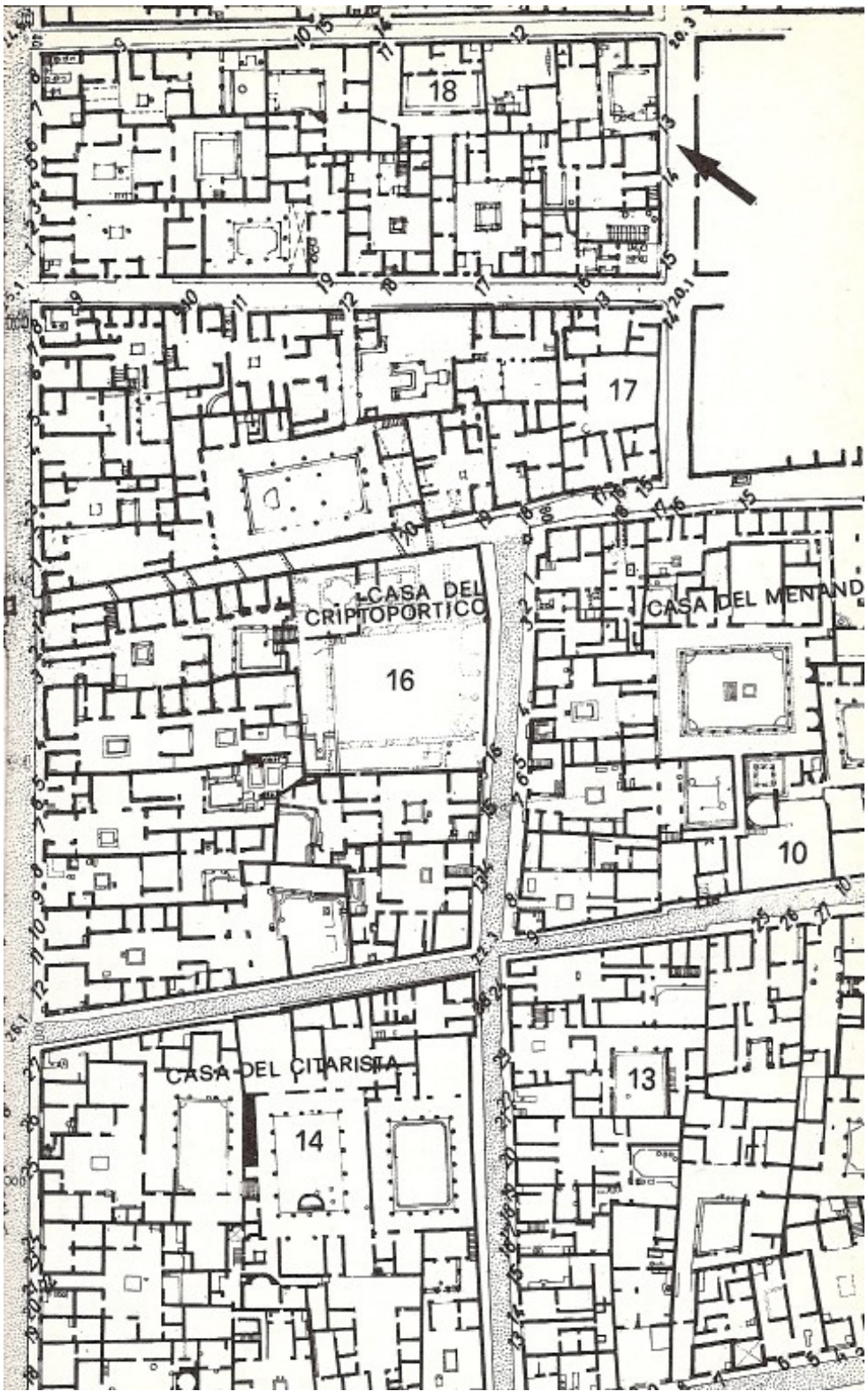


Fig. 9.3. Pompei. Pianta della città (particolare). (Da Eschenbach *1970).*

trico già citato, una restituzione 1:1000 dell'intera città, estesa fino a comprendere al Villa dei Misteri a Nord-Ovest, in tre differenti tematismi: *insulae*, porte urbiche e necropoli[10] (Fig. 9.4).

A queste vanno aggiunte delle restituzioni di dettaglio, a scala 1:500, delle terme e delle ville suburbane[11]. Le "*RICA Maps*", pur nei limiti connessi con una cartografia realizzata con metodologie tradizionali, hanno costituito la base cartografica di riferimento fino al rilascio della recentissima "*Nuova cartografia informatizzata georiferita*" della città.

Sono proprio le metodologie e le strumentazioni impiegate, insieme ai vantaggi connessi all'utilizzo di cartografia digitale a rendere la "Nuova cartografia" di Pompei, uno strumento di grande accuratezza e precisione. Per la sua realizzazione, infatti, è stato eseguito un nuovo rilievo topografico a terra, volto a verificare, correggere ed eventualmente integrare, le "*RICA Maps*"[12]. La precisione del dato plano-altimetrico, insieme alla georeferenziazione sulla base di un sistema di riferimento assoluto è stata ottenuta materializzando a terra una "maglia" topografica, estesa fino a coprire le aree funerarie e i settori posti immediatamente all'esterno del circuito murario, basata su poligonali di diverso ordine, di cui la prima dotata di riferimento assoluto acquisito tramite localizzazione DGPS delle coordinate geografiche di due capisaldi[13] (Fig. 9.5).

La realizzazione di una base cartografica digitale, articolata su differenti livelli informativi, gestita tramite una piattaforma GIS, ha consentito di risolvere, tramite la "Nuova cartografia informatizzata georiferita", numerosi problemi, fra i quali alcuni di difficile risoluzione tramite le rappresentazioni cartografiche di tipo tradizionale, come quelle legate all'esistenza di strutture a livelli inferiori o superiori rispetto al piano terra o al piano stradale,o le problematiche legate alla presenza di coperture, alla caratterizzazione delle aperture delle finestre[14] (Fig. 9.6).

9.2 Verso un rilievo integrato

9.2.1 Rilievo topografico

Le attività d'indagine svolte dai vari gruppi di ricerca coinvolti nell'ambito del *Pompeii Sustainable Preservation Project*, si sono tradotte in una complessa e variegata serie di interventi, che hanno interessato gli edifici funerari ricadenti all'interno della Necropoli di Porta Nocera e di via Nucerina. La creazione di una base di conoscenza capace di porsi come concreto strumento di supporto agli interventi di ricerca, tutela e valorizzazione futuri, passa necessariamente dall'esatta definizione dello stato di conservazione degli edifici funerari, costruita sulla base di un esame diretto delle singole parti di cui ciascun monumento funerario è costituto. Essa richiede lo studio degli aspetti materico-costruttivi, delle tecniche impiegate, dello stato di conservazione attuale di ciascun elemento che compone ogni singolo monumento, sia esso parte della cortina muraria, uno strato di rive-

[10] García y García 2018, pp. 56-57.
[11] Rispoli 2018, p. 103.
[12] Paone 2018.
[13] Sampaolo 2018.
[14] Morichi 2018.

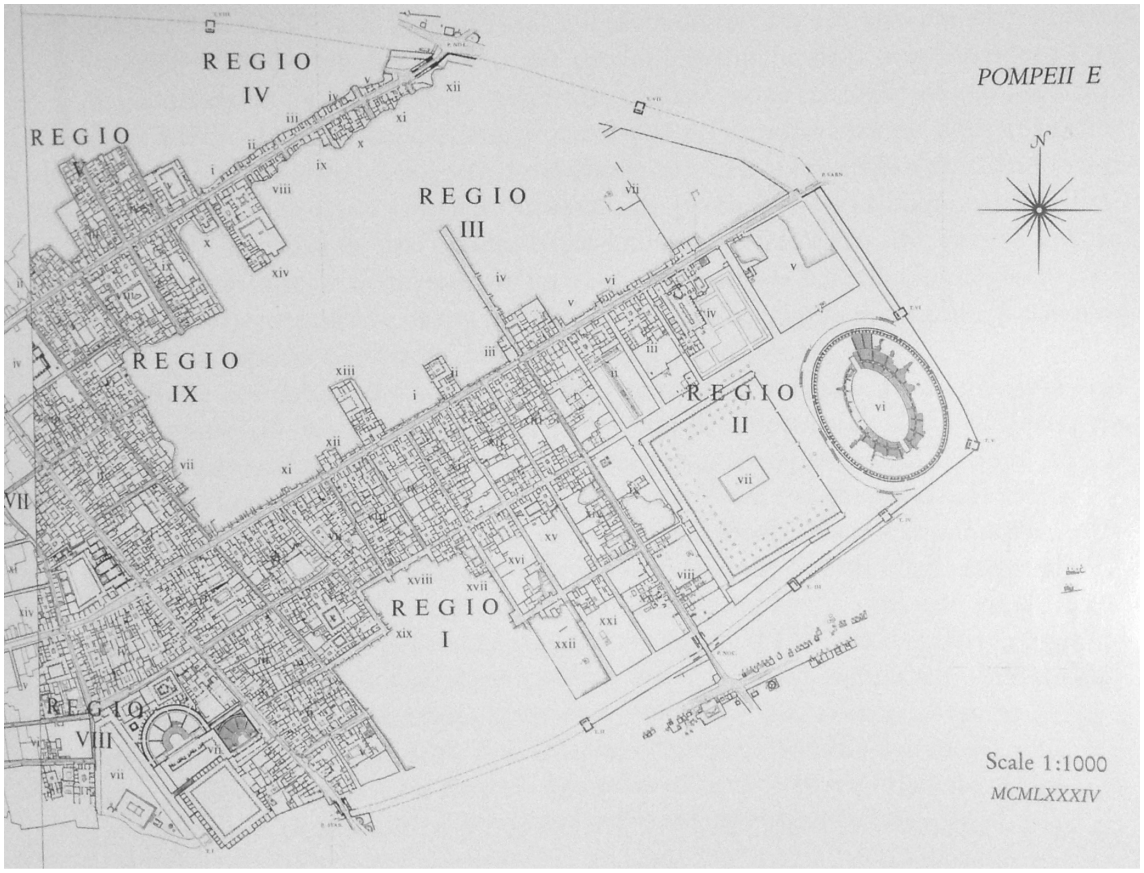


Fig. 9.4. Pompei. RICA Maps. Tav. 2, foglio Est (Da Rispoli *2018).*

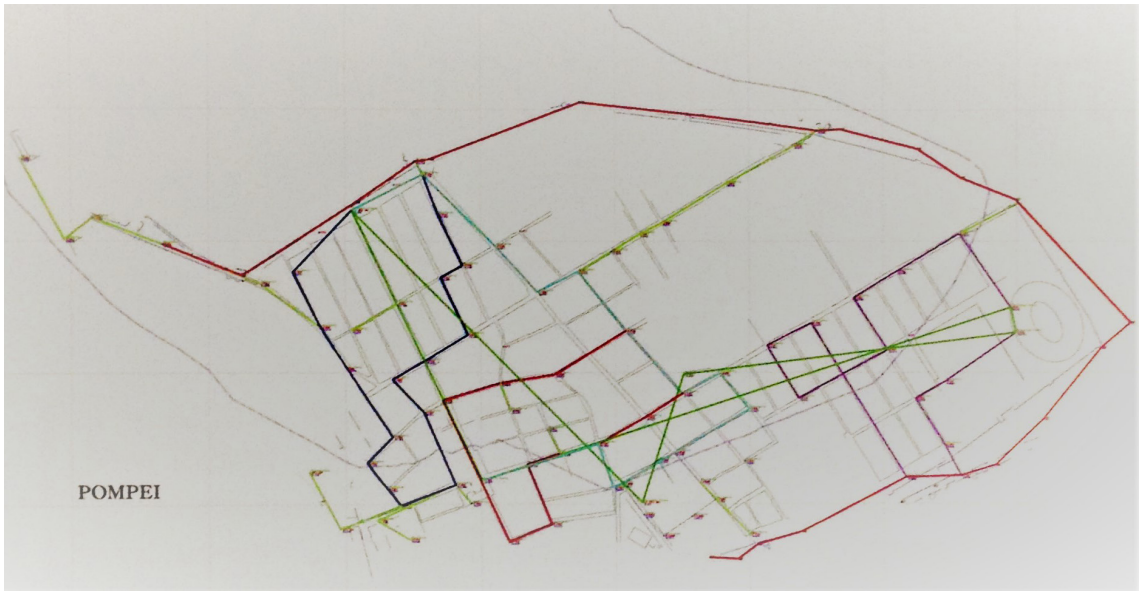


Fig. 9.5. Pompei. "Nuova cartografia informatizzata georiferita". Rappresentazione delle poligonali topografiche di riferimento e delle relative stazioni (Da Sampaolo *2018).*

stimento, o un elemento di fondazione.

La conoscenza dello stato di conservazione declinata su un singolo elemento strutturale o su una superficie di rivestimento, costituisce la base per un percorso di approfondimento volto, da un lato ad indagare le eventuali cause di degrado in atto, determinandone le relazioni con il manufatto, dall'altro a enucleare eventuali interventi di restauro pregressi, che nel corso degli anni, sono stati impiegati per assicurare la conservazione nel tempo degli edifici funerari, interventi che possono concretizzarsi in apporti materici a carico delle strutture, come nel caso del consolidamento di superfici di rivestimento o di interventi di installazione di apparati di protezione, quali coperture o lastre verticali fissate alle pareti come strumento di protezione di superfici decorate, stucchi, intonaci talvolta ospitanti affreschi, graffiti e *rubricaturae* (Fig. 9.7).

Le attività di sopra descritte coinvolgono differenti discipline capaci di misurare molteplici parametri fisico-chimici, sia del terreno circostante, sia delle singole strutture di cui è composto un monumento. Tramite l'apporto dell'archeometria e della geosifica diventa possibile stimare numerosi parametri fisici di uno specifico contesto ambientale. Ad esempio diventa possibile stimare l'altezza della falda acquifera e la capacità di drenaggio delle acque superficiali, mettendo l'una e l'altra in correlazione con le strutture di fondazione di un edificio funerario, oppure valutarne la risposta nei confronti di sollecitazioni fisiche tramite l'impiego di microsismografi (Fig. 9.8).

Tutte le analisi volte alla stima di parametri fisici relativi ad un edificio funerario o all'ambiente in cui esso di si trova inserito, sono accumunate dall'esigenza di una correlazione dei dati acquisiti con l'esatto punto in cui, all'interno di uno spazio fisico tridimensionale, si manifesta il fenomeno d'interesse.

Le attività svolte dall'IBAM-CNR nel corso delle campagne 2014-2018 nell'ambito del *Pompeii Sustainable Preservation Project* hanno avuto come principale obiettivo quello di soddisfare tale esigenza, tramite la realizzazione di una documentazione che consentisse di ottenere una rappresentazione dello spazio fisico nelle sue tre dimensioni, che fosse affidabile, in termini di precisione del dato dimensionale, sia "media" scala, utile per lo studio di fenomeni che coinvolgono e per la pianificazione di interventi che coinvolgono dell'intero contesto della necropoli, sia su "grande" scala, ottimale nel caso di interventi sul singolo monumento funerario.

Per realizzare ciò occorreva innanzitutto disporre di una solida e affidabile base, a cui riferire tutti i rilievi. Una verifica volta a rintracciare i punti topografici materializzati sul terreno durante le attività svolte per la realizzazione della "*Nuova cartografia informatizzata georiferita*" di Pompei, aveva chiaramente mostrato come la poligonale di secondo livello realizzata nel 2009 e costituita da 16 stazioni distribuite lungo

[15] La rete topografia materializzata in occasione dei lavori per la realizzazione della nuova cartografia informatizzata è costituita da un totale di 83 stazioni tutte interne all'area archeologica, tranne le 16 sopra accennate. V. Sampaolo 2018, pp. 114-115.



Fig. 9.6. Pompei. "Nuova cartografia informatizzata georiferita" (Da Morichi-Paone-Sampaolo 2018).



Fig. 9.7. Pompei. Necropoli di Porta Nocera. Tomba 11 ES. In evidenza i differenti tipi di protezione apprestati per l'edificio funerario: aggiunta di materiale impermeabilizzante sulla cresta dei muri del recinto; tettoia in legno, tegole e ferro e pannellature verticali in vetro per la protezione della facciata.

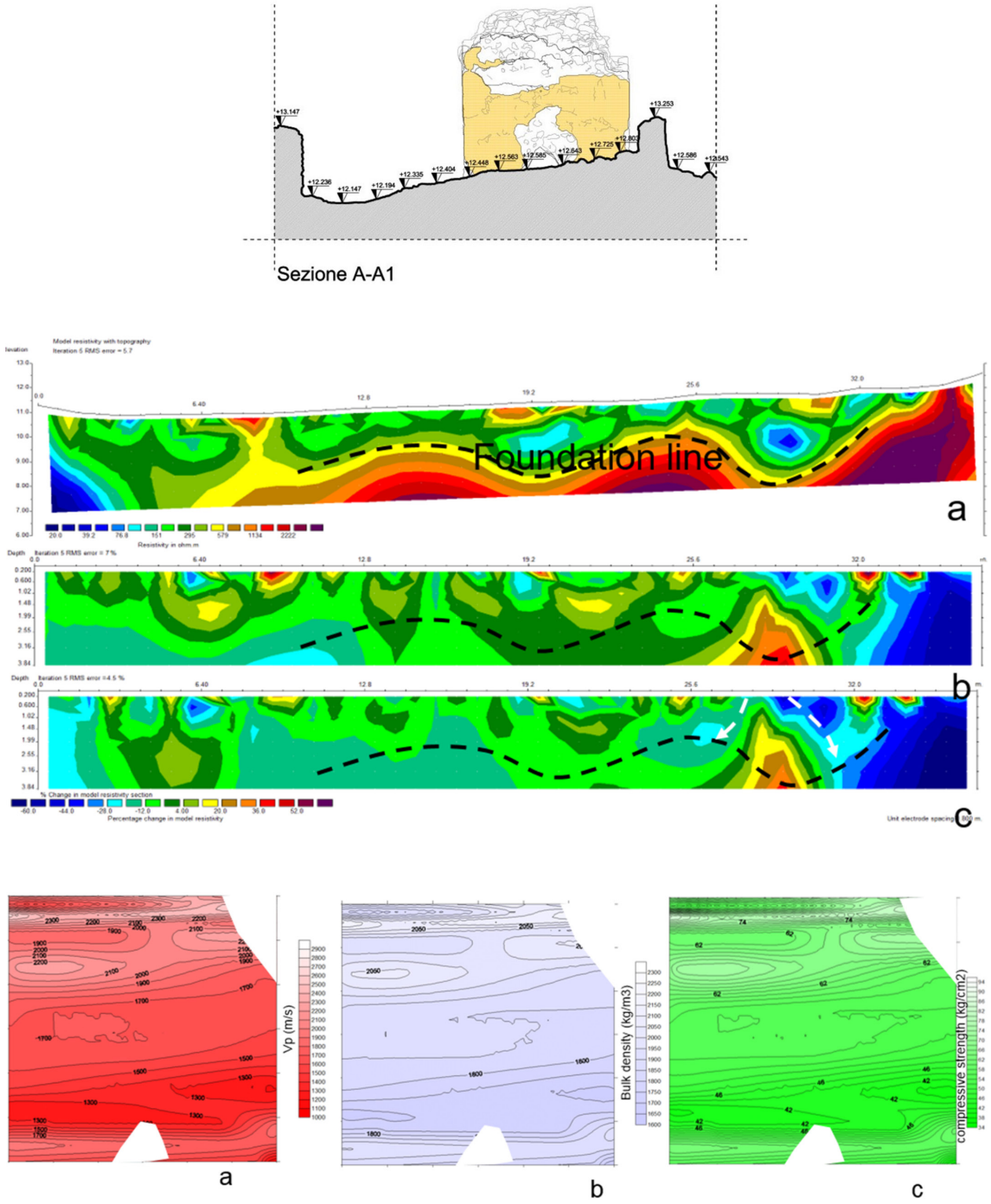


Fig. 9.8. Necropoli di via Nucerina. Tomba D-N. Restituzione al tratto della parete nord dell'edificio funerario (in alto); Mappa della conduttività idrica del terreno lungo il margine settentrionale dell'edificio funerario (al centro); Mappa della resistività in relazione alla parete nord dell'edificio funerario.

il perimetro esterno della cinta muraria dell'antica città[15], non consentiva né di coprire in modo adeguato l'area sepolcrale di "Via Nucerina", né di effettuare agevolmente le necessarie operazioni di collimazione con il settore funerario di Porta Nocera, da cui la prima è separata dal terrapieno su cui insistono le strutture di accesso all'area archeologica attraverso l'ingresso prospiciente l'antico anfiteatro (Fig. 9.9).

Al fine di usufruire di una base di riferimento affidabile che consentisse sia l'aggancio alla rete topografica esistente, sia creazione di un sufficiente numero di stazioni, all'interno e fra le due aree oggetto dell'attività di rilievo, è stata realizzata un'apposita rete locale[16] materializzata sul terreno tramite una poligonale di collegamento fra le due aree di Porta Nocera e via Nucerina. Tale rete è stata successivamente agganciata a tre caposaldi della poligonale topografica di riferimento (stazioni ST079, ST078, ST007)[17] dalle quali si sono ricavate le coordinate utili per una georeferenziazione secondo il sistema EPGS 3004, Gauss Boaga Roma 40, adottato a Pompei (Fig. 9.10).

Per la realizzazione della poligonale di collegamento tra i caposaldi noti, lunga circa 482 metri, sono state necessarie 15 stazioni intermedie, a causa della presenza di ostacoli come dislivelli, alberi e fabbricati. Alcune stazioni di servizio sono state realizzate all'interno dell'area di via Nucerina e altre lungo la strada che da questo settore della necropoli conduceva verso Porta Nocera.

Tale rete topografica è stata successivamente ampliata per rispondere a particolari esigenze di precisione e accuratezza connesse con le attività di ricerca, come accaduto nel caso dell'esecuzione, durante la campagna del 2017, di accurati rilievi non invasivi intorno alla tomba D-N della necropoli di via Nucerina, che ha comportato la creazione di una fitta trama di punti di riferimento all'interno dell'area sepolcrale, al fine di consentire l'esatta localizzazione delle aree sottoposte ad indagini geofisiche. È stato quindi necessario aumentare i punti di stazione della poligonale topografica realizzati in precedenza e pertanto presenti all'interno dell'area sepolcrale (Figg. 9.11-9.12).

9.2.2 Rilievo fotogrammetrico da drone

L'alto dettaglio richiesto per una rappresentazione digitale del terreno nelle due aree funerarie oggetto di studio, presupponeva la disponibilità di un'ortofoto, ottenuta con un volo a bassa quota, che fosse capace di configurarsi come una base di riferimento affidabile per il collegamento di tutte le evidenze monumentali presenti nell'area.

Tale risultato non poteva essere raggiunto tramite foto aeree ad alta quota o satellitari. Si è pertanto presentata, fin dall'inizio delle attività condotte dall'IBAM-CNR, la necessità di ottenere tale risultato tramite la realizzazione di un'apposita campagna di rilevamento aerofotogrammetrico tramite un APR (Ae-

[16] A tal fine si è impiegata una stazione Trimble S6. Le operazioni di rilievo sono state condotte da Salvatore Russo, collaboratore tecnico dell'IBAM-CNR.

[17] Per le caratteristiche dei capisaldi materializzati sul terreno e localizzati attraverso apposite monografie v. Sampaolo 2018, pp. 118-121.

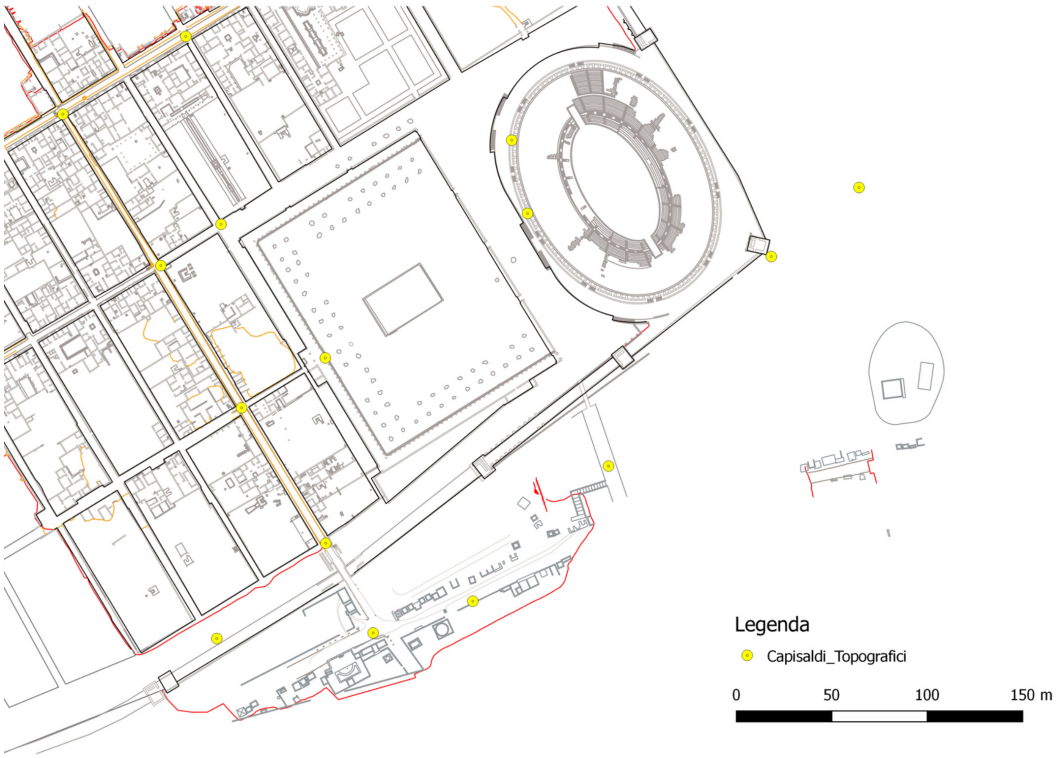


Fig. 9.9. "Nuova cartografia informatizzata georiferita di Pompei". In giallo la localizzazione dei capisaldi topografici e la loro relazione con i due settori funerari di Porta Nocera e di via Nucerina.

