

Alma Mater Studiorum - Università di Bologna

DOTTORATO DI RICERCA

Scienze Geodetiche e Topografiche

Ciclo XXII

Settore scientifico disciplinare di afferenza: ICAR/06

Valorizzazione di cartografia storica
attraverso moderne tecniche geomatiche:
recupero metrico, elaborazione e
consultazione in ambiente digitale

Presentata da: **Giorgia Gatta**

Coordinatore Dottorato

Relatore

prof. Gabriele Bitelli

prof. Gabriele Bitelli

Esame finale anno 2010

PAROLE CHIAVE

CARTOGRAFIA STORICA

RECUPERO METRICO

GEOREFERENZIAZIONE

MODELLAZIONE TRIDIMENSIONALE

SISTEMI WEBGIS

alla mia micciotta

INDICE

PAROLE CHIAVE	3
INDICE	7
ABSTRACT	11
INTRODUZIONE	13
1. LA CARTOGRAFIA	17
1.1. STORIA DELLA CARTOGRAFIA	19
1.1.1. Dalla Terra alla carta	20
1.1.2. Le origini della cartografia	23
1.1.2.1. La cartografia nel mondo greco e romano	25
1.1.2.2. La cartografia nel mondo medievale	29
1.1.2.3. La rifioritura della cartografia	30
1.1.3. La cartografia moderna	37
1.1.3.1. La rappresentazione della città	38
1.1.3.2. Le cartografie ufficiali	40
1.1.4. Antichi strumenti di rilievo a fini cartografici	41
1.1.5. Moderni strumenti di rilievo a fini cartografici	48
1.1.5.1. La Fotogrammetria	50
1.2. LA CARTOGRAFIA STORICA	55
1.2.1. Il recupero della cartografia storica	56
1.2.2. Dal supporto analogico a quello digitale	59
1.2.3. Recupero di cartografia storica in ambiente digitale	62
1.2.4. Casi di studio	64
1.2.4.1. Carte del delta del Po	64
1.2.4.2. <i>Ichnoscenografia</i> di Bologna	78
1.2.4.3. La carta Monari-Laghi	86
1.2.4.4. Mappe catastali di Bologna	89

2. ACQUISIZIONE DI CARTOGRAFIA STORICA	99
2.1. SCANSIONE	103
2.1.1. Sistemi per digitalizzazione di carte di grande formato	103
2.1.1.1. Scanner piani	104
2.1.1.2. Dorsi digitali	108
2.1.2. Parametri di scansione	110
2.1.2.1. Controllo del colore	112
2.1.3. Casi esemplificativi	118
2.1.3.1. Acquisizione del Catasto Gregoriano	118
2.1.3.2. Acquisizione delle carte del delta del Po	123
2.2. RILIEVO FOTOGRAMMETRICO	125
2.2.1. Progetto del rilievo e acquisizione	126
2.2.1.1. Controllo del colore	127
2.2.2. Calibrazione della camera	130
2.2.3. Orientamento dei fotogrammi	130
2.2.4. DSM e ortofoto	131
2.2.5. Esempi da bibliografia	132
2.2.5.1. Soluzioni di raddrizzamento	132
2.2.5.2. Soluzioni 3D	133
2.3. RILIEVO CON LASER A SCANSIONE	135
2.3.1. Tipi di <i>Laser scanner</i>	136
2.3.2. Progetto del rilievo e acquisizione	137
2.3.3. Elaborazione dei dati	138
2.3.4. L'informazione RGB	139
2.3.5. Esempi da bibliografia	140
3. GEOREFERENZIAZIONE	143
3.1. GENERAZIONE DELLA CARTA GEOREFERENZIATA	147
3.1.1. Trasformazione geometrica	147
3.1.1.1. Trasformazioni globali	148
3.1.1.2. Trasformazioni locali	151
3.1.1.3. Analisi dei residui	154
3.1.2. Ricampionamento d'immagine	155
3.1.3. Mosaicatura	158
3.1.4. Casi esemplificativi	159
3.1.4.1. Georeferenziazione standard delle carte del delta del Po	160

3.1.4.2. Georeferenziazione delle carte di Bologna	164
3.2. ANALISI DELLE DEFORMAZIONI	171
3.2.1. L'analisi delle deformazioni con un software dedicato	172
3.2.1.1. Analisi delle deformazioni delle carte del delta del Po	174
3.2.1.2. Analisi delle deformazioni delle carte di Bologna	177
3.2.2. Visualizzazione dei residui della georeferenziazione	182
3.2.2.1. Grafico dei residui	183
3.2.2.2. Mappa dei residui	184
3.2.2.3. Modello tridimensionale dei residui	185
3.2.3. "Errori veri" vs. "errori di stima"	187
3.3. ANALISI COMPARATE TRA CARTOGRAFIE	189
3.3.1. Confronti tra cartografie	190
3.3.1.1. Sovrapposizioni	191
3.3.1.2. Sistemi per consultazione interattiva di carte	198
3.3.2. Referenziamenti "non standard"	199
3.3.2.1. Co-registrazione	200
3.3.2.2. Referenziamento "all'inverso"	204
3.3.2.3. Georeferenziazione a zone	206
3.3.2.4. Misure αD	213
4. ELABORAZIONE E GESTIONE DEL DATO IN AMBIENTE DIGITALE	219
4.1. VETTORIALIZZAZIONE	221
4.1.1. Vettorializzazione manuale	223
4.1.1.1. Esempio di applicazione ad una mappa catastale	224
4.1.2. Vettorializzazione automatica	226
4.1.2.1. Esempio di applicazione ad una mappa catastale	227
4.1.3. Vettorializzazione semiautomatica	231
4.2. MODELLAZIONE TRIDIMENSIONALE	233
4.2.1. Creazione del modello 3D	234
4.2.1.1. Elevazione in quota	235
4.2.1.2. Texturizzazione	236
4.2.1.3. Generazione del modello completo	237
4.2.2. Integrazione con dati recenti	238
4.2.3. Inserimento in archivi basati su Web	242
4.3. INSERIMENTO DELLA CARTA IN AMBIENTE GIS	245

4.3.1. Metadati e standard di catalogazione	247
4.3.1.1. Sezione GEN	250
4.3.1.2. Sezione BIB	250
4.3.1.3. Sezione STRU	251
4.3.1.4. Sezione IMG	251
4.3.1.5. Sezione OCR	254
4.3.1.6. Sezione DOC	254
4.3.1.7. Sezione DIS	255
4.3.1.8. Produzione di MAG	255
4.3.2. Formati di archiviazione del dato	256
4.3.3. Filigrana	259
4.3.3.1. <i>Visual watermarking</i>	261
4.3.3.2. <i>Digital watermarking</i>	263
4.3.4. La consultazione e l'accesso al dato mediante sistemi GIS	265
4.3.4.1. Collegamento ai registri	268
4.3.4.2. <i>Query</i> ed analisi	272
4.3.4.3. Visualizzatori	274
CONCLUSIONI	279
BIBLIOGRAFIA	283
SITOGRAFIA	293
RINGRAZIAMENTI	295

ABSTRACT

“**C**artographic heritage” is different from “cartographic history”. The second term refers to the study of the development of surveying and drawing techniques related to maps, through time, i.e. through different types of cultural environment which were background for the creation of maps. The first term concerns the whole amount of ancient maps, together with these different types of cultural environment, which the history has brought us and which we perceive as cultural values to be preserved and made available to many users (public, institutions, experts).

Unfortunately, ancient maps often suffer preservation problems of their analog support, mostly due to aging. Today, metric recovery in digital form and digital processing of historical cartography allow preserving map heritage. Moreover, modern geomatic techniques give us new chances of using historical information, which would be unachievable on analog supports.

In this PhD thesis, the whole digital processing of recovery and elaboration of ancient cartography is reported, with a special emphasis on the use of digital tools in preservation and elaboration of cartographic heritage. It is possible to divide the workflow into three main steps, that reflect the chapter structure of the thesis itself:

- **map acquisition:** conversion of the ancient map support from analog to digital, by means of high resolution scanning or 3D surveying (digital photogrammetry or laser scanning techniques); this process must be performed carefully, with special instruments, in order to reduce deformation as much as possible;
- **map georeferencing:** reproducing in the digital image the native metric content of the map, or even improving it by selecting a large number of still existing ground control points; this way it is possible to understand the projection features of the historical map, as well as to evaluate and represent the degree of deformation induced by the old type of cartographic transformation (that can be unknown to us), by surveying errors or by support deformation, usually all errors of too high value with respect to our standards;

- **data elaboration and management in a digital environment**, by means of modern software tools: vectorization, giving the map a new and more attractive graphic view (for instance, by creating a 3D model), superimposing it on current base maps, comparing it to other maps, and finally inserting it in GIS or WebGIS environment as a specific layer.

The study is supported by some case histories, each of them interesting from the point of view of one digital cartographic elaboration step at least. The ancient maps taken into account are the following ones:

- three maps of the Po river delta, made at the end of the XVI century by a famous land-surveyor, Ottavio Fabri (he is single author in the first map, co-author with Gerolamo Pontara in the second map, co-author with Bonajuto Lorini and others in the third map), who wrote a methodological textbook where he explains a new topographical instrument, the *squadra mobile* (mobile square) invented and used by himself; today all maps are preserved in the State Archive of Venice;
- the *Ichnoscenografia* of Bologna by Filippo de' Gnudi, made in the 1702 and today preserved in the Archiginnasio Library of Bologna; it is a scenographic view of the city, captured in a bird's eye flight, but also with an icnographic value, as the author himself declares;
- the map of Bologna by the *periti* Gregorio Monari and Antonio Laghi, the first map of the city derived from a systematic survey, even though it was made only ten years later (1711-1712) than the map by de' Gnudi; in this map the scenographic view was abandoned, in favor of a more correct representation by means of orthogonal projection; today the map is preserved in the State Archive of Bologna;
- the Gregorian Cadastre of Bologna, made in 1831 and updated until 1927, now preserved in the State Archive of Bologna; it is composed by 140 maps and 12 *brogliardi* (register volumes).

In particular, the three maps of the Po river delta and the Cadastre were studied with respect to their acquisition procedure. Moreover, the first maps were analyzed from the georeferencing point of view, and the Cadastre was analyzed with respect to a possible GIS insertion. Finally, the *Ichnoscenografia* was used to illustrate a possible application of digital elaboration, such as 3D modeling.

Last but not least, we must not forget that the study of an ancient map should start, whenever possible, from the consultation of the precious original analogical document; analysis by means of current digital techniques allow us new research opportunities in a rich and modern multidisciplinary context.

INTRODUZIONE

E' immenso il **patrimonio cartografico antico** (costituito da carte, atlanti geografici, planisferi, mappamondi) conservato presso istituzioni, sia pubbliche sia private, a livello mondiale. Si tratta di documenti di straordinario valore storico, artistico e documentario, beni culturali preziosi ma spesso scarsamente conosciuti, in quanto conservati in stanze dimenticate o non accessibili al pubblico, e valorizzati in modo episodico e frammentario.

Purtroppo, frequentemente i documenti cartografici antichi soffrono di problemi di usura del supporto su cui sono nati, costituito da materia organica, dunque deperibile, e col tempo sono destinati a deteriorarsi ulteriormente. Il **recupero di cartografia storica** è l'insieme di operazioni volte a salvaguardare, ed eventualmente rendere accessibile al pubblico, il patrimonio storico-culturale costituito dall'insieme dei documenti cartografici che il tempo ha portato fino a noi, assegnandoci l'arduo compito di preservarne il delicato supporto e il fondamentale contenuto. Le operazioni volte alla conservazione del supporto consistono nella protezione di questo dall'effetto del tempo ed eventualmente in un preventivo restauro; le operazioni volte alla conservazione del contenuto consistono invece nel salvaguardare l'esistenza del documento cartografico mediante trasporto su un supporto differente da quello originale, ad esempio su uno di tipo digitale attraverso le nuove tecnologie geomatiche. Negli ultimi anni, grazie all'allargamento del concetto di "bene culturale" e ad una crescente consapevolezza della sua importanza, nonché grazie allo sviluppo di nuove tecnologie, presso diverse istituzioni hanno preso avvio numerose iniziative, atte ad integrare l'attività di catalogazione del materiale documentario e cartografico, ivi conservato, con quella di digitalizzazione e di messa in rete delle informazioni.

Per il taglio dato al lavoro discusso all'interno della presente tesi, si è preferito non trattare diffusamente del problema della "**storia della cartografia**", ma solo fare un breve accenno alle problematiche di base relative alle scienze geodetiche e cartografiche (definizione delle superfici di riferimento, strumenti ed errori di rilievo, leggi della rappresentazione cartografica e relative deformazioni, ...), e al loro sviluppo nei secoli attraverso differenti ambienti storico-culturali. Si è preferito piuttosto centrare la ricerca sugli aspetti legati alle possibilità di recupero di questa "**eredità cartografica**" (costituita da documenti cartografici, assieme al contenuto informativo di cui si fanno

portatori, e a quello culturale in cui hanno avuto genesi) che la storia ci ha consegnato: i moderni strumenti della Geomatica consentono l'acquisizione, l'elaborazione e la fruizione della cartografia antica in ambiente digitale, mostrando come sia possibile valorizzare la carta storica in chiave moderna e mostrarne l'odierna utilità. Infatti, la disponibilità di una carta storica in ambiente digitale, con la salvaguardia delle proprietà metriche ad essa associate, non è solamente una garanzia per la sua conservazione nel futuro sottoforma di copia fedele, ma è anche il mezzo per avviare un ampio spettro di ricerche ed applicazioni, non attuabili col solo supporto analogico. Si rendono possibili analisi della carta sotto molteplici punti di vista, e applicazioni a carattere multidisciplinare legate allo studio dell'evoluzione del territorio nel tempo. Infine, non è da sottovalutare il fatto che digitalizzare una carta storica significa anche renderla più facilmente accessibile al pubblico, quando invece solitamente è fruibile da pochi o viene utilizzata solo per studi specifici.

Argomento trattato nella tesi è dunque l'illustrazione dell'intero processo di recupero della cartografia antica in ambiente digitale, intendendo, con esso, non solo la fase di acquisizione, ma anche quella di trattamento della carta in ambiente digitale. Il processo può essere suddiviso in tre passaggi fondamentali, che rispecchiano la struttura in capitoli della tesi:

- **acquisizione:** trasferimento della carta antica dal supporto analogico a quello digitale, per mezzo di scanner ad alta risoluzione o tecniche di rilievo tridimensionale (fotogrammetria digitale o *Laser scanning*); il processo deve essere condotto attentamente e con apposita strumentazione, per ridurre al minimo le deformazioni;
- **georeferenziazione:** assegnazione di coordinate oggetto (solitamente in un sistema di riferimento cartografico) al sistema immagine (costituito dalla carta acquisita), al fine di ridare alla carta storica digitalizzata il contenuto metrico inizialmente posseduto dal documento originale, o per migliorarlo, mediante selezione di un consistente numero di punti di controllo ancor oggi riconoscibili sul territorio; in questo modo è possibile comprendere le caratteristiche di precisione della carta storica, rappresentando e valutando il grado di deformazione indotto dall'antica proiezione cartografica (quando esistente), o da errori di rilievo sul campo, o da deformazione del supporto analogico (comunque tutti errori normalmente elevati per gli standard moderni);
- **elaborazione e gestione del dato in ambiente digitale:** tutta una serie di elaborazioni ulteriori sulla carta digitalizzata e georeferenzata,

eseguite in funzione dello scopo prefissato: vettorializzazione, modellazione tridimensionale (per fornire alla carta storica un aspetto nuovo e più attraente), sovrapposizione a basi cartografiche moderne, inserimento della carta in sistemi GIS e WebGIS come specifico *layer*, e così via.

Ciascuna fase viene descritta attraverso la trattazione di alcuni casi pratici, ognuno dei quali risulta interessante dal punto di vista di almeno una fase del processo di recupero di cartografia storica. I documenti presi in esame sono, in ordine cronologico:

- tre **carte del delta del Po** (oggi conservate presso l'Archivio di Stato di Venezia), risalenti alla fine del XVI secolo, e redatte per mano di uno stesso cartografo (Ottavio Fabri), unico autore in uno degli esemplari, e coautore (assieme a Gerolamo Pontara e Bonajuto Lorini, anch'essi periti *Savi ed Esecutori delle Acque* al servizio del Governo della Serenissima Repubblica) negli altri due esemplari; Fabri è anche autore di un manuale in cui illustra l'uso di un nuovo strumento di sua invenzione (*squadra mobile*) per il rilievo sul campo e la rappresentazione in carta;
- la ***Ichnoscenographia* di Bologna** di Filippo de' Gnudi, risalente al 1702, ed oggi conservata presso la biblioteca dell'Archiginnasio di Bologna: si tratta di una carta in vista scenografica "a volo d'uccello", ma disegnata su base icnografica, come lo stesso autore dichiara;
- la **carta Monari-Laghi**, di Bologna (oggi conservata presso l'Archivio di Stato di Bologna), la prima carta della città derivata da un rilievo sistematico, anche se eseguita dai due periti solo dieci anni dopo la *Ichnoscenografia* di de' Gnudi (1711 - 1712); nella carta la vista scenografica scompare, a favore di una rappresentazione più corretta data dalla proiezione ortogonale;
- il **Catasto Gregoriano** di Bologna, eseguito e variamente aggiornato nell'arco temporale che va dal 1831 al 1927, ed oggi anch'esso conservato presso l'Archivio di Stato della città; nelle sue varie edizioni, è composto da 140 mappe e 12 *brogliardi* (registri catastali).