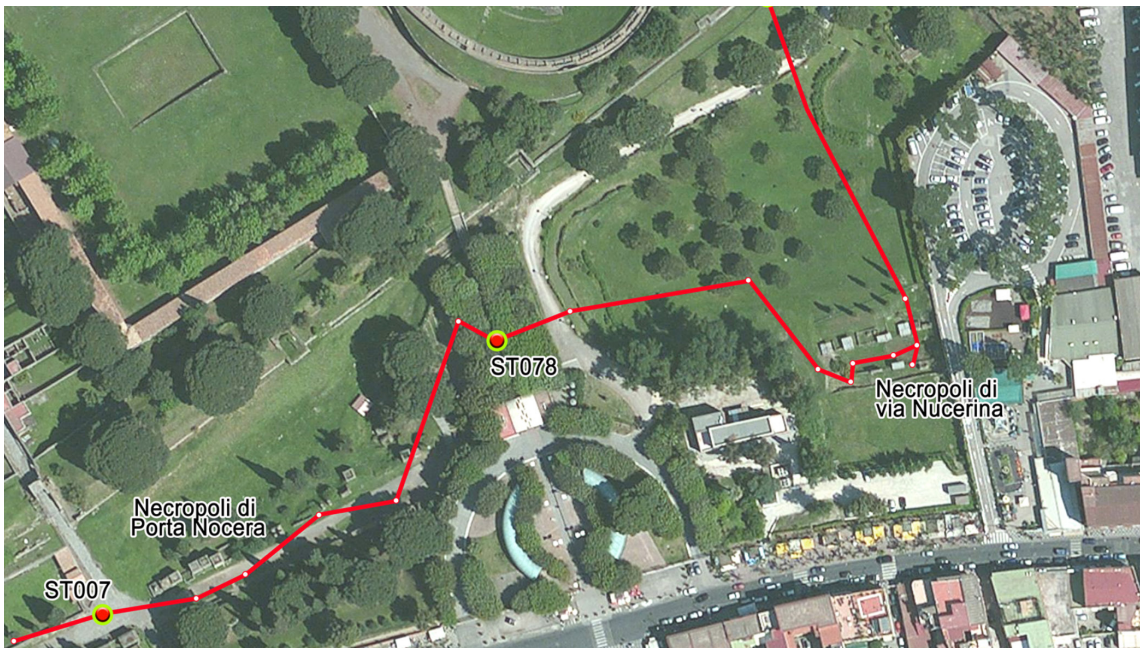


Fig. 9.10. Pompei. Rete topografica di riferimento (in rosso) costruita a partire dai caposaldi materializzati per la redazione della "nuova carta informatizzata georiferita di Pompei" (Rilievo topografico e elaborazione di Salvatore Russo).

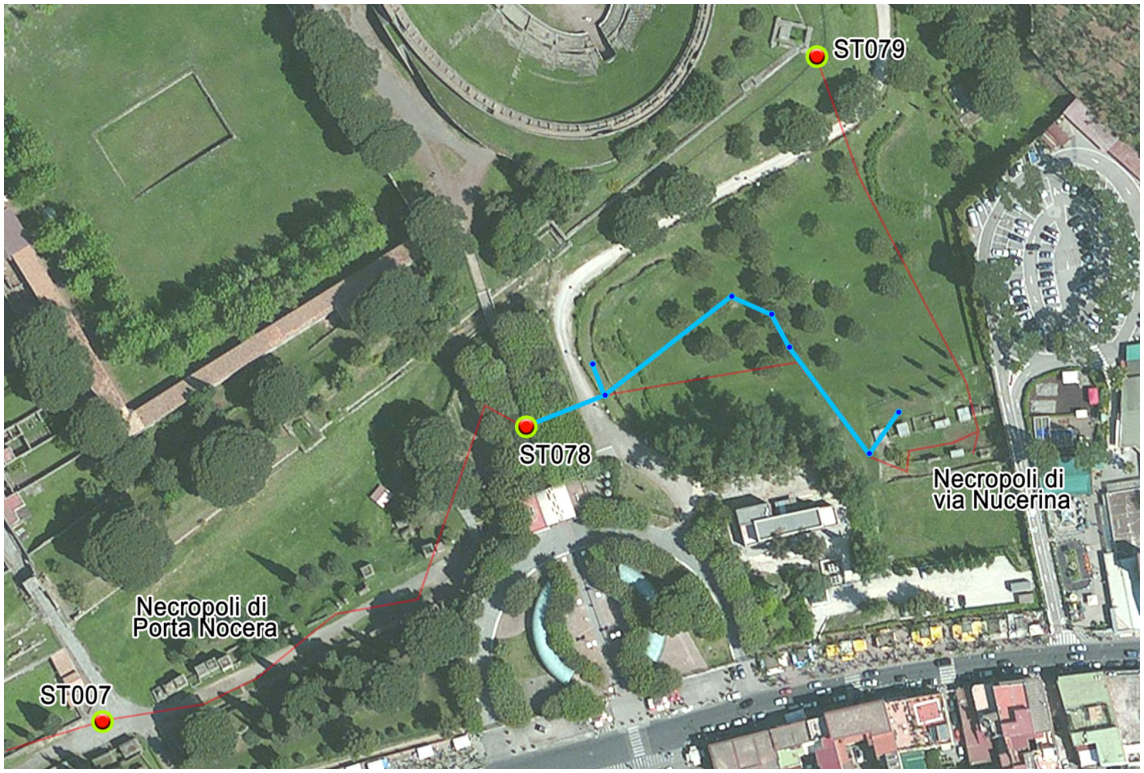


Fig. 9.11. Pompei. Rete topografica di riferimento (in rosso) costruita a partire dai caposaldi materializzati per la redazione della "nuova carta informatizzata georiferita di Pompei" ed ulteriori ampliamenti (in azzurro).



Fig. 9.12. Pompei, necropoli di via Nucerina. Creazione di perimetrazione topografica (in rosso) a supporto delle attività di indagine georadar.

romobile a Pilotaggio Remoto) o UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), comunemente conosciuto come drone, equipaggiato da adeguate macchine da presa.

La scelta della strumentazione in relazione alle peculiarità dell'area e alla tipologia delle riprese da effettuare ha fatto propendere verso la scelta di un quadricottero multirotore a eliche sovrapposte controrotanti, le quali, oltre ad aumentare la capacità di carico utile (*payload*), fornivano migliori garanzie di stabilità in volo anche in condizioni non del tutto ottimali, come nel caso della presenza correnti aeree a bassa quota.

L'aeromobile è stato dotato di differenti macchine da presa, per la scelta delle quali si sono tenute in considerazione sia il peso complessivo dell'apparecchiatura, sia la risoluzione che poteva essere ottenuta dalle riprese fotografiche. La scelta è ricaduta su una fotocamera GoPro Hero 3 Black Edition, Full HD, con sensore a 12 megapixel, che nonostante peso e le dimensioni contenute assicurava un'alta qualità delle riprese. Questa è stata utilizzata insieme ad una Sony Alpha 6000, Full HD, mirrorless, con sensore da 24,2 megapixel, equipaggiata con differenti ottiche ed un grandangolo capace di coprire un'area di presa estesa per un'ampiezza di 170 gradi.

Il piano di volo è stato articolato su *Waypoints* fissati ad un'altezza di circa 40 metri rispetto al suolo e ha previsto la copertura dell'intera area attraverso tre strisciate principali, ottenute in una sola sessione di volo. La leggerezza delle macchine da presa ha infatti permesso all'aeromobile di economizzare la carica delle batterie.

La realizzazione dell'intera copertura aerea in un'unica sessione di volo ha assicurato, inoltre, condizioni d'illuminazione uniformi su tutta l'area e ha facilitato il lavoro di restituzione fotogrammetrica tramite metodologie di *Structure From Motion*, in fase di post-produzione, contenendo entro limiti accettabili le distorsioni prodotte dalle differenti ottiche, garantendo al contempo, un numero ridotto di fotogrammi e la copertura di ampie porzioni dell'area oggetto d'interesse (Fig. 9.13).

Le immagini sono state acquisite in modalità *Continuous Shooting*, con l'esecuzione di 3 fotogrammi al secondo. Ciò ha permesso agli operatori in post-produzione di poter selezionare gli scatti in base alla migliore sovrapposizione tra fotogrammi consecutivi, mai scesa ad una soglia inferiore al 60 per cento di porzione in comune fra coppie di fotogrammi successivi.

Le riprese fotografiche ottenute durante la sessione di volo, la campionatura al suolo di diversi *Ground Control Points* attraverso coordinate GPS associati a target ben visibili nelle riprese fotografiche, la realizzazione di una poligonale di riferimento per la georeferenziazione, hanno consentito di ottenere un'ortofoto della Necropoli di Porta Nocera e di via Nucerina, con una risoluzione a terra inferiore ai 4 cm per *pixel*. L'altissima risoluzione dell'ortofoto ha permesso di usufruire di una base di grande affidabilità nel riscontro a terra delle evidenze (Fig. 9.14).

9.2.3 Rilievo fotogrammetrico close range

L'intera area della Necropoli di Porta Nocera e di via Nucerina sono state

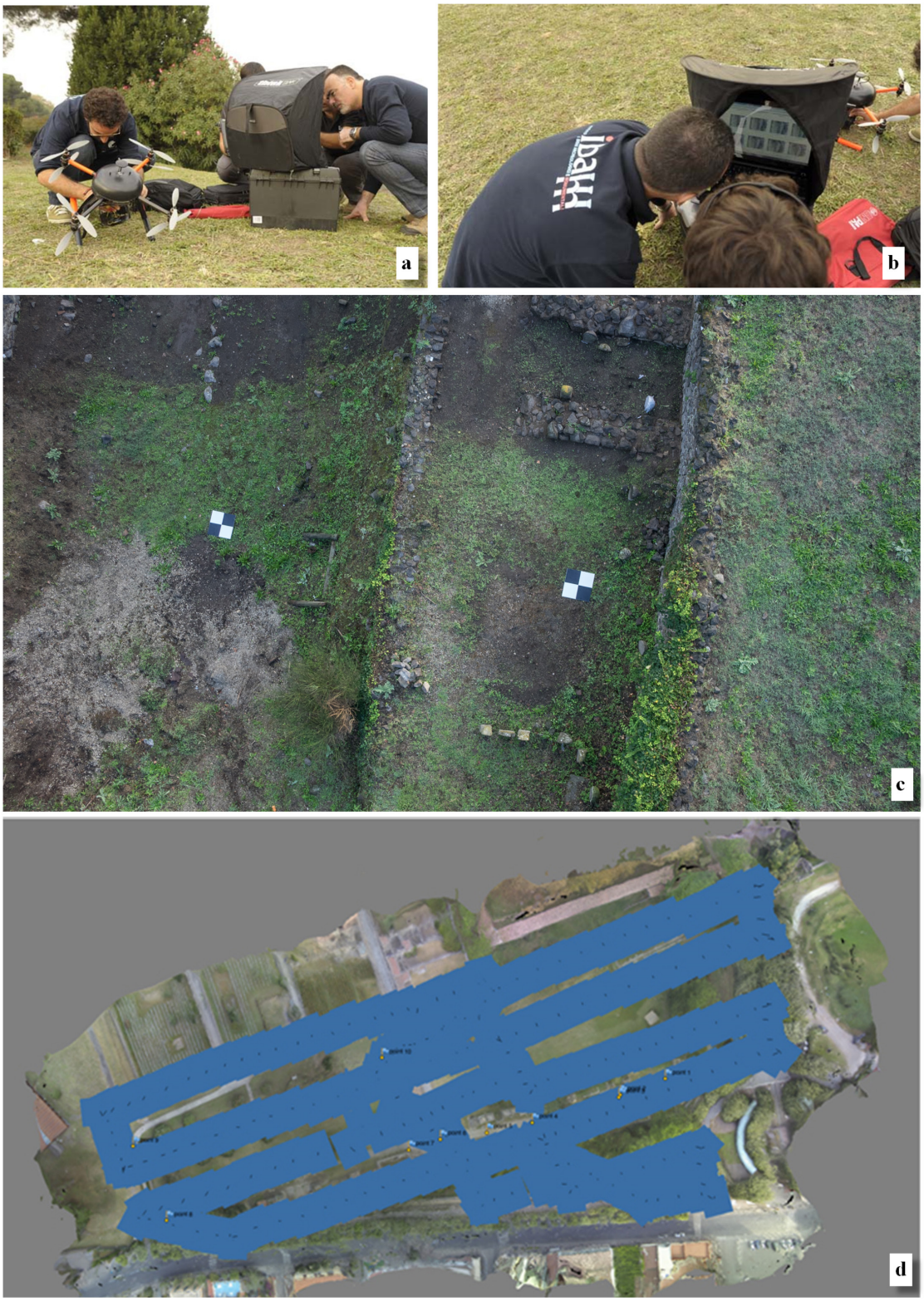


Fig. 9.13. Fasi di realizzazione delle riprese fotogrammetriche da drone. Programmazione del volo (a,b); definizione dei GCP tramite target a terra (c); allineamento delle immagini tramite photoscan (d).



Fig. 9.14. Fotopiano ottenuto tramite rilievo fotogrammetrico. Necropoli di Porta Nocera (a). Necropoli di via Nucerina (b).

oggetto nel corso delle attività svoltesi nell'ambito del PSPP di numerose campagne di ripresa fotografica per la realizzazione di differenti tipologie di documentazione, da fotopiani ad alta definizione di facciate o superfici di rivestimento a modelli tridimensionali ottenuti attraverso metodologie di *Structure From Motion*.

I risultati che l'applicazione di tale metodologia consente oggi di ottenere si mostrano adatti a soddisfare la necessità di modelli tridimensionali caratterizzati da una alta definizione nella resa delle superfici, particolarmente adatti nel caso in cui, per necessità di documentazione connesse con la realizzazione di interventi di restauro, la rappresentazione fedele degli apparecchi murari nella loro tessitura e nel loro apparato decorativo, rivesta una grande importanza.

La realizzazione di modelli tridimensionali tramite procedure di *Structure From Motion* richiede la copertura totale dell'oggetto, con comprese sia dall'alto, sia eventualmente degli spazi interni, abbastanza semplice da realizzare nel caso di oggetti di piccole dimensioni, più complessa qualora a dover essere rilevato è un monumento architettonico, la cui morfologia può risultare anche molto complessa.

Le stazioni di presa sono state pertanto orientate attorno a ogni singolo monumento, su cui sono stati applicati e geo-riferiti, tramite stazione topografica, dei target necessari per garantire in fase di analisi delle immagini, il corretto orientamento e la scalatura dei modelli. Ciò ha garantito la copertura totale delle superfici, secondo il medesimo criterio di sovrapposizione parziale, mai inferiore al 60 per cento, tra un fotogramma e il successivo[18] (Fig. 9.15).

Inoltre non si poteva non dedicare particolare attenzione al contesto ambientale in cui ogni evidenza è collocata, pena la perdita di dati di grande importanza, ma difficilmente formalizzabili. A tale scopo le riprese effettuate sui singoli monumenti sono state integrate con una campagna fotografica panoramica allo scopo di riprodurre tutti i punti di vista, le vedute ad ampio raggio, le prospettive, che un ipotetico visitatore potrebbe effettuare durante una normale passeggiata all'interno dell'area archeologica. Particolarmente adatte a tal fine si sono rivelate delle immagini "equirettangolari", eseguite per una restituzione cubica o sferica

[18] Il rilievo fotografico è stato eseguito tramite una fotocamera digitale Sony Alpha 6000 da 24 megapixel con obiettivo stabilizzato da 16 mm. Le riprese dall'alto, necessarie per coprire angoli e punti di vista altrimenti irraggiungibili da terra, sono state realizzate con l'impiego di macchine da presa montate su aste telescopiche monitorate da remoto tramite un'applicazione che sfrutta le capacità di connessione WiFi Direct della fotocamera e di device mobili.

[19] Per le riprese si è utilizzato l'HDR, *Hing Dynamic Range*, una tecnica oggi abbastanza diffusa nella fotografia digitale, basata sulla realizzazione di scatti multipli dello stesso soggetto in modo da compensare, con l'esposizione delle diverse immagini, la perdita di dettagli nelle zone sottoesposte o sovraesposte. La successiva elaborazione della serie di immagini consente di ottenere un'unica immagine con una corretta esposizione sia delle aree più scure che di quelle più chiare. Questa ha offerto il vantaggio di poter contenere la gamma dinamica dell'immagine all'interno del "visivamente apprezzabile" in modo da offrire all'utilizzatore finale una buona qualità di dettaglio, sia nelle alte luci, che nelle ombre, mantenendo inalterata l'atmosfera del luogo, presente al momento dello scatto fotografico.



Fig. 9.15. Pompei, Necropoli di Porta Nocera. Piano delle riprese (a); Rilievo fotogrammetrico (b).

dell'immagine e dotate di una risoluzione di 5000 x 2500 *pixel*[19]. L'intera area della necropoli di Porta Nocera è stata quindi suddivisa in vari "punti di vista", corrispondenti alle diverse e successive stazioni di ripresa, con una distanza reciproca, che andava da un minimo di 3 ad un massimo di 15 metri, in base al maggiore o minore dettaglio richiesto dalla presenza o meno di punti di interesse nelle immediate vicinanze. La maglia di articolazione dei punti di stazione è stata progettata in modo da coprire tutte le possibili angolazioni e prospettive, avendo sempre cura di porre il punto di vista delle riprese ad un'altezza compatibile con quella di un ipotetico visitatore.

Le immagini equirettangolari sono state successivamente utilizzate per la realizzazione di una web immersive gallery, che attraverso una successione di immagini sferiche consente una visita "virtuale", ma fortemente immersiva, del sito e dei singoli monumenti funerari[20] (Fig. 9.16).

9.2.4 Rilievo laser scanner

L'intera area della necropoli di Porta Nocera e di via Nucerina è stata infine sottoposta ad una campagna di rilievo laser scanner, che effettuata a più riprese nel corso delle varie attività condotte nell'ambito del *Pompeii Sustainable Preservation Project*, consentendo di ottenere una progressiva e sempre più estesa copertura dei due settori funerari[21].

Anche in questo caso tutte le acquisizioni sono state realizzate, attraverso un piano di presa capace di coprire per ogni singola scansione, un'area di presa pari a 360° sul piano orizzontale e 300° su quello verticale. Il posizionamento di alcuni target e la loro registrazione da parte dello strumento laser ha inoltre consentito di disporre di alcuni punti di controllo per il corretto allineamento delle nuvole di punti generate dalla scansione (Fig. 9.17).

Si è in tal mondo ottenuta una base di dati di estrema precisione e di grande importanza, utilissima per la produzione di molteplici tipologie di documenti, dalla modellazione tridimensionale, a piante, sezioni, prospetti di ciascun edificio funerario presente nell'area.

Essa costituisce un documento di grande valore edun archivio inestimabile di dati e informazioni (Fig. 9.18).

[20] La *Immersive web gallery*, giunta ormai in fase di testing, è stata progettata e realizzata, insieme alle riprese equirettangolari, da Danilo P. Pavone, collaboratore tecnico dell'IBAM-CNR.

[21] Per la sua realizzazione si è impiegato un Laser Scanner modello FARO FOCUS 3D X130, modello che nella velocità di cattura e nella precisione del dato elaborato ha sicuramente i suoi punti di forza.



Fig. 9.16. Fotopiano ottenuto tramite rilievo fotogrammetrico. Necropoli di Porta Nocera (a); Necropoli di via Nucerina (b).



Fig. 9.17. Pompei, necropoli di via Nucerina. Nuvola di punti con un target topografico utile per l'esatto orientamento e gerorefernziazione delle point clouds.

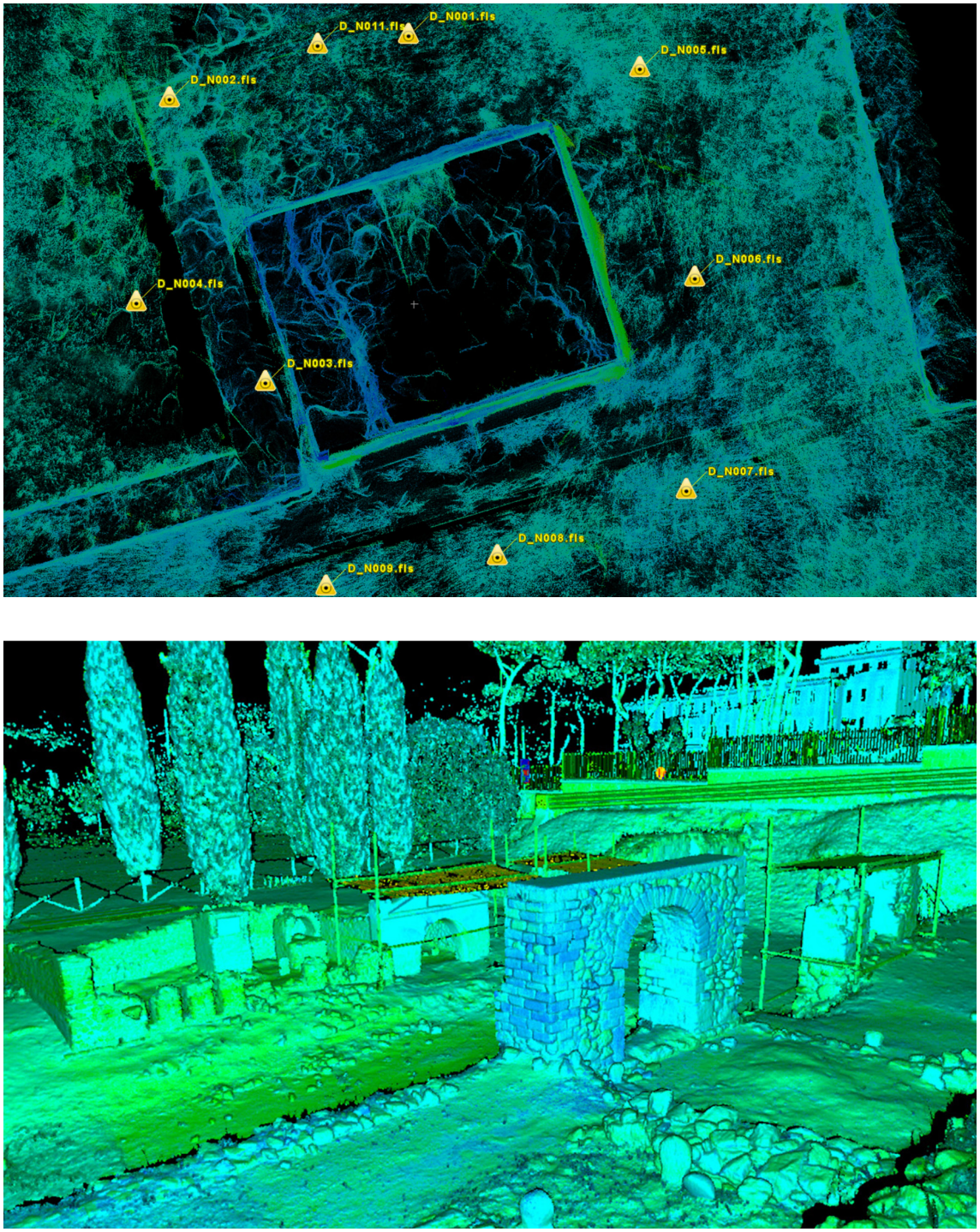


Fig. 9.18. Pompei, necropoli di via Nucerina. Point clouds realizzate tramite rilievo laser scanner.

Capitolo X

La banca dati

«La documentazione archeologica è in definitiva assimilabile ad un processo di standardizzazione delle informazioni che parte dagli obiettivi e dai contenuti della ricerca fino a comprendere la metodologia di scavo e le regole utilizzate per la formalizzazione dei dati».

Andrea D'Andrea 2006, p.81

10.1 Il Grande Progetto Pompei e il Piano della conoscenza

La produzione di nuova conoscenza sia attraverso l'esecuzione di un programma di rilievo e d'indagine diretta, sia attraverso la raccolta e la sistemazione dei dati pregressi ha costituito, come detto, il fulcro intorno al quale si sono svolte tutte le attività del "*Grande Progetto Pompei*". Non è un caso, quindi, che uno dei cinque "*Piani*" su cui è stato articolato il GPP, era specificatamente dedicato alla conoscenza.

Fra gli obiettivi realizzativi all'interno del "*Piano della conoscenza*" del GPP la creazione di un Sistema Informativo ha certamente costituito quello più importante e, per certi aspetti, più ambizioso. Infatti nell'ottica della generazione di nuova conoscenza la forte integrazione fra dati vecchi e nuovi, considerati nel loro esatto contesto, assume una funzione strategica, per attuare un programma di prevenzione programmata che costituisce l'obiettivo ultimo dell'intero progetto.

In tale ottica, la creazione di un modello capace di archiviare e gestire dati estremamente eterogenei, sia d'archivio, che prodotti dalle nuove ricerche condotte nell'ambito del GPP, consentendone al contempo l'integrazione con il SIGECWeb sviluppato dall'ICCD[1], e con altre banche dati e piattaforme web come il SIAV e il SILEG[2] ha certamente rappresentato uno degli obiettivi di maggiore rilievo fra quelli previsti nel "Piano della conoscenza" del GPP.

Il pieno rispetto dei tracciati schedografici elaborati dall'ICCD[3], conformemente ai quali era stata redatta gran parte della documentazione d'archivio prodotta negli ultimi decenni

[1] Il SIGECWeb è il "*Sistema Informativo Generale del Catalogo"* dell'Istituto Centrale per il Catalogo e la Documentazione, sviluppato per l'integrazione con i sistemi utilizzati dal Ministero e dagli altri enti che cooperano alla tutela e alla catalogazione dei beni culturali. V. Desiderio *et alii* 2013.

[2] Il SIAV è il "*Sistema Informativo dell'Area Vesuviana"*, mentre il SILEG è la banca dati dell'anagrafe degli esecutori e dei cantieri del Mibac.

[3] V. Moro-Mancinelli-Negri 2017.

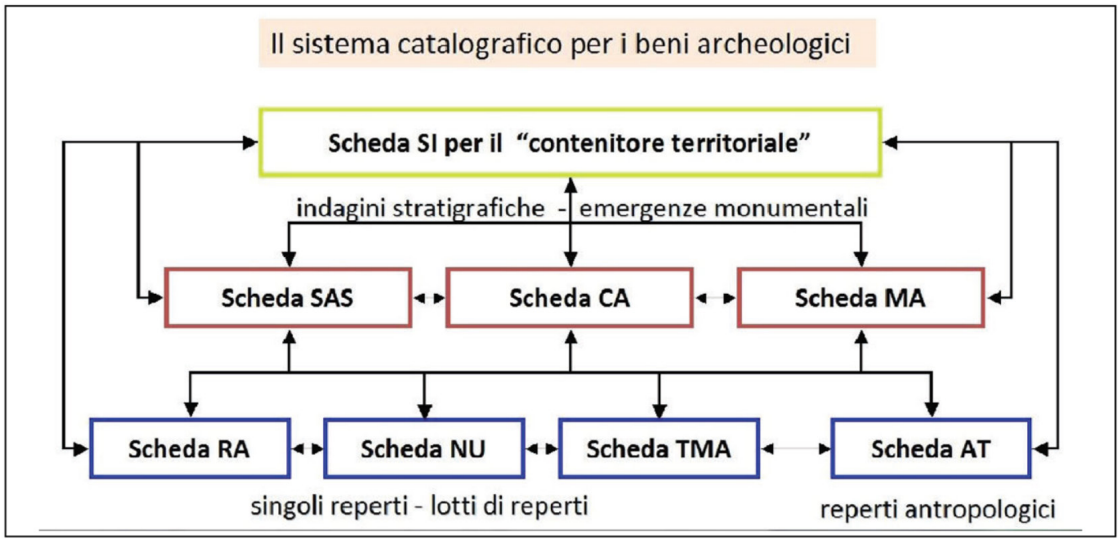


Fig. 10.1. Il sistema catalografico definito dall'ICCD per i beni archeologici (Da Moro *et alii 2017, p. 36).*

dall'ex Soprintendenza Speciale per i beni archeologici di Pompei, Ercolano e Stabia[4], unita alla necessità di trovare spazio per la registrazione delle specifiche peculiarità sia del sito di Pompei, che delle metodologie impiegate nell'ambito delle attività del GPP, aveva spinto verso la mediazione fra gli opposti estremi del rispetto delle norme e degli standard da un lato e dell'integrazione dall'altra.

In tale prospettiva, volta comunque alla creazione di un sistema organico e coerente che permettesse di gestire le evidenze archeologiche di Pompei, dalla scala urbana al singolo apparecchio murario, si è fatto ricorso, nella progettazione del *Sistema Informativo del Grande Progetto Pompei*, alle principali schede redatte dall'ICCD (Fig. 10.1).

La scheda SI "*Sito*" è stata utilizzata per l'archiviazione di due differenti livelli della città antica, il sito nel suo complesso e le divisioni in *Regiones*. La scheda CA, "*Complesso Archeologico*", invece è stata impiegata per la gestione delle *Insulae*, mentre tramite la scheda MA, "*Monumento archeologico*", si sono espressi tutti i sottostanti livelli che vanno dalla singola domus, alle sue articolazioni interne basate sui vari ambienti, per giungere alle pareti e ai piani pavimentali che ne rappresentano gli elementi costituenti[5] (Fig. 10.2).

Le schede appena elencate coprono nel loro complesso le differenti tipologie di testimonianze materiali presenti nel sito archeologico di Pompei. Ad esse si aggiungono ulteriori schede

[4] Secondo quanto pubblicato nell'Allegato Tecnico per il Sistema informativo del Grande Progetto Pompei il patrimonio informativo era costituito da «*una grande quantità di schede RA (circa 50.000), da un ampio archivio di immagini registrate secondo il modello IMR dell'ICCD (quasi 20.000), un minor numero di schede bibliografiche secondo il modello BIB dell'ICCD (quasi 2.000), schede per i beni numismatici secondo il modello NU dell'ICCD (meno di 400) e pochissime schede S e D, anche queste redatte secondo lo standard ICCD*» Fichera *et alii* 2012, p. 5.

[5] Fichera *et alii* 2012; Fichera-Malnati-Mancinelli 2015; ICCD 2013.

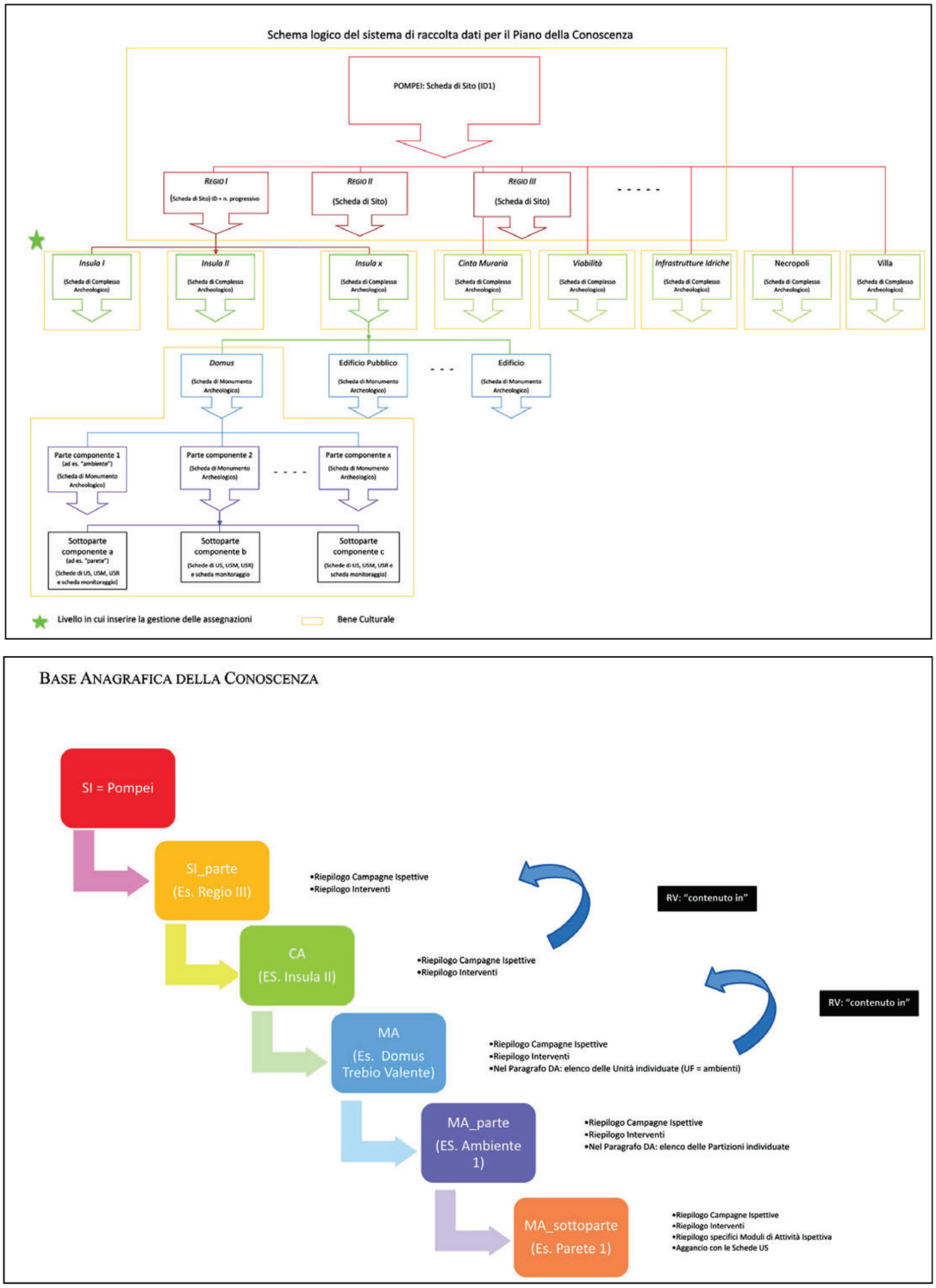


Fig. 10.2. Grande Progetto Pompei. Piano della Conoscenza. Schema logico del Sistema di raccolta dei dati (in alto); Sistema delle relazioni fra i beni (in basso) (Da Fichera *et alii 2015).*

attraverso le quali diventa possibile formalizzare diverse tipologie di interventi che possono interessare i beni archeologici nelle differenti articolazioni sopra descritta.

Le schede "*Ispezione*", "*Diagnosi*", e "*Interventi*" coprono nel loro insieme l'intera casistica di azioni che, con diverso grado di intensità, dall'analisi autoptica alla diagnosi strumentale, dall'intervento di scavo al restauro e da questo al monitoraggio, possono interessare un settore della città, un monumento archeologico o una sua parte. In questo caso all''interno del tracciato delle schede sono confluite anche alcuni elementi derivati da schede in uso da diverso tempo da parte dell'ex Soprintendenza di Pompei.

Completano l'elenco due schede descrittive, per la registrazione delle Unità Stratigrafiche e della tecnica muraria, che in questo caso, si basano sulle schede dell'ICCD.

Il sistema schedografico sopra rapidamente descritto, ha costituito la base per la creazione di una banca dati, con estensione geospaziale, per l'archiviazione e la gestione dei dati. Fra le possibili tipologie di features tramite le quali dare espressione grafica agli elementi che possono avere una definizione geografica spaziale. A tal riguardo si è impiegata il tipo di geometria "*polygon*", per la caratterizzazione di tutti gli elementi costituenti il sito, i cui dati tematici, come detto, sono stati strutturati sulla base delle schede SI, CA e MA. Si è invece utilizzata la geometria "*multipolygon*" per la rappresentazione delle aree oggetto di attività ispettive o d'interventi di scavo. I risultati delle attività di indagine stratigrafica, di analisi sui materiali e sulle tecniche costruttive, nonché sui degradi, condotti sulla base di fotopiani rettificati ed associati ai differenti elementi murari o piani pavimentali, sono stati espressi tramite il ricorso a features bidimensionali che coprono tutte le primitive geografiche: punti, linee e poligoni (Fig. 10.3).

Nel complesso la traduzione grafica sia dei beni archeologici, che delle attività di ispezione, diagnosi e intervento si basa essenzialmente su una rappresentazione bidimensionale, mentre si auspica nel report tecnico più volte citato: «*che il geodatabase supporti le geometrie tridimensionali allo scopo di realizzare in futuro un modello 3D di Pompei in cui sia più immediata e di facile lettura la ricostruzione delle unità edilizie con tutti i suoi componenti, non solo coperture pavimenti, pareti, ma anche colonne, scale, aperture e tamponature, ecc. sulle pareti dei muri in 3D dovrà essere possibile georeferenziare le ortofoto rettificate, già previste con questo progetto, e al momento agganciate alla MA_sottoparte*»[6] (Fig. 10.4).

10.2 PSPP-Db. Il modello concettuale

Pur essendo orientata al medesimo fine, ovvero la sperimentazione di metodologie, tecniche e materiali per il restauro architettonico dei monumenti antichi, la documentazione prodotta nell'ambito del *Pompeii Sustainable Preservation Project* fra il 2014 e il 2018 si mostra estremamente varia sotto molteplici punti di vista.

I differenti gruppi di lavoro, appar-

[6] ICCD 2013, p. 33.

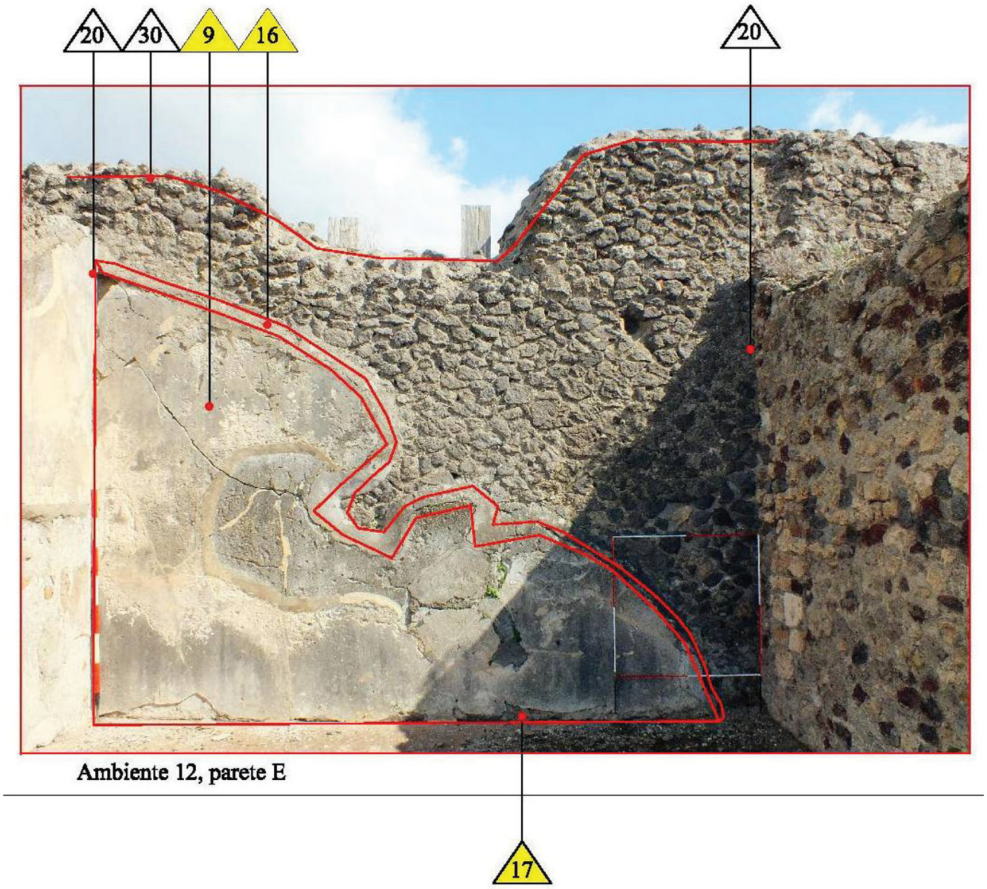


Fig. 10.3. Grande Progetto Pompei. Piano della Conoscenza. Esempio di mappatura degli strati di rivestimento e di eventuali degradi effettuata tramite feature lineare su fotopiano rettificato (Da ICCD 2013, p. 43).

tenenti a varie istituzioni, che hanno infatti collaborato al progetto hanno prodotto, ciascuno secondo le proprie competenze, metodologie, strumenti e specifiche finalità, una considerevole quantità di dati, che si mostra estremamente diversificata anche sotto il semplice aspetto del contenuto o del formato di esportazione.

Come di norma accade in qualsiasi progetto che vede operare in prospettiva multidisciplinare e verso un obiettivo comune gruppi di ricerca differenti, i dati raccolti sul campo, che richiedono spesso complesse fasi di elaborazione propedeutiche all'interpretazione[7], non solo richiedono strategie di integrazione per giungere al risultato atteso, il che impone un alto grado di omogeneità formale fra i dati[8], ma ne-

[7] Ciò comporta non solo la produzione di differenti file, risultato di processi di intermedi di elaborazione, ma anche la necessità di conservare copia dei dati originali.

[8] L'omologazione e la standardizzazione dei dati il cui obiettivo è la creazione di *dataset* che condividendo formati, schemi di archiviazione e descrizione, rendano possibile i processi di analisi e interpretazione, richiedono l'applicazione di opportune strategie. Queste devono essere applicate lungo tutto l'*iter* che dalla digitalizzazione del dato, attraverso la sua descrizione formale, giunge alla sua archiviazione in apposite banche dati.

	SCHEDA	GEOMETRIA	DIMENSIONI
1	Sito (insieme)	Polygon	2D
2	Sito (parte)	Polygon	2D
3	Complesso archeologico	Polygon	2D
4	Monumento archeologico	Polygon	2D
5	Monumento archeologico (parte)	Polygon	2D
6	Monumento archeologico (sottoparte)	Polygon	2D
7	Unità Stratigrafica	Polygon	2D
8	Attività ispettiva	Multipolygon	3D
9	Diagnostica	Multipolygon	3D
10	Intervento	Multipolygon	3D
11	Tecnica muraria	Polygon	2D

Fig. 10.4. Grande Progetto Pompei. Piano della Conoscenza. Schede e relativa rappresentazione geometrica.

cessitano di strategie di archiviazione e condivisione, capaci di favorire l'economicità della ricerca, massimizzando i risultati e garantendo non solo il persistere nel tempo della base documentaria prodotta, ma anche la condivisione e il riutilizzo futuro dei dati (Fig. 10.5).

La ricerca d'archivio, le attività di rilievo (topografico, laser scanner, fotogrammetrico), le indagini geologiche, geomorfologiche e geofisiche, il monitoraggio delle condizioni microclimatiche e ambientali, le analisi strutturali e materico-costruttive, le osservazioni sullo stato di conservazione, sul degrado delle strutture, sugli effetti di restauri antichi e moderni, gli interventi di scavo, hanno prodotto nel corso delle attività svolte nell'ambito del PSPP una massa considerevole di dati, sotto forma di immagini, modelli 2D e 3D, disegni, dati testuali, registrazioni audio-video, dati alfanumerici prodotti da differenti strumentazioni.

Tale massa eterogenea di dati richiedeva l'applicazione di strategie mirate per l'archiviazione, l'analisi, l'interpretazione e la condivisione. Tuttavia il semplice rispetto degli standard di raccolta e archiviazione adottati nell'ambito del *Sistema Informativo del Grande Progetto Pompei* (SIGPP), pur offrendo un modello organico e unitario per tutti i processi che dalla raccolta dei dati sul campo, attraverso l'archiviazione, portano ad un'efficiente gestione, la sua applicazione nei confronti dei dati prodotti nell'ambito delle attività del PSPP, presentava alcune limitazioni. Risultava infatti abbastanza evidente, come alcune categorie di dati avrebbero tratto notevoli vantaggi da una

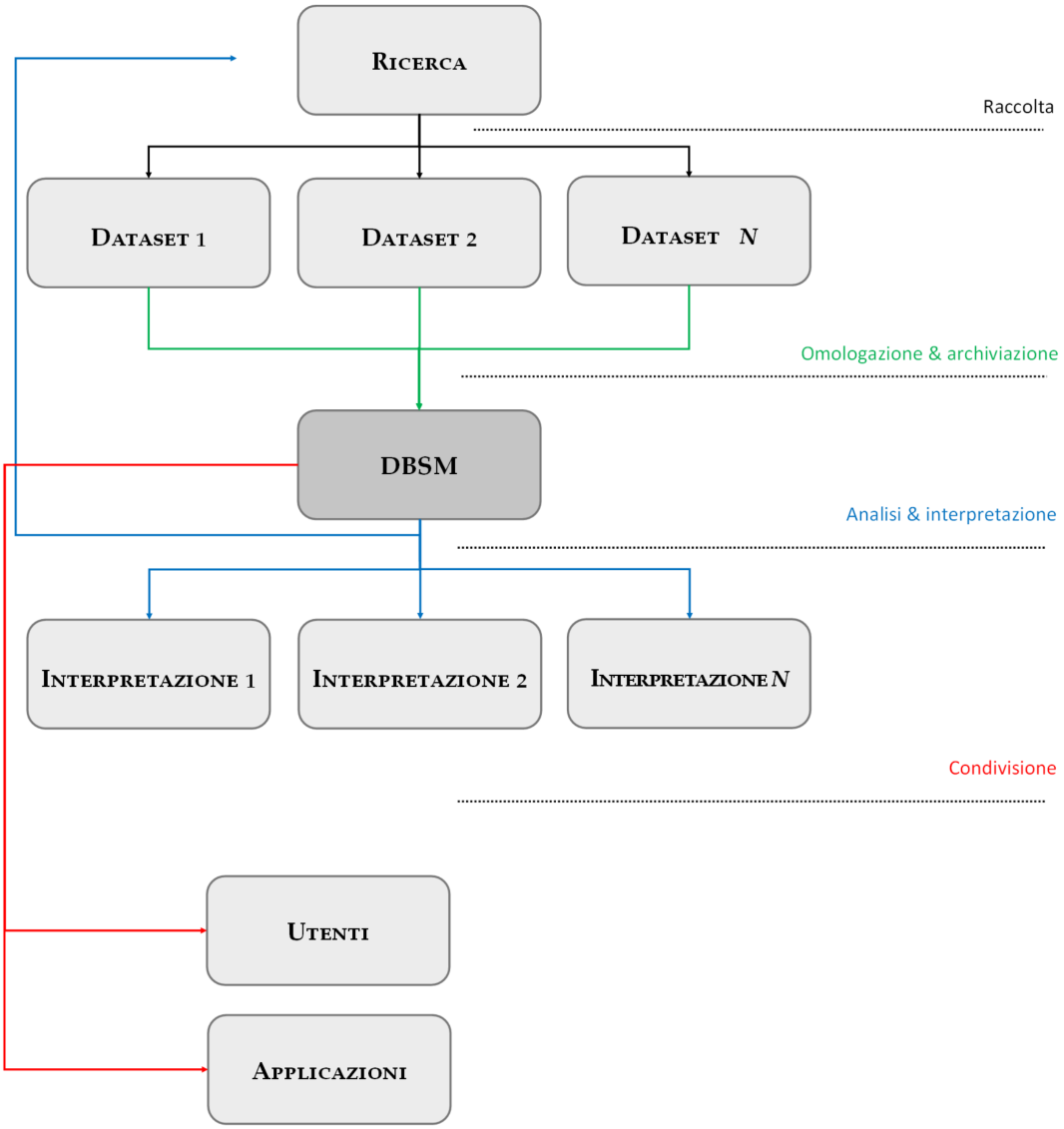


Fig. 10.5. Funzione di un DBMS, fra raccolta, archviazione, analisi e condivisione dei dati.

gestione all'interno di uno spazio tridimensionale, che rendesse conto sia della posizione assoluta di un dato elemento, sia delle relazioni reciproche, che esso intrattiene, sempre su base spaziale, con gli altri elementi e con il contesto di riferimento. Ciò avviene, ad esempio, con le analisi stratigrafiche murarie, condotte a supporto di differenti indagini, legate alla definizione degli aspetti crono-tipologici, tecnico-funzionali, materico-costruttivi, o determinata dalla necessità di valutazione dello stato di conservazione o dei fenomeni di degrado in atto.

Le analisi svolte nell'ambito del presente lavoro, si sono pertanto rivolte alla progettazione e allo sviluppo di un database che consentisse l'archiviazione dei dati prodotti durante le attività del PSPP, agevolando i processi di analisi e condivisione dei risultati, e garantendo, al contempo, l'integrazione della terza dimensione, in tutti quei casi in cui tale informazione potesse arricchire il significato ed il valore del dato.

Fra i requisiti fondamentali della banca dati che si è realizzata nell'ambito del presente progetto di ricerca, denominata *PSPP-Db*, l'integrazione con il *Sistema Informativo del Grande Progetto Pompei* ha rivestito, per evidenti ragioni, un ruolo fondamentale.

La struttura della banca dati *PSPP-Db* ha in tale logica di ripreso gli elementi che il *Sistema Informativo del Grande Progetto Pompei* aveva impiegato per l'articolazione dello specifico contesto di studio e le differenti tipologie di attività che ad esso vengono rivolte (Fig. 10.6).

Un "*Progetto*", articolato in "*Campagne*", comprendenti ciascuna una o più "*Attività*", rappresenta nello schema concettuale della banca dati, il punto di partenza per qualsiasi tipologia di intervento o di azione che possa essere condotta all'interno del sito archeologico di Pompei.

Ciascuna "*Attività*" è condotta "*Persone*", che agiscono singolarmente o all'interno di "*Laboratori*", gruppi di ricerca o altre tipologie di aggregazione, sempre e comunque riconducibili ad "*Enti*", amministrati, di ricerca oppure a forme di organizzazione, sia pubbliche, che private.

Le differenti tipologie di attività che possono essere svolte nell'ambito di ciascuna "*Campagna*" sono state articolate, riprendendo la ripartizione operata all'interno del SIGPP sulla base delle finalità, che ne costituiscono il presupposto, e del differente gradi d'impatto dell'analisi sull'oggetto. Sulla base di tali presupposti si è distinto fra "*Ispezioni*", "*Diagnosi*" e "*Interventi*". Un "*Ispezione*", può produrre "*Rilievi*" e molteplici tipologie di "*Analisi Tecniche*", mentre un'attività di "*Diagnosi*", mira, attraverso l'esecuzione di "*Indagini non invasive*", a un'analisi capace di andare maggiormente in profondità nelle strutture dell'oggetto o del contesto alla ricerca di cause remote di eventi in atto. Gli "*Interventi*", infine, prevedono azioni di maggiore impegno nei confronti dell'oggetto, comprendendo "*Scavi*" e "*Restauri*".

Le differenti tipologie di "*Attività*" sopra descritte, sono accomunate dall'applicazione di "*Metodologie*" e dall'utilizzo di "*Strumenti*", che gli conferiscono specifica individualità a ciascuna azione.