In particolare, ad esemplificare la fase di acquisizione si sono prese in esame le mappe catastali, le carte del Delta del Po e la carta Monari-Laghi (anche se ancora in fase di studio); per la fase di georeferenziazione sono state analizzate soprattutto le carte del delta del Po; per la fase di elaborazione digitale i casi di studio maggiormente approfonditi sono stati la *Ichnoscenografia* del de' Gnudi (per quanto

riguarda la modellazione tridimensionale) e le mappe catastali (per quanto riguarda l'inserimento in archivi GIS e WebGIS).

Sarebbero stati possibili altri approcci alla trattazione, ma si è preferito questo tipo di struttura per evidenziare come il tema trattato, pur nella estrema varietà dei soggetti e delle problematiche che ciascuno di essi solleva, possa essere affrontato oggi come un *corpus* unico, scomponibile in sottoprocessi e prodotti ben distinguibili.

L'attività condotta nel corso del periodo di Dottorato ha consentito di affrontare direttamente tutti questi aspetti, nell'ambito di un percorso caratterizzato da una specifica connotazione multidisciplinare; la ricerca ha evidenziato problemi che si possono considerare oggi risolti e temi invece ancora aperti (non solo di carattere tecnico e tecnologico), su cui essa potrà trovare prosecuzione.

1. LA CARTOGRAFIA

*Più ancora che immagine del mondo,
La “carta” è un'immagine dell'immagine che del mondo ha
un individuo, un'epoca storica o una particolare società.*

Linee guida per la digitalizzazione del materiale cartografico
Istituto Centrale per il Catalogo Unico
(Sgambati G., Benassati G., Biancini L., Buonora P., Sinisi D., Cantile
A., Delfino L., Di Angelo Antonio M., Falchetta P., Mancinelli M.L.,
Sanguineti M.T., Serratrice G., Truci I., Valerio V., 2006)

La rappresentazione sul piano di luoghi ed elementi caratteristici del territorio è un'arte antichissima. Ci si può chiedere perché l'uomo, da sempre, si sia preoccupato di “mettere in carta” il mondo. Probabilmente la risposta è semplice, seppur non banale: per rappresentare, attraverso un'immagine, la realtà che lo circonda, per riconoscerla e farla conoscere. L'immagine è da sempre il mezzo principale per visualizzare, per descrivere, per far conoscere la realtà: in altre parole, per comunicare. In quanto la potenza dell'immagine, sia essa una moderna fotografia, un classico disegno, un semplice simbolo, una carta, sta nella forza dell'immediatezza e nella facilità di comprensione.

A partire dalle origini, per arrivare fino ai nostri giorni, in questo capitolo verrà descritto, in un *excursus* storico, lo sviluppo della tecnica cartografica (v. cap. 1.1). Dalla “storia della cartografia”, si passerà alla “cartografia storica” come intesa oggi, analizzando il problema e le motivazioni del suo recupero (v. cap. 1.2).

1. LA CARTOGRAFIA

1.1. STORIA DELLA CARTOGRAFIA

Una carta è una rappresentazione piana, e ridotta in scala, della superficie terrestre (intera o in parte) e dei fenomeni ivi presenti, spazialmente distribuiti. Una carta, necessariamente, risulta semplificata rispetto alla realtà, essendo il risultato di un'operazione di selezione degli oggetti e dei fenomeni, in funzione della scala e del tema: infatti in carta non possono essere rappresentati tutti gli elementi della realtà territoriale. Inoltre essa è una rappresentazione simbolica, in quanto fa uso di segni convenzionali. Ciò che distingue una carta da una qualunque altra rappresentazione del territorio (come uno schizzo panoramico o una fotografia) è l'assenza di un "punto di vista", essendo la carta una proiezione ortogonale.

Svariate possono essere le ragioni che portano a rappresentare il territorio in carta, ma prima fra tutte è la necessità di localizzare punti, oggetti, luoghi e fenomeni, e operare misure di angoli e distanze tra questi, di orientarsi (un classico esempio è costituito dall'antica cartografia nautica, utilizzata per orientarsi in mare mantenendo la rotta verso il porto di destinazione). La cartografia (dal greco *χάρτης*, in latino *charta*, cioè carta da papiro, e *γράφω*, in latino *graphia*, cioè scrittura) è quella scienza che, a partire dai risultati del rilievo del terreno, si occupa della redazione di carte atte a rappresentarlo, e dei modi di lettura e utilizzo di tali carte.

Il termine "carta" deriva probabilmente dal latino *charta* ad indicare il supporto su cui per secoli è stata tradizionalmente redatta, per l'appunto fogli di carta. Per i Romani la *charta* era un foglio o una sottile lamina su cui scrivere, e per estensione il termine veniva utilizzato con significato di "scritto" o "lettera"; per designare le carte geografiche usavano invece il termine *tabula* (e *forma* per le piante di città). Il termine "carta" venne infatti adottato solo più tardi, con le carte nautiche del XIII secolo, per passare poi nelle varie lingue europee: portoghese (*cartes*), italiana (*carta*), francese (*carte*), tedesca (*karte*), romena (*hartă*), russa (*karta*) e in tutte le altre. Un termine alternativo a "carta" è "mappa", che anche in questo caso è un esplicito richiamo ad uno dei supporti anticamente utilizzati, la stoffa. Ancora una volta la parola latina originale, *mappa*, non era utilizzata dai Romani per indicare una carta geografica, bensì la tovaglia o la salvietta. Dalla voce latina deriva comunque la *mapa* spagnola, la *mappa* italiana, la *map* inglese, e così via. Il termine medievale *mappa mundi* sta per

“rappresentazione geografica del mondo”, originariamente dipinta su stoffa. Altro termine usato per indicare in passato le rappresentazioni cartografiche, in particolare quelle miniate di età medievale, era il latino *pittura*. Oggi in italiano si usano il termine *carta* per indicare le rappresentazioni cartografiche in generale, e il termine *mappa* per le carte catastali a grandissima scala (Sestini A., 1981). Il supporto non è, o non è sempre stato, un foglio di carta o un pezzo di stoffa: legno, bastoni, pelli di bisonte, fibre di agave, terracotta sono tra i più svariati supporti su cui l'uomo, nel corso del tempo, ha rappresentato il territorio. Negli ultimi anni, il supporto cartografico ha cambiato forma ancora una volta, divenendo digitale (vale a dire un file). Ma nonostante ciò, anche oggi la carta (o mappa che dir si voglia) rimane, nell'immaginario comune, e non solo nel nome, un foglio.

Nate a fini pratici, ma anche culturali, le carte, in quanto strumento per localizzare e conoscere la distribuzione di certi fenomeni all'interno di un territorio, hanno avuto nel tempo diverse applicazioni in svariati campi: la geografia, la geologia, la geofisica, la botanica, le scienze economiche, la demografia, l'etnologia, l'idraulica, le costruzioni (di edifici, strade, ferrovie, porti), la pianificazione del territorio e la programmazione territoriale. Da non omettere anche l'utilizzo delle carte a fini militari, ragion per cui nella maggior parte degli Stati le operazioni di rilievo topografico e di produzione cartografica sono ancor oggi affidate ad organi militari (in Italia l'IGM).

1.1.1. Dalla Terra alla carta

La carta, come detto, è una rappresentazione piana della superficie terrestre. La problematica insita nell'operazione di trasposizione sul piano del territorio consiste dunque nel passaggio dalla realtà al disegno, dalla Terra alla carta, da un mondo tridimensionale ad un piano bidimensionale. Il passaggio è possibile ma non è banale, presentando alcune difficoltà.

In primo luogo, occorre definire la superficie terrestre, in termini di forma e dimensioni: se da un lato il **geoide** è la superficie equipotenziale che descrive l'ideale livello medio del mare, e conseguentemente descrive bene la forma della Terra, dall'altro lato è vero che nella pratica esso non è utilizzabile per i calcoli, e di conseguenza occorre ricorrere a superfici più semplici come un **ellissoide**

di rotazione (con semiasse polare inferiore a quello equatoriale), che approssima ottimamente il geoide.

In secondo luogo occorre attuare il passaggio dalla Terra al piano, attraverso il geoide. Come accennato sopra, la carta non è condizionata da un "punto di vista": essa infatti deriva da una proiezione ortogonale del terreno sul geoide, quindi secondo la verticale del luogo, e dal trasferimento dei punti del geoide ai corrispondenti sul piano della rappresentazione. Per tale motivo ogni punto del terreno risulterà avere in pianta una posizione indipendente, come se fosse ripreso da un punto di osservazione specifico. Il secondo passaggio, il trasferimento di punti del geoide (approssimabile con un ellissoide) sul piano, si attua attraverso le cosiddette leggi di proiezione cartografica.

Una **proiezione cartografica** è una corrispondenza biunivoca tra punti sull'ellissoide (identificati dalle coordinate geografiche di latitudine e longitudine) e punti sul piano della rappresentazione (identificati da una coppia di coordinate cartesiane), vale a dire una regola geometrica per tracciare sul piano il reticolato di meridiani e paralleli definibili sull'ellissoide. La scelta di una proiezione piuttosto che un'altra, tra le infinite possibili, comporta tipo ed entità differenti di deformazione, la quale comunque è inevitabile. Infatti, qualunque sia la legge adottata, essa indurrà sempre delle deformazioni, per il semplice ma non banale fatto che una superficie sferica o una ellissoidica non sono sviluppabili sul piano. In fase di redazione di una carta occorre dunque scegliere la legge della rappresentazione più consona allo scopo prefissato, valutare fino a che livello la deformazione che ne deriva è accettabile, ed eventualmente limitare in modo opportuno la zona da cartografare.

Esistono classi differenti di proiezione a seconda del tipo di elemento geometrico che si vuol mantenere inalterato in grandezza o in proporzione: proiezioni isogoniche (in cui rimangono invariati gli angoli), dette anche conformi (in quanto rimane invariata la forma delle figure nel passaggio dall'ellissoide al piano), proiezioni equivalenti (per quelle in cui rimane invariato il rapporto tra aree corrispondenti), proiezioni equidistanti (quando si mantiene inalterato il rapporto tra dimensioni lineari in carta e dimensioni lineari nella realtà).

La **scala** di una carta definisce il rapporto tra elementi lineari sul piano della rappresentazione e i corrispondenti sulla Terra, e di norma consiste in una riduzione delle dimensioni lineari. Questo fatto comporta un'operazione di "semplificazione", vale a dire di eliminazione grafica di molti elementi presenti nella realtà, in quanto non possono essere rappresentati in carta, a causa appunto delle dimensioni ridotte (Sestini A., 1981).

I dati necessari per redigere una carta “originale” derivano dalla fase di **rilievo**, che consiste nella determinazione della posizione reciproca di punti rappresentativi di un certo oggetto (il territorio, se il rilievo è a fini cartografici), per dare, di quello, una rappresentazione. La scienza del Rilievo, con le tecniche e gli strumenti relativi, nasce proprio a scopo cartografico: rappresentare il territorio. Da una carta originale si possono estrarre poi carte dette “derivate”, unicamente in scala minore. Alla base del rilevamento vi è la determinazione, in modo rigoroso, di punti sul geoide; tali punti, normalmente detti “vertici trigonometrici”, sono i vertici della “rete trigonometrica”. Essa è una rete di triangoli sferoidici (in quanto i punti si trovano sul geoide), che a coppie condividono un “lato”. Per “triangolazione” s’intende quindi quel sistema atto a misurare in modo altamente preciso la posizione dei vertici trigonometrici, poi, a partire da questi, “infittire la rete” mediante misurazioni topografiche di ambito più limitato (Antico Gallina M., 1994). Nel 1550, Sebastian Münster scriveva: «Ogni cosa tu debba misurare, deve essere misurata mediante triangoli». La questione sul quando e il dove fu formulata questa regola fondamentale, che sembra suonare come un monito per gli studenti, rimane aperta. Sappiamo solo che a Vienna, nel 1462-1464, Johannes Regiomontanus cominciò un trattamento puramente matematico sulle funzioni di base della triangolazione, quelle trigonometriche, così come utilizzate in astronomia nei lontani tempi greco-romani (Woodward D., 2007).

La determinazione sempre più precisa della forma e delle dimensioni del geoide ha portato l’Unione Geodetica e Geofisica Internazionale ad abbandonare, nel 1924, l’ellissoide di Bessel (con schiacciamento 1/299), per adottare quello dell’americano Hayford del 1909, definito “**ellissoide internazionale**” (con schiacciamento 1/297). Ancor oggi questo ellissoide è alla base di molti sistemi geodetici, tra i quali l’ED50 (*European Datum*, del 1950) per quanto riguarda l’Europa, e il Gauss-Boaga per quanto riguarda l’Italia.

Come sistema cartografico di rappresentazione del globo si è andato imponendo l’UTM (*Universal Transversal Mercator*), basato sulla proiezione cilindrica di Mercatore trasversa, denominata “**proiezione di Gauss**”, dal nome di chi la studiò. Il principale motivo della sua adozione (avvenuta nel 1951) consiste nel fatto che tale proiezione è conforme, per cui le trasformate piane di meridiani e paralleli mantengono la perpendicolarità reciproca (Folloni G., 1978).

Da ricordare, infine, è la fondazione dell’Associazione Internazionale di Cartografia (ICA, *International Cartographic Association*), nel 1961. La nascita di una associazione di cartografia a livello mondiale è un chiaro

segnale dell'interesse verso problemi di uniformazione a scala mondiale dei sistemi cartografici e dei metodi di rappresentazione del territorio.

1.1.2. Le origini della cartografia

La nascita della cartografia si perde nella notte dei tempi. Anche prendendo il documento cartografico più antico a segnare la data di nascita della cartografia, la questione rimane aperta, poiché l'individuazione del primo documento definibile a rigore "cartografico" risulta alquanto discutibile.

Forse la più antica rappresentazione territoriale (risalente al periodo tra l'Età del Bronzo e quella del Ferro) è la *Mappa di Bedolina*, un'incisione su roccia di sentieri, ruscelli, capanne, campi coltivati, ma anche attrezzi di lavoro, uomini, animali; in essa si riscontano ancora vari aggiornamenti susseguitisi nel tempo (Antico Gallina M., 1994). Mappe di popoli etnologicamente primitivi, soggetti a nomadismo, e quindi allo spostarsi e al doversi orientare nello spazio, pescatori, cacciatori o navigatori, consistono in graffiti su pietra o su legno (questi diffusi soprattutto tra gli Esquimesi (fig. 1.1a), i Siberiani e gli Indiani del Nord America), incisioni su osso, dipinti su cuoio, pelli o su altri materiali: i Messicani, al tempo della conquista spagnola, dipingevano mappe su un materiale estratto da fibre di agave, i Polinesiani delle isole Marshall erano abili nel costruirne un tipo particolare, con fibre di palma unite tra di loro da fili di palma di cocco, e con intercalate delle conchiglie (una sorta di carte nautiche indicanti, all'interno di un reticolato di riferimento, le isole e i sistemi di onde marine) (fig. 1.1b). Ma è anche stata ritrovata, in Valcamonica, una rappresentazione murale (un insieme di case e sullo sfondo un vulcano in eruzione), risalente addirittura al 6200 a.C.: il *muro di Catal-Hyuk* (fig. 1.1c). Potrebbe essere definita questa la prima rappresentazione cartografica della storia?