Ogni "*Attività*", applica quindi "*Me-*

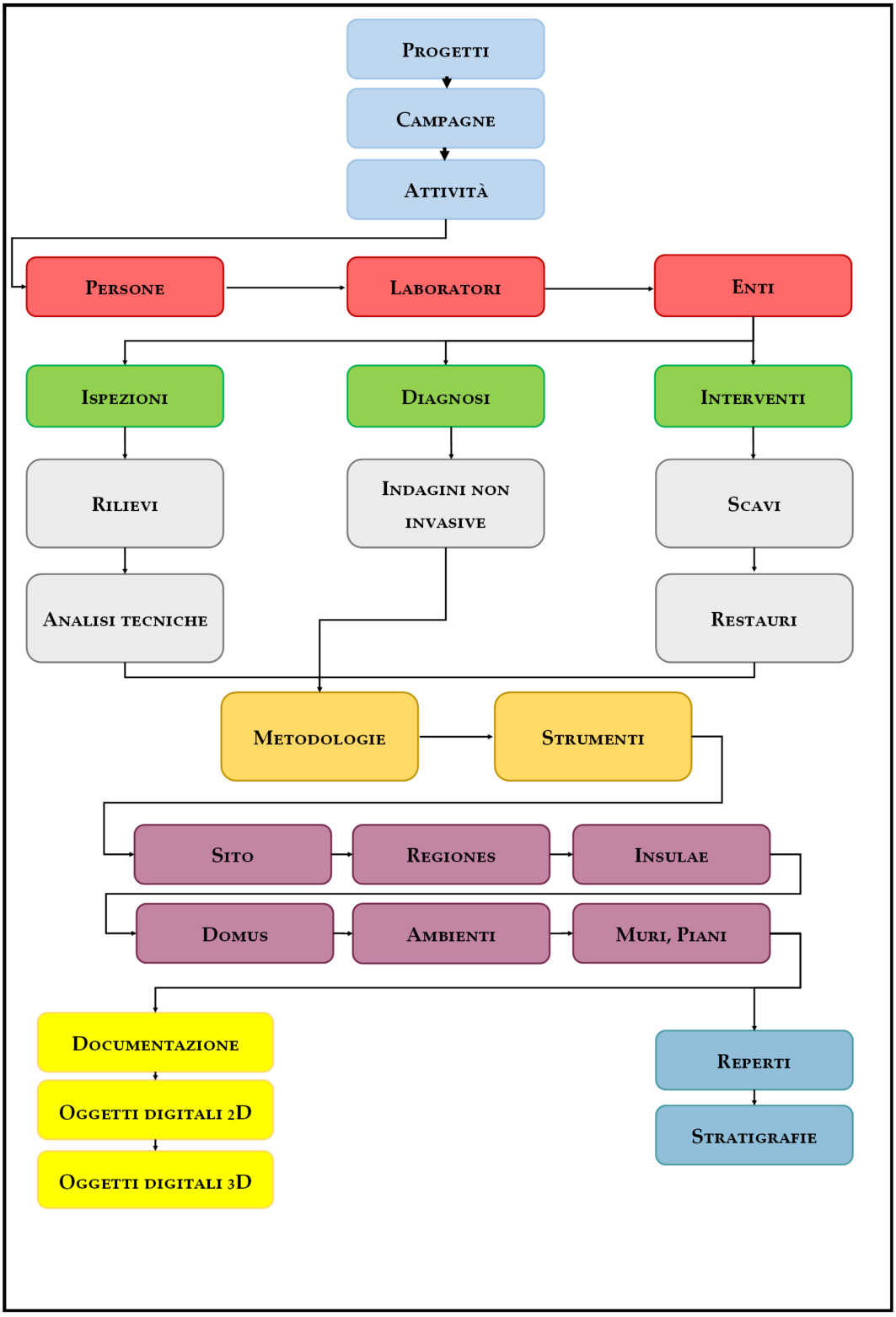


Fig. 10.6. PSPP-Db, schema di riferimento per lo sviluppo del modello concettuale.

todologie" e "*Strumenti*" alla specifica realtà oggetto di studio, che nel caso in questione, riprendendo ancora una volta le ripartizioni operate nella definizione del SIGPP, da un livello generale, il "*Sito*", comprendente l'intera area archeologica e i settori funerari, posti in posizione extraurbana, prende in considerazione le articolazioni in "*Regiones*", "*Insulae*", "*Domus*", "*Ambienti*" e ulteriori suddivisioni interne, verticali o orizzontali, costituite da "*Muri e Pareti*".

Le differenti tipologie di "*Attività*", possono produrre nuovi beni storico-archeologici o parti di essi, destinati ad aumentare e ad accrescere la quantità di elementi d'interesse presenti nel sito, oppure oggetti fisici o dati astratti finalizzati ad aumentare la conoscenza e la comprensione del sito. La prima categoria comprende, i "*Reperti*" rinvenuti durante un'attività di scavo o le "*Stratigrafie*", considerate come esito fisico dell'apposizione materica prodotta durante un intervento di restauro. All'interno della seconda categoria, invece, confluisce tutta la "*Documentazione*" prodotta o acquisita, o l'esito dei processi di analisi e interpretazione ottenuti a partire da essa, distinta in "*Oggetti digitali 2D*" e "*Oggetti digitali 3D*".

10.3 PSPP-Db. Descrizione della banca dati

Per la realizzazione della banca dati *PSPP-Db* si è fatto ricorso a PostgreSql[9], che rappresenta uno dei software maggiormente diffusi nel panorama dei DBSM oggi disponibili sul mercato. La scelta compita è stata dettata dai molteplici vantaggi che tale applicativo presenta, specie se confrontato con le caratteristiche di prodotti equivalenti.

PostgreSql è un software *Object Oriented Relational DataBase Management System* (OORDBMS), e come tale unisce le caratteristiche tipiche dei DBMS relazionali, ai vantaggi offerti dal modello di programmazione *Object Oriented*, che rappresenta ormai il paradigma di programmazione in assoluto più diffuso a livello mondiale.

PostgreSql inoltre è un DBMS *Open Source*, il cui utilizzo, insieme al codice sorgente, è rilasciato secondo la licenza BSD, sviluppata dall'Università di Berkeley in California[10].

Infine, aspetto che costituisce uno dei maggiori vantaggi che tale software presenta nei riguardi dell'utilizzo per le specifiche finalità del presente progetto, Postgres può vantare oggi di un'estensione geospaziale, PostGIS[11], che

[9] Sviluppato a partire dal 1982 da un gruppo di ricercatori dell'Università di Berkeley in California, guidati da Michael Stronebraker, con il nome di INGRES, il DBSM fu oggetto, alla metà degli ottanta di un tentativo da parte dello stesso Stronebraker di una commercializzazione, intento successivamente abbandonato. Fu però solo nel 1994, quando due studenti della medesima università americana, Andrew Yu e Jolly Chen, dotarono l'originario software di un interprete SQL, che tale applicativo iniziò la sua fortuna, venendo rilasciato l'anno dopo con il nome di Postgres95 e poi PostgreSQL, denominazione che accompagna tuttora il software giunto alla versione 11.1, licenziata l'8 novembre 2018. www.postgresql.org

[10] La licenza BSD (*Berkeley Software Distribution*), specificatamente orientata alla regolamentazione del rilascio e dell'utilizzo del software, prevedeva originariamente quattro prescrizioni, che nel corso degli anni si sono ridotte, in un'ottica di maggiore libertà, prima a tre e infine a due. www.opensource.org/licenses/bsd-license.php

[11] www.postgis.net

non solo consente la gestione integrata del dato geospaziale attraverso una dotazione di algoritmi di geoprocessing fra i più avanzati oggi disponibili sul mercato, con una positiva apertura anche nei confronti della gestione del dato tridimensionale, ma più vantare una perfetta integrazione all'interno di QGIS e GVSIG, le piattaforme software *open source* più diffuse oggi nel panorama internazionale.

La realizzazione della banca dati PSPP-Db ha pertanto richiesto una progettazione che alla strutturazione secondo il modello relazionale, capace garantire un alto controllo della coerenza e dell'integrità referenziale dei dati, ha unito le potenzialità offerte dall'estensione geospaziale.

Nella versione attuale[12] la banca dati PSPP-Db è articolata su 270 tabelle, di cui 17 tabelle dotate di estensione geospaziale, 38 tabelle deputate alla gestione dei collegamenti, 163 tabelle di vocabolari, 52 tabelle di entità prive di estensione geospaziale (Fig. 10.7).

10.3.1 Progetti, campagne, attività

Scopo di questo settore della banca dati PSPP-Db, è la gestione dei "*progetti*", delle "*campagne*" e delle "*attività*", che rappresentano la formalizzazione astratta all'interno della quale ricondurre ogni possibile attività condotta (Fig. 10.8).

Il presupposto fondamentale su cui si basa tale sezione è relativo al fatto che ciascuna "attività" svolta fa capo ad una ben determinata "campagna". L'insieme delle varie campagne è, infine ricondotto, al singolo "progetto", nell'ambito del quale tutte le campagne sono state condotte.

In tal modo, basandosi su un criterio di successione temporale, in cui un "progetto" può avere uno sviluppo pluriennale, mentre le "campagne" e le "attività" ad esso relative, hanno tuttalpiù una durata annuale, diventa possibile ricondurre saldamente i dati prodotti, insieme alle informazioni relative alle specifiche attività svolte, alle finalità perseguite e ai soggetti coinvolti, all'interno di un ben preciso riferimento spazio-temporale.

10.3.2. Persone, laboratori, enti

Qualsiasi attività svolta deve necessariamente riferirsi alle persone che, a vario titolo e con diverse responsabilità, le hanno condotte. Queste possono aver operato singolarmente o in gruppi di lavoro, in ogni caso sempre all'interno e in riferimento ad un'istituzione, un ente, un soggetto pubblico o privato, che possieda un ruolo e delle mansioni ben definite all'interno del singolo progetto e delle diverse campagne attraverso le quali il singolo progetto persegue i propri obiettivi. In tale ottica ogni singola "*Persona*" deve necessariamente essere ricondotta, con l'indicazione delle specifiche mansioni e responsabilità, ad un "*Ente*" di appartenenza e, talvolta, ad un "*Laboratorio*" o gruppo di lavoro (Fig. 10.8).

L'archivio delle "persone" includerà inoltre i riferimenti ai redattori o ai revisori delle schede, e della documenta-

[12] L'attuale versione della banca dati *PSPP-Db*, risale a ottobre 2018.

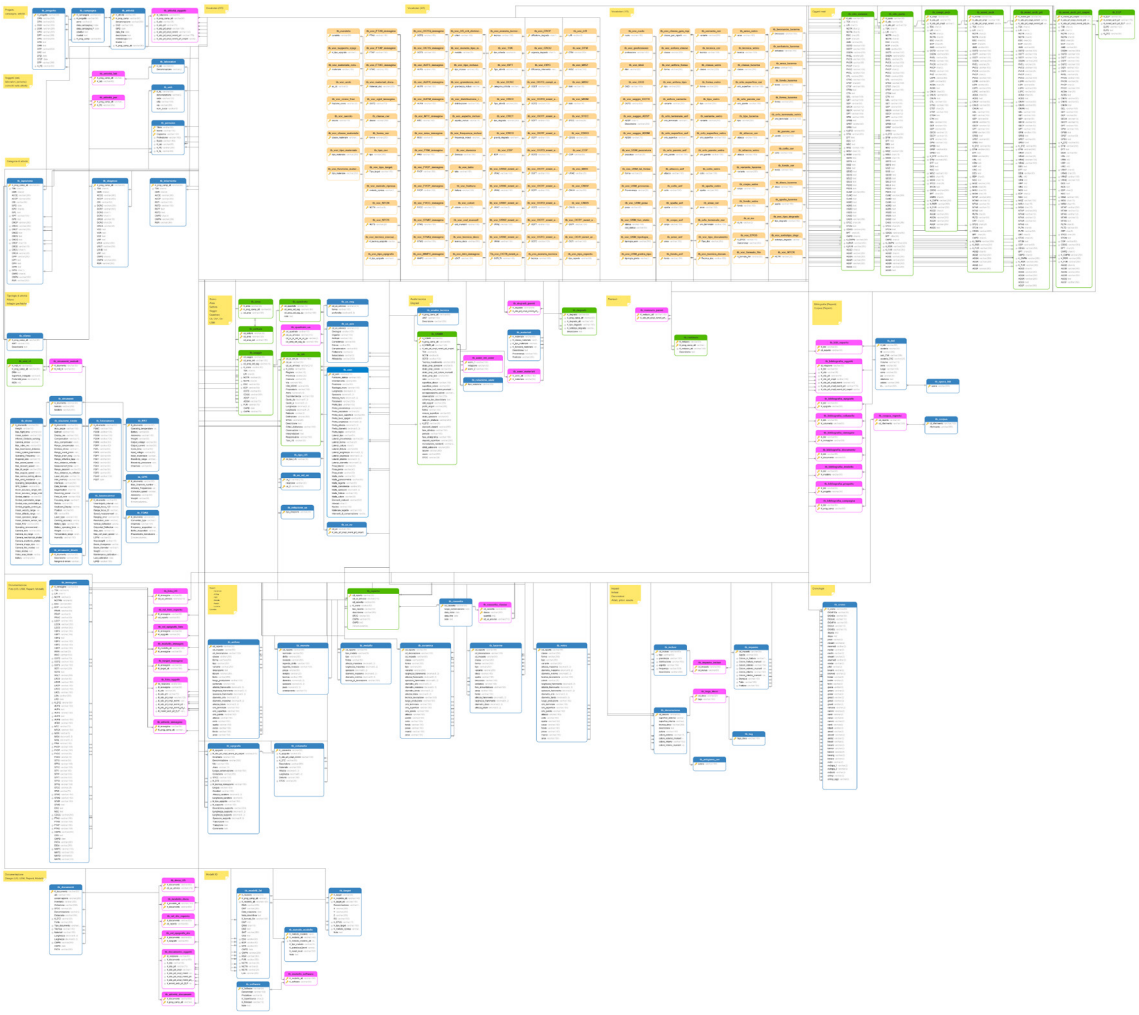


Fig. 10.7. PSPP-Db, schema relazionale della banca dati. In azzurro e in verde rispettivamente le tabelle prive e quelle dotate di estensione geospaziale; in arancio le tabelle per la gestione dei vocabolari; in viola le tabelle di gestione dei collegamenti.

zione prodotta, nonché a tutti i soggetti, che a vario titolo, anche con funzioni di sola responsabilità, hanno svolto un ruolo nelle singole attività.

10.3.3 Ispezioni, diagnosi, interventi

Seguendo quanto previsto nel SIGPP e integrandone l'intero profilo schedografico ciascuna attività all'interno del PSPP-Db può essere in maniera esclusiva ripartita fra tre differenti tipologie: "*Ispezioni*", "*Diagnosi*" e "*Interventi*" (Fig.10.8).

La principale differenza che intercorre fra le tre tipologie sopra menzionate risiede nel fatto che le "*Ispezioni*" instaurano con l'oggetto e il contesto d'interesse un rapporto che si basa su un'indagine di superficie, volta ad acquisire dati relativi all'aspetto dimen-

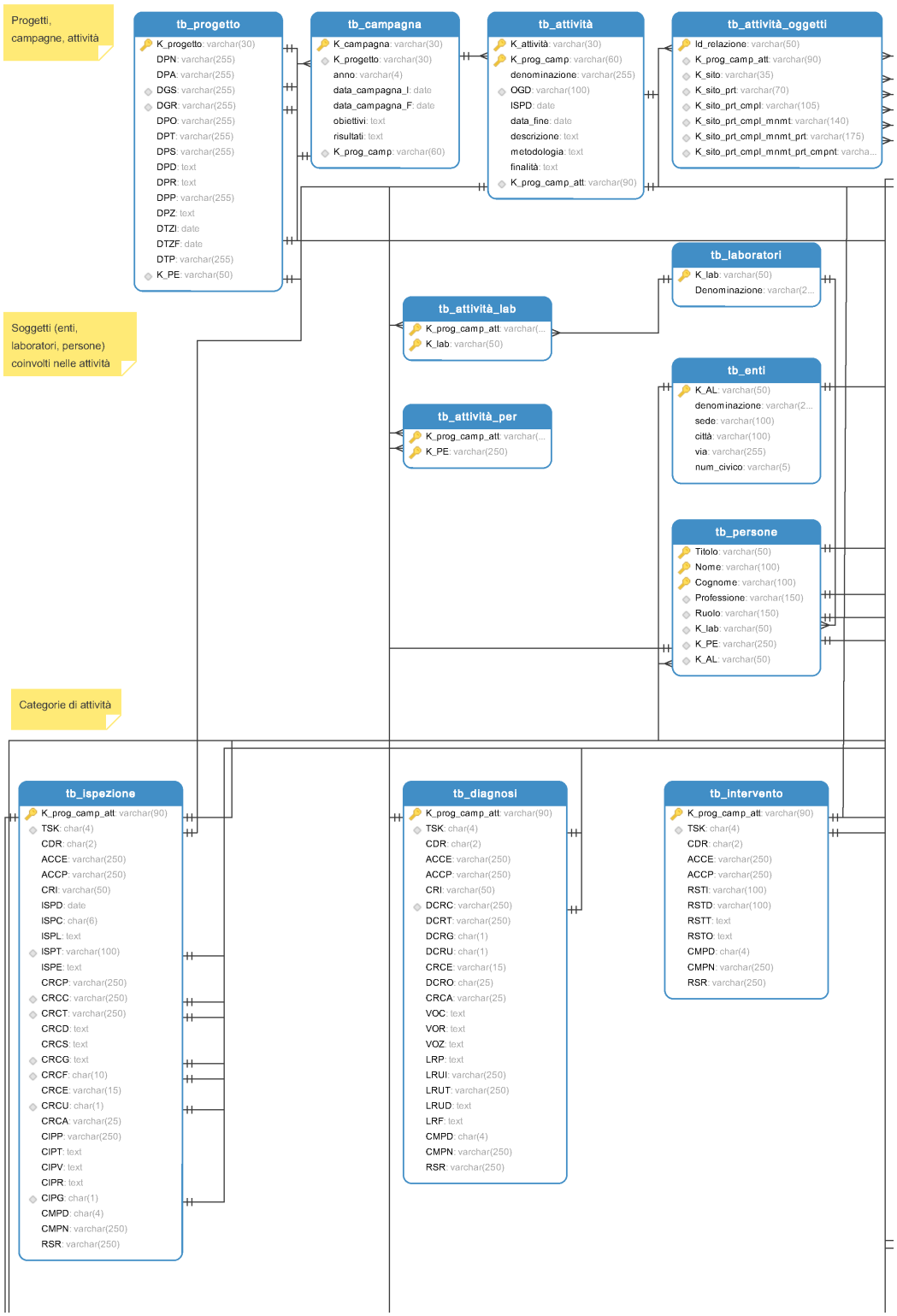


Fig. 10.8. PSPP-Db, Schema relazionale. Tabelle relative alla gestione di: "Progetti", "Campagne", "Attività", "Persone", "Laboratori", "Enti", "Ispezioni", "Diagnosi", "Interventi".

sionale o ad un'analisi tecnico-costruttiva, fondata su un esame autoptico. Le "Diagnosi", invece, investigano l'oggetto o il contesto in modo più profondo, grazie a strumentazioni non invasive capaci di raccogliere dati sulle cause profonde di fenomeni che si manifestano in superficie. Gli "*Interventi*", infine, si esplicano attraverso un'azione concreta, capace di incidere, in modo spesso irreversibile sull'oggetto o il contesto, come avviene nel caso di uno scavo o di un intervento di restauro.

10.3.4 Rilievo

Le attività di rilievo rientrano fra quelle classificate come "Ispezioni" (Fig. 10.9).

Scopo ultimo di un "*Rilievo*" è la raccolta di dati relativi ai caratteri dimensionali, plano-volumetrici, nonché sulla conformazione geomorfologica del contesto di riferimento. Per ottenere ciò un'attività di rilievo deve impiegare specifiche "*Metodologie*" e "*Strumenti*", adattandole allo contesto e alle peculiarità dell'oggetto indagato. Un'attività di rilievo, inoltre, instaura un ben preciso rapporto spaziale con il contesto esaminato. Pertanto la relativa tabella è stata dotata di un'estensione spaziale, tridimensionale, di tipo "*polygon*" allo scopo di circoscrivere tramite essa l'area oggetto d'indagine.

10.3.5. Indagini non invasive

Le "*Indagini non invasive*", rientrano all'interno delle attività di "Diagnosi" (Fig. 10.9).

L'obiettivo di tali indagini, come già detto, è quello di giungere ad una conoscenza profonda dell'oggetto e del contesto in cui esso si trova insito, al fine di ottenere una stima delle cause che stanno alla base delle condizioni, in cui versa l'oggetto, isolando le possibili cause di degrado in atto. Come nel caso delle attività di rilievo, le indagini non invasive, si basano su delle "Metodologie" e delle "Strumentazioni", che vengono applicate all'interno di un ben preciso spazio. Anche per tale tipologia d'indagine si è quindi fatto ricorso ad un'estensione spaziale, tridimensionale, di tipo "*polygon*".

10.3.6 Analisi tecniche

Le "*Analisi tecniche*" rientrano fra le attività classificate come "Ispezioni" (Fig. 10.10).

Il loro scopo è quello di giungere, attraverso un esame autoptico, alla caratterizzazione materico-costruttiva e tecnico-funzionale dell'oggetto d'interesse.

Diventa pertanto essenziale, in relazione a tali specifici scopi, disporre di strumenti capaci di annotare, delimitandone l'estensione sulle superfici oggetto d'indagine, le eventuali aree o zone dove l'impiego di una determinata tecnica costruttiva o di uno specifico materiale, solo per limitarsi a qualche esempio, possono assumere una certa importanza, se poste nella giusta prospettiva e in condizione di dialogare con l'intera struttura per la ricostruzione delle soluzioni tecniche adottate.

Alla luce delle considerazioni sopra esposte, appare evidente come nell'ottica di una formalizzazione delle os-

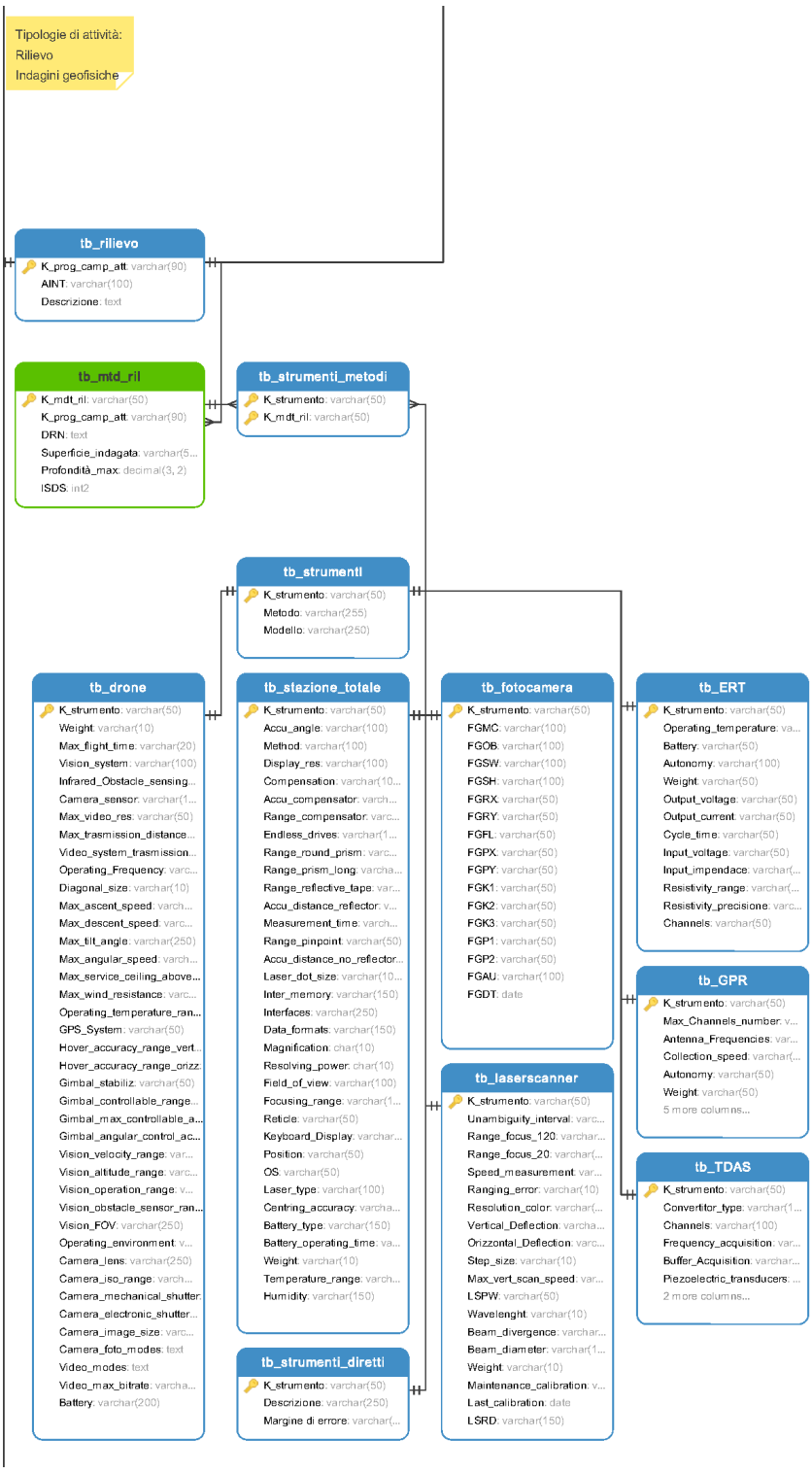


Fig. 10.9. PSPP-Db, Schema relazionale. Tabelle relative alla gestione di: "Rilievi", "Indagini non invasive", "Strumenti".

servazioni prodotte nell'ambito di tale tipologia analisi rivesta particolare importanza l'attribuzione di una connotazione spaziale alle osservazioni effettuate insieme alla gestione delle informazioni relative al "Materiale" impiegato. Se a quest'ultima necessità si è fatto fronte, con l'integrazione di alcune tabelle e vocabolari appositamente strutturate per la gestione dei dati inerenti i materiali impiegati, alla tabella USMR, modellata sulla scheda Unità Stratigrafica di Rivestimento (USR) dell'ICCD, è stata attribuita un'estensione spaziale tridimensionale del tipo "*Multipolygon*".

10.3.7 Analisi dei degradi

L'analisi dei "*Degradi*" rientrano fra le attività classificate come "Diagnosi" (Fig. 10.10).

Tale tipologia di analisi è rivolta all'identificazione delle cause di eventuali fenomeni di degrado in atto a carico delle strutture.

Anche in questo caso, l'esigenza di integrare le informazioni utili per una corretta identificazione della collocazione spaziale dei degradi identificati è stata soddisfatta attribuendo un'estensione spaziale tridimensionale del tipo "*Multipolygon*", alla tabella "*Degradi*".

10.3.8 Restauri

Il "*Restauro*" rientra fra le attività classificate come "Interventi"(Fig. 10.11).

Lo scopo di questa sezione della banca dati *PSPP-Db* è quella di gestire le informazioni relative agli interventi di restauro eseguite a carico delle strutture. Anche per i restauri riveste una grande importanza lo stretto legame che intercorre fra i dati necessari alla corretta definizione dell'intervento di restauro e l'esatta collocazione nello spazio dell'intervento, esigenza, anche in questo caso, soddisfatta attribuendo un'estensione spaziale tridimensionale del tipo "*Multipolygon*", alla tabella "*Restauri*".

10.3.9 Scavo archeologico

Lo scavo archeologico rientra fra le attività classificate come "Interventi" (Fig. 10.12).

A questa sezione della banca dati *PSPP-Db* è demandato il compito dell'archiviazione e della gestione di tutte le informazioni connesse con un'indagine di scavo archeologico, per la corretta definizione della quale si è fatto ricorso alle schede ministeriali, tanto la scheda di *Saggio Stratigrafico* (SAS), quanto le schede di *Unità Stratigrafica* (US) e di *Unità Stratigrafica Muraria* (USM).

Particolare attenzione è stata attribuita alla definizione degli elementi "*Area*", "*Settore*", "*Saggio*" e "*Quadrato*", per i quali, come per l'"*Unità Stratigrafica*", era essenziale prevedere una connotazione spaziale, che in questo caso è stata soddisfatta ricorrendo ad un'estensione spaziale tridimensionale del tipo "*polygon*", per tutte le evidenze sopra elencate.

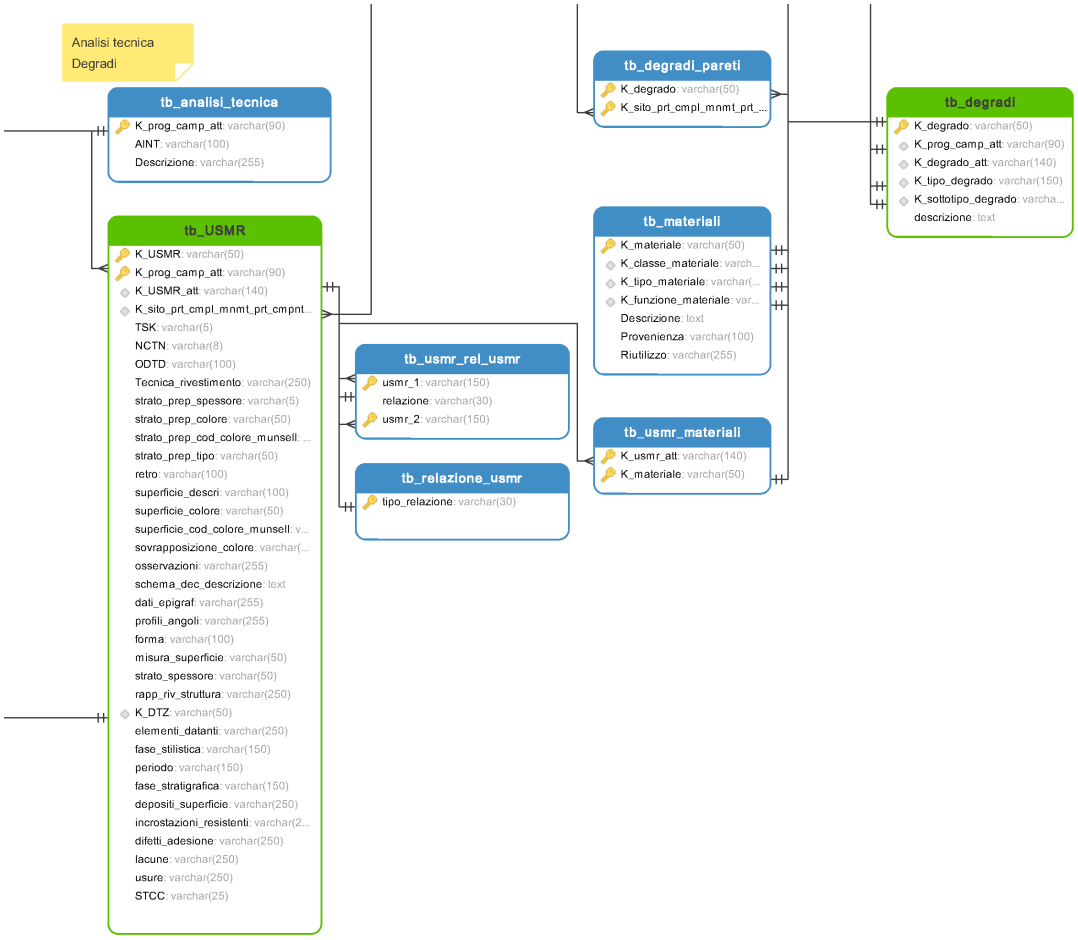


Fig. 10.10. PSPP-Db, Schema relazionale. Tabelle relative alla gestione delle attività di "Analisi tecnica", "Degradi".

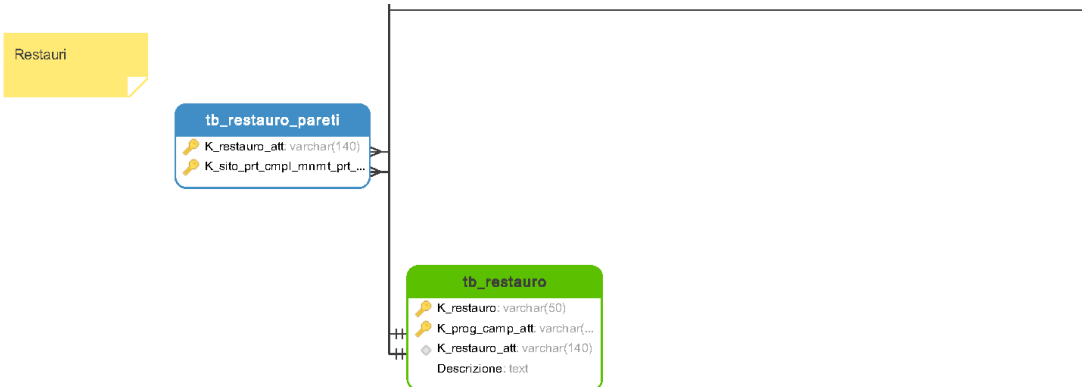


Fig. 10.11. "Restauri".

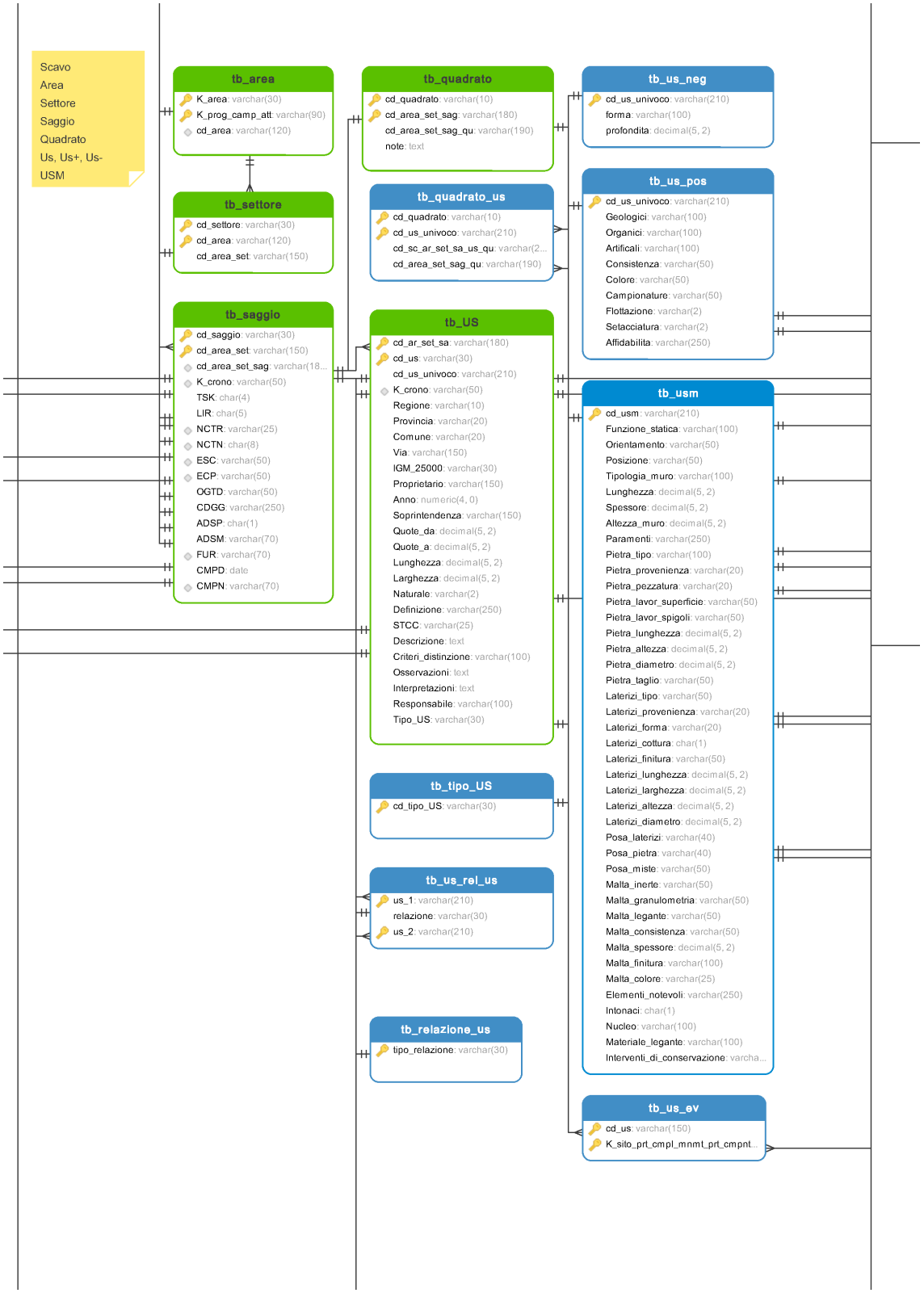


Fig. 10.12. PSPP-Db, Schema relazionale. Tabelle relative alla gestione delle Indagini di scavo: "Aree", "Settori", "Saggi", "Quadrati", "US", "USM".

10.3.10 Dal sito all'elemento murario

Le attività fin qui descritte possono interessare differenti porzioni dell'area archeologica di Pompei: dall'intero sito al singolo muro di delimitazione di un ambiente (Figg.10.13-10.14).

Diventa pertanto importante operare un'articolazione dello spazio urbano dell'antica città in differenti livelli. Per rispondere a questa esigenza, come detto, nell'ambito del SIGPP si era scomposta la città in sei livelli differenti. Tale articolazione, insieme con l'apparato schedografico che la caratterizza, è stata replicata e perfettamente integrata all'interno della banca dati sviluppata nell'ambito del presente progetto.

Ciò ne assicura pertanto la perfetta compatibilità sia con il SIGPP, sia con il SIGECWEB, dal quale il primo deriva.

A ciascuna delle sei articolazioni, in cui è stata suddiviso l'antico spazio urbano, "*Sito insieme*", "*Sito parte*", "*Complesso archeologico*", "*Monumento archeologico*", "*Monumento archeologico parte*", "*Monumento archeologico componente*" è stata attribuita un'estensione spaziale di tipo *multipolygon*[13].

10.3.11 Reperti

Una qualsiasi attività, agendo su una o più delle suddivisioni in cui è stato articolato il sito di Pompei, produce differenti risultati. I "*Reperti*" rappresentano ciò che deriva da un intervento di "Scavo archeologico" (Figg. 10.15-10.16).

Un singolo reperto, rappresentato nello spazio tramite l'attribuzione di un'estensione tridimensionale del tipo "*point*", è direttamente in relazione con la stratigrafia in cui è stato rinvenuto e da questa, con un procedimento a ritroso, all'attività di scavo che, come detto precedentemente, è localizzata tramite il dato spaziale ad essa riferito all'interno di una porzione ben definita della città.

I dati relativi ai reperti, sono serviti per operare una fase di testing del grado di dettaglio che sarebbe stato possibile raggiungere tramite la banca dati realizzata.

Questa, allo stato attuale, permette di archiviare e catalogare differenti classi e tipologie di reperti, come "*Produzioni ceramiche*", "*Anfore*", "*Lucerne*", "*Metalli*", "*Vetri*", con approfondimenti relativi alle materie prime impiegate, alle tecniche di fabbricazione, agli impasti e inclusi, agli apparati decorativi e agli artisti che li hanno elaborati (Fig. 10.17).

La banca dati *PSPP-Db*, infine, consente di gestire anche la localizzazione del reperto all'interno del luogo di conservazione e delle eventuali cassette in cui è custodito.

All'interno della medesima categoria, condividendone l'articolazione e il medesimo livello di dettaglio, sono state incluse due categorie di reperti che il

[13] Come definito in precedenza, il livello "*Sito insieme*" indica l'intera città; "*Sito parte*" l'articolazione in *Regiones*; tramite il "*Complesso archeologico*", è possibile indicare un'*insula*, mentre una *domus* è nel suo complesso gestita come "*Monumento archeologico*". Tale livello contiene a sua volta una duplice articolazione in "*Monumento archeologico parte*", con il quale è possibile indicare un singolo ambiente appartenente alla domus, e in "*Monumento archeologico componente*", che giunge infine al livello dell'elemento murario o di una superficie pavimentale.

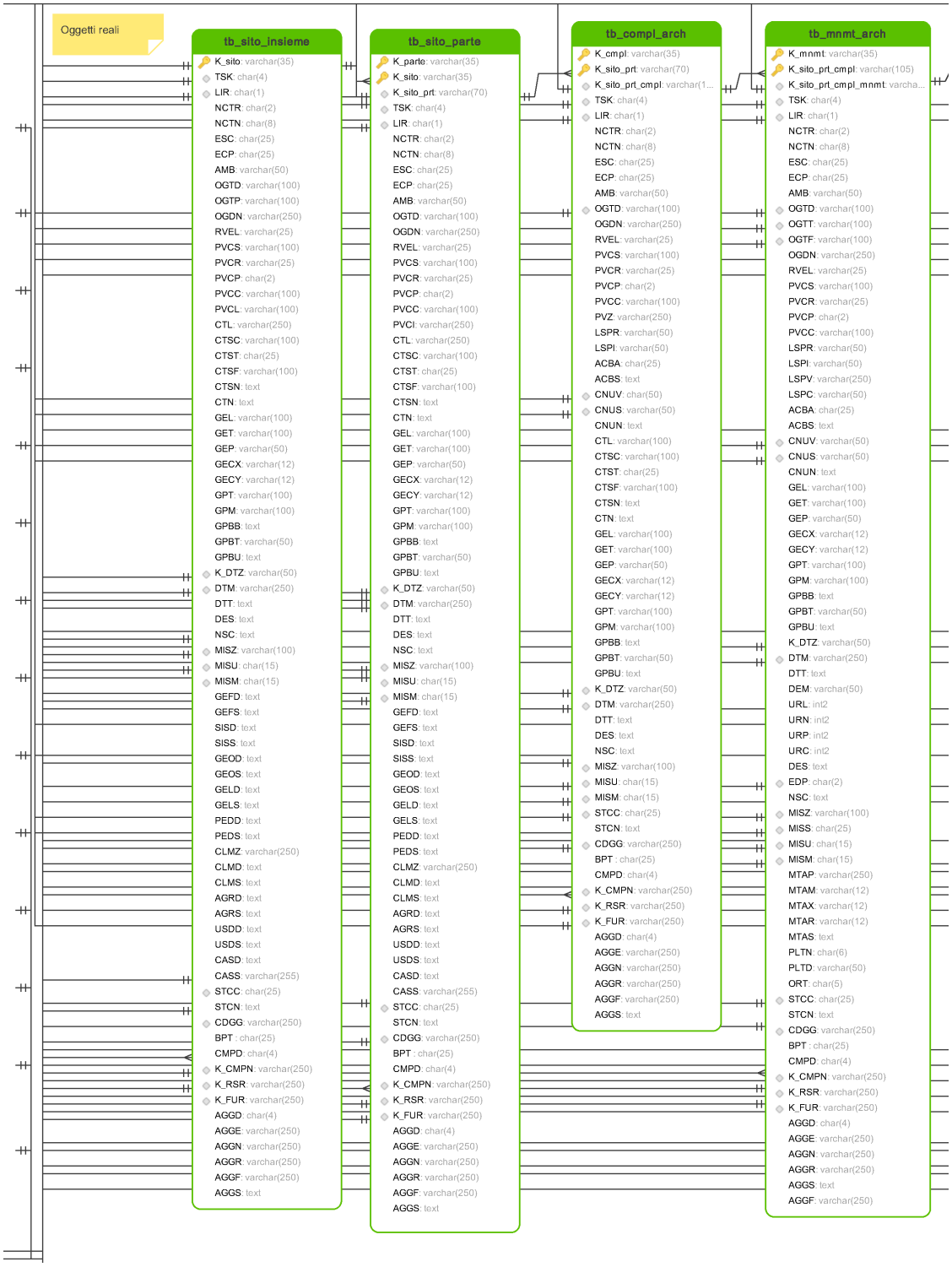


Fig. 10.13. PSPP-Db, Schema relazionale. Tabelle relative alla gestione di: "Sito insieme", "Sito parte", "Complesso archeologico", "Monumento archeologico".

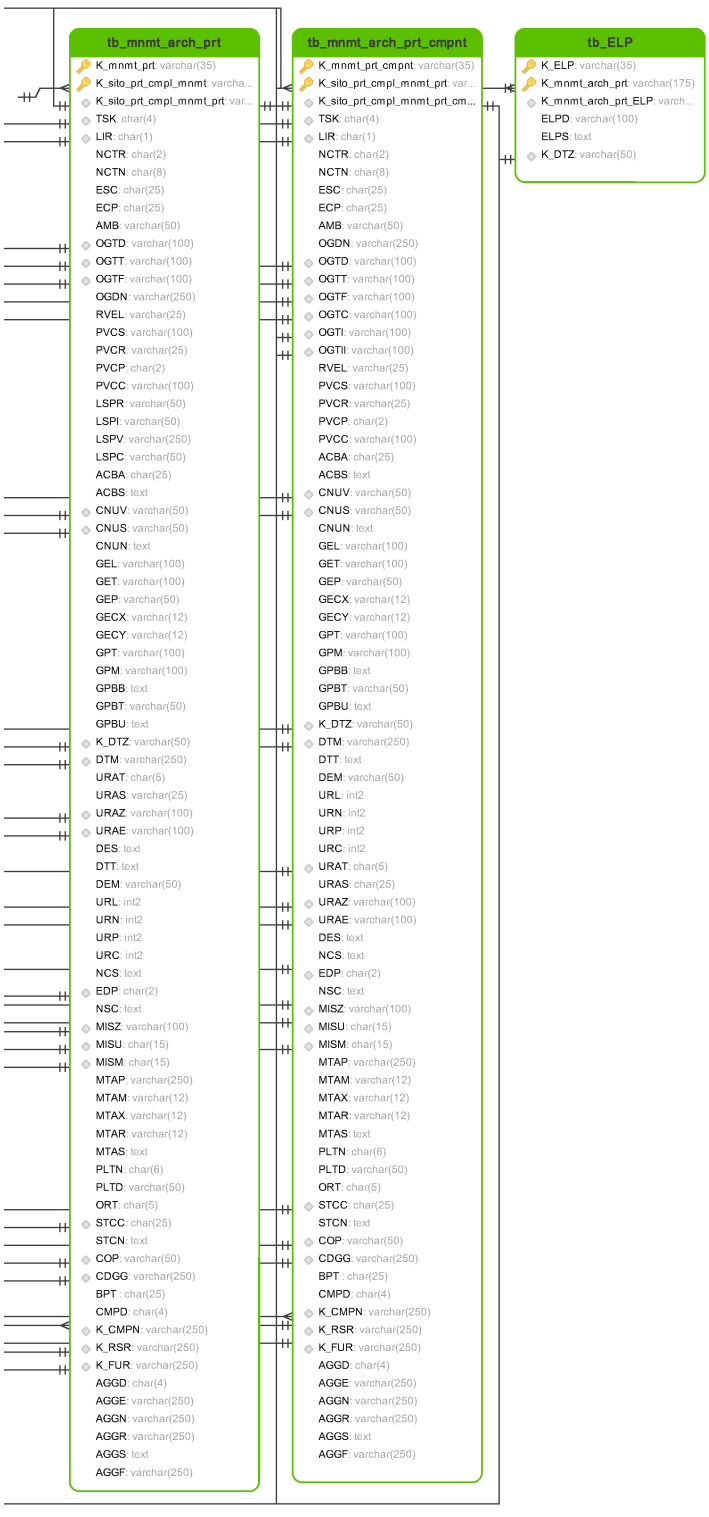


Fig. 10.14. PSPP-Db, Schema relazionale. Tabelle relative alla gestione dei livelli: "Monumento parte" e del "Monumento parte componente".

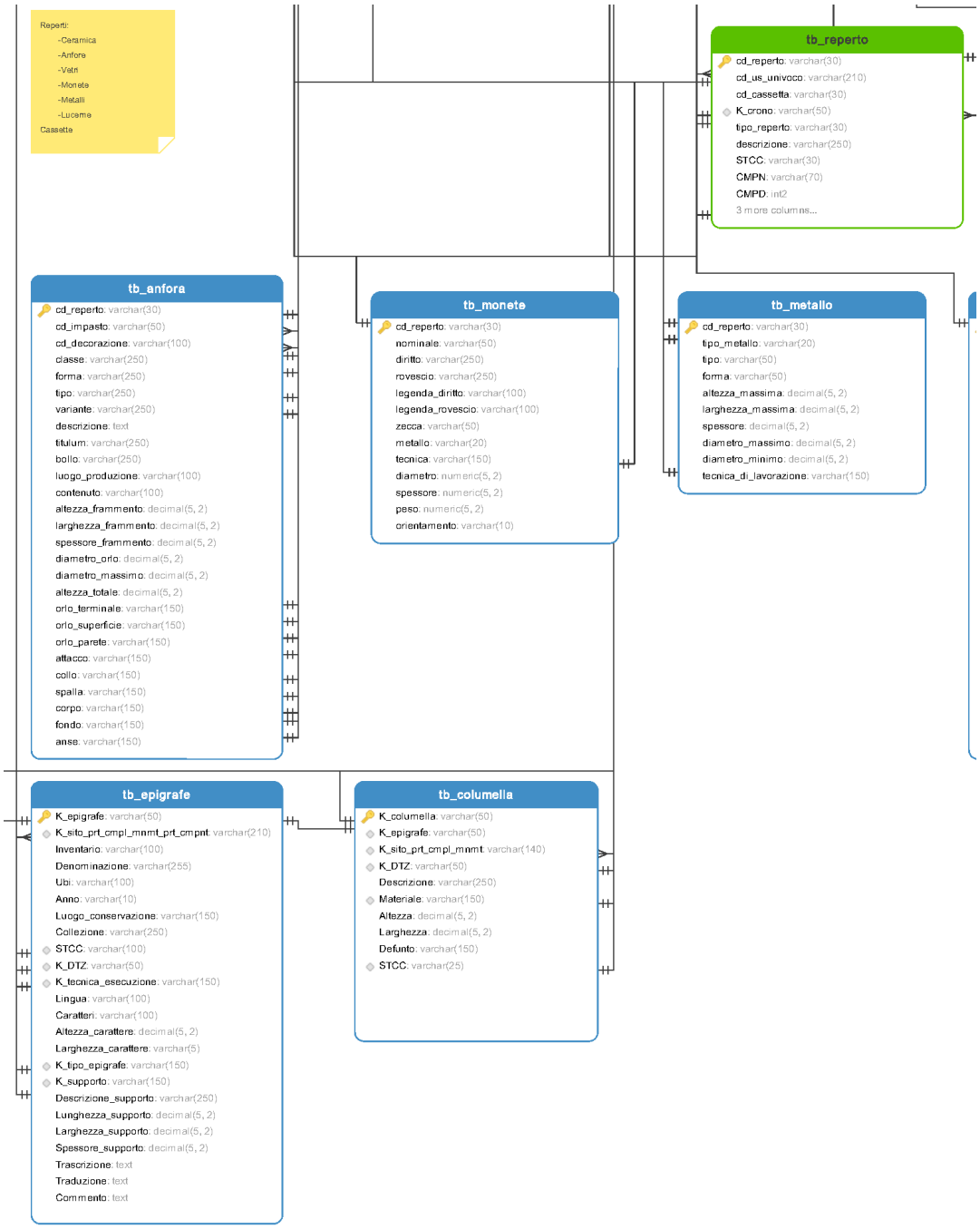


Fig. 10.15. PSPP-Db, Schema relazionale. Tabelle relative alla gestione dei "Reperti", "Anfore", "Monete", "Vetri", "Metalli", "Epigrafi", "Stele".



Fig. 10.16. PSPP-Db, Schema relazionale. Tabelle relative alla gestione delle "Cassette" e dei "Reperti".

più delle volte, tranne alcune eccezioni, possono essere considerati reperti "immobili" destinati a rimanere in situ. Si tratta delle "*Epigrafi*" e delle stele funerarie antropomorfe, generalmente indicate negli studi di settore sull'antica città di Pompei come "*Columelle*". Per entrambe le categorie sono state gestite, tramite la banca dati, oltre ai dati utili per una loro catalogazione, anche le relazioni da esse intrattenute sia con il contesto di rinvenimento, sia il luogo di conservazione, nel caso si tratti di reperti decontestualizzati.

10.3.12 Immagini, documenti e oggetti 2D

I risultati ottenuti dalle altre tipologie di attività, possono essere accomunati e assimilati a immagini, documenti e altre tipologie di oggetti digitali caratterizzati dal possesso di due dimensioni, in opposizione a oggetti, prodotti anch'essi a partire dai dati raccolti, che rispetto ai primi possiedono una dimensione aggiuntiva.

Le fotografie digitali effettuate durante un'ispezione, una campagna di

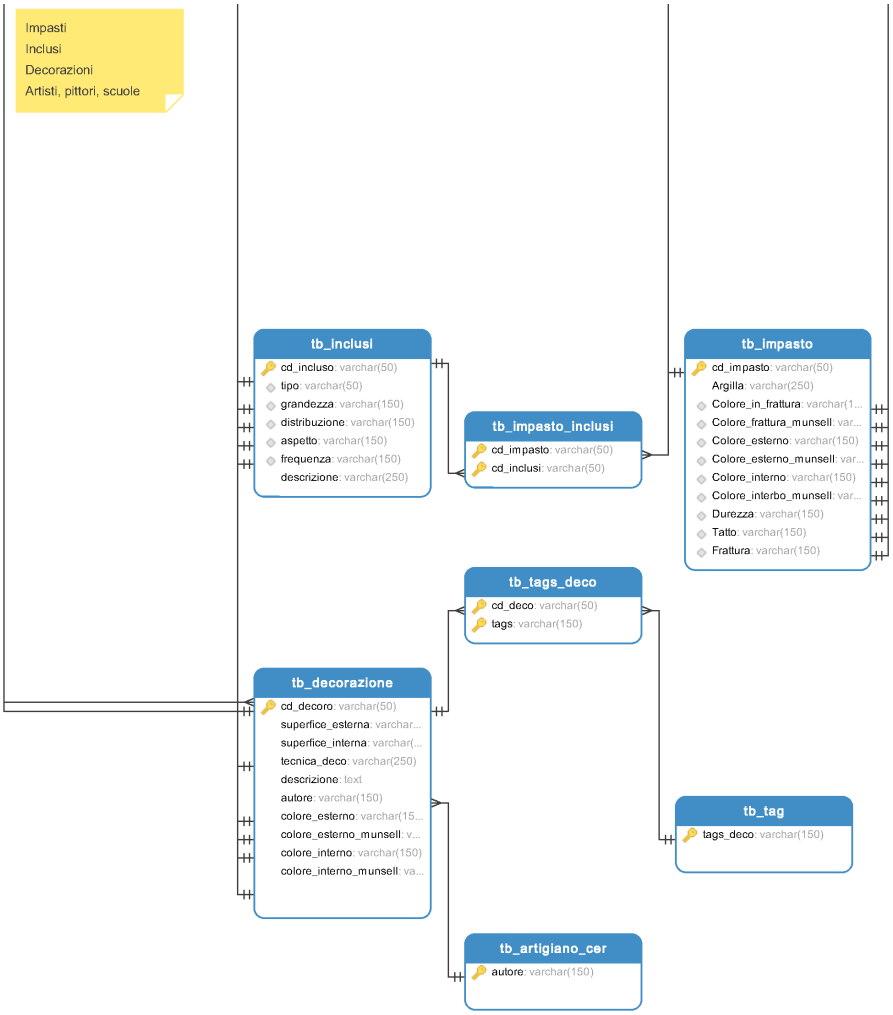


Fig. 10.17. PSPP-Db, Schema relazionale. Tabelle relative alla gestione di: "Impasti", "Inclusi", "Decorazioni", "Artisti".

scavo, un'attività di rilievo o di restauro, così come disegni, schizzi, relazioni, elaborati di vario genere e tipologia, nonché la documentazione d'archivio, sotto forma di immagini storiche o vecchi rilievi, costituiscono solo alcuni esempi di una vasta categoria di dati, estremamente varia dal punto di vista tipologico, prodotta durante le attività di ricerca.