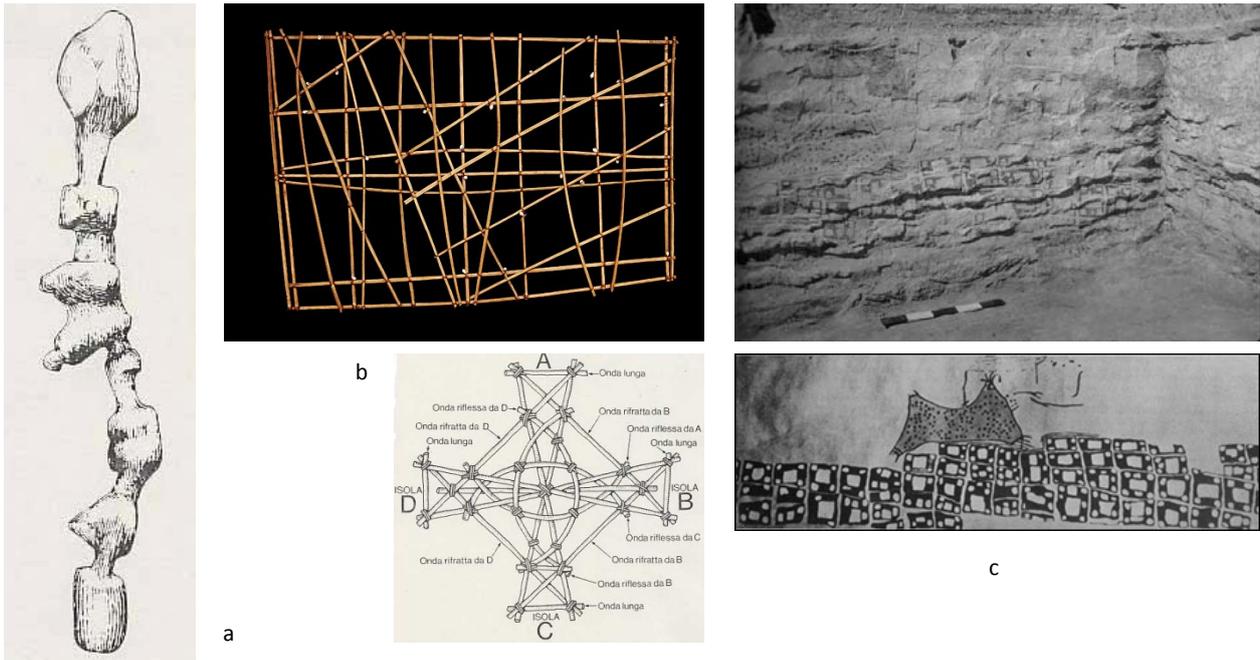


Fig. 1.1 - Antiche rappresentazioni cartografiche:
 a) bastone esquimese (fonte: <http://digilander.libero.it>);
 b) carta geografica realizzata dagli abitanti delle isole Marshall (fonte: <http://it.encarta.msn.com>) e schema interpretativo (fonte: <http://digilander.libero.it>);
 c) il muro di Catal-Hyuk e schema interpretativo (fonte: <http://digilander.libero.it>).

I primi tentativi indiscutibilmente definibili “cartografici” di cui si è a conoscenza risalgono al III millennio a.C., ad opera di Babilonesi ed Egizi: di origine mesopotamica è la più antica “carta” (in realtà si tratta di un’incisione su tavoletta di argilla raffigurante la Mesopotamia settentrionale, con città, montagne, l’Eufrate ed un suo affluente), databile tra il 2400 e il 2200 a.C. (fig. 1.2a). Le carte babilonesi, solitamente disegnate su supporti di terracotta, erano redatte allo scopo di tassazione delle proprietà agricole che venivano qui rappresentate. Anche alcune mappe egiziane, risalenti al III millennio a.C., erano utilizzate per redigere piani catastali, quali la delimitazione delle proprietà fondiarie e il riconoscimento degli appezzamenti coltivati; altre mappe, invece, che descrivono itinerari marini e terrestri, erano redatte allo scopo di misurare gli spostamenti compiuti (fig. 1.2b). Sempre di origine egiziana è la *Mappa delle miniere d’oro* (un giacimento aurifero della Nubia), presumibilmente del 1150 a.C. (fig. 1.2c). Da ricordare sono anche le carte regionali del II secolo a.C., piuttosto complete e dettagliate, di origine cinese, disegnate su seta.

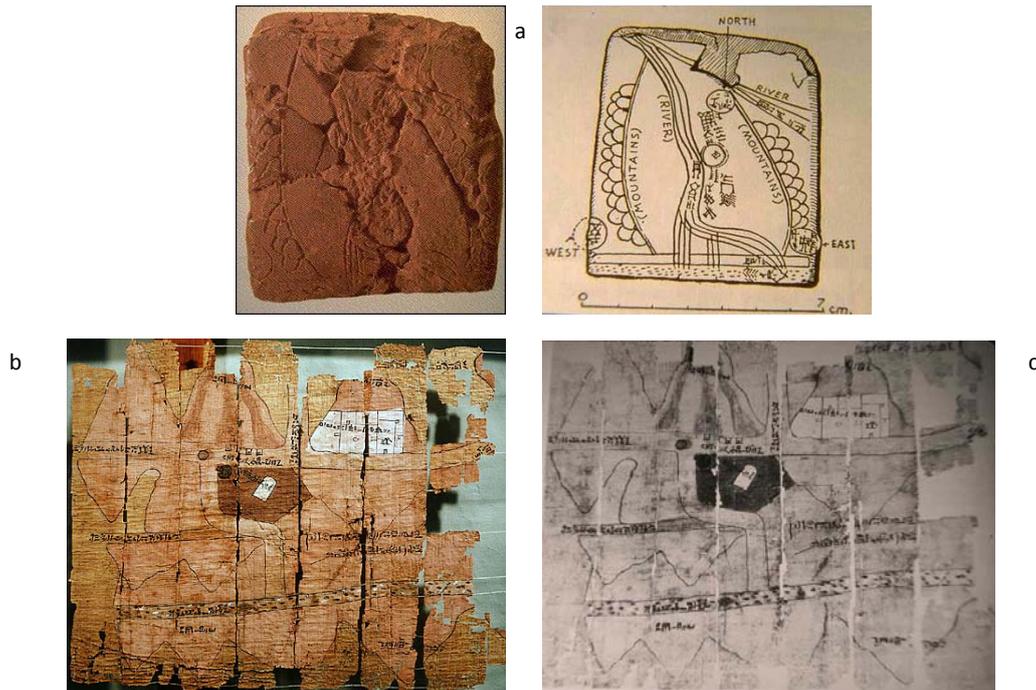


Fig. 1.2 - Altre rappresentazioni cartografiche antiche:

- a) tavoletta mesopotamica e schema interpretativo (fonte: <http://digilander.libero.it>);
 b) mappa egiziana (fonte: <http://it.encarta.msn.com>);
 c) mappa delle Miniere d'oro (fonte: <http://digilander.libero.it>).

1.1.2.1. La cartografia nel mondo greco e romano

Ma fu il mondo greco, con le speculazioni cosmografiche dei suoi filosofi (erano infatti i filosofi, e non i tecnici geometri, a dedicarsi alla pratica cartografica), spinte dalle conoscenze dirette dovute alla colonizzazione ellenica di gran parte dei territori del Mediterraneo orientale nei secoli VII e VI a.C., a dare un grande impulso alla tecnica cartografica. Si può affermare che la cartografia come scienza, su cui si sarebbe sviluppata tutta la cartografia occidentale, nacque su suolo greco, sia pure con influssi delle civiltà precedenti, l'egizia, l'assira e la babilonese. Diversi sono i personaggi che possono essere ricordati per essere stati grandi scopritori in questo campo:

- il filosofo **Anassimandro di Mileto** (610-546 a.C.), a cui si deve la realizzazione (forse del 541 a.C.) della prima mappa del mondo allora conosciuto (l'ecumene), che si estende attorno al mar Egeo ed è rappresentata con un cerchio circondato dall'oceano e diviso in due dal Mediterraneo;

- **Ecateo di Mileto** (550-480 a.C.), autore della *Periegesi* (Viaggio intorno al mondo), la prima opera geografica greca scritta in prosa;
- **Dicearco da Messina** (350-290 a.C.), filosofo peripatetico che disegnò una carta in cui compare, per la prima volta, un elemento matematico di costruzione, consistente in un parallelo di riferimento per la collocazione dei luoghi;
- **Eratostene** (276-195 a.C.), filosofo, matematico e geografo, famoso per la misura altamente precisa del meridiano terrestre, e oggi ritenuto fondatore della geografia scientifica; fu autore di una descrizione geografica del mondo assieme alla prima carta dell'ecumene (molto più esteso rispetto alla carta di Anassimandro) ad essere dotata di una sorta di reticolato geografico, con paralleli disugualmente spazati passanti per luoghi noti, e linee, anch'esse non equidistanti, perpendicolari alle prime;
- il filosofo **Cratete di Mallo** (II sec. a.C.), probabilmente il primo a costruire un globo, segno che iniziava a farsi strada la consapevolezza delle deformazioni indotte dalla rappresentazione della sfera terrestre su un piano;
- l'astronomo **Ipparco di Nicea** (II sec a.C.), che, con le sue misure di longitudine e le osservazioni astronomiche su varie località, gettò le basi per la moderna geodesia (riprese poi solo nel XVII secolo), con l'invenzione di due proiezioni, quella ortografica e quella stereografica, per rappresentare la sfera sul piano;
- **Marino di Tiro** (attorno al 120 d.C.), il primo a dare un approccio matematico alle proiezioni cartografiche, sostenendo quella che forse fu la prima proiezione cartografica della storia, la cilindrica centrale, e introducendo per primo la misura in gradi d'arco (anziché, come d'uso sino ad allora, in stadi, misura che era più incerta da definire) per le longitudini e le latitudini;
- l'astronomo, matematico e geografo **Claudio Tolomeo** (90-168 d.C.), che, con la sua *Geographia* (opera geografica teoretica di riferimento per tutta l'età medievale, e all'interno della quale si trova il primo atlante del mondo pervenutoci), può essere ritenuto il fondatore della geografia matematica e della cartografia razionale, e che nelle sue carte (di cui purtroppo ci sono giunti solo rifacimenti di età medievale, basati sulle descrizioni originarie e su aggiunte posteriori) utilizzò una proiezione conica (la conica semplice) basata sui precetti della matematica, ed un reticolato rudimentale di meridiani e paralleli (però i luoghi sono fissati non in base a misure dirette di latitudine e longitudine, bensì di distanze, quindi in modo più approssimativo) (fig. 1.3).

Con questi ultimi due personaggi la cartografia venne così finalmente ad assumere un fondamento matematico. Se da un lato la determinazione della latitudine era già possibile, anche se in modo approssimativo (mediante osservazione dell'ombra solare proiettata da un'asta o in base alla durata del giorno), ancora difficile era la determinazione della longitudine (si sapeva solo che essa doveva fondarsi sulla differenza di ora tra due luoghi); questo tassello mancante, importante per la completa determinazione delle coordinate geografiche, verrà aggiunto solo nel Settecento.

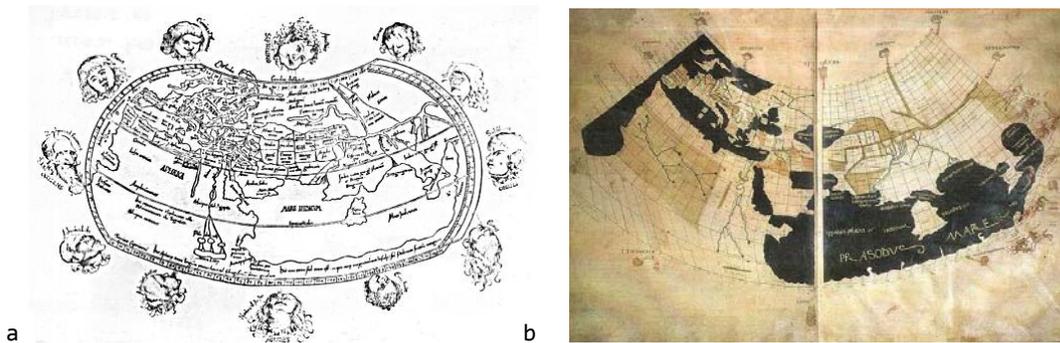


Fig. 1.3 - Carte tratte dal *Geographia* di Tolomeo: a) raffigurazione del mondo entro un sistema di meridiani e paralleli (fonte: <http://it.encarta.msn.com>); b) planisfero, in un rifacimento del XII secolo (fonte: <http://digilander.Libero.it>).

I Romani non apportarono conoscenze nuove a quelle raggiunte dai Greci in campo cartografico, ma sicuramente vi aggiunsero uno spiccato spirito pratico. La produzione cartografica di epoca romana fu infatti caratterizzata da un chiaro indirizzo pratico, per le necessità militari di conquista dei nuovi territori (che presupponevano di impartire alle legioni istruzioni precise per localizzare i luoghi), e per le necessità amministrative di mantenimento dei territori dell'Impero e del suo gran numero di strade. Nell'arco di 25 anni, nella seconda metà del I secolo a.C., fu eseguita una vasta operazione di rilevamento (consistente nella misurazione dei terreni e delle distanze lungo le grandi vie, e nella centuriazione, operazione di ripartizione dei terreni da assegnare in proprietà a privati) da parte degli *agrimensores* romani, istituiti da Giulio Cesare, che erano al seguito degli eserciti consolari, e la cui opera fornì a Roma il *capitastrum*, che può essere definito il primo vero e proprio "catasto" della storia (dal greco *katastikon*, registro, elenco a fini fiscali di beni e possessori): i tecnici riportavano su tavole di bronzo o di marmo le forme catastali (da cui il nome "*formae*" dato a questi documenti, redatti in duplice copia e depositati presso ogni comunità locale) delle varie città d'Italia, allo scopo di delimitare il

territorio, assegnare terre, organizzare gli impianti urbani, costruire strade (Costa A., 1983). Di queste *formae* non ci sono pervenuti esemplari, se non la *Forma Urbis Romae*, su marmo, a scala 1:300, redatta in tarda età, dopo il 200 d.C., all'epoca di Settimio Severo (Antico Gallina M., 1994). Grandi opere cartografiche risalgono all'età imperiale: furono iniziate da Cesare (100-44 a.C.) e concluse da Augusto (63 a.C. - 14 d.C.) tra il 44 e il 19 a.C. Ai nostri giorni sono però giunte solo poche mappe, segno, questo, che le mappe venivano effettivamente utilizzate ed erano quindi soggette ad usura. Oltre ad alcuni schizzi e istruzioni per rilevatori, ci è pervenuta la copia medievale (realizzata tra il IX e il XIII secolo, su un rotolo di pergamena lungo poco meno di 7 metri e alto poco più di 30 cm) della *Tabula Peutingeriana* (dal nome di un umanista di Norimberga, Corrado Peutinger, che iniziò a studiarla nel '500): un *itinerarium pictum* traduzione degli *itineraria scripta* (elenchi di vie e di luoghi con annotate le relative distanze), a testimonianza che le carte romane erano essenzialmente itinerarie (fig. 1.4). La *Tabula Peutingeriana* fu eseguita nel 375 d.C. forse da un certo Castorius, e vi è rappresentato, in modo schematico secondo le conoscenze geografiche di derivazione tolemaica, l'Impero romano e il mondo allora conosciuto (l'ecumene), con uno sviluppo stradale di circa 120.000 km in totale. La rappresentazione è caratterizzata da un notevole schiacciamento delle terre e da un disegno orizzontale, a profilo seghettato, per le catene montuose, oltre che da una scarsità di distese marine; i fiumi, invece, in quanto fondamentale mezzo di comunicazione per i Romani, hanno grande rilievo. Nella *Tabula Peutingeriana* si fa evidente la differenziazione dei segni convenzionali: le strade sono indicate con linee rosse e attraversano città e luoghi di sosta indicati con dicitura nera e con vignette diverse a seconda dell'importanza o della tipologia; infine sono riportate alcune distanze, in miglia, tra un luogo e un altro (Antico Gallina M., 1994). Il fine della *tabula* (termine che in età romana designava in generale una carta geografica) era chiaramente pratico: portare la carta arrotolata; è per questo che la carta fu redatta in una striscia lunga 6,75 m per soli 34 cm di larghezza (Federzoni L., 2000).

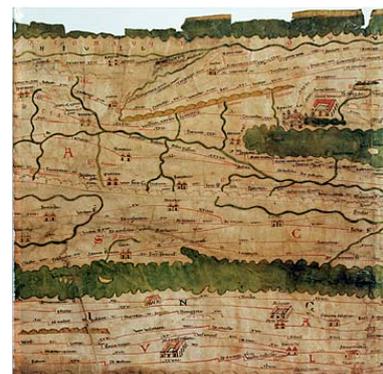


Fig. 1.4 - Particolare della *Tabula Peutingeriana*, conservata presso la Biblioteca Nazionale di Vienna (fonte: <http://it.encarta.msn.com>).