Per la gestione di tale categoria di all'interno del *PSPP-Db* si è fatto ricorso ad un processo di astrazione, al fine di superarne l'estrema variabilità tipologica e contenutistica, considerandone il risultato che era possibile ottenere attraverso un processo di digitalizzazione, ovvero un oggetto digitale bidimensionale, categoria all'interno della quale sulla base delle specifiche caratteristiche si è operata una distinzione fra "*Immagini*" e "*Documenti*" (Fig. 10.18-10.19).

Le immagini instaurano con l'ogget-

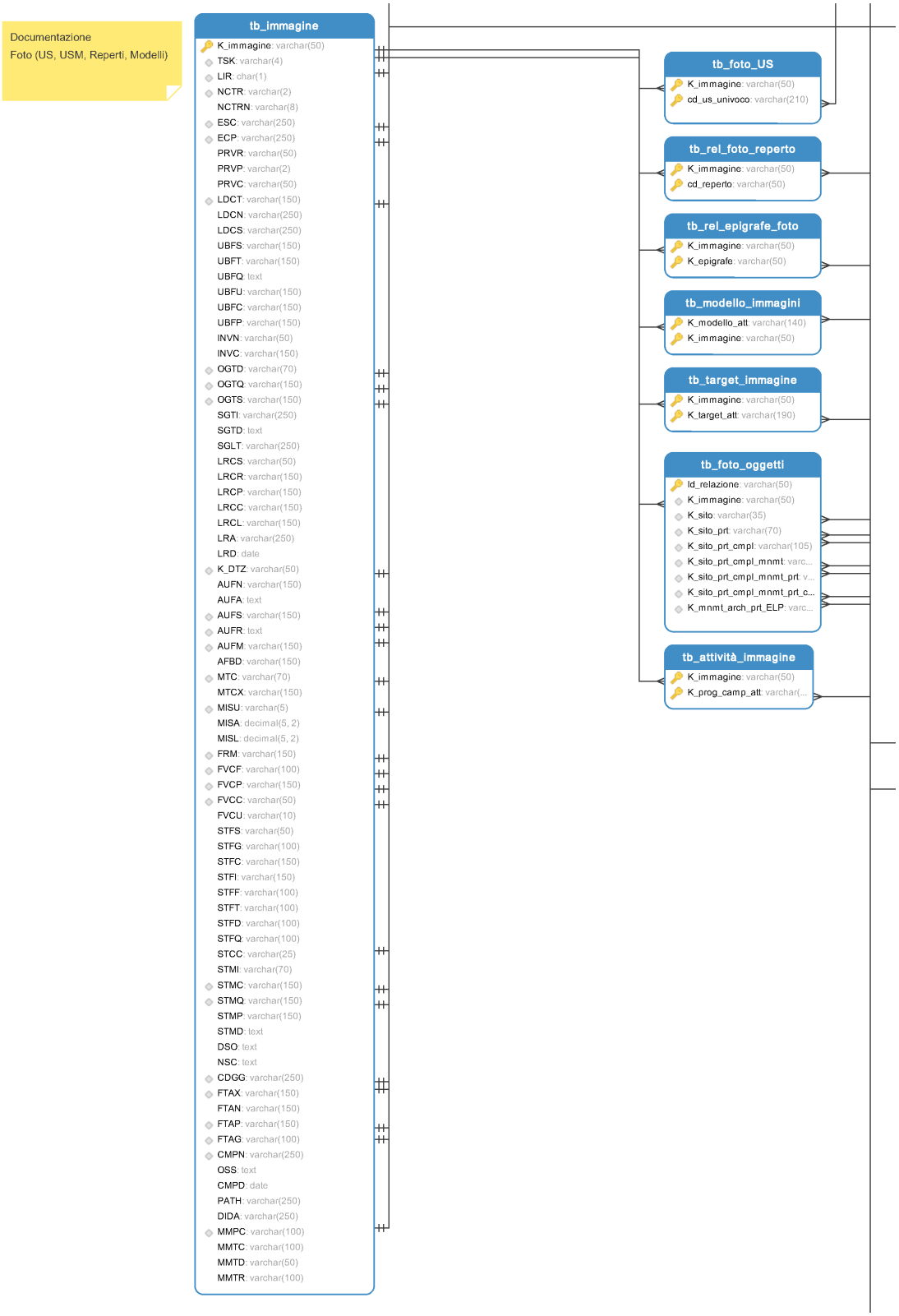


Fig. 10.18. PSPP-Db, Schema relazionale. Tabelle relative alla gestione delle "Immagini".

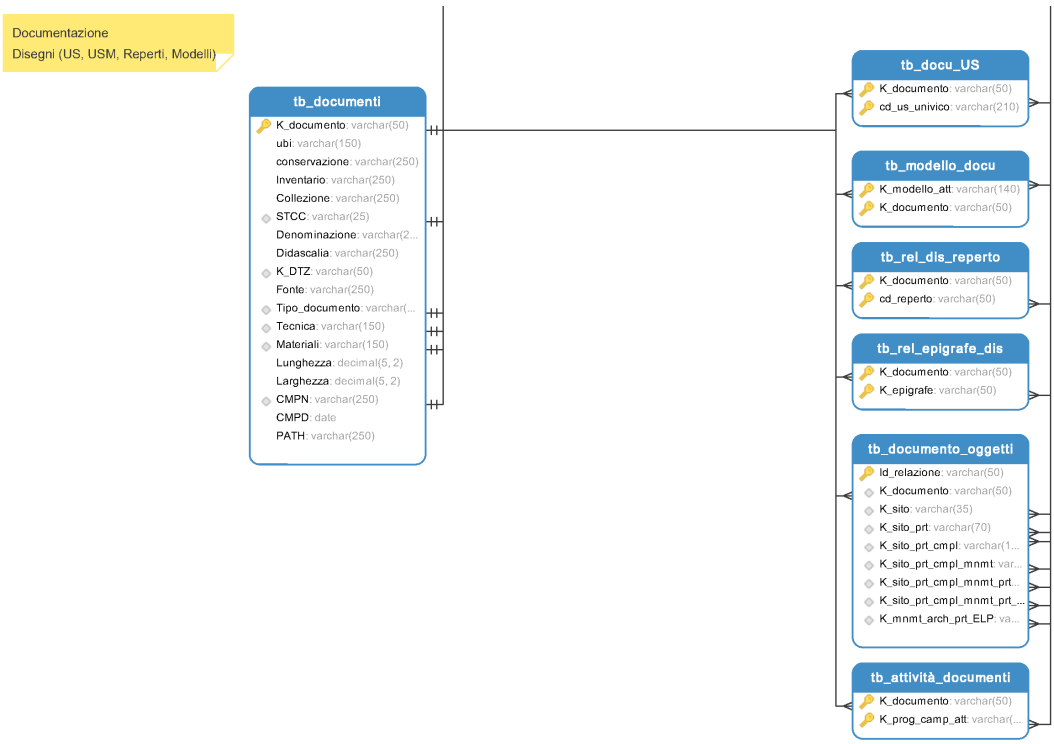


Fig. 10.19. PSPP-Db, Schema relazionale. Tabelle relative alla gestione dei: "Documenti".

to rappresentato un maggiore grado di iconicità e richiedono pertanto in minore impegno nella trascrizione e formalizzazione contenutistica. Nella loro archiviazione e gestione informatizzata particolare rilievo assume il rapporto che l'immagine mantiene con lo strumento che ne ha consentito la realizzazione e che determinandone la qualità e l'affidabilità, incide considerevolmente anche sul valore documentario.

All'interno di tale categoria sono confluite sia immagini prodotte direttamente in formato digitale, sia quelle derivate da processi di ripresa analogici, come nel caso di foto storiche, che hanno richiesto un preliminare processo di digitalizzazione per la loro archiviazione e gestione.

Si tratta, come già illustrato, una categoria di documenti di differente tipologia, all'interno della quale rientrano, per limitarsi ad un solo esempio, anche le immagini prodotte durante alcune indagini non invasive, come nel caso delle *slices* ottenute a partire dai dati raccolti sul terreno da strumentazioni georadar, geoelettriche o magnetometiche, ed assimilabili a delle immagini raster, ottenute attraverso processi di mapalgebra, che conferisco a ciascuna cella della matrice di cui l'immagine è composta un colore direttamente connesso con il valore geofisico registrato dagli strumenti.

Per l'archiviazione delle immagini, si fatto ricorso alla scheda ministeriale F, scheda fotografica, che ha offerto

un'ottima base di partenza per la varietà e molteplicità degli aspetti da essa considerati. Particolarmente importante è stata la creazione delle relazioni, che legano ciascuna immagine, sia alle attività nell'ambito delle quali i *dataset* fotografici sono stati eventualmente prodotti, sia ai reperti, agli oggetti o ai contesti ritratti.

All'interno della categoria "*Documenti*" sono invece confluiti tutte le rimanenti tipologie, come disegni, rilievi, carte tematiche, schede descrittive, relazioni, che instaurano, rispetto alle immagini un rapporto più complesso e variato fra contenuti e oggetto o contesto a cui questi si riferiscono. Di tale differenza si è tenuto conto nella strutturazione della banca dati, affinché l'intero valore documentale potenzialmente contenuto nell'originale e successivamente trasferito nella copia digitale, rimanesse immutato. Come già accaduto per le immagini, attraverso la gestione degli opportuni legami, è stato possibile mettere in relazione ciascun documento sia con le attività che ne hanno determinato l'acquisizione, sia con l'oggetto o il contesto di riferimento.

10.3.13 Modelli 3D

Gli oggetti digitali tridimensionali rappresentano una tipologia di documentazione di recente diffusione che, nel caso specifico, si aggiunge alla documentazione che è possibile ottenere tramite le differenti tipologie di attività condotte all'interno del sito archeologico di Pompei (Fig. 10.20).

Si tratta in questo caso di una documentazione che diventa disponibile alla ricerca, solo dopo un processo di post-produzione, realizzato a partire dai dati ricavati sul campo, siano essi *dataset* fotografici o nuvole di punti ottenute da rilievi laser. Questo rapporto per così dire mediato fra l'attività sul campo e la disponibilità del modello digitale, nonché il legame molto stretto fra dati di partenza, modelli 3D, metodologie e strumentazioni impiegate sia in fase di rilievo che di post-produzione, distinguono un modello 3D dalle altre forme di documentazione, che si è preso in considerazione in quanto prodotti delle attività di ricerca.

Le riflessioni sopra esposte hanno suggerito l'opportunità dell'integrazione, fra gli elementi descrittivi di un modello 3D, dei dati relativi ai software e alle metodologie impiegate per la realizzazione dell'oggetto digitale[14]. Si è inoltre posta particolate attenzione a mantenere contezza delle relazioni esistenti fra i modelli digitali e gli elementi che di volta in volta durante le attività di rilievo sono stati presi in considera-

[14] Particolarmente preziosi nella progettazione di questa sezione del database si sono rivelate diverse esperienze. La prima, specificatamente orientata alla definizione di framework per la creazione e l'utilizzo di oggetti digitali 3D, come sistema informativo e comunicativo, maturata in seno alle attività svolte per la realizzazione del Sistema Informativo Unificato per la Soprintendenza Speciale per i beni archeologici di Napoli e Pompei, che vide coinvolti, a partire a 2005, oltre la Soprintendenza già citata, anche l'Università Normale di Pisa, e Arcus s.p.a. V. Benedetti-Gaiani-Remondino 2010. Di estremo interesse anche il contributo dato alle problematiche connesse con la metadatazione di oggetti digitali 3D applicati al patrimonio culturale e archeologico, le attività di ricerca svolte nell'ambito del progetto europeo 3D-Icons, per il quale v. D'Andrea 2016; McCarthy 2014.

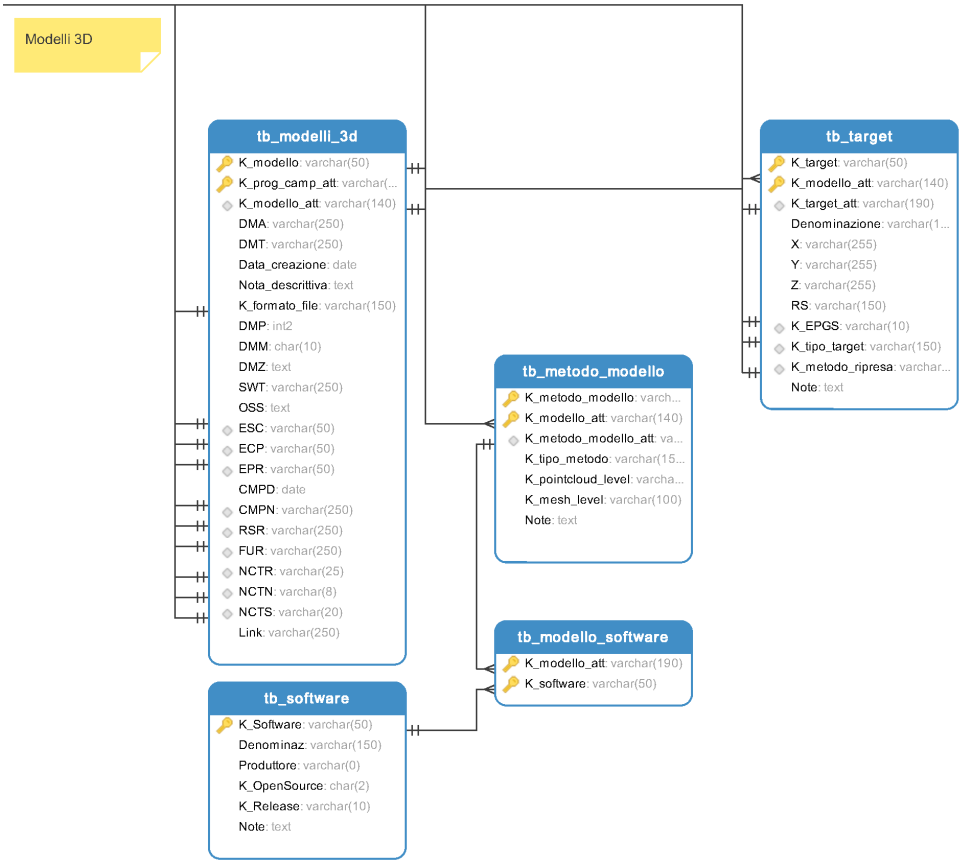


Fig. 10.20. PSPP-Db, Schema relazionale. Tabelle relative alla gestione dei: "Modelli 3D".

zione per l'esatta georeferenziazione e la scalatura, dell'oggetto, le cui informazioni, sotto forma coordinate relative e assolute e immagini ritraenti i vari target materializzati sull'oggetto, sono stati messi in relazione all'interno della banca dati con l'oggetto di riferimento.

10.3.14 Cronologie

L'esatta collocazione temporale costituisce, insieme a quella spaziale, un presupposto imprescindibile per conferire validità a qualsiasi dato e alla conoscenza che da esso deriva. Nell'ambito della progettazione della banca *PSPP-Db*, alla gestione dell'elemento cronologico è stata, inevitabilmente, conferita grande importanza. Ciò è avvenuto tramite un'apposita sezione destina alla gestione delle cronologie e alle relazioni che esse instaurano sia con gli oggetti e i contesti analizzati, sia con le attività e i soggetti coinvolti, sia con la documentazione, recente o storica, che è stata di volta in volta prodotta (Fig. 10.21).

Per disporre di un dato cronologico, la cui formalizzazione potesse adattarsi a diverse esigenze, coniugando il grado d'indeterminatezza insito, in modo

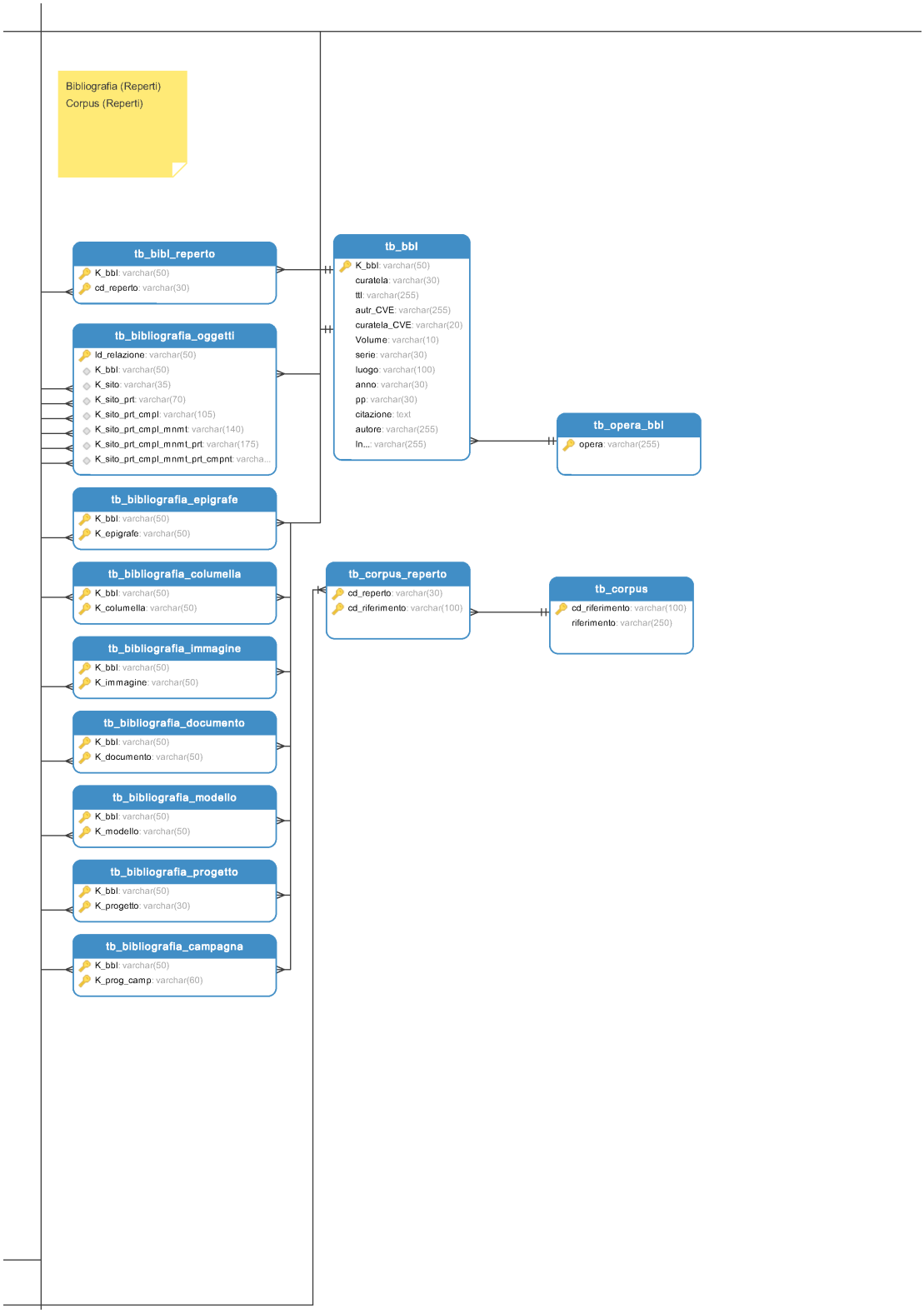


Fig. 10.21. PSPP-Db, Schema relazionale. Tabelle relative alla gestione dei riferimenti bibliografici.

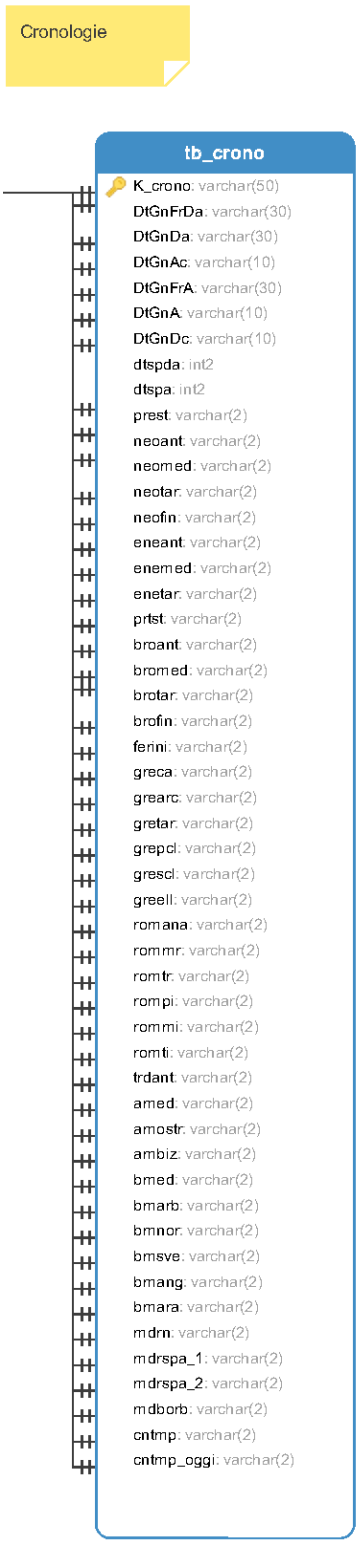


Fig. 10.22. PSPP-Db, Schema relazionale. Tabelle relative alla gestione del dato cronologico.

spesso ineliminabile, nella ricerca umanistica in generale e storico-archeologica in particolare, con l'esigenza di precisione di cui le strategie di archiviazione e indicizzazione delle informazioni richiedono, si è fatto ricorso ad un sistema di gestione delle cronologie multilivello, grazie al quale poter contemperare sia datazioni al secolo, che datazioni numeriche, sia datazioni espresse tramite il riferimento a singole fasi cronologiche.

10.3.15 Bibliografia

Ad un'apposita sezione all'interno della banca dati è attribuita la funzione della raccolta e della gestione di tutti i riferimenti bibliografici (Fig. 10.22).

La struttura conferita a tale sezione consente la piena gestione dei dati necessari per una corretta e completa descrizione di differenti tipologie di risorse bibliografiche, e per il successivo riferimento ai contesti indagati, siano essi relativi ad una specifica parte del sito o ad un singolo reperto archeologico.

10.3.16 Vocabolari

L'utilizzo di vocabolari controllati, tassonomie e *thesauri*[15], fornendo un

[15] Per le differenze fra "*Vocabolari controllati*", "*Tassonomie*" e "*Thesauri*" v. D'Andrea 2006, pp. 102-116.

[16] Per la costruzione dei singoli vocabolari ci si è basati in particolate sugli elenchi redatti dall'ICCD a corredo delle linee guida, che sono state rese pubbliche come supporto della compilazione delle relative schede ministeriali.

supporto durante i processi d'inserimento e descrizione dei dati, si configura come un potente strumento per l'omologazione e la standardizzazione dei contenuti. Tale aspetto riveste un'importanza fondamentale per la definizione di una strategia efficace per l'analisi dei dati.

L'intera struttura del database *PSPP-Db*, rapidamente analizzata nei suoi elementi fondamentali, usufruisce di un esteso e articolato insieme di vocabolari[16], i cui valori vengono automaticamente richiamati, durante l'inserimento di un nuovo record o la modifica di uno esistente (Figg. 10.23-10.25).

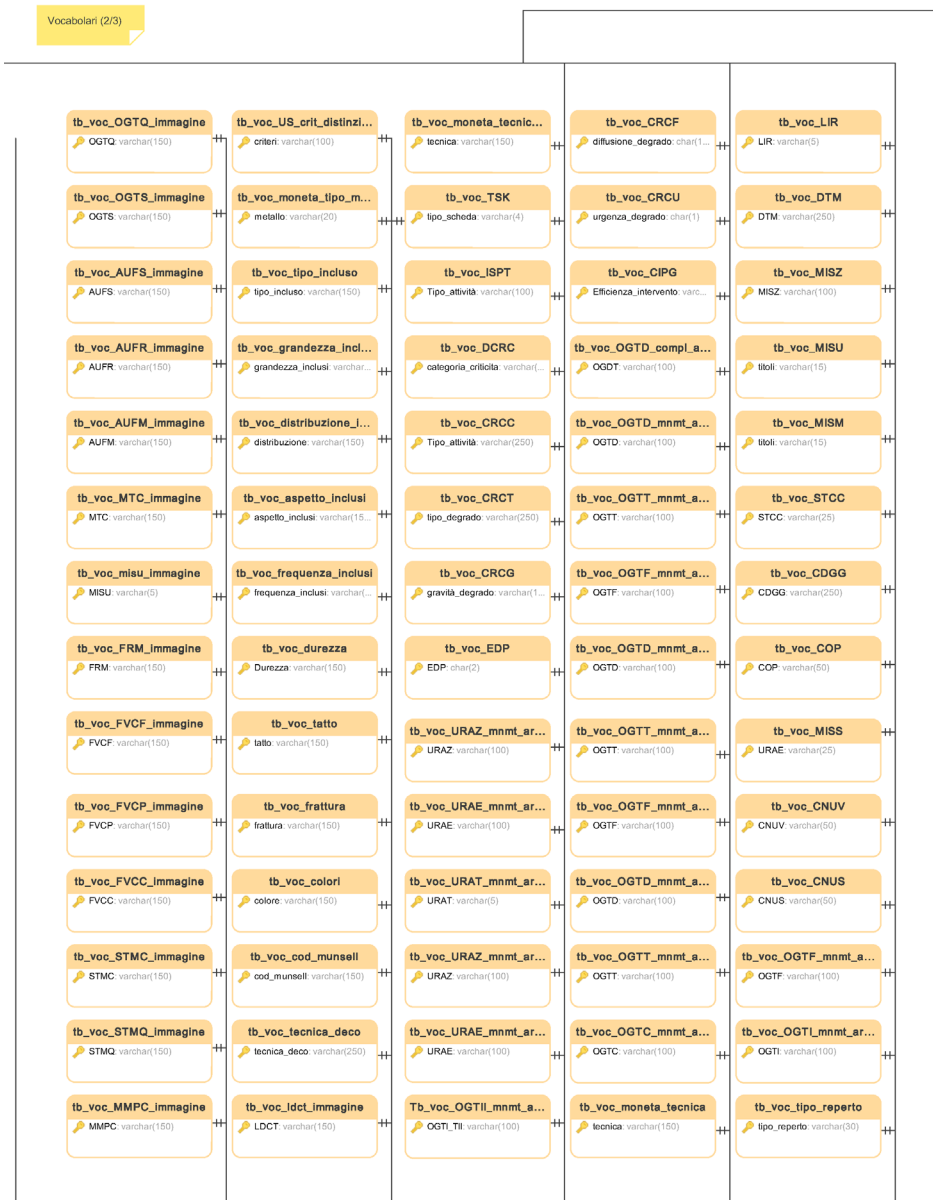


Fig. 10.23. PSPP-Db, Schema relazionale. Tabelle relative alla gestione dei vocabolari.



Fig. 10.24. PSPP-Db, Schema relazionale. Tabelle relative alla gestione dei vocabolari.

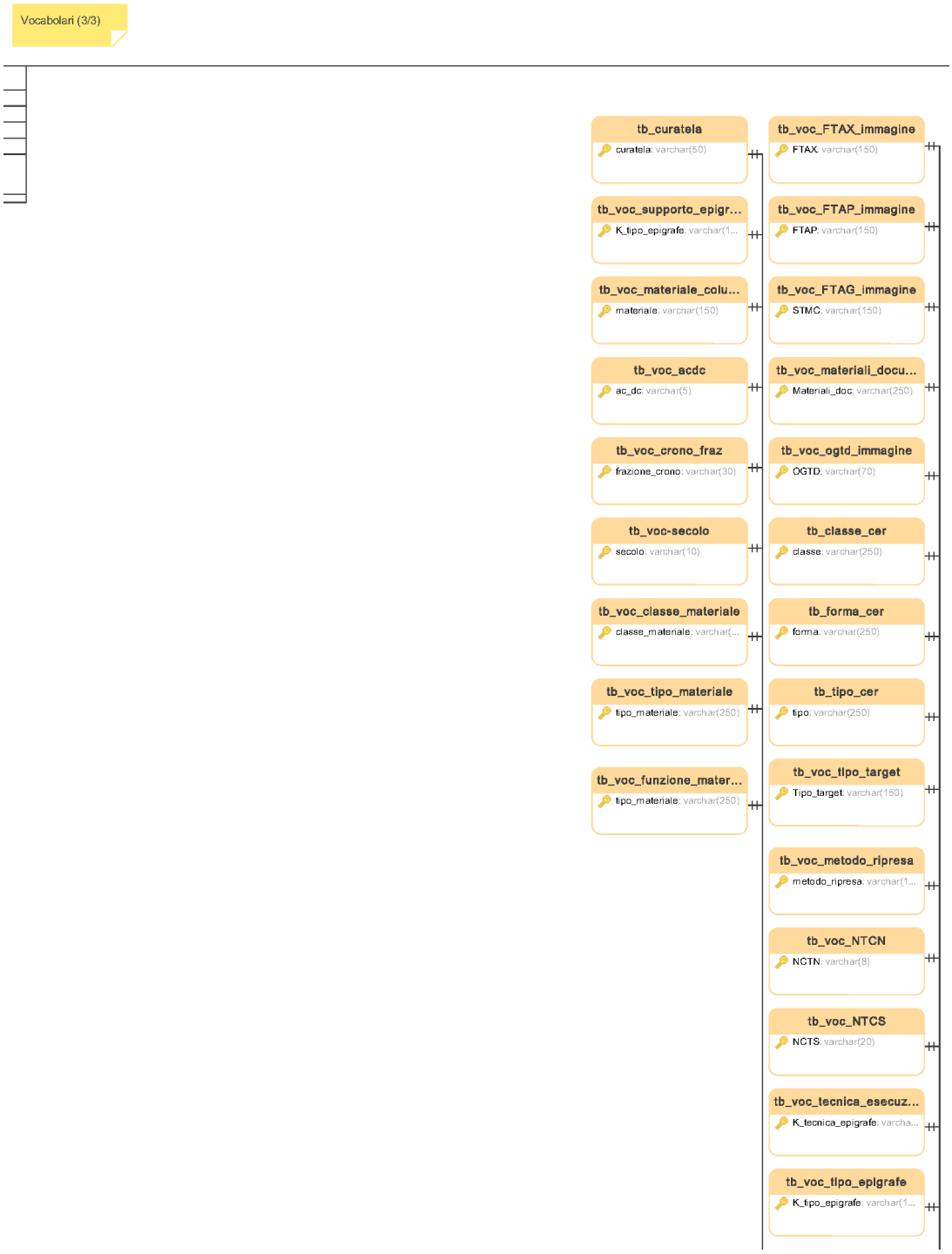


Fig. 10.25. PSPP-Db, Schema relazionale. Tabelle relative alla gestione dei vocabolari.

Conclusioni

Il presente lavoro intendeva rispondere ad alcune questioni legate alla valutazione delle potenzialità, dei limiti e delle eventuali criticità connesse all'utilizzo di oggetti digitali tridimensionali inerenti il patrimonio culturale come sistema informativo. Ciò richiedeva di valutare sia le reali possibilità dell'utilizzo di tali oggetti come strumento di archiviazione, sia gli eventuali vantaggi in termini di analisi, interpretazione e condivisione dei risultati connessi al loro utilizzo.

La responsabilità conferita all'Ibam-Cnr, come partner del Pompeii Sustainable Preservation Project (PSPP), del rilievo architettonico e della successiva restituzione digitale delle evidenze archeologiche e monumentali presenti all'interno delle necropoli di Porta Nocera e di Via Nucerina a Pompei, contesto di studio dove sperimentare, in accordo con gli obiettivi del PSPP, metodologie, tecniche e materiali per il restauro architettonico, ha fornito, nel pieno rispetto del riutilizzo dei dati e dell'economia della ricerca, il materiale su cui poter condurre le necessarie sperimentazioni oggetto del presente lavoro.

L'occasione è stata propizia per avviare, preliminarmente allo svolgimento delle attività di ricerca, una riflessione sul ruolo, le funzioni e l'apporto fornito dal rilievo, dal disegno e dalla restituzione grafica alla ricerca archeologica, nonché le modifiche introdotte dall'utilizzo, ormai pervasivo, di strumenti informatici di disegno assistito che, oltre a rendere estremamente veloci e affidabili i processi di restituzione grafica, hanno contribuito ad accrescere in modo esponenziale la disponibilità di oggetti digitali.

In tale riflessione un ruolo fondamentale lo hanno occupato i nuovi strumenti di rilievo che consentono oggi di ottenere, in modo sempre più semplice e pertanto con costi contenuti, repliche tridimensionali di oggetti e contesti reali.

Ciò che ne è derivata è un'immagine complessa dell'oggetto digitale, la cui natura resta sospesa fra opposte teorie che tendono a ricondurlo nel campo di un'effimera virtualità oppure, al contrario, a riconoscergli un'esistenza concreta. Aldilà delle implicazioni, certamente interessanti e per certi aspetti affascinanti insite in alcune di tali teorie, particolare importanza ha assunto il rapporto di iconicità, così come definito da alcuni esponenti della moderna semiologia, che lega una copia digitale al corrispondente oggetto reale, rapporto che diviene maggiormente stringente con il passaggio dalle due alle tre dimensioni.

È proprio l'iconicità, utilizzata per esprimere il grado di somiglianza fra un oggetto reale e una sua copia, ad aver offerto una chiave di lettura delle potenzialità insite nell'utilizzo di un oggetto digitale tridimensionale, come sistema informativo. È infatti lo stretto rapporto di somiglianza, sotto l'aspetto formale, dimensionale, nella resa e caratterizzazione delle superfici, che lega l'oggetto reale al modello digitale tridimensionale, ad amplificare le potenzialità che quest'ultimo possiede all'atto di veicolare dati e informazioni relative all'oggetto reale,

ma provenienti da un complesso potenzialmente infinito di fonti.

Affinché un oggetto reale tridimensionale, in virtù dell'alto grado di iconicità che lo caratterizza, possa svolgere tale ruolo occorre tuttavia che i dati ad esso attribuiti siano legati da un rapporto spaziale con l'oggetto digitale e le parti in cui esso può essere suddiviso. Ciò è quello che si è tentato, in parte, di fare nel presente lavoro, con la creazione di una banca dati, denominata PSPP-Db, realizzata in PostgreSql, dotata di un'estensione spaziale, capace di gestire, in forma complessiva, molteplici tipologie di dati relativi al contesto di provenienza degli oggetti digitali relativi a monumenti funerari presenti nella Necropoli di Porta Nocera e di Via Nucerina a Pompei. L'integrazione del PSPP-Db all'interno di una piattaforma GIS ha reso possibile la gestione e l'analisi dei dati archiviati in un ambiente tridimensionale, consentendo un primo legame con modelli tridimensionali, che per esigenze di semplificazione in sperimentale, sono stati realizzati con un basso grado di iconicità.

Ricerche future potranno valutare ed eventualmente prevedere l'integrazione della banca dati realizzata con alcuni modelli di gestione di dati in uno spazio tridimensionale, il cui impiego per la modellazione di interi organismi urbani o di singoli edifici è ormai abbastanza diffuso, mentre, allo stato attuale, si presenta ancora estremamente limitato nell'applicazione a contesti archeologici.

ABBREVIAZIONI BIBLIOGRAFICHE

Ackerman 2003	J. S. Ackermann, *Architettura e disegno. La rappresentazione da Vitruvio a Gehry*, Roma 2003.
Agisoft 2017	Agisoft, *Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition, Version 1.3*, 2017.
Amoruso-Apollonio-Remondino 2010	G. Amoruso, F.I. Apollonio, F. Remondino, *Caratterizzazione strumentale di sensori attivi a tempo di volo (TOF) e a triangolazione. Utilizzo di laser scanner su superfici marmoree di epoca romana*, in B. Benedetti, M. Gaiani, F. Remondino (ed.), *Modelli digitali 3D in archeologia: il caso di Pompei*, Pisa 2010, pp. 118-160.
Angell-Moore 1984	I.O. Angell, R.E.M. Moore, *On archaeological applications of the Voronoi tessellation*, in S. Laflin (ed.), *Computer Applications in Archaeology*, Birmingham 1984, pp. 9-14.
Atkinson *et alii* 1990	M. Atkinson, F. Bancilhon, D. De Witt, K. Dittrich, D. Maier, S. Zdonik, *The object-oriented database system manifesto*, in H. V Jagadish, H. Garcia-Molina (ed.), *Proceedings of the ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*, 1990.
Atzeni *et alii* 2014	P. Atzeni, S. Ceri, P. Fraternali, S. Paraboschi, R. Torlone, *Basi di dati*, Milano 2014.
Azzena 1997	G. Azzena, *Questioni terminologiche - e di merito - sui GIS in archeologia*, in *istemi informativi e reti geografiche in archeologia: GIS-INTERNET. VII Ciclo di Lezioni sulla Ricerca applicata in Archeologia (Certosa di Pontignano 1995)*, Firenze 1997, pp. 33-43.
Bacci-Manferdini-Masci 2010	G. Bacci, A.M. Manferdini, M.E. Masci, *Il progetto del rilievo*, in B. Benedetti, M. Gaiani, F. Remondino (ed.), *Modelli digitali 3D in archeologia: il caso di Pompei*, Pisa 2010, pp. 64-92.
Baldissini-Gaiani-Remondino 2010	S. Baldissini, M. Gaiani, F. Remondino, *Rilievo, gestione e mappatura del colore*, in *Modelli digitali 3D in archeologia: il caso di Pompei*, 2010, pp. 200-231.
Barcelo-Pallarés 1996	J.A. Barcelo, M. Pallarés, *From visual seduction to spatial analysis. A critique of GIS in archaeology*, in «*Archeologia e calcolatori*», 7, 1996, pp. 327-335.
Barnabei 2007	L. Barnabei, *I culti di Pompei. Raccolta critica della documentazione*, in «*Contributi di Archeologia Vesuviana*», III, 2007, pp. 7-88.

Bartoli 1978 — M.T. Bartoli, *Orthografia, Ichnografia, scaenografia*, in «*Studi e documenti di architettura*», 8, 1978, pp. 197-208.

Bateson 1972 — G. Bateson, *Steps to an ecology of mind*, San Francisco 1972.

Bateson 1979 — G. Bateson, *Mind and nature. A necessary unit*, New York 1979.

Bayes 1763 — T. Bayes, *Essay Towards Solving a Problem in the Doctrine of Chances*, in « *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* », 53, 1763, pp. 470-518.

Bell 1973 — D. Bell, *The coming of post-industrial society: a venture in social forecasting*, New York 1973.

Beltrami 1885 — L. Beltrami, *Il castello di Milano. Castrum Portae Jovis. Sotto il dominio dei Visconti e degli Sforza*, Milano 1885.

Benedetti-Gaiani-Remondino 2010 — B. Benedetti, M. Gaiani, F. Remondino, *Modelli digitali 3D in archeologia: il caso di Pompei*, Pisa 2010.

Bettagno 1978 — A. Bettagno, *Piranesi: incisioni, rami, legature, architetture*, Vicenza 1978.

Bianchini 2008 — M. Bianchini, *Manuale di rilievo e documentazione digitale in archeologia*, Roma 2008.

Bielfeldt 2007 — R. Bielfeldt, *Der Liber-Tempel in Pompeji in Sant'Abbondio. Oskisches Vorstadtheiligtum und kaiserzeitliches Kultlokal*, in «*Mitteilungen des Deutschen Archäologischen Instituts- Römische Abteilung*», 113, 2007, pp. 317-371.

Boehler-Marbs 2004 — W. Boehler, A. Marbs, *3D scanning and Photgrammetry for Heritage Recording: a comparison*, in «*Proceedings of the 12th International Conference on Geoinformatics*», 2004, pp. 291-298.

Boehler-Vicent-Marbs 2003 — W. Boehler, M. Vicent, A. Marbs, *Investigating laser scanner accuracy*, in «*Proc. CIPA XIXth Int. Symposium*», 34, 2003.

Booc -Rumbaugh-Jacobson 1998 — G. Booch, J. Rumbaugh, I. Jacobson, *The Unified Modeling Language User Guide*, Boston 1998.

Booch-Rumbaugh-Jacobson 1999 — G. Booch, J. Rumbaugh, I. Jacobson, *The Unified Modeling Language Reference Manual*, Boston 1999.

Borrough 1986 — P.A. Borrough, *Principles of geographical information systems for land resources assessment*, in «*Journal of Quaternary Science*», 1986, pp. 108-330.

Breymann 1885 — G. A. Breymann, *Costruzioni in pietra e strutture murali*, Milano 1885.

Brogiolo 1988 — G. P. Brogiolo, *Archeologia dell'edilizia storica*, Como 1988.

Brogiolo-Cagnana 2012 — G. P. Brogiolo, A. Cagnana (a cura di), *Archeologia dell'architettura. Metodi e interpretazioni*, Firenze 2012.

Buscemi 2003 — F. Buscemi, *Sebastiano Ittar architetto di Lord Elgin*, in «Il Disegno di Architettura», 27, 2007 pp. 3-9.

Buscemi 2006 — F. Buscemi, *"Plan d'Atènes avec ses monuments restaurés". Un inedito di Sebastiano Ittar*, in «ASAtene» 84, III, 6.I, pp. 63-90.

Buscemi 2008 — F. Buscemi, *L'Atene antica di Sebastiano Ittar. Un architetto di Lord Elgin tra Sicilia, Malta e Grecia*, Palermo 2008.

Buscemi 2010 — F. Buscemi (a cura di), *Cogitata tradere posteris. Figurazioni dell'architettura nell'Ottocento*, Acireale-Roma 2010.

Cairoli Giuliani 2008 — F. Cairoli Giuliani, *Prefazione al Manuale di rilievo e documentazione digitale in archeologia*, in Bianchini 2008, pp. 9-12.

Calabrese 1985 — O. Calabrese, *Il linguaggio dell'arte*, Milano 1985.

Calvino 1985 — I. Calvino, *Lezioni americane. Sei proposte per il prossimo millennio*, Milano 1985.

Camagni-Nikolassy 2014 — P. Camagni, R. Nikolassy, *Creare database relazionali con SQL e PHP*, Milano 2014.

Campbell 2014 — V.L. Campbell, *The Tombs of Pompeii: Organization, Space, and Society*, New York 2014.

Carandini 1979 — A. Carandini, *Archeologia e cultura materiale. Dai lavori senza gloria nell'antichità a una politica dei beni culturali*, Bari 1979.

Carandini 2017 — A. Carandini, *La forza del contesto*, Milano 2017.

Carettoni *et alii* 1960 — G. Carettoni, A. M. Colini, L. Cozza, G. Gatti, *La pianta marmorea di Roma antica*, Roma 1960.

Cesariano 1521 — C. Cesariano, *Di Lucio Vitruvio Pollione de Architettura Libri Dece traducti de latino in vulgare...*, Como 1521.

Ceserani 1996 — R. Ceserani, *Il fantastico*, Bologna 1996.

Clark 1972 — D.L. Clark, *Models in Archaeology*, Londra 1972.

Codd 1970 — E.F. Codd, *A relational model of data for large shared data banks*, in «*Communications of the ACM*», 13 (6), 1970, pp. 377-387.

Codd 1972 — E.F. Codd, *Further normalization of the data base relational model*, in *Database systems*, New Jersey 1972, pp. 33-64.

Coons 1977 — S.A. Coons, *Modification of shape piecewise curves*, in «*Computer-Aided Design*», 9, 3, 1977, pp. 178-180.

Coons 1978 — S.A. Coons, *Constrained least-squares*, in «*Computers & Graphics*», 3, 1, 1978, pp. 43-47.

Coppola 2015 — A. Coppola, *Blender. La guida definitiva. Volume 1*, Bologna,2015.

Costamagna 2012 — E. Costamagna, *GIS 3D: studio e applicazione alla documentazione dei beni culturali*, Politecnico di Torino, 2012.

Cundari 2006 — C. Cundari, *Il Disegno. Ragioni, fondamenti, applicazioni*, Roma 2006.

D'Alessio 2009 — M.T. D'Alessio, *I culti a Pompei. Divinità, luoghi e frequentatori (VI secolo a.C.-79 d.C.)*, Roma 2009.

D'Ambrosio 1984 — A. D'Ambrosio, *La stipe votiva in località Bottaro*, Napoli, 1984.

D'Ambrosio 1994 — A. D'Ambrosio, *Pompei-Suburbio. Scavo nell'ex Fondo Iozzino*, in «*Rivista di studi pompeiani*», 6, 1994, pp. 20-21.

D'Ambrosio-De Caro 1983 — A. D'Ambrosio, S. De Caro, *La necropoli di Porta Nocera*, in L. Vlad Borrelli, A. D'Ambrosio, S. De Caro (ed.), *Un Impegno per Pompei. Studi e contributi. Fotopiano e documentazione della necropoli di Porta Nocera*, Milano 1983.

D'Ambrosio-De Caro 1987 — A. D'Ambrosio, S. De Caro, *La necropoli di Porta Nocera. Campagna di scavo 1983*, in H. Von Hesberg, P. Zanker (ed.), *Römische Gräberstraßen: Selbstdarstellung, Status, Standard (Kolloquium in München vom 28. bis 30. Oktober 1985)*, München 1987, pp. 199-228.

D'Andrea 2001 — A. D'Andrea, *Discretizzazione e modello dati nei sistemi GIS*, in «*Archeologia e calcolatori*», 12, 2001, pp. 337-342.

D'Andrea 2004 — A. D'Andrea, *L'entropia dell'archeologia computazionale. Ovvero dall'ordine al disordine*, in « *Archeologia e calcolatori* », 15, 2004, pp. 219-238.

D'Andrea 2006 — A. D'Andrea, *Documentazione archeologica, standard e trattamento informatico*, Budapest 2006.

Damisch 1992 — H. Damisch, *L'origine della prospettiva*, Napoli 1992.

Dato, Pagnano 1995 — G. Dato, G. Pagnano, *Stefano Ittar: un architetto polacco a Catania*, in «Lembasi», I, 1, 1995, pp. 85-104.

De Bon-Pianetti-Modrzewska 2010 — S. De Bon, F. Pianetti, I. Modrzewska, Alessio De Bon. *Un topografo non accademico*, in F. Buscemi (a cura di), *Cogitata tradere posteris. Figurazioni dell'architettura nell'Ottocento*, Acireale-Roma 2010 pp. 147-156.

De Caprariis 2017 — F. De Capraris, *Nolli & Co.: La scala della pianta marmorea severiana*, in «Papers of the British School at Rome», pp. 1-27. doi:10.1017/S0068246217000368.

De Caro 1991 — S. De Caro, *La città sannitica. Urbanistica e architettura*, in F. Zevi (ed.), *Pompei I*, Napoli 1991, pp. 23-46.

De Cernival 1964 — J. De Cenival, *Architettura egiziana. Epoca faraonica*, Milano 1964.

Della Corte 1911 — M. Della Corte, *Di un sepolcreto della necropoli sannitica di Pompei, scoperto presso la Porta Stabiana.*, in « *Notizie scavi di Antichità* », VIII, 1911, pp. 106-111.

Della Corte 1916 — M. Della Corte, *sannilico-romana, scoperta fuori la Porta di Stabia.*, in «*Notizie scavi di Antichità*», XIII, 1916, pp. 288-309.

Della Corte 1958 — M. Della Corte, *Iscrizioni scoperte nel quinquennio 1951-1956*, in «*Notizie scavi di Antichità*», VIII,12, 1958, pp. 77-184.

Della Corte 1970 — M. Della Corte, *Corpus Iscriptionum Latinarum, IV, Supplementi III, 4*, Berlino 1970.

De Rosa 2000 — A. De Rosa, *Dall'Antichità al Medioevo,* in A. De Rosa, A. Sgrosso, A. Giordano, *La Geometria nell'Immagine. Storia dei metodi di rappresentazione*, vol. I, Torino 2000.

De Rosa-Sgrosso-Giordano 2000-2001 — A. De Rosa, A. Sgrosso, A. Giordano, *La Geometria nell'Immagine. Storia dei metodi di rappresentazione*, vol. I-III, Torino, 2000 (I), 2001(II-III).

De Rubertis 1994 — R. De Rubertis, *Il disegno dell'architettura*, Roma 1994.

De Rubertis 2007 — R. De Rubertis, *In elogio della rappresentazione*, in «*Ikhnos. Analisi grafica e storia della rappresentazione*», 2007, pp. 11-22.

De Saussurre 1967 — F. De Saussurre, *Corso di linguistica generale*, Bari 1967.

Docci 1994 — M. Docci, *Manuale del rilevamento architettonico e urbano*, Bari 1994.

Docci 1997 — M. Docci (a cura di), *Il Disegno di progetto dalle origini al XVIII secolo*, Atti del Convegno, Roma 22/24 aprile 1993, Roma 1997.

Docci, Maestri 1990 — M. Docci, D. Maestri, *Il rilevamento architettonico. Storia, metodi e disegno*, Roma-Bari 1990.

Dodds 2009 — E.R. Dodds, *I greci e l'irrazionale*, Milano 2009.

Doglioni 1997 — F. Doglioni, *Stratigrafia e restauro. Tra conoscenza e conservazione dell'architettura*, Trieste 1997.

Dotto 2010 — E. Dotto, Lo strumentario tecnico per il rilevamento: le acquisizioni del primo Ottocento, in F. Buscemi (a cura di), *Cogitata tradere posteris. Figurazioni dell'architettura nell'Ottocento*, Acireale-Roma 2010, pp. 113-134.

Ducker 1979 — K.J. Ducker, *Land resource information systems: Spatial and attribute resolution issues*, in R.T. Aangeenbrug (ed.), *Proceedings of AVTO-CARTO IV*, 1979, pp. 328-336.

Durlach-Mavor 1995 — N.I. Durlach, A.S. Mavor, *Virtual Reality: Scientific and Technological Challenges*, Washington DC 1995.

Eco 1975 — U. Eco, *Trattato di semiotica generale*, Milano 1975.

Eco 1997 — U. Eco, *Kant e l'ornitorico*, Milano 1997.

Emmerson 2010 — A.L.C. Emmerson, *Reconstructing the Funerary Landscape at Pompeii's Porta Stabia*, in «*Rivista di studi pompeiani*», 21, 2010, pp. 77-86.

Erlander-Branderburg *et alii* 1987 — A. Erlande-Branderburg, R. Pernoud, J. Gimpel, R. Bechmann, *Villard de Honnecourt. Disegni*, Milano 1987.

Federle 2010 — G. Federle, *Matita e mouse. Il disegno nell'era digitale*, in «*TD - Tecnologie didattiche*», 2010, pp. 12-19.

Fichera *et alii* 2012 — M.G. Fichera, M.L. Mancinelli, M. D'Aristotile, S. Frasca, *Sistema Informativo Grande Progetto Pompei. Allegato Tecnico*, 2012.

Fichera-Malnati-Mancinelli 2015 — M.G. Fichera, L. Malnati, M.L. Mancinelli, *Grande progetto Pompei: la direzione generale per le antichità e il piano della conoscenza*, in «*Archeologia e calcolatori*», Suppl. 7, 2015, pp. 25-31.

Fiorelli 1850 — G. Fiorelli, *Giornale degli Scavi di Pompei 1*, Napoli 1850.

Fiorelli 1860 — G. Fiorelli, *Pompei Antiquitatum Historia. Volume I*, Napoli 1860.

Fiorelli 1881 — G. Fiorelli, *Scavi*, in «*Notizie scavi di Antichità*», 1881.