1.1.2.2. La cartografia nel mondo medievale

Con la caduta dell'Impero romano, lo sviluppo della tecnica cartografica in Europa subì un arresto quasi totale: nel periodo medievale la cartografia rimase solo attività di alcuni monaci, impegnati nella copia di carte greche e romane o nella produzione di carte di stampo cristiano. Anche se erede della cartografia greca e romana, quella medievale-cristiana tese all'annullamento dei decori estetici, ad una riduzione delle dimensioni e ad una maggior schematizzazione, secondo lo spirito cristiano di non esaltare le cose terrene e di contrastare le conquiste scientifiche del mondo pagano; le scritte erano solitamente in latino. La coscienza della Terra sferica venne soppiantata nuovamente dall'idea di una Terra piatta, in osservanza delle Sacre Scritture, che non ammettevano la sfericità terrestre. Allo scopo di mostrare la centralità di Gerusalemme nel mondo, si era disposti a tradire i principi affermati dalla geografia scientifica. La rappresentazione del mondo (*mappae mundi*), infatti, avveniva con immagini fantastiche, derivanti da interpretazioni delle Sacre Scritture o basate su intuizioni cosmografiche: solitamente il mondo veniva raffigurato piatto e quadrato, oppure ovale, orientato con l'est in alto (dove spesso si trovava anche la raffigurazione del Paradiso), ed era suddiviso in zone da una gigantesca "T", con un anello periferico a rappresentare l'Oceano. Ad esempio, nel grande *mappa mundi* di *Ebstorf* (il nome deriva dalla città in cui era costruito il monastero benedettino dove era custodita la carta, nel tempo andata distrutta), forse del 1235, la Terra appare suddivisa a mo' di croce, individuata da testa, mani e piedi di Cristo, ad indicare i punti cardinali; la carta aveva un diametro di circa 3,5 m (fig. 1.5). Quando non decoravano chiese, poste ad esempio dietro l'altare, le mappe erano conservate nelle biblioteche dei monasteri, sia che si trattasse di *mappae mundi*, che di mappe della Terra Santa, che, addirittura, di carte nautiche (Federzoni L., 2000).

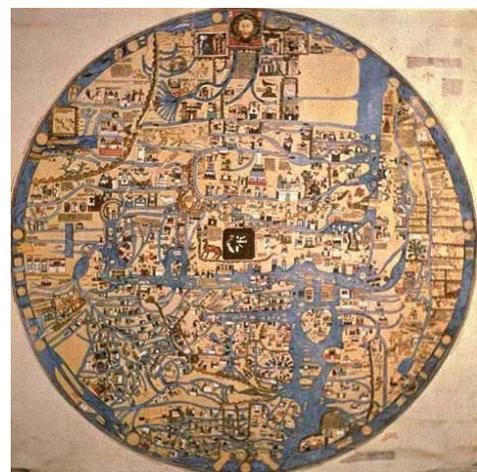


Fig. 1.5 - Ricostruzione della *mappa mundi* di *Ebstorf*
(fonte: <http://digilander.libero.it>).

Alla produzione di stampo cristiano si contrappose quella vivace dei naviganti e dei geografi arabi, che, studiando e criticando la tradizione tolemaica, se ne fecero custodi, fino a riconsegnarla all'Occidente nel XV secolo. Essi furono interessati alla redazione soprattutto di carte nautiche, sia del Mediterraneo che dell'Oceano Indiano, ma non apportarono sostanziali innovazioni in campo cartografico (fig. 1.6).

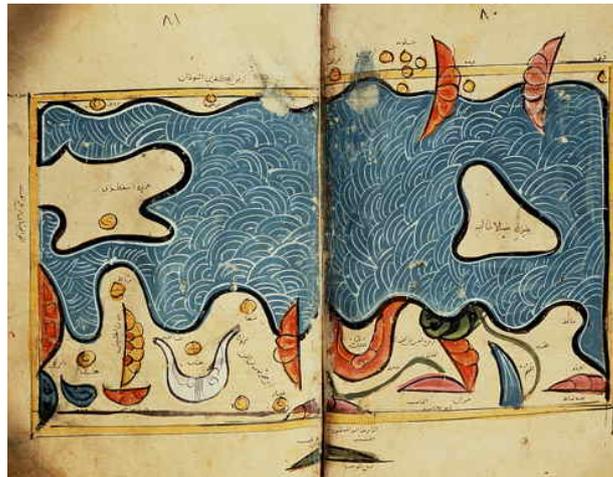


Fig. 1.6 - Carta dell'India realizzata da Al Idrisi, geografo del sec. XI, conservata presso il Museo del Cairo (fonte: <http://www.sapere.it>).

1.1.2.3. La rifioritura della cartografia

E' proprio attraverso la diffusione delle mappe nautiche, promossa dai viaggi per mare, dalle crociate del XII e XIII secolo, dalle relazioni commerciali tra i popoli, dagli interessi politici ed economici suscitati dalla scoperta delle nuove terre, dall'utilizzo della bussola, che rifiorì, rinnovandosi, tutto il settore della cartografia. Una primitiva cartografia nautica esisteva già tra Groenlandesi e Polinesiani, segnale dell'importanza dei popoli a spostarsi per mare e dunque alla necessità di orientarsi; anche la cartografia itineraria romana può in un qualche senso ricordare la cartografia nautica. Anche se le più antiche carte nautiche occidentali arrivate a noi risalgono alla fine del XIII secolo (la **Carta Pisana** (fig. 1.7), così detta perché rinvenuta in un archivio di Pisa, di autore ignoto ma probabilmente eseguita a Genova, probabilmente è del 1290), per la loro maturità esse segnalano che una cartografia mediterranea era già stata sviluppata nei secoli precedenti. Nate nel bacino del Mediterraneo, in particolare ad opera di veneziani e genovesi, probabilmente le carte nautiche furono frutto e naturale evoluzione dei

peripli (i portolani dell'antichità greco-romana, dei quali il più antico pervenutoci risale al 450 a.C., ed è opera dell'ammiraglio cartaginese Annone), racconti di viaggi e descrizioni della costa, a corredo dei quali non si sa se fossero state redatte anche mappe (fig. 1.8).



Fig. 1.7 - *Carta Pisana* (seconda metà del XIII sec., su pergamena di 50 x 1050 cm), presso la Bibliothèque Nationale di Parigi (fonte: <http://digilander.libero.it>).

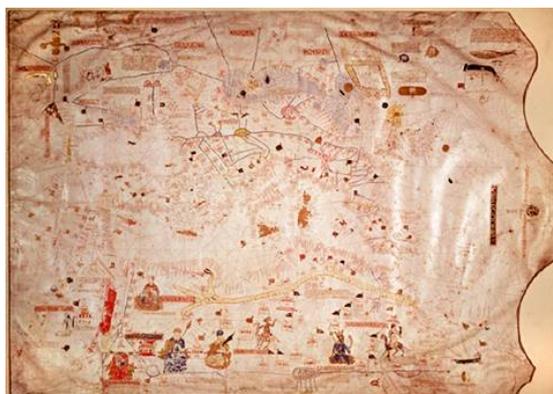


Fig. 1.8 - Portolano spagnolo disegnato nel 1413 da Mecia de Viladestes (fonte: <http://it.encarta.msn.com>).

Di certo ad influenzare il grande sviluppo delle carte nautiche vi fu l'introduzione, in Europa nel XII secolo, della **bussola magnetica**, testimoniata sulle carte nautiche dalla rosa dei venti, ad indicare il sistema di direzioni dei venti (fino a sedici); questo fatto era importante al punto tale che spesso, oltre a quella centrale, altre rose dei venti venivano disegnate ai margini delle carte e le loro direzioni, tracciate in maniera ridondante e spesso superflua, si intersecavano l'una con l'altra. Le direzioni dell'orizzonte servivano ad un duplice scopo, da una parte come riferimento per marcare in carta punti notevoli della costa, e conseguentemente il profilo dell'intera costa, dall'altra per individuare l'angolo, tra il nord (indicato da una bussola posta sopra alla carta) e la direzione di destinazione, da assumere all'uscita da un

porto per intraprendere la rotta (“angolo di rotta”). Innovazione in campo cartografico, fu l’introduzione, su queste carte, di una scala grafica, espressa da una barra suddivisa in un certo numero di segmenti; solitamente la scala del disegno era circa 1:6.000.000. In queste carte il nord era posto generalmente in alto, e i nomi dei luoghi (porti, approdi, punti caratteristici) erano spesso segnati in modo molto fitto al margine della linea di costa, e perpendicolarmente ad essa. La linea di costa in genere era raffigurata in maniera approssimata, ma in modo più dettagliato in corrispondenza dei paesi coi quali i mercanti italiani (genovesi, veneziani e fiorentini) intrattenevano rapporti commerciali. La costruzione di tali carte non si basava ancora su principi matematici (non vi erano proiezioni geometriche alla base, e mancava del tutto un reticolato geografico di meridiani e paralleli), ma solitamente si trattava di copie di carte precedenti, con rispetto per le proporzioni, e con l’inserimento, ovviamente, della rosa dei venti e delle sue direzioni. Il supporto era, il più delle volte, pergamena (fig. 1.9). Spesso le carte nautiche, comunque, non erano concepite per l’utilizzo sulle navi, dato l’inserimento, su queste, di raffigurazioni puramente decorative; piuttosto in questi casi avevano uno scopo semplicemente ornamentale.

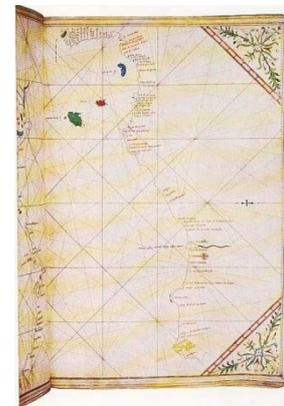


Fig. 1.9 - Carta veneziana del 1490,
recante gli ultimi sviluppi delle esplorazioni portoghesi
(fonte: <http://digilander.libero.it>).

Due importanti fonti giunsero in Europa ed influirono sulle carte nautiche: esse furono le scoperte e le informazioni dei viaggiatori (basti ricordare i viaggi di Marco Polo) e la tradizione tolemaica. Quest’ultima sbarcò in Europa dopo essere stata custodita dagli Arabi, per divenire il motore di rinascita della cartografia europea. In seguito alla caduta di Costantinopoli, l’arrivo a Firenze del *Geographia* di Tolomeo diede un grande impulso alla produzione cartografica in tutta Europa, in quanto la concezione di cartografia ivi contenuta era di gran lunga superiore rispetto a quella europea del periodo, nonostante risalisse a mille anni prima. Nel clima culturale del Rinascimento, infatti, si riscoprono gli

antichi scrittori greci e se ne studiò la lingua; tra le varie opere tradotte in latino si annovera dunque anche il *Geographia* di Tolomeo (la cui traduzione fu terminata nel 1406), riprodotto in molte copie per opera di amanuensi e, per le carte, di miniaturisti. Presto l'opera tolemaica fu anche edita a stampa: la prima edizione del solo testo risale al 1475 (stampata a Vicenza), mentre la prima corredata anche da carte (il *Tolomeo di Bologna*) è del 1477; la prima edizione in italiano venne stampata nel 1548 a Venezia, città in cui sorsero numerose stamperie in quanto punto di irradiazione e diffusione della cultura (fig. 1.10). Grazie all'introduzione in Europa, nella seconda metà del XV secolo, della stampa a caratteri mobili, il *Geographia* vide una diffusione sempre più rapida; oltre alla possibilità di eseguire uno svariato numero di copie di testo, la stampa giocò un ruolo fondamentale anche nella diffusione delle carte, che, non dovendo più essere copiate a mano, potevano essere eseguite in un numero molto maggiore di copie: fattore fondamentale, perché ciò permise alla carta di raggiungere un numero sempre maggiore di fruitori. Già da qualche anno si era diffusa la stampa di mappe su carta a partire da xilografie su legno (eseguite ad intaglio) e incisioni all'acquaforte su rame (tecnica che garantiva grande finezza e nitidezza di stampa, e che per questo venne adottata fino in pieno Ottocento); il *Tolomeo di Bologna*, per esempio, raccoglie mappe stampate da incisioni su rame. La tecnica litografica, caratterizzata dall'utilizzo di inchiostri grasso-resinosi su pietra calcarea incisa, si diffuse invece a partire dall'Ottocento. La più antica carta nautica stampata, la *Carta del Mediterraneo orientale*, risale al 1539, pubblicata a Venezia da Giovanni Andrea Vavassore (fig. 1.11).

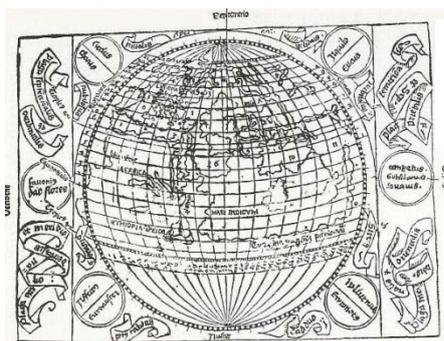
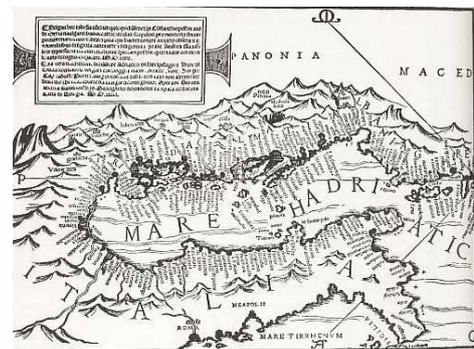


Fig. 1.10 - Prima stampa di un Tolomeo tedesco
(Norimberga, 1490 circa)
(fonte: <http://digilander.libero.it>).

Fig. 1.11 - Particolare della *Carta del Mediterraneo orientale* di G.A. Vavassore del 1539,
prima carta nautica stampata
(fonte: <http://digilander.libero.it>).



Anche grazie ai maestri, e famosi incisori su legno, Vavassore e Matteo Pagano, la produzione cartografica veneziana acquistò grande fama in tutta Europa. D'altra parte, il commercio di queste carte era agevolato dal fatto che le navi veneziane viaggiavano costantemente tra il Levante, la Spagna, il Portogallo, le Fiandre e l'Inghilterra. Venezia fu un punto nevralgico nell'Europa del XV-XVI secolo: la maggior parte dei cartografi provenivano da Venezia, o qui svolgevano la propria attività; le scoperte degli esploratori portoghesi erano spesso messe in carta da cartografi italiani, e in particolare veneziani. Il settore lagunare veneto disponeva di una quantità di materiale cartografico tra le maggiori di tutta Italia. Per il fatto di essere città legata per la sua sopravvivenza sia alla terraferma (per i territori lagunari) sia al mare (per gli intensi scambi commerciali), Venezia andava sviluppando una cartografia ricca e complessa; caratteri distintivi di questa cartografia erano l'essenzialità dei segni e l'assenza di esuberanza decorativa, mossi dallo spirito pratico e pragmatico appreso dai Veneziani negli scambi e nei commerci.

Sempre a Venezia, nel corso del XV secolo andò sviluppandosi, accanto a quella nautica, una cartografia di tipo amministrativo, allo scopo di governo e gestione dei propri territori e controllo dei terreni ambiti; il documento cartografico, infatti, corredato da quello scritto, costituiva uno strumento politico essenziale in quanto, esatto ed aggiornato, permetteva di conoscere anche visivamente i territori da amministrare e quelli da assoggettare. La Repubblica veneziana fu così il primo Stato italiano a fornirsi di un apparato amministrativo di tipo cartografico; il suo esempio sarebbe stato seguito dagli altri Stati della Penisola solo secoli più avanti, a partire dal Settecento, quando, sulla base di una rilevazione generale del territorio, sarebbero stati costituiti i catasti particellari. Alle operazioni di rilevamento dei territori, ad opera di cartografi al servizio della Serenissima Repubblica, si aggiunsero sopralluoghi e perizie svolti tecnici *perticatori*, chiamati dall'Amministrazione pubblica o dalla controparte per risolvere le controversie inerenti al calpestamento dei diritti e alle rivendicazioni territoriali sollevate dall'espansione veneziana (Institut Cartogràfic de Catalunya, Department de Geografia de la Universitat Autònoma de Barcelona, 1992).

Oltre a Venezia, comunque, varie altre città portuali erano impegnate in una ricca produzione cartografica a scopi nautici. Fu proprio in questo ambito del settore che, nel corso del XVI secolo, in Europa iniziò a prender piede la concezione della cartografia come disciplina scientifica ed una consapevolezza nuova e più moderna del "prodotto cartografico", così come lo intendiamo oggi. D'alto canto, furono proprio da un lato il

ritorno ad una cartografia di tipo scientifico e matematico (grazie alla riscoperta del *Geographia* di Tolomeo) dall'altro i grandi viaggi di esplorazione di quei secoli, a spingere in questa direzione. Innanzitutto tornò in uso un reticolato a linee perpendicolari tra loro per rappresentare meridiani e paralleli (dando origine alle cosiddette *carte piane*, fondamentali nell'affermare il principio per cui i punti sulla Terra non potevano essere semplicemente disegnati in carta, ma dovevano essere ivi introdotti in base ai loro valori di latitudine e longitudine) e di notazioni più moderne per esprimerne il valore; inoltre fece la sua comparsa l'indicazione della declinazione magnetica mediante una scala inclinata al bordo di qualche linea di costa (fig. 1.12). Ancora, si iniziò a prender coscienza del problema delle deformazioni indotte dalla trasposizione di una superficie sferica su un piano, e così tornò in auge la semplice proiezione conica di origine tolemaica, o sue varianti (come, a scala regionale, quella trapezoidale, caso limite della proiezione conica), o se ne introdussero di nuove, come la proiezione cilindrica tangente (fig. 1.13). Infine, si iniziò ad avere un'idea abbastanza veritiera sulla conformazione dei confini dei territori europei, notando le differenze rispetto alla rappresentazione, talvolta erronea (come per l'Asia meridionale e orientale, o per il Mediterraneo), presente nei vari *Tolomei*: le nuove edizioni del *Tolomeo* si andarono quindi arricchendo di *tabulae novae* aggiornate.

Fig. 1.12 - Particolare della carta di Pedro Reinel del Nord Atlantico, nota come *Kunstmann I*, post 1504; da notare, in vicinanza della costa del Labrador, la presenza di una scala delle declinazioni magnetiche (fonte: <http://digilander.libero.it>).

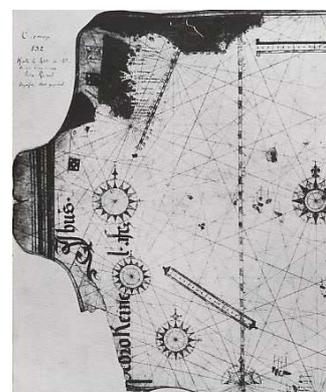


Fig. 1.13 - L'Italia in proiezione trapezoidale, in una incisione su rame del 1508, derivata da una precedente edizione del 1478 (fonte: Borri R., 1999).

Il Cinquecento vide una fioritura della cartografia, con produzione sia a stampa sia manoscritta; accanto alla produzione per così dire “ufficiale” ne comparve anche una “estetica”, con carte manoscritte in genere non originali, destinate non ad uso pratico ma a semplice decoro, tant’è vero che esse contenevano decorazioni, immagini di Santi e figure varie, stemmi e cartigli eleganti.

Con la sua *Carta marina* in 24 fogli, *Nova et aucta orbis terrae descriptio ad usum navigantium emendata et accomodata*, del 1569, il matematico e geografo fiammingo **Mercator** (latinizzazione del nome Gerard Kremer) pose le basi per la moderna cartografia nautica. Egli, infatti, cercando rimedio al problema del mantenimento della rotta da parte delle navi (che nel tener fisso l’angolo di rotta indicato dalla bussola descrivevano di fatto una curva lossodromica, scoperta che aveva fatto pochi anni prima il matematico portoghese Pedro Nuñez), propose una carta nautica sopra a cui le rotte potessero essere tracciate come linee rette (in quanto basata sul principio della conservazione del rapporto tra le lunghezze del grado di meridiano e del grado di parallelo della sfera): l’impossibilità di poter eseguire questa semplice azione era infatti il difetto fondamentale delle carte piane. Una carta nautica, per definirsi tale, deve infatti consentire il mantenimento degli angoli (deve essere isogonica) e permettere la rettificazione delle lossodromie. La carta del Mercatore era costruita sulla base di quella che fu chiamata *proiezione di Mercatore*, la proiezione cilindrica centrale, che si dimostrò di valore inestimabile per i navigatori di quel secolo e dei secoli seguenti, tant’è vero che è ancora tutt’oggi in uso per la cartografia nautica (fig. 1.14). Con la carta del Mercatore può quindi dirsi essere nata la cartografia scientifica. Ed il resto diviene storia moderna (Raisz E., 1937).



Fig. 1.14 - Carta del Mercatore *Nova et accurata orbis terrae descriptio*, del 1569
(fonte: <http://digilander.libero.it>).

1.1.3. La cartografia moderna

A partire dal XVI-XVII secolo la cartografia iniziò ad assumere un valore tecnico ed oggettivo, i connotati di modernità con cui la conosciamo oggi. A supporto della tecnica cartografica si svilupparono necessariamente anche la Geodesia (disciplina che si occupa della misura e della rappresentazione della Terra e del suo campo gravitazionale) e tutta la Scienza del Rilievo.

Vari furono gli avvenimenti che segnarono passi importanti in questo senso:

- comparve il primo atlante, inteso come raccolta sistematica di carte in tavole dello stesso formato (il nome derivò in seguito da un'opera di Mercatore, in cui il mitico Atlante misurava la Terra anziché sorreggerla com'era nella rappresentazione mitologica antica), dopo quello antico di Tolomeo, ad opera del fiammingo Abramo **Ortelio**: *Theatrum Orbis Terrarum* (1570);
- il matematico, fisico e astronomo olandese Willebrord Snell Van Royen (1591-1626), noto come **Snellius**, applicò la triangolazione al campo della Geodesia, misurando per primo una base geodetica, presso Leida, utilizzata per la misurazione geometrico-astronomica di un arco di meridiano (*Eratosthenes Batavus*, 1617); venne così a fornire il fondamento geodetico per le successive rappresentazioni cartografiche;
- **Newton** (1642-1727) affermò la legge di gravitazione universale (1687), da cui avrebbe preso piede l'idea di una forma ellissoidica della Terra (una sfera schiacciata ai poli) e di cui, tra l'altro, era stata data prova sperimentale dall'astronomo francese Richer nel 1671-1672;
- il 1728 vide la nascita delle **curve di livello** (ad opera dell'ingegnere olandese M. Samuel Cruquius), che vennero utilizzate nel 1791 dal matematico e cartografo francese Jean Louis Dupain Triel per rappresentare l'altimetria nella prima cartografia della Francia ad isoipse, equidistanziate 10 tese; passo importante anche questo, se si pensa che fino ad allora la rappresentazione della quota era stata trascurata o appena accennata in forma simbolica;
- nel 1747 Cesare Francesco **Cassini** de Thury (1714-1784) pubblicò la prima carta topografica rigorosamente geometrica, rappresentante, in 182 fogli (ma gli ultimi uscirono solo nel 1818), il territorio francese in scala 1:86.400, secondo la proiezione di Cassini, una cilindrica trasversa;
- nel 1791 l'Accademia francese delle Scienze stabilì l'adozione, come unità di misura delle lunghezze, del **metro**, definendolo come la

decimilionesima parte della distanza tra polo Nord ed Equatore lungo il meridiano terrestre passante per Parigi; quello che oggi sembra una banalità, probabilmente non lo era per quei tempi, se è vero che prima di allora le misure in carta si svolgevano con unità variabili da luogo a luogo (e, quando presente, la scala della carta ne è ancora oggi chiara testimonianza);

- sempre l'Accademia delle Scienze ebbe l'iniziativa di far eseguire misurazioni del grado di longitudine (grazie all'invenzione del sestante e di cronometri precisi), che, nel corso del Settecento, portarono alla determinazione più precisa delle coordinate geografiche;
- i matematici Johann Heinrich Lambert (1728-1777) e Giuseppe Luigi Lagrange (1736-1813) si occuparono del problema delle proiezioni, inventandone di nuove.

1.1.3.1. La rappresentazione della città

Nel corso del XVI secolo si produssero anche numerose carte di città, solitamente in rappresentazioni di tipo prospettico, con un punto di osservazione obliquo e non zenitale, in modo da raffigurare le facciate degli edifici e tutti gli elementi architettonici della città. Caso a sé fu quello di **Leonardo da Vinci**, che con la sua *Mappa di Imola* (1502) si mise in posizione completamente zenitale (come era stato, prima di questa, solo con la *Forma Urbis Romae* di età romana), introducendo degli elementi di rappresentazione che precorrevano i tempi (per secoli non avrebbero avuto seguito): la differenziazione tra spazi pubblici e privati, la delimitazione delle singole unità immobiliari come in un moderno catasto, la messa in risalto degli edifici più rilevanti.

Nel corso del XVII secolo, rimase ancora forte la tendenza a rappresentare il tessuto urbano con riprese in visione prospettica, anche se il punto di vista tendeva ad alzarsi sempre più verso lo zenit. Le mappe urbane di questo secolo ricadono in 4 possibili classi di rappresentazione:

- mappe prospettiche con punto di osservazione medio-alto, in modo da consentire una facile lettura e una rappresentazione esteticamente preferibile; questo è il gruppo in cui rientra il maggior numero di carte urbane in Europa;
- mappe di fortificazioni urbane, per lo più in proiezione zenitale, in cui sono rappresentati le mura, la cittadella fortificata, gli edifici

monumentali, i corsi d'acqua, i ponti, e solitamente non il territorio esterno alle mura;

- mappe urbane in vista zenitale in cui la città si presenta come elemento del territorio, che viene dunque rappresentato;
- mappe delle nuove città fondate.

Accanto alle rappresentazioni cartografiche urbane, si sviluppò nel corso del secolo una produzione nuova, il vedutismo, col quale la città nel suo complesso o solo alcuni particolari edifici venivano raffigurati da un certo punto di osservazione.

Il XVIII secolo vide l'innalzarsi sempre più del punto di vista, fino a coincidere con lo zenit. Le nuove esigenze di maggior esattezza ed oggettività scientifica determinarono in tutta Europa il graduale passaggio dalla mappa prospettica a quella zenitale. Quest'ultima divenne, a metà del secolo, il modello più diffuso per la rappresentazione della città, e, nel secolo successivo, l'unico possibile, in quanto documento scientificamente valido ed oggettivo: sostituì definitivamente ogni altro mezzo di rappresentazione urbana, come vedute e panorami, considerati espressione d'arte. Di pari passo andava scomparendo la rappresentazione scenografica, per dar posto a quella icnografica pura. Questi risultati rispecchiavano perfettamente il perfezionamento degli strumenti di misura che si era andato attuando nel corso di quegli anni, e la conseguente maggior precisione dei rilievi e della trasposizione in carta dei dati; inoltre rispondevano all'esigenza, propria di questo secolo, di cercare la vera forma degli edifici e della città nel loro complesso, nell'ottica di un utilizzo più specialistico della mappa urbana (come sarebbe successo con le mappe catastali del secolo seguente). Caratteri distintivi di questa nuova produzione sono dunque:

- una raffigurazione oggettiva della città;
- lo schema planimetrico dettagliato;
- la delimitazione precisa degli edifici e degli isolati;
- l'identificazione delle strade mediante una ricca toponomastica;
- la caratterizzazione delle aree verdi interne alla città;
- medesimo grado di importanza dato a ciò che sta dentro e ciò che sta fuori dalle mura;
- il sempre minor utilizzo di decorazioni.

Le carte urbane di questo secolo furono le prime del genere a presentare una planimetria attendibile per forma e dimensione; di conseguenza risultano ancor oggi strumento fondamentale di conoscenza della città di quel tempo (Docci M., Maestri D., 1993) (Cantile A., 2007).

1.1.3.2. Le cartografie ufficiali

Il XVIII fu il secolo delle cartografie ufficiali dei grandi Stati (la Francia in primo luogo), a media e grande scala, ad uso soprattutto militare, catastale, o per necessità lavorative (come ad esempio la regolazione delle acque), prodotte sulla base del rilievo sistematico dei territori, mediante bussola, misura delle distanze, elementari triangolazioni; in Italia ricca è soprattutto la cartografia della zona lagunare di Venezia. Il primo esempio di servizi geodetici di Stato per la realizzazione sistematica di lavori a fini cartografici e catastali, oltre che scientifici, è il *Trigonometrical Survey of Great-Britain*, istituito nel 1791 in occasione della misura della base Houslow-Heath mediante il distanziometro a fili fissi e stadia divisa, realizzato da J. Watt e W. Green. All'interno dei servizi geodetici, nacquero, in questo secolo, le figure degli ingegneri-topografi militari. Essendo assunta quale documento legale, esatto e dunque imparziale, strumento di gestione politica al servizio dello Stato, la carta andò acquistando, in questo secolo, un ruolo del tutto nuovo.

Inoltre questo fu il secolo in cui la cartografia si differenziò, trovando applicazione in molti settori dell'attività umana: il rilevamento geologico, l'indagine meteorologica e climatica, la didattica, la storia, l'economia, l'industria, l'amministrazione.

Il XIX fu il secolo di consolidamento delle conoscenze raggiunte nel corso del Settecento, di perfezionamento degli strumenti e delle tecniche di misura, e di nascita delle cartografie basate su rappresentazioni moderne. Da ricordare è la *Carta di Gauss* (dal matematico, astronomo, fisico e geodeta tedesco Karl Friedrich **Gauss**, 1777-1855), basata sulla omonima rappresentazione, di tipo conforme, in adozione ancora oggi per l'intera cartografia mondiale. Da ricordare è anche il cartografo francese August **Tissot** (1824-1896), per gli studi sulle deformazioni indotte dalle varie proiezioni cartografiche: da lui prese il nome l'ellisse indicatrice dei moduli di deformazione. L'astronomo, matematico e geodeta tedesco Friedrich Wilhelm **Bessel** (1784-1846) definì un nuovo ellissoide (detto appunto "di Bessel") in base al calcolo di un valore più preciso di schiacciamento. Le ricerche di Friedrich Robert **Helmert** (1843-1917), sulla deviazione della verticale rispetto alla normale, confluirono nel suo primo volume, pubblicato nel 1887. La costituzione, nel 1864, di un'*Organizzazione internazionale per le misure geodetiche*, consentì, nel secolo successivo, l'allestimento di cartografie nazionali da parte di vari Stati. In Italia (unita in Regno nel 1861) ciò fu condotto dall'Istituto Topografico Militare, nato nel 1872 (e che dieci anni dopo

assunse l'attuale denominazione di IGM, Istituto Geografico Militare), che mise a punto la grande produzione cartografica nazionale, con il rilievo alla scala 1:25.000 (ultimato nel 1900), e la redazione delle carte d'Italia al 50.000 e al 100.000 (di cui l'ultimo foglio comparve nel 1921). Aggiornata e rieditata negli anni, questa cartografia è ancora oggi quella di base per il territorio italiano (Sestini A., 1981).

1.1.4. Antichi strumenti di rilievo a fini cartografici

Le civiltà antiche, i Greci e i Romani avevano inventato, spesso derivandoli dalle scienze astronomiche, diversi strumenti di rilievo. Di alcuni di questi si perse traccia per lungo tempo nel corso della storia, per poi riscoprirli solo secoli più avanti, talvolta attribuendo loro nomi differenti, spesso di derivazione araba (come ad esempio per il nome latino medievale *alidada*, che deriva dall'arabo *al-dāda*). Nel tempo questi strumenti vennero perfezionati, sia per quanto riguarda la maneggevolezza, sia per quanto riguarda la precisione, facendosi espressione delle innovazioni della scienza e della tecnica. Fu soprattutto in epoca rinascimentale (dalla seconda metà del XIV secolo fino al XVI secolo) che si andarono riscoprendo ed affinando gli antichi strumenti di rilievo o se ne costruirono di nuovi, con connotati tipicamente "topografici". A spingere in questa direzione furono le necessità imposte dai primi rilevamenti per scopi cartografici dell'Europa centrale, che vennero perlopiù eseguiti mediante odometri per la misura delle distanze e bussole magnetiche per la misura delle direzioni.

Per quanto riguarda le misure di lunghezze e distanze, i più antichi strumenti di cui si ha traccia consistono in **regoli rigidi, aste, canne e pertiche**; questi o analoghi strumenti vennero usati fino alla fine dell'Ottocento. Le unità di misura utilizzate erano derivate da parti del corpo umano: il *cubitus* dei Romani (cioè il braccio), lo *stadium* dei Greci (cioè lo stadio, da cui il termine *stadia*), il passo, il piede, la tesa. Accanto a questi antichi strumenti ricomparve, nella seconda metà del XV secolo, riscoperto da Leonardo da Vinci, l'**odometro**, strumento di cui non si conosce né il periodo di invenzione (comunque molto antico, in quanto le prime descrizioni ci sono fornite da Vitruvio, e probabilmente utilizzato dai Romani per il posizionamento delle pietre miliari) né l'inventore (ma forse si tratta di Archimede). L'odometro (dal greco

hodos, strada, e *metron*, misura) è una macchina calcolatrice per la misura della distanza percorsa. Nella versione di Leonardo da Vinci (1452-1519), l'odometro è una sorta di carriola trainata da una persona, e dotata di due ruote dentate: una verticale, messa in movimento dal mozzo della ruota, ed una orizzontale, azionata solo ad ogni giro completo della prima. Quest'ultima permette la raccolta in un apposito contenitore di sassi, o di sfere (di legno o metallo), dal cui numero si risale alla distanza percorsa (fig. 1.15). Nel suo *Codice Atlantico*, Leonardo illustra il metodo di rilievo oggi noto col nome di "intersezione in avanti", utilizzando l'odometro per la misura della lunghezza della base e la diottra con bussola per la misura degli angoli (Docci M., Maestri D., 1993).

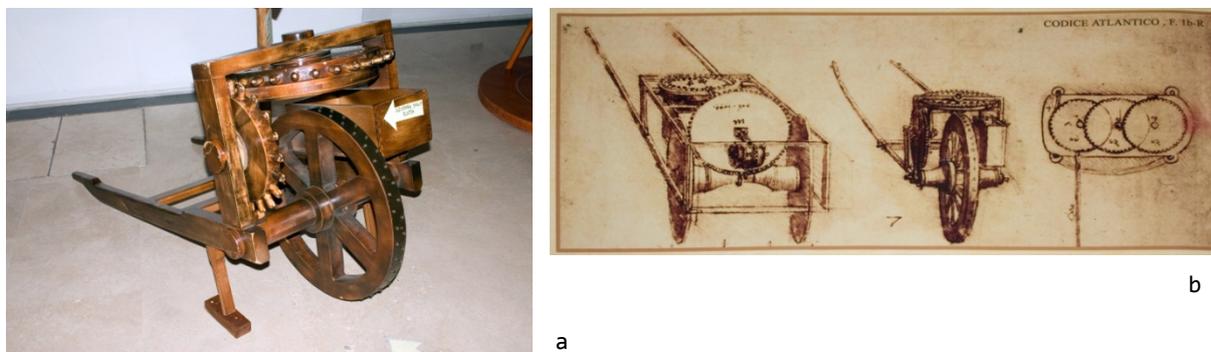


Fig. 1.15 - Ricostruzione dell'odometro (a),
 disegnato e descritto da Leonardo da Vinci nel *Codice Atlantico* (b)
 (mostra *Leonardo da Vinci - Il genio e Le invenzioni*,
 Palazzo della Cancelleria, Roma, 30/4/2009 - 30/4/2010)

Per quanto riguarda le misure di angoli e direzioni, il più antico strumento di cui si ha testimonianza nella storia è lo **gnomone** (probabilmente inventato da Anassimandro), consistente in un palo infisso verticalmente nel terreno, al centro di circonferenze concentriche: la lunghezza dell'ombra prodotta dal palo al sole, in rapporto alla lunghezza del palo, indicava l'angolo dei raggi solari rispetto al piano orizzontale. Altro antico strumento è il **bastone di Giacobbe** (o *baculum*, o arboreto, o croce geometrica), diffuso anche fra gli Egizi, gli Ebrei e gli Arabi per fini astronomici, per la determinazione della distanza angolare tra due astri e dell'altezza del sole sull'orizzonte. Era costituito da due regoli di legno disposti a croce, di cui il più lungo, graduato, scorreva entro un foro praticato in quello più corto. Lo strumento venne utilizzato anche nei secoli seguenti, fin oltre la metà del XVI secolo, assumendo sulle navi il nome di balestriglia. Altro antico

strumento (circa 120 a.C.) per misurare direzioni è la **diottra a traguardi** (o alidada). Si tratta di una riga di legno alle cui estremità erano applicati verticalmente due diaframmi forati (uno “oculare”, l’altro “obiettivo”), i cui centri individuavano la linea di mira. Anch’esso di origini antiche, greche e romane, poi utilizzato in epoca medievale per misure astronomiche e topografiche (col nome di *instrumentum gnomonicum* o *instrumentum mediclinorum*), il **quadrato geometrico**, con le sue varianti (il quarto di cerchio, la squadra mobile) trovò larga diffusione nel XV e XVI secolo, essendo utilizzato a fini architettonici e cartografici, per misure angolari sia su piani orizzontali sia verticali, ed anche per misure di lunghezza. Era essenzialmente composto da quattro regoli di legno, due dei quali graduati, disposti a formare un quadrato; un altro regolo incernierato ad un vertice del quadrato, e libero di ruotare di un angolo di 90°, individuava la linea di mira (detta alidada), con cui l’osservatore collimava un punto (Borchi E., Macii R.). La **bussola**, di origine ancora incerta, iniziò ad essere usata in modo costante a fini di rilievo topografico nel corso del Quattrocento. Leonardo da Vinci la descrisse in varie applicazioni e ne diede vari disegni; la usò per i rilievi della città di Imola e per quelli delle rocche di Cesena e di Urbino. Sicuramente l’avvento della bussola segnò una tappa fondamentale nella storia del rilevamento, in quanto pose l’attenzione verso il nord, con conseguente orientamento delle carte in quella direzione, a differenza di quanto era stato fatto fino ad allora.

La testimonianza dell’invenzione e dell’uso, da parte di Greci e Romani, di strumenti per il rilievo, ci è giunta attraverso i manuali scritti al riguardo: ne sono esempio l’*Almagesto* di Tolomeo del II secolo d.C., in cui si descrivono il cerchio equatoriale, il regolo parallattico, il cerchio diviso o graduato, e il *De architettura* di Vitruvio del I secolo a.C., in cui si descrivono la *dioptra*, la libella aquaria, il corobate, l’odometro. Molto rare sono invece le testimonianze di scritti analoghi di età medievale: non a caso, questo fu un periodo buio nell’uso degli strumenti di rilievo e nella pratica cartografica. Traduzioni di opere precedenti ed una nuova manualistica rifiorirono solo nei secoli XV e XVI ad opera di astronomi e di cultori della cosiddetta “geometria pratica”, contemporaneamente alla riscoperta di quegli antichi strumenti il cui uso era stato abbandonato da secoli, e all’emergere della concezione della cartografia come disciplina scientifica. L’attenzione si rivolse alla fabbricazione degli strumenti descritti nelle opere degli autori greci, al perfezionamento degli strumenti trasmessi dagli Arabi, e all’invenzione di nuovi, dandone trattazione in diverse opere (Docci M., Maestri D., 1993) (Woodward D., 2007):

- l'**orizzonte** (descritto nel *Ludi Rerum Mathematicarum*, 1450-1452), strumento derivato dal dorso dell'astrolabio, così denominato da **Leon Battista Alberti** (1404-1472) e da lui utilizzato per i rilevamenti di Roma, secondo uno schema di intersezione in avanti facendo stazione dagli estremi di una base misurata e collimando punti visibili (anche se a questo metodo deve essere associato un rilievo di dettaglio dal basso, per tutte quelle parti all'interno della città non visibili dagli estremi della base) (fig. 1.16);
- il **bossolo**, in sostanza un grafometro con bussola a cerchio intero, di **Nicolò Tartaglia** (1499ca.-1557): *Quesiti et inventioni diverse* (dove, nel quinto libro, *se insegna il modo di mettere rettamente il disegno con el Bossolo, Li siti, Paesi, et Le piante delle Città, con el modo de fabricar il detto Bossolo in dui modi*), 1546;
- la **bussola a doppio quadrante**, il cui uso nel rilievo per intersezione in avanti (a partire da una base di lunghezza nota) venne illustrato da **Cosimo Bartoli** (1503-1572) nel suo *Del modo di misurare Le distantie, Le superfici, i corpi, Le piante, Le province, Le prospettive, et tutte Le altre cose terrene, che possono occorrere a gli huomini, secondo Le vere regole d'Euclide, et de gl'altri più lodati scrittori* (1564), oggi testo di fondamentale importanza per lo studio dello stato dell'arte per quanto riguarda i rilevamenti nel XVI secolo (fig. 1.17);
- l'**olometro**, descritto e utilizzato da **Abel Fullone** (1513-1563): *Descrittione et uso dell'Holometro. Per sapere misurare tutte Le cose, che si possono vedere coll'occhio così in lunghezza, et larghezza; come in altezza, et profondità. Ritrovato per Abel Fullone, valletto di camera del re di Francia, neccessario a quelli che vogliono prontamente et senza fare alcuna ragione arithmetica sapere Le distantie de' Luoghi, misurare la terra; et tor in disegno paesi, et città*, 1564;
- il **radio latino**, inventato da Orsini e descritto diffusamente da **Egnazio Danti** (1536-1586) nel suo *Trattato del Ratio Latino. Istrumento giustissimo & facile piu d'ogni altro per prendere qual si voglia misura, & positione di Luogo tanto in Cielo, come in Terra. Il quale oltre alle operazioni proprie sue fa anco tutte quelle della gran regole di C. Tolomeo, et dell'antico Radio Astronomico. Inventato dall'ILL.^{mo} et Eccell.^{mo} signor Latino Orsini*, 1583 (fig. 1.18);
- la **squadra mobile**, inventata da **Ottavio Fabri** (XVI sec.): *L'uso della squadra mobile. Con la quale per teoria et per pratica si misura geometricamente ogni distanza, altezza, e profondità. S'impara à perticare, liuellare, et pigliare in dissegno Le Città, Paesi, et*

Provincie. Il tutto con le sue dimostrazioni intagliate in rame. Da Ottavio Fabbri messa in luce, 1598 (fig. 1.19).

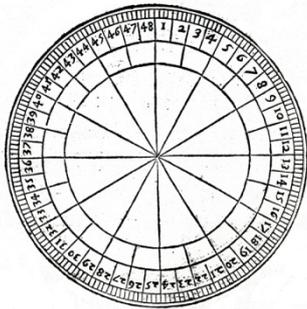


Fig. 1.16 - Schema dell'orizzonte di Leon Battista Alberti (fonte: <http://www.imss.fi.it>).

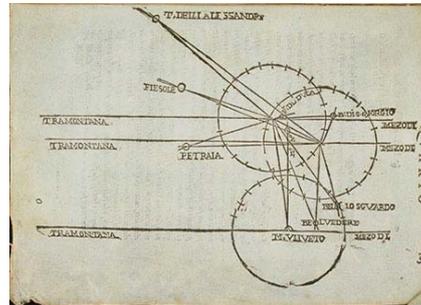


Fig. 1.17 - Uso della bussola nel manuale di Cosimo Bartoli (fonte: <http://www.imss.fi.it>).

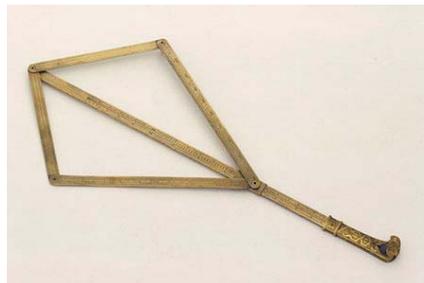


Fig. 1.18 - Radio latino inventato da Orsini e descritto da Egnazio Danti (fonte: <http://www.imss.fi.it>).

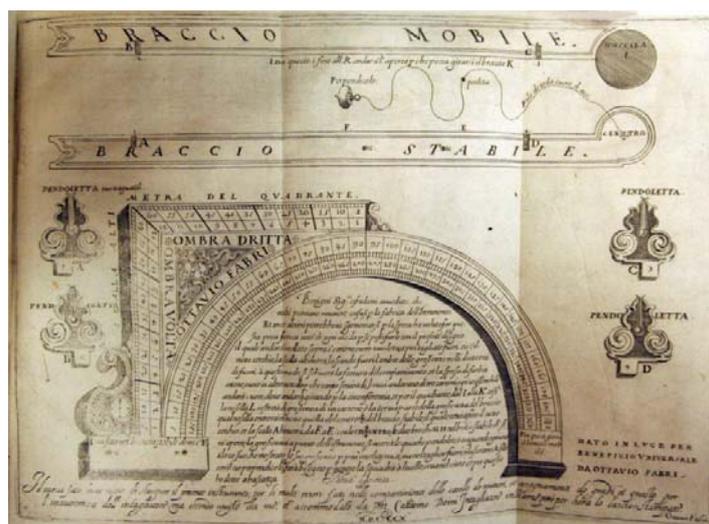


Fig. 1.19 - Disegno della squadra mobile di Ottavio Fabri da *L'uso della squadra mobile*, 1673 (Biblioteca Dore, Facoltà di Ingegneria, Università di Bologna).

Tutte le esperienze pratiche condotte da questi personaggi dell'epoca furono raccolte nel principio di **intersezione in avanti**, enunciato nel 1533 da **Gemma Frisius** (1508-1555). Infatti allora le tecniche di rilievo si basavano su semplici principi di triangolazione, consistenti nella misura di angolo tra 2 punti, collimati a partire da quello di stazione. La misura era sempre eseguita con traguardo ottico, consentendo comunque di raggiungere una precisione generalmente superiore rispetto a quella ottenibile con misure dirette di distanza («*Non vò mancare di dire che questo modo passato, se bene è facile a mettere in atto, saputo che haremo le miglia de Luoghi, non è però molto fedele, mediante la inegualità delle miglia, non andando sempre le strade per linee rette da luogo à luogo, ma torte in verso più lati, secondo il caso, ò la occasione del paese: et però è di necessità, che metterlo poi in atto faccia su la carta qualche varietà*» (Bartoli C., 1564)) (Vagnetti L., 1970). Almeno una misura di distanza era però necessaria al fine di dare la giusta scala al disegno, eseguito riportando in carta le misure effettuate in campagna, talvolta utilizzando lo stesso strumento di rilievo. Per la misura delle altezze e delle profondità, gli strumenti stessi erano dotati di apposite scale altimetre, costruite sulla base di relazioni angolari; la misura avveniva quindi, sostanzialmente, sfruttando le relazioni della prospettiva: «*Nondimeno generalmente i principij sono gli istessi di tutte le parte del misurare. [...] Et così ciascuna altezza da esser misurata ouero spatio, ò pure profondità si de sempre pigliar come linee dritte, com'è manifesto, & sempre l'altezza con lo spatio fanno un'angolo dritto, cioè C. [...] & alcuna volta sotto l'angolo B. io conosco l'A,C. & alcune altre sotto l'A. io conosco il B,C. & in questa maniera secondo la piccolezza di quei due angoli acuti A, & B. si come la cosa maggiore, & minore, & questo mediante il senso col discorso della ragione, come si caua dalla Prospetiuia. Ma perche non è veramente possibile, che il senso, & la ragione conoscano la vera quantità dell'angolo acuto variato, perciò sarebbe cosa difficilissima, massimamente con la sola scienza della prospettiua conoscere la certissima quantità. Onde gli Antichi misuratori delle cose trouarono l'arte con alcuni stromenti artificiali, mediante la quale si conoscono con certezza la grandezza delle cose.*» (Fabri O., 1673) (fig. 1.20).

Nei suoi *Ludi Rerum Mathematicarum*, Alberti descrive varie procedure di rilievo del territorio e di geometria pratica, come il calcolo dell'altezza di una torre o della larghezza di un fiume. Insegna al lettore a costruire uno strumento circolare graduato e ad usarlo a fini di rilievo: a partire da un luogo piatto e alto, dal quale vedere molti punti notevoli nell'intorno, come torri e campanili, si eseguono misure di

angolo collimando i vari punti; eseguendo la medesima operazione anche dagli altri punti, si riescono a fissare le proporzioni di una serie di triangoli, che sono scalabili dalla conoscenza, mediante misura, della lunghezza di un solo lato (Woodward D., 2007).

L'introduzione, nel 1594, del **calcolo logaritmico**, da parte dello scozzese **Giovanni Napier** (1550-1617), apportò una semplificazione notevole nel calcolo trigonometrico, in precedenza risolto mediante il tracciamento grafico, sicuramente speditivo ma poco preciso; il nuovo metodo andò quindi a vantaggio di una maggior precisione nelle operazioni di rilievo e di stesura delle misure in carta.

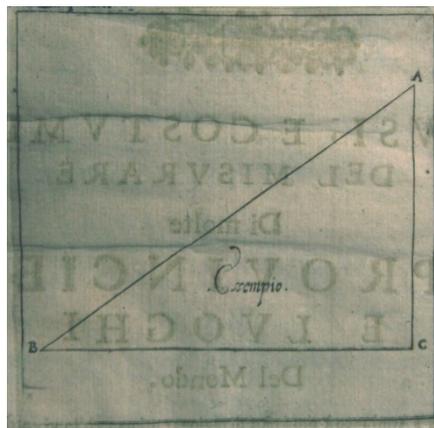


Fig. 1.20 - Esempio di misura dell'altezza AC a partire dalla misura dell'angolo in B e della lunghezza di BC: tale valore può essere ricavato mediante regole prospettiche o strumenti di rilievo (Ottavio Fabri, *L'uso della squadra mobile*, 1673; conservato presso la Biblioteca Dore, Facoltà di Ingegneria, Università di Bologna).

Non è facile, oggi, valutare gli errori, sia in tipo sia in entità, che potevano essere commessi con questi strumenti durante la fase di rilievo in campo, nonché di disegno su carta. Di sicuro allora non c'erano ancora né la coscienza né la conoscenza che abbiamo noi oggi riguardo agli errori di misura e alla loro propagazione. Tuttavia si era già da tempo consci della problematica derivante dallo sviluppo della sfera su un piano, e iniziava a farsi strada la problematica degli errori derivanti da una troppo grande estensione della zona cartografata: «*Et se bene io so, che essendo il mondo di forma Sferica, egli non hà convenientia alcuna con il piano; nel descrivere nondimeno una Provincia, ò un regno di 300 - 400 miglia non può nascere tal errore, ò differentia che sia in un certo modo sensibile, ò apparente*» (Bartoli C., 1564) (Vagnetti L., 1970). Inoltre era risaputo che al diminuire delle dimensioni dello strumento diminuiva anche la precisione, come dice ad esempio Fabri a riguardo della sua squadra mobile: «*auuertendo, che Lo Strumento serue anco della medesima*

grandezza come vedrai La Figura, ma è ben vero, che più grandi, che sono gli Strumenti tanto ò più sono giusti. & massimamente questo che doveri hauere Le braccia sue una honesta Lunghezza almeno d'un piede per ogni braccio, rispetto a' traguardi» (Fabri O., 1673). Gli strumenti avevano precisioni sicuramente basse per i canoni moderni (1° o 2° nell'apprezzamento degli angoli, senza contare i possibili errori strumentali) e le operazioni di misura in campo e di rappresentazione in carta venivano eseguite con modalità (il traguardo ottico, l'utilizzo di strumenti di dimensioni non idonee, ecc.) per le quali non è possibile, oggi, definire chiaramente la precisione associata. Solo facendo ipotesi semplificative riguardo ad errori strumentali, precisioni e modalità operative, è possibile tentare moderne analisi di propagazione dell'errore (ad esempio nel caso di rilievo per triangolazione) (Fanello G.L., 2001).

1.1.5. Moderni strumenti di rilievo a fini cartografici

In epoca rinascimentale e posteriore, accanto alla riscoperta e al perfezionamento di strumenti di rilievo antichi, ereditati da Greci e Romani, vi fu l'invenzione di strumenti nuovi (fig. 1.21). E' il caso del *polimetricum*, inventato dal topografo e cartografo Martin Waldseemüller (1470-1521). Questo fu il primo strumento per la misura di angoli sia orizzontali (mediante cerchio orizzontale con al centro un quadrato) sia verticali (mediante un semicerchio verticale, la cui perpendicolarità era garantita da un filo a piombo), ed era inoltre provvisto di bussola per la misura di angoli di direzione. Il *polimetricum* fu un precursore del *theodolitus* (1522), un astrolabio semplificato costruito dall'inglese Leonard Digges (1520-1599): un quadrato, due lati del quale erano divisi in 1200 parti uguali, inscriveva un cerchio diviso in 360 parti; il vantaggio rispetto al precursore era il fatto di avere la bussola coassiale col cerchio orizzontale, il quale era girevole. Il primo vero e proprio teodolite è l'*instrument topographical* (per eccellenza), costruito dallo stesso Digges nel 1573. In Italia uno strumento analogo, costruito ad opera di Gallucci (1598), assunse il nome di **visorio**. Il primo goniometro che possa chiamarsi "teodolite" nel senso moderno della parola è del 1787, costruito dall'inglese J. Ramsden. Dal primo esemplare che comparve sul campo, il teodolite, strumento che ha fatto storia in Geodesia e Topografia, fu variamente perfezionato durante gli ultimi

secoli, fino ad arrivare nella sua veste finale nel Novecento. Altro strumento topografico tra i più famosi è la **tavoletta pretoriana** (circa 1576), il cui nome deriva da Johannes Richer (1537-1616) di Norimberga, detto Praetorius. Nelle versioni ottocentesche, un sostegno formato da tre gambe reggeva un piano di lavoro su cui era distesa la carta in fase di disegno, oltre ad una livella, un declinatore magnetico e l'alidada a cannocchiale; un meccanismo consentiva di rendere orizzontale il piano di lavoro e orientarlo secondo una prefissata direzione. Questo si sarebbe rivelato essere uno strumento tra i più utilizzati nel corso dei secoli, in quanto molto comodo per misurare gli angoli di direzione e rappresentarli sul foglio direttamente in campagna.



Fig. 1.21 - Bussola topografica del XVII secolo (fonte: <http://www.imss.fi.it>).

Svolta decisiva per la Topografia fu l'introduzione, negli strumenti topografici, del **cannocchiale**, nato in Olanda tra il 1604 e il 1609, ed in seguito perfezionato da Galileo. Del 1608-1611 è il primo cannocchiale astronomico (probabilmente ad opera dell'italiano Fontana), il tipo effettivamente utilizzato in Topografia. A questo, il Porro aggiunse una lente anallattica tra obiettivo e reticolo (cannocchiale centralmente anallattico, 1850), che permise l'attenuazione degli errori; costruì anche il **tacheometro** (da lui detto teodolite olometrico) e fu autore della teoria della celerinmensura. Da questo momento, l'evoluzione degli strumenti topografici risultò indissolubilmente legata al perfezionamento dell'ottica.

Altro passo importante fu l'introduzione della **livella a bolla d'aria** negli strumenti topografici, cosa che avvenne per la prima volta nel 1702 ad opera di Allain Manesson Mallet. Il livello fece poi la sua comparsa nel 1770. Solo nel 1909 circa venne introdotta la bolla con lettura a coincidenza d'immagini ad opera della Casa tedesca Zeiss e di quella svizzera Wild. Con la livella a bolla d'aria iniziò una nuova era per gli

strumenti topografici, sia dal punto di vista costruttivo sia di quello dell'utilizzo. Alla fine del Novecento, con la nascita e lo sviluppo del digitale, gli strumenti topografici si sono arricchiti di questo carattere, trasformandosi in livelli digitali per rilievi altimetrici, distanziometri per quelli planimetrici, in moderne stazioni totali e nella strumentazione GPS per rilievi di tipo tridimensionale (Cantile A., 2007).

1.1.5.1. La Fotogrammetria

Oggi, questi classici strumenti topografici, seppur nelle loro diverse versioni, rimangono utili, nel campo della Cartografia, solo per piccoli rilievi o per aggiornamento di cartografia preesistente, ma non per produzione di cartografia *ex-novo*. Nel corso del Novecento, infatti, si andò sviluppando una tecnica completamente differente per il rilievo a fini cartografici; questa prese avvio da un'invenzione avvenuta nel corso del secolo precedente, la **fotografia** (che, dal greco $\varphi\omega\varsigma$, *phôs* (genitivo *phôtòs*) e $\gamma\rho\alpha\phi\acute{\iota}\varsigma$, *graphìa*, significa "disegno per mezzo della luce"). Il termine, nato a designare il procedimento, è passato poi a designare anche il suo risultato, le immagini stampate, che verranno abbreviate in *foto*, dal francese *photò*, solo a partire dagli anni Trenta del Novecento.

La scoperta spetta a due personaggi francesi: prima il chimico **Joseph-Nicéphore Niepce** (1765-1833), a cui si deve la prima fotografia della storia (1826), in quanto fu il primo ad aver reso permanente un'immagine, fissandola su una lastra di peltro (riproducendo una veduta di una casa ripresa dalla finestra del laboratorio, e ottenuta dopo ben otto ore di esposizione al sole, tanto che la luce colpisce due lati opposti della casa), poi il pittore e decoratore di scenari teatrali **Louis-Jacques-Mandé Daguerre** (1787-1851), a cui spetta il merito di aver diffuso la nuova tecnica, rendendola pratica e popolare, e che da lui prese il nome *dagherrotipia* (fig. 1.22). La nascita ufficiale della fotografia fu il 19 luglio 1839, quando ne venne proposto l'acquisto alla Camera dei deputati di Parigi da parte del fisico D.F. Arago: da questa data essa divenne di dominio pubblico, condizionando irreversibilmente il futuro della società. Il nuovo procedimento acquistò il nome di fotografia su proposta di un certo Herschel, in una lettera scritta al fisico **William Henry Fox Talbot** (1800-1877). Quest'ultimo fu il terzo grande fotografo della storia, inventore del processo alla base dell'attuale stampa fotografica, il negativo-positivo. Del 1888 è la prima macchina fotografica per dilettanti, la Kodak: il nome fu inventato rispettando tre semplici

caratteristiche, quelle di un nome breve, facile da pronunciare (per l'appunto la lettera "K", forte ed incisiva nel suono, sembrava essere giusta allo scopo) e che non ricordasse nient'altro se non se stesso. Celebre lo slogan inventato dal fondatore George Eastman: «*You press the button, we do the rest*» («Premete il bottone, noi facciamo il resto»). Con questa si potevano ottenere fino a 100 fotografie, rotonde e del diametro di 6 cm, da far sviluppare alla casa produttrice (fig. 1.23).

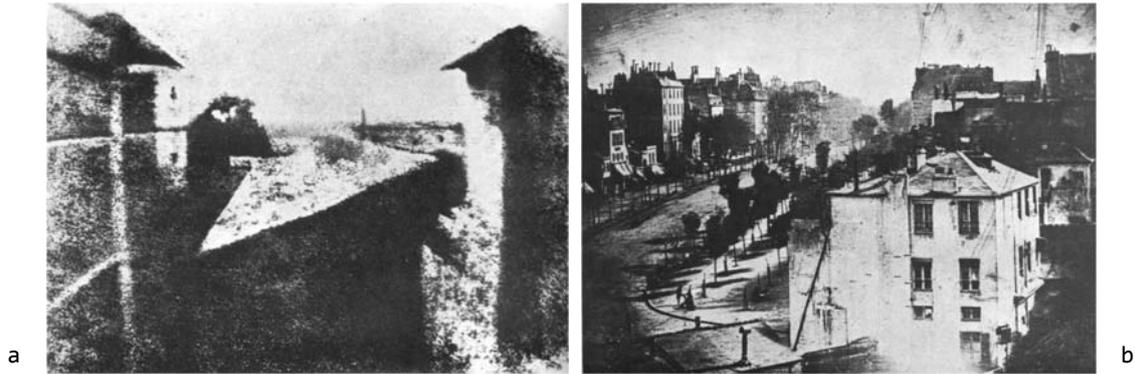


Fig. 1.22 - Gli albori della fotografia:

a) la prima foto (Niepce, 1826); b) dagherrotipo (Daguerre, 1839).

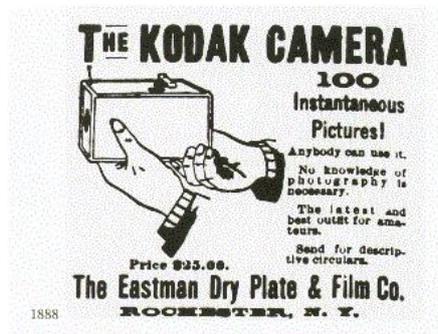


Fig. 1.23 - Manifesto pubblicitario Kodak (1888) (fonte: <http://commons.wikimedia.org>).

Le caratteristiche particolari della fotografia ne hanno fatto negli anni un oggetto insostituibile, nonché il linguaggio più comune della nostra società: la riproduzione fedele - seppur, come spesso dimostra, apparentemente fedele - della realtà, l'immediatezza, l'incisività, la semplicità con cui può essere ottenuta, nonché la riproducibilità in un'infinità di copie, la facilità di comprensione, l'accessibilità a tutti. La fotografia, entrando a contatto con ogni singola persona, raggiungendo la massa, dunque, e non solo un'élite, e divenendo la base degli odierni mass-media (primo dei quali fu *Life*, una tra le più

importanti riviste illustrate del mondo, nata nel 1936), è andata a rivoluzionare la visione del mondo, mutandola per sempre. Ma non si tratta di un'invenzione di notevole impatto solo sul modo di comunicare, bensì anche sul settore cartografico. Dopotutto, la carta è in primo luogo una forma di comunicazione. Al di là della soggettività con cui può essere stata prodotta nel corso della sua storia, al di là del simbolismo spesso associatovi, e della stilizzazione richiesta per scopi specifici, la carta vuole comunicare le fattezze di un territorio, la conformazione di un rilievo, l'intreccio di una rete stradale, la natura degli affioramenti rocciosi, i confini di uno Stato, un qualche tematismo tra gli infiniti possibili. Scopo della carta, insomma, è la rappresentazione della realtà attraverso un'immagine. E la più vera immagine della realtà è proprio una foto. Non a caso *The Pencil of Nature* (*La matita della natura*) è il nome attribuito alla neonata tecnica fotografica nel titolo del primo libro illustrato di fotografie, scritto da William Henry Fox Talbot e pubblicato a Londra da Longman, Brown, Green & Longmans (1844-1846). Nel suo libro l'autore afferma: «*The plates of the present work are impressed by the agency of Light alone, without any aid whatever from the artist's pencil. They are the sun-pictures themselves, and not, as some people have imagined, engravings in imitation*» («Le tavole del presente lavoro sono ottenute solo per azione della luce, senza alcun aiuto da parte della matita dell'autore. Esse sono pitture del sole, e non, come alcune persone hanno pensato, imitazioni») (fig. 1.24) (Arborio Mella F., 1976).

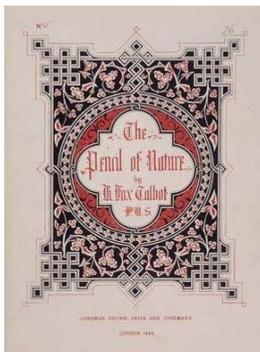


Fig. 1.24 - Frontespizio di *The Pencil of Nature* (1844-1846), il primo libro illustrato di fotografie (fonte: <http://commons.wikimedia.org>).

Nel XIX secolo il mondo si arricchì dunque della fotografia. E nel XX, assieme ai primi voli e poi all'invenzione dell'aereo (1903), la tecnica cartografica si arricchì della **aereofotogrammetria** (prima da pallone, poi da aereo), inizialmente chiamata topofotografia. La prima fotografia aerea della storia fu scattata nel 1858, realizzata da mongolfiera dal celebre fotografo francese, oltre che scrittore e caricaturista, Gaspar Felix Tournachon, noto col nome di Nadar (1820-1910). In Italia le prime foto

riprese dall'alto (in particolare da pallone frenato, mediante camera Zeiss con obiettivo di focale 150 mm, e con un formato lastra di 21 x 21 cm) risalgono alla fine del secolo e riprendono il Foro Romano; degli inizi del Novecento (1908-1909) sono invece immagini che riproducono il corso del Tevere, a scala 1:3.500, ma senza vista stereoscopica, in una ripresa effettuata dal Genio Militare (Boemi M.F., 1999). Era iniziata una rivoluzione per la tecnica cartografica, sia dal punto di vista del processo di produzione (la restituzione fotogrammetrica a fini cartografici), sia dal punto di vista della visualizzazione in carta dell'informazione territoriale (l'ortofoto).

La tecnica aerofotogrammetrica fu sviluppata nella prima metà del XX secolo, soprattutto sulla base all'esperienza maturata in occasione della Prima Guerra Mondiale per quanto riguarda l'utilizzo di fotogrammi aerei ripresi durante le operazioni belliche; divenne poi, nel corso del secolo, il metodo principe per la redazione di carte. Ma per giungere ad un siffatto risultato, il terreno doveva essere stato preparato già anni prima (Borchi E., Macii R.):

- nel 1791-1793 fu realizzato per la prima volta, da Beautemps-Beaupré, il passaggio tipico della fotogrammetria: da due proiezioni prospettiche di una stessa porzione di terreno (in questo caso prospettive a mano libera prese da punti di vista noti e con noto orientamento spaziale) ad una proiezione ortogonale della stessa;
- nel 1858, come già detto, Nadar scattò la prima foto aerea, da mongolfiera;
- nel 1884-1889, l'italiano P. Paganini costruì un fototeodolite, il primo strumento meccanico di restituzione della storia, per l'utilizzo di fotogrammi di zone alpine a fini cartografici;
- nel 1899 venne pubblicata la memoria sui fondamenti geometrici della fotogrammetria (opera del tedesco S. Finsterwalder), dove, per la prima volta, veniva affrontato il metodo del vertice di piramide per la soluzione dell'orientamento esterno dei fotogrammi;
- nel 1901 in casa Zeiss nacque lo stereocomparatore, ad opera del tedesco Pulfrich;
- due anni dopo nacque il fotoperspectografo, ad opera dell'austriaco Th. Scheimpflug, che mise a punto importanti studi sul raddrizzamento dei fotogrammi;
- nel 1907 gli italiani Ranza e Tardivo pubblicarono i risultati ottenuti mediante fotografie da pallone frenato: piani fotografici della città di Venezia e della piana del Tevere;
- nel 1909 in casa Zeiss nacque lo stereoautografo, ad opera dell'austriaco E. Ritter von Orel, strumento che può definirsi il

primo apparato di restituzione automatica di prese terrestri normali, capace di restituire su carta immagini fotogrammetriche in coppie stereoscopiche;

- nel 1924 uscì l'opera del tedesco O. von Gruber, *Studi sul problema del doppio vertice di piramide e dei procedimenti di orientamento reciproco e assoluto delle coppie*, che divenne una guida per i realizzatori di restitutori e un vero caposaldo per la scienza fotogrammetrica.

Nel corso del Novecento le tecniche e gli strumenti della fotogrammetria (camere ed obiettivi, strumenti di bordo sugli aerei, restitutori) sono andati via via perfezionandosi, rendendo tecnicamente possibile ed economicamente conveniente l'esecuzione di carte topografiche a partire da fotogrammi aerei: da ricordare, a tale proposito, è il contributo dato dall'ingegnere italiano Ermenegildo Santoni (1896-1970) al metodo fotogrammetrico. Negli ultimi decenni, l'introduzione delle tecniche digitali ha dato una spinta ulteriore in questa direzione, permettendo la velocizzazione del processo di restituzione fotogrammetrica, e di conseguenza del processo di produzione cartografica. I vecchi restitutori analogici e analitici sono stati gradualmente sostituiti dalle moderne stazioni fotogrammetriche digitali, a cui si sono affiancati scanner fotogrammetrici, per la conversione in digitale delle pellicole analogiche, e recentemente anche camere digitali, per acquisizioni digitali dirette (Kraus K., 1997). Grazie alle nuove tecniche digitali, oggi l'aerofotogrammetria rimane ancora il metodo principe per la redazione delle carte, anche se a partire dagli anni Sessanta è stato affiancato dai sistemi di telerilevamento: il lancio dei primi satelliti (nel 1966 il *Pageos*, nel '72, '75 e '78 i tre *Landsat*) ha segnato una svolta ulteriore per la tecnica cartografica, perché ha permesso di mappare molte zone del mondo ancora poco conosciute. Rispetto ai fotogrammi aerei, le immagini satellitari hanno una sintesi maggiore, per via del punto di presa più alto, registrano in più bande spettrali, per cui permettono analisi di tipo differente, e consentono riprese più frequenti di uno stesso luogo. Oggi, la tradizionale carta IGM al 100.000 è in via di sostituzione con una carta ricavata dalle immagini del satellite *Landsat*.

1.2. LA CARTOGRAFIA STORICA

La cartografia, nata oltre 4000 anni fa come espressione artistica ancor prima che scienza, nel tempo ha subito un'evoluzione che ha riflesso quella culturale e sociale dell'uomo. Inizialmente, il prodotto "carta" in senso lato era più spesso rappresentazione artistica, paesaggistica, architettonica, con funzione spesso decorativa.

Dunque, ciò che è stato naturale evoluzione del processo cartografico, oggi, nell'ottica di classificare le carte nate da quel processo, diviene difficoltà, che si fa tanto maggiore quanto più indietro si va nella storia: distinguere la tecnica dall'arte, ovvero sia ciò che è propriamente documento cartografico, da ciò che invece è documento iconografico in generale. Nel corso della storia, il passaggio da una forma all'altra consiste in quelle carte geografiche, mappe catastali, carte topografiche che mutuano dall'arte i mezzi e le tecniche di rappresentazione (come vedute prospettiche di paesaggi, dipinte con acquerelli o tempere su carta o su tela), ma assumono connotati tecnici più moderni e tendono a rispettare requisiti di precisione. Per questi tipi di carte la distinzione tra documenti cartografici e documenti iconografici può essere fatta con relativa semplicità. Più complicato è invece il caso di vedute di paesaggi, disegni a grandissima scala o addirittura privi di un rapporto di scala, o disegni realizzati con tecniche di rilevamento e di rappresentazione multiple, che per questi motivi possono porre problemi di catalogazione.

Dunque, classificazioni rigide basate sul contenuto del documento, la scala grafica, la simbologia e la tecnica utilizzate spesso sono insufficienti a definire in modo certo e oggettivo il genere di appartenenza del documento; occorre più spesso una valutazione *ad hoc*, che tenga conto di un maggior numero di fattori. Tra questi, bisogna sicuramente considerare il contesto culturale, sociale, economico e quello politico, e fattori di tipo gestionale. Nel corso della storia, infatti, diversi sono i casi in cui la cartografia è stata utilizzata come strumento politico di gestione territoriale e falsificazione della realtà: è stato il caso ad esempio di alcune carte che, grazie alla proiezione di Mercatore in cui erano disegnate, facevano apparire esageratamente grandi i possedimenti britannici in Canada, rispetto invece alle colonie francesi prossime all'Equatore. In epoca più recente, è stato il caso di cartografie redatte sotto il regime nazista, in cui la Polonia e gli altri Paesi dell'Europa orientale venivano messi in luce come "minaccia" per la

Germania; o, ancora, è stato il caso della cartografia ufficiale sovietica, che era stata falsata per nascondere i propri segreti militari.

Per una classificazione corretta del documento occorre poi considerare altri fattori: l'ambiente e il periodo storico in cui l'autore vive, e la sua soggettività. L'autore, infatti, non è un imparziale osservatore che mette su carta in modo oggettivo la realtà che lo circonda, bensì un artista che filtra la realtà attraverso i propri occhi e la propria mente, occhi e mente che in parte hanno i filtri culturali che il contesto storico nel quale egli vive gli fornisce. Per questo si può affermare che «più ancora che immagine del mondo, la "carta" è un'immagine dell'immagine che del mondo ha un individuo, un'epoca storica o una particolare società» (Sgambati G., Benassati G., Biancini L., Buonora P., Sinisi D., Cantile A., Delfino L., Di Angelo Antonio M., Falchetta P., Mancinelli M.L., Sanguineti M.T., Serratrice G., Truci I., Valerio V., 2006).

1.2.1. Il recupero della cartografia storica

Le carte generalmente denominate "antiche" sono in tutto e per tutto beni culturali storici, frutto della cultura di un popolo e di una particolare società, di cui riflettono i caratteri e gli intendimenti; l'insieme di tutti questi documenti costituisce, a livello mondiale, un immenso patrimonio di inestimabile valore culturale e storico, quale strumento conoscitivo sulla cultura del passato, e mezzo per conservarne memoria. Le carte storiche sono opere d'arte, e rimangono tali anche quando, nel corso della storia, il documento cartografico vero e proprio prende il sopravvento sul prodotto iconografico puramente estetico. Questa è la prima ragione che spinge oggi a "recuperare" carte antiche.

In secondo luogo, le carte storiche, nonostante il loro carattere di estrema sintetizzazione (o forse proprio grazie a questo), sono una preziosa fonte di informazioni, geograficamente localizzate, relative ad un preciso momento della storia, fissate come un «fermo-immagine» sul foglio (Dall'Aglio P.L., Di Cocco I., Marchetti G., 2002). Sta nella «stratificazione geografica» (Cantile A., 2003) delle informazioni provenienti da più istantanee cronologicamente in successione, a ricomporre il «lunghissimo film» (Dall'Aglio P.L., Di Cocco I., Marchetti G., 2002) della storia, la potenzialità del documento cartografico storico: quello di rendere possibile studi multitemporali e analisi sulle trasformazioni del paesaggio, della morfologia del territorio e del suo assetto nel tempo, comprendendone le leggi e i tempi di evoluzione. Leggi

e tempi che, applicati alla realtà odierna, aiutano nella comprensione e progettazione dell'assetto territoriale sia presente che futuro.

Purtroppo, si tratta di un patrimonio, assieme a quello documentaristico in generale, destinato a deteriorarsi col tempo, a causa del supporto su cui è nato, costituito da materia organica, dunque deperibile. Oggi il tentativo è sempre maggiormente quello di sensibilizzare la gente verso il problema: se non si recupera questo immenso patrimonio, esso andrà perduto per sempre (Adcock E.P., Varlamoff M.T., Kremp V., 2004). Esempio di questa tendenza è fornito dall'Archivio di Stato di Genova, presso il quale dal 2008 ha preso avvio il progetto *Adotta un documento*, patrocinato da ALCE (Associazione Ligure Commercio Estero), teso a sensibilizzare il pubblico (privati, associazioni ed imprese) verso i problemi di conservazione di tale patrimonio storico-culturale, nell'obiettivo di raccogliere fondi (data la scarsità di quelli ministeriali) per il restauro di una parte dei documenti di origine medievale, soggetti al deperimento e all'attacco delle muffe: il nome della persona o dell'ente che, tramite contributo in denaro, "adotta" un documento viene posto sulla cartellina protettiva del documento stesso (Archivio di Stato di Genova, 2008).

Il **recupero** della cartografia storica consiste nell'insieme di operazioni volte a salvaguardare questo prezioso patrimonio culturale e storico, preservandone da una parte il delicato supporto e dall'altra il fondamentale contenuto. Si tratta di conservare e proteggere nella sua forma originaria il **supporto**, e laddove necessario restaurarlo, trattandolo con interventi che riducano al minimo l'inevitabile deterioramento dei materiali. Al contempo, può risultare utile salvaguardare l'esistenza del suo **contenuto** attraverso le possibilità offerte dalle nuove tecnologie, trasportando su supporto digitale la carta nata su supporto analogico. In tal modo gli strumenti e le modalità di visualizzazione, gestione e fruizione della moderna cartografia numerica possono essere aperti e applicati anche alla cartografia antica.

La disponibilità di una carta storica in ambiente digitale, con la salvaguardia delle proprietà metriche ad essa associate, non è solamente una garanzia per la sua conservazione nel futuro sottoforma di copia fedele, ma è anche un modo per renderla più facilmente accessibile, quando invece solitamente è fruibile da pochi o viene utilizzata solo per studi specifici. Inoltre, può rendere possibile un ampio spettro di ricerche ed applicazioni:

- essere di supporto a **studi**, spesso a carattere multidisciplinare, che consentano di ampliare le conoscenze sulle caratteristiche e la genesi

della carta, sia dal punto di vista geometrico sia dal punto di vista descrittivo e semantico;

- rendere possibile la comparazione oggettiva dei **contenuti** suoi con quelli di rappresentazioni successive, integrandone i temi, anche sfruttando le potenzialità dei sistemi informativi geografici;
- permettere nuove modalità di **visualizzazione** che ne esaltino il contenuto espressivo, grazie alle opportunità offerte dalla elaborazione digitale delle immagini e a nuovi metodi di rappresentazione (per esempio visualizzazioni tridimensionali o animazioni), e così aprire la carta a nuovi stimolanti utilizzi, non possibili sul supporto tradizionale;
- supportare la **diffusione** e la distribuzione di questo genere di informazione via rete, mediante sistemi WebGIS, sfruttando efficaci metodologie di archiviazione, catalogazione, collegamento con database alfanumerici e consultazione.

Questo ambito di applicazione di tecniche e tecnologie digitali alla cartografia storica ha dunque una parentela solo lontana con la “storia della cartografia”; si concentra invece sull’adottare o sul mettere a punto adeguate metodologie di acquisizione digitale del dato e modalità efficaci per la sua fruizione, che vanno oltre quelle consentite dal supporto analogico. In tale ambito, il contributo della Geomatica è evidentemente essenziale, e destinato ad ampliarsi ulteriormente in un contesto interdisciplinare. L’interesse su questi temi è crescente; ne è una riprova per esempio la recente costituzione in ambito ICA (*International Cartographic Association*) della *Commission on Digital Technologies in Cartographic Heritage* (Bitelli G., Gatta G., 2007) (Bitelli G., Gatta G., 2008).

1.2.2. Dal supporto analogico a quello digitale

Oggi, la carta come la storia tradizionalmente ci porta a pensarla, un foglio di carta stampato, probabilmente non è più attuabile. Questo è dovuto in parte all'evoluzione tecnologica e all'introduzione del digitale, ed in parte alla conseguente necessità di disporre in tempo reale di informazioni geografiche complete e aggiornate, oltre che di informazioni di vario genere localizzate geograficamente (probabilmente molte di più di quelle che servivano ad un navigante dell'epoca della carta del Mercatore per orientarsi da un porto all'altro). Ma questo non significa che la carta, nella sua accezione più ampia, cioè quella di rappresentazione del territorio e documento di informazione geografica, non possa ancora esistere, anzi. Per il fatto che nell'odierna società i mezzi di comunicazione sono sempre più potenti, e per il fatto che le informazioni e i programmi per realizzare e consultare carte geografiche sono accessibili ad un numero sempre maggiore di utenti, anche non specialisti, probabilmente non vi sono mai state tante carte in circolazione quanto oggi. Si tratta però di un tipo di carta differente da quella del passato.

Nel corso degli ultimi decenni la cartografia, così come tutti i campi della tecnica e molteplici aspetti della vita di tutti i giorni, ha risentito enormemente dell'introduzione del computer e delle tecniche digitali. Inizialmente ciò si è tradotto in un'automazione dei mezzi e dei processi: a partire dalla fine degli anni Settanta, si è sviluppata la cosiddetta **cartografia automatica**, con un insieme di tecnologie di ausilio alla produzione di carte o al loro aggiornamento, sostitutive della fase manuale di disegno, e in grado di accelerare i ritmi, con conseguente riduzione dei costi. Ne è esempio il tavolo digitalizzatore per l'acquisizione in ambiente numerico di carte tradizionali al tratto, con gestione degli elementi cartografici in termini di coordinate planimetriche. Altro esempio è costituito dall'ortoproiettore analitico, per l'automazione del processo di produzione di ortofoto.

Dall'altro lato, l'introduzione del computer e delle tecniche digitali in campo cartografico si è tradotto, a partire dagli anni Ottanta, in un'espressione nuova della cartografia, la **cartografia numerica**, basata sul moderno supporto digitale (un file), e che si è andata affiancando alla cartografia tradizionale su supporto analogico. L'acquisizione di dati per la costruzione di una tal carta può avvenire indirettamente, mediante digitalizzazione di cartografia tradizionale al tratto, o

direttamente, mediante la restituzione fotogrammetrica e l'ortorettifica digitali. Elementi caratteristici di una carta numerica sono:

- componente geometrica: archivi di coordinate per localizzare spazialmente qualunque punto od oggetto sulla carta (la carta numerica si compone di "geo-dati", cioè dati geo-referenziati), e archivi topologici;
- componente descrittiva: codifiche e informazioni alfanumeriche per descrivere la geometria degli oggetti rappresentati, analoghe a quelle che si ritrovano in legenda su una carta tradizionale;
- una scala "nominale", legata alle procedure di costruzione della carta, le quali ne determinano le caratteristiche di precisione e i contenuti;
- una veste grafica.

Per questo la cartografia numerica è un'immagine speculare della cartografia tradizionale. Di quest'ultima mantiene tutti gli attributi, i contenuti e le funzioni di base, ma maggiore è il contenuto informativo e differente è il modo di visualizzare i dati ed utilizzarli. Le informazioni di base, infatti, possono essere integrate con altre di diverso genere: socio-economico, fisico, geologico, sismico, ecc., in una modalità a *layer* (ognuno dei quali contenente elementi di tipologia omogenea), quindi senza la necessità di realizzare carte tematiche apposite come accade nella cartografia tradizionale. Si tratta quindi non solo di un prodotto grafico visualizzato su schermo, ma anche di tutta una serie di informazioni di corredo, georeferenziate, gestite da un computer in grado di fondere tra loro dati differenti e valutarne la compatibilità, oltre che la qualità. Tali informazioni, elaborate in un'infinità di modi, risultano utili per effettuare studi a carattere multidisciplinare di interpretazione della realtà territoriale, sicuramente impensabili fino a pochi decenni fa.

Con l'introduzione della cartografia numerica, le funzioni e le finalità della cartografia hanno assunto un significato diverso da quello del passato. Nell'utilizzo della carta numerica, si possono sfruttare i numerosi vantaggi di cui essa dispone:

- uno spazio teoricamente illimitato, sia in termini di spazio fisico, sia in termini di quantità di informazioni presenti;
- invarianza del dato nel tempo, in quanto non esistono problemi di conservazione del supporto;
- oggettività delle misure e del contenuto qualitativo degli oggetti, per via delle codifiche;
- presenza di un archivio di coordinate;

- automazione delle procedure, come ad esempio il posizionamento di simboli, la campitura degli oggetti, la metratura del foglio;
- flessibilità nella vestizione della carta;
- semplicità e velocità nelle modifiche e negli aggiornamenti;
- possibilità di associare la dimensione temporale, intendendo sia diverse versioni della base di dati, sia un'informazione temporale ad ogni elemento della carta;
- possibilità di una cartografia 3D, anziché una rappresentazione che tenga separato il contenuto planimetrico da quello altimetrico, come invece avviene nella carta tradizionale;
- possibilità di fare collegamenti GIS tra dati grafici e dati alfanumerici.

D'altro canto, l'introduzione della cartografia numerica ha posto nuovi problemi, o ha richiesto soluzioni nuove a problemi vecchi. E' il caso ad esempio del controllo della qualità del dato; i parametri di qualità di una carta numerica sono infatti completamente differenti da quelli di una carta tradizionale:

- precisione geometrica: differenza di posizione di un punto rispetto al sistema cartografico adottato;
- risoluzione: la dimensione del più piccolo particolare rappresentato numericamente;
- precisione semantica: corrispondenza tra la realtà e l'attributo logico-descrittivo associato a quella entità;
- coerenza: congruenza