Flannery 1976 — K. V Flannery, *The Early MesoAmerican Village*, London & New York 1976.

Forte 2002 — M. Forte, *I Sistemi Informativi Geografici in Archeologia*, Roma 2002.

Forte 2003 — M. Forte, *Mindscape: ecological thinking, cyber-anthropology and virtual archaeological landscapes*, in M. Forte, P.R. Williams (ed.), *The Reconstruction of Archaeological Landscapes through Digital Technologies. Proceedings of the 1st Italy- United States Workshop (Boston, Massachussets 2001)*, BAR Intern, Oxford 2003, pp. 95-108.

Forte 2004a — M. Forte, *Cibernetica e beni culturali: il problema della cornice*, in *IX Convegno dell'Associazione Italiana Intelligenza Artificiale*, Perugia, 2004, pp. 1-21.

Forte 2004b — M. Forte, *Realtà virtuale, beni culturali e cibernetica: un approccio ecosistemico*, in «*Archeologia e calcolatori*», 15, 2004, pp. 423-448.

Forte 2006 — M. Forte, *Tra conoscenza e comunicazione in archeologia: considerazioni in margine alla terza dimensione*, in S. Campana, R. Francovich (ed.), *Laser scanner e GPS. Paesaggi archeologici e tecnologie digitali 1*, Firenze 2006, pp. 23-40.

Forte-Beltrami 2000 — M. Forte, R. Beltrami, *A proposito di Virtual Archaeology: disordini, interazioni cognitive e virtualità*, in «*Archeologia e calcolatori*», 11, 2000, pp. 273-300.

Frazer 2009 — J.G. Frazer, *Il ramo d'oro*, Torino 2009.

Gabellone 2010 — F. Gabellone, *Modellazioni 3D e ricostruzioni virtuali: esemplificazioni su monumenti e manufatti*, in F. D'Andria, D. Malfitana, N. Masimi, G. Scardozzi (ed.), *Il dialogo dei saperi. Metodologie integrate per i beni culturali*, Napoli 2010, pp. 495-516.

García y García 2006 — L. García y García, *Danni di guerra a Pompei. Una dolorosa vicenda quasi dimenticata*, Roma 2006.

Gardin 1955 — Gardin, *Problèmes de documentation*, in «*Diogène*», 11, 1955, pp. 107-124.

Giannichedda 2002 — E. Giannichedda, *Archeologia teorica*, Roma 2002.

Giocondo 1511 — G. Giocondo, *M. Vitruvius per Iocundum solito castigatior factus cum figuris et tabula ut iam legi et intelligi possit*, Venezia 1511.

Giorda 2000 — C. Giorda, *Cybergeografia. Estensione, rappresentazione e percezione dello spazio nell'epoca dell'informazione*, Torino 2000.

Gioseffi 1957 — D. Gioseffi, *Perspectiva artificialis. Per la storia della prospettiva. Spigolature e appunti*, in «*Università degli Studi di Trieste, Instituto di Storia dell'Arte Antica e Moderna*», 7, 1957, pp. 145-157.

Gioseffi 1980 — D. Gioseffi, *Prospettiva e semiologia*, in M. Dalai Emiliani (ed.), *La prospettiva rinascimentale: codificazioni e trasgressioni*, Firenze 1980.

Gladkih-Kornietz-Soffer 1985 — M. I. Gladkih, N. L. Kornietz, O. Soffer, *Abitazioni di ossa di Mammut nella pianura russa*, in «Le Scienze», 197, pp. 82-89.

Glazer 2000 — M. Glazer, *Art is work*, Milano 2000.

Goldthwaite 1980 — R.A. Goldthwaite, *La costruzione della Firenze rinascimentale. Una storia economico e sociale*, Bologna 1980.

Gringeri pantano 1995 — F. Gringeri Pantano (a cura di), *Avola, Cava Grande e Vendicari nel Voyage in Sicilia di Jean Hoüel*. 1776-79, Siracusa 1995.

Gringeri Pantano 1999 — F. Gringeri Pantano (a cura di), *Jean Hoüel e la sicilia. Gli iblei nel voyage pittoresque. 1776-1779*, Palermo 1999.

Gringeri Pantano 2006 — F. Gringeri Pantano, *Siracusa e gli iblei nel voyage di Jean Hoüel*, in *Annali del barocco in Sicilia. Siracusa antica e moderna. Il val di Noto nella cultura di viaggio*, Roma 2006, pp. 65-82.

Guidi 2014 — G. Guidi, *Terrestrial optical active sensors – theory & applications*, in F. Remondino, S. Campana (ed.), *3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage. Theory and best practices*, BAR-InteOxford, 2014, pp. 39-64.

Guidi-Russo-Beraldin 2010 — G. Guidi, M. Russo, J.-A. Beraldin, *Acquisizione 3D e modellazione poligonale*, Milano 2010.

Gurdazzoli-Forte 1992 — A. Gurdazzoli, M. Forte, *Archeologia e tecniche di eidologia informatica*, in « *Archeologia e calcolatori* », III, 1992, pp. 37-76.

Guzzo 2007 — P.G. Guzzo, *Pompei. Storia e paesaggi della città antica*, Milano 2007.

Harris 1983 — E. C. Harris, *Principi di stratigrafia archeologica*, Roma 1983.

Higgs 1972 — E.S. Higgs, *Papers in Economic Prehistory*, Cambridge 1972.

Higgs 1975 — E.S. Higgs, *No Title*, Cambridge 1975.

Hurst *et alii* 1989 — J. Hurst, M. S. Mhoney, N. H. Taylor, D. T. Ross, R. M. Fano, *Retrospectives I: the early years in computer graphics at MIT, Lincoln Lab, and Harvard*, in «*ACM SIGGRAPH Computer Graphics*», 23, 1989, pp. 19-38.

Ingensand 2006 — H. Ingensand, *Metrological aspects in terrestrial laser-scanning technology*, in «*Proceedings of the 3rd IAG/12th FIG symposium, Baden, Austria*», 2224, 2006.

ISO/IEC 2007 — ISO/IEC, ISO/IEC Guide 99 International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology, 2007.

Jordan 1874 — H. Jordan, *Forma Urbis regionum XIV*, Roma 1874.

Kant 1781 — I. Kant, *Kritik der reinen Vernunft*, 1re (ed.), Riga 1781.

Kavakli - Gero 2001 — M. Kavakli, J.S. Gero, *Sketching as mental imagery processing*, in « *Design Studies* », 22, 4, 2001, pp. 347-364.

Kockel 1985 — V. Kockel, *Funde und Forschungen in den Vesuvstädten I*, in «*Archäologischer Anzeiger*», 1985.

Koldewey-Puchstein 1899 — R. Koldewey - O.Puchstein, *Die griechischen Tempel in Unteritalien und Sicilien*, Berlino 1899.

Korzybski 1941 — A. Korzybski, *Science and Sanity*, New York 1941.

Levy 1997 — P. Levy, *Il virtuale*, Milano 1997.

Limoncelli 2012 — M. Limoncelli, *Il restauro virtuale*, Bologna 2012.

Longo 1998 — G. Longo, *Il nuovo Golem. Come il computer cambia la nostra cultura*, Milano 1998.

Ludovico 1991 — A. Ludovico, *Rilevamento architettonico e topografico – Metodi e strumenti nei secoli XVIII e XIX*, Roma 1991.

Machlup 1962 — F. Machlup, *The Production and Distribution of Knowledge in the United States*, Princeton 1962.

Maiuri 1951 — A. Maiuri, *Gli scavi di Pompei nel programma delle opere della Cassa per il Mezzogiorno*, Napoli 1951.

Maiuri 1956 — A. Maiuri, *Pompei*, Roma 1956.

Maiuri 1993 — A. Maiuri, *Mestiere di archeologo*, Milano 1993.

Maldonado 1987 — T. Maldonado, *Il futuro della modernità*, Milano 1987.

Maldonado 1992 — T. Maldonado, *Reale e virtuale*, Milano 1992.

Malfitana *et alii* 2017 — D. Malfitana, G. Amara, S. Barone, G. Fragalà, D.P. Pavone, *La comunicazione ai tempi del grande plastico di Pompei. Dal modello in sughero al modello digitale*, in S. Pallecchi (ed.), *Raccontare l'archeologia. Strategie e tecniche per la comunicazione dei risultati delle ricerche archeologiche*, Firenze 2017, pp. 115-124.

Malfitana *et alii* 2018a — D. Malfitana, G. Leucci, A. Mazzaglia, G. Cacciaguerra, L. De Giorgi, S. Barone, G. Fragalà, D. Pavone, S. Russo, *Archaeo-Geophysics Surveys in Pompeii*, in «*Surveys in Geophysics*», 2018.

Malfitana *et alii* 2018b	D. Malfitana, G. Leucci, A. Mazzaglia, G. Cacciaguerra, L. De Giorgi, S. Barone, G. Fragalà, D.P. Pavone, S. Russo, *Multidisciplinare study for preservation of the Porta Nocera necropolis in Pompeii*, in «*Internationa Journal of conservation science*», 2018.
Manacorda 2002	D. Manacorda, *Il mondo dell'archeologia*, Roma 2002.
Manacorda 2003	D. Manacorda, *Prefazione al Manuale di rilievo archeologico*, in Medri 2003, pp. V-VI.
Mandolesi 2009	L. Mandolesi, *Pyarchinit – Python – Qgis e PostgresSQL per la gestione dei dati di scavo*, in «*Archeologia e calcolatori*», Supplement, 2009, pp. 209-222.
Mandolesi-Cocca 2013	L. Mandolesi, E. Cocca, *Pyarchinit gli sviluppi dopo ArcheoFoss 2009*, in «*Archeologia e calcolatori*», Supplement, 2013, pp. 128-138.
Mannoni-Cabona-Ferrando 1988	T. Mannoni, D. Cabona, I. Ferrando, *Archeologia globale del territorio. Metodi e risultati di una nuova strategia della ricerca in Liguria*, in G. Noyé (ed.), *Structures de l'habitat et occupation du sol dans le pays mediterraneens: les methodes et l'apport de l'archeologie extensive (Paris 1984)*, 1988, pp. 43-58.
Mannoni-Giannichedda 1996	T. Mannoni, E. Giannichedda, *Archeologia della produzione*, Torino 1996.
Manyika *et alii* 2011	J. Manyika, M. Chui, B. Brown, J. Bughin, R. Dobbs, C. Roxburgh, A.H. Byers, *Big data: The next frontier for innovation, competition, and productivity*, 2011.
Manzini 1989a	E. Manzini, *Superfici comunicative. Dal sistema degli oggetti alla scena interattiva globale*, in « *Quaderni DI* », 8, 1989, pp. 19-26.
Manzini 1989b	E. Manzini, *Artefatti. Verso una nuova ecologia dell'ambiente artificiale*, Milano 1989.
Marble 1990	D.F. Marble, *Geographic information systems: an overview*, in D.J. Peuquet, D.F. Marble (ed.), *Introductory Readings In Geographic Information Systems*, London-New York-Philadelphia 1990, pp. 4-14.
Marino 1990	L. Marino, *Il rilievo per il restauro*, Milano 1990.
Matthaei *et alii* 2016	A. Matthaei, A. Anguissola, R. Kilian, M. Martelli Castaldi, S. Saba, E. Emmerling, D. Malfitana, A. Mazzaglia, G. Leucci, G. Fragalà, L. De Giorgi, D.P. Pavone, S. Barone, Samuele Russo, *Pompeii Sustainable Preservation Project: i lavori del 2015 e il futuro del progetto*, in «*FastiOnLine*», 2016.
Mau 1888	A. Mau, *Scavi di Pompei. Sepolcri della Via Nucerina*, in «*Mitteilungen des Kaiserlichen Deutschen Archaologischen Instituts - Romische Abteitung*», 1888, pp. 120-138.

Mazzaglia 2016 — A. Mazzaglia, *GIS e archeologia. Nuovi strumenti per vecchi problemi*, in D. Malfitana, G. Cacciaguerra, A. Mazzaglia (ed.), *Catania. Archeologia e città. Il progetto OpenCiTy. Banca dati, GIS e WebGIS*, Catania, 2016, pp. 269-275.

Medri 2003 — L. Medri, *Manuale di rilievo archeologico*, Bari 2003.

Meier 1886 — H. Meier, *Aufdeckung von Gräbern in Pompeji*, in «*Centralblatt der Bauverwaltung*», VI, 46, 1886, pp. 451-452.

Migliari-Docci 1997 — R.M.R. Migliari, M. Docci, *Disegno architettonico antico e medievale*, in «*Storia del Disegno*», Torino 1997, pp. 23-32.

Moles 1972 — A. Moles, *Teoria informazionale dello schema*, in «*Versus*», 2, 1972, pp. 29-37.

Moles 1981 — A. Moles, *L'image: communication fonctionnelle*, Casterman, Bruxelles 1981.

Morris 1988 — C.W. Morris, *Segni e valori. Significazione e significatività e altri scritti di semiotica, etica ed estetica*, Bari 1988.

Morris 1999 — C.W. Morris, *Lineamenti di una teoria dei segni*, Lecce 1999.

Negroponte 1999 — N. Negroponte, *Essere digitali*, Milano 1999.

Negrotti 1990 — M. Negrotti, *Per una teoria dell'artificiale: tra natura, cultura e tecnologia*, Milano 1990.

Negrotti 1997 — M. Negrotti, *La terza realtà : introduzione alla teoria dell'artificiale*, Bari 1997.

Nietzsche 2009 — F. Nietzsche, *L'origine della tragedia*, Torino 2009.

Noti 2014 — V. Noti, *GIS Open Source per geologia e ambiente*, Palermo 2014.

Orsi 1898 — P. Orsi, *Le necropoli di Licodia Eubea ed i vasi geometrici del quarto periodo siculo*, in «Mittheilungen des Kaiserlich Deutschen Archaeologischen Instituts. Roemische Abtheilungen», 13, pp. 305-66.

Osanna-Pellegrino 2017 — M. Osanna, C. Pellegrino, *Nuove ricerche nel santuario extra-urbano di Fondo Iozzino a Pompei*, in E. Govi (ed.), *La città etrusca e il sacro Santuari e istituzioni politiche*, Bologna 2017, pp. 373-395.

Pane 1980 — R. Pane, *Paestum nelle acqueforti di Piranesi*, Milano 1980.

Paolini 2010 — P. Paolini, *Per una storia del disegno di rilievo archeologico*, in «*Ikhnos. Annale di analisi grafica e storia della rappresentazione*», Siracusa 2010, pp. 69-92.

Panofsky 1927 — E. Panofsky, *Die Perspektive als «symbolische form»*, in F. Saxl (ed.), *Vortrage der Bibliothek Warburg 1924-1925*, Leipzig-Berlin, 1927.

Panofsky 1961 — E. Panofsky, *La prospettiva come «forma simbolica» e altri scritti*, Milano 1961.

Peirce 1960	C.S. Peirce, *Collected papers*, Cambridge 1960.
Pennacchioni 2004	M. Pennacchioni, *Metodologie e tecniche del disegno archeologico. Manuale per il disegno dei reperti archeologici*, Firenze 2004.
Pensando-Guidobaldi 2006	F. Pensando, M.P. Guidobaldi, *Pompei, Oplontis, Ercolano, Stabiae*, Roma-Bari 2006.
Pesaresi 2013	P. Pesaresi, *The Herculaneum Conservation Project's programmed maintenance cycles for the archaeological site of Herculaneum*, in M. Boriani, R. Bagaglio, D. Gullotta (ed.), *Built Heritage 2013 Monitoring Conservation Management. Milan, Italy 18-20 November 2013.*, Milano 2013, p. 184-193.
Pierluisi 2004	G. Pierluisi, *"Piramidi" o il disegno come trasformazione del visibile*, in R. Migliari (a cura di), *Disegno come modello*, Roma 2004 pp. 28-38.
Prensky 2001a	M. Prensky, *Digital natives, digital immigrants, part II: Do they really think differently?*, in «*On the Horizon*», 9, 6, 2001, pp. 1-6.
Prensky 2001b	M. Prensky, *Digital Natives, Digital Immigrants Part I*, in «*On the Horizon*», 9, 5, 2001, pp. 1-6.
Prensky 2009	M. Prensky, *H. Sapiens Digital: From Digital Immigrants and Digital Natives to Digital Wisdom*, in «I*nnovate: Journal of Online Education*», 5, 3, 2009, p. Article 1.
Prown 1982	J.D. Prown, *Mind in Matter: An Introduction to Material Culture Theory and Method*, in «*Winterthur Portfolio*», 17, 1, 1982, pp. 1-19.
Pugliese Caratelli-Elia 1975	G. Pugliese Caratelli, O. Elia, *Il santuario dionisiaco di S. Abbondio a Pompei*, in *ans Orfismo in Magna Grecia. Atti del XIV convegno di studi sulla Magna Grecia (1974)*, Napoli 1975, pp. 139-154.
Redmond - Smith 1980	K.C. Redmond, T.M. Smith, *Project Whirlwind: The History of a Pioneer Computer*, Bedford (MA) 1980.
Remondino - Vettore - Guarnieri 2005	F. Remondino, A. Vettore, A. Guarnieri, *3D modeling of Close-Range Objects: Photogrammetry or Laser Scanning*, in «*Proceedings of SPIE -IS&IT The International Society for Optical Engineering. Electronic Imaging:videometrics VIII*», 2005, pp. 216-225.
Renfrew - Bahn 1995	C. Renfrew, P. Bahn, *Archeologia. Teoria. Metodi. Pratica*, Milano 1995.
Renfrew - Bahn 2005	C. Renfrew, P. Bahn, *Archaeology. The key concepts*, London & New York 2005.
Ricci 1996	A. Ricci, *I mali dell'abbondanza. Considerazioni impolitiche sui beni culturali*, Roma 1996.

Riegle 1893 — A. Riegle, *Stilfragen: Grundlegungen zu einer Geschichte der Ornamentik,* Berlin, 1893. Traduzione italiana: A. Riegle, P*roblemi di stile: fondamenti di una storia dell'arte ornamentale*, Milano 1963.

Rocchi 1982 — G. Rocchi, *La Basilica di San Francesco ad Assisi*, Firenze 1982.

Rocchi 1990 — G. Rocchi, *Introduzione*, in L. Marino, *Il rilievo per il restauro*, Milano 1990.

Rodriguez-Almeida 2002 — E. Rodríguez-Almeida, *Formae Urbis Antiquae*, Collection de l'École française de Rome, 305, Roma 2002.

Rogers 2001 — D.F. Rogers, *An introduction to NURBS with historical perspective*, San Francisco 2001.

Rossi Pinelli 2003 — O. Rossi Pinelli, *Piranesi*, in «Art dossier», n. 186, 2003.

Ruskin 1849 — J. Ruskin, *The seven laps of Architecture*, New York, 1849. Traduzione italiana: J. Ruskin, *Le Sette lampade dell'architettura*, Milano 1982.

Ruskin 1851-1853 — J. Ruskin, *The stones of Venice,* Vol.I-III, London, 1851 (I), 1853 (II-III).

Sacripanti 1953 — M. Sacripanti, *Il disegno puro e il disegno dell'Architettura*, Roma 1953.

Sampaolo 2018 — F. Sampaolo, *Inquadramento topografico della nuova cartografia informatizzata georiferita pompeiana: progetto e realizzazione*, in R. Morichi, R. Paone, F. Sampaolo (ed.), *Pompei. Nuova cartografia informatizzata georiferita*, Roma 2018, pp. 113-121.

Scollar 1999 — I. Scollar, *25 years of Computer Applications in Archaeology*, in M.L. Dingwall, S. Exon, V. GAFFNEY, S. LAFLIN, M. VAN LEUSEN (ed.), *Archaeology in the Age of the Internet, Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*, Oxford 1999, pp. 5-10.

Shanks-Tilley 1987 — M. Shanks, C. Tilley, *Re-constructing Archaeology*, Cambridge 1987.

Sigmund 1978 — F. Sigmund, *Introduzione alla psicanalisi*, Torino 1978.

Sogliano 1886 — A. Sogliano, *Pompei*, in «*Notizie scavi di Antichità*», 1886, p. 334-337.

Sogliano 1887 — A. Sogliano, *Pompei*, in «*Notizie scavi di Antichità*», 1887, pp. 33-40; 452-458.

Soprano 1961 — P. Soprano, *Via Nucerina. Sepolcri di età romana*, in «*Notizie scavi di Antichità*», 1961, pp. 189-200.

Stefani 1998 — G. Stefani, *Necropoli di Porta Nola - Necropoli di Porta Nocera*, in P.G. Guzzo (ed.), *Pompei oltre la vita. Nuove testimoninanze dalle necropoli. Catalogo della mostra.*, Napoli, 1998, pp. 37-42, 63-70.

Sutherland 1963 — I.E. Sutherland, *Sketchpad: A man-machine graphical communication system*, Massachusetts Institute of Technology, 1963.

Suwa-Purcell-Gero 1998 — M. Suwa, T. Purcell, J. Gero, *Macroscopic analysis of design processes based on a scheme for coding designers' cognitive actions*, in « Design Studies », 19, 4, 1998, pp. 455-483.

Szemethy 2010 — H. Szemethy, *From Samotrace to Spalato/Split. The architectural drawings of ancient buildings and sites by George Newmann (1841-1912)*, in F. Buscemi (a cura di), *Cogitata tradere posteris. Figurazioni dell'architettura nell'Ottocento*, Acireale-Roma, 2010 pp. 87-112.

Tagliabue 1993 — R. Tagliabue, *Architetto e archeologo. Confronto fra campi disciplinari*, Milano 1993.

Tanasi 2010 — D. Tanasi, *Gli scavi di Monte San Paolillo e le presenze di tipo miceneo nel territorio di Catania*, in M. G. Branciforti, V. La Rosa (a cura di), *Tra lava e mare. Contributi all'archaiologhia di Catania*, Catania 2010, pp. 81-94.

Tani 2002 — C. Tani, *Villard De Honnecourt: divulgatore di cultura scinetifica? Ricerca di tracce di elementi di Euclide nel "Taccuino"*, in «*Heliopolis. Quadrimestrale dell'Istituto Politeia*», 1, 2002, pp. 107-123.

Thiessen 1911 — A.H. Thiessen, *Precipitation averages for large areas*, in « *Monthly Weather Review* », 39, 1911, pp. 1982-1084.

Thompson 2007 — J. Thompson, *Engagement in public-private partnership in cultural heritage: the case of Herculaneum, Italy.*, in ICCROM (ed.), *Proceedings of the International Forum on Privatisation and Cultural Heritage, Catania, 13 - 15 September (2007)*, Roma 2007, pp. 120-134.

Thompson-D'Andrea 2009 — J. Thompson, A. D'Andrea, *Gestione di un progetto interdisciplinare in un sito archeologico complesso*, in A. Coralini (ed.), *Vesuviana. Archeologie a confronto. Atti del Convegno Internazionale (Bologna, 14-16 gennaio 2008).*, Bologna 2009, pp. 237-251.

Unali 1996 — M. Unali, *Il disegno per il progetto dell'architettura*, Roma 1996.

Valkenburg-Mc Ivor 1996 — R.J. Valkenburg, A.M. Mc Ivor, *Accurate 3D measurement using a structured Light system*, 1996.

Van Andringa 2009 — W. Van Andringa, *Quotidien des dieux et des hommes: la vie religieuse dans les cités du Vésuve à l'époque romaine*, Roma 2009.

Van Andringa 2013 — W. Van Andringa, *Archéologie et religion : le sanctuaire dionysiaque de S. Abbondio à Pompéi*, in «*Mélanges de L'Ecole Française de Rome*», 25-1, 2013.

Verstijnen *et alii* 1998 — I.M. Verstijnen, C. van Leeuwen, G. Goldschmidt, R. Hamel, J.M. Hennessey, *Creative discovery in imagery and perception: Combining is relatively easy, restructuring takes a sketch*, in «*Acta Psychologica*», 99, 2, 1998, pp. 177-200.

Vetter 1953	E. Vetter, *Handbuck der italischen Dialekte. I, Oskische Inschriften*, Heidelberg 1953.
Viollet Le Duc 1868	E.E. Viollet Le Duc, *Dictionnaire Raisonné de L'Architecture Française du XIe au XVIe siècle*, Paris 1868.
Vita-Finzi-Higgs 1970	C. Vita-Finzi, E.S. Higgs, *Prehistoric Economy in the Mount Carmel Area of Palestine: Site Catchment Analysis*, in «*Proceedings of the Prehistoric Society*», 36, 1970, pp. 1-37.
Volpe 2008	G. Volpe, *Per un'archeologia globale dei paesaggi della Daunia. Tra archeologia, metodologia e politica dei beni culturali*, in G. Volpe (ed.), *Storia e archeologia della Daunia. In ricordo di Marina Mazzei. Atti delle giornate di studio (Foggia 19-21 maggio 2005)*, Bari 2008, pp. 447-462.
Volpe 2015	G. Volpe, *Storia, archeologia e globalità*, in G. Volpe (ed.), *Storia e archeologia globale - 1*, Bari 2015, pp. 5-8.
Voronoi 1908	G. Voronoi, *Nouvelles applications des paramètres continus à la théorie des formes quadratiques. Deuxième mémoire. Recherches sur les paralléllòedres primitifs.*, in «*Journal für die reine und angewandte Mathematik*», 134, 1908, pp. 198-278.
Wallace-Hadrill 2009	A. Wallace-Hadrill, *The Herculaneum Conservation Project: An introduction*, in A. Coralini (ed.), *Vesuviana. Archeologie a confronto. Atti del Convegno Internazionale (Bologna, 14-16 gennaio 2008)*, Bologna 2009, pp. 203-207.
Wallace-Hadrill *et alii* 2008	A. Wallace-Hadrill, M.P. Guidobaldi, D. Camardo, V. Moesch, *Le ricerche archeologiche nell'ambito dell'Herculaneum Conservation Project*, in P.G. Guzzo, M.P. Guidobaldi (ed.), *Nuove ricerche archeologiche nell'area vesuviana (Scavi 2003-2006). Atti del convegno internazionale, Roma 1-3 Febbraio 2007*, Roma 2008, pp. 409-424.
Zadeh 1965	L.A. Zadeh, *'Fuzzy Sets'*, in «*Information and control*», 8, 1965, pp. 338-353.

SITOGRAFIA

E. Ruggero, *Immagine C. Semiologia dell'immagine*, in F. Lever, P. C. Rivoltella, A. Zanacchi, *La comunicazione. Dizionario di scienze e tecniche*, www.lacomunicazione.it, consultato il 23 agosto 2018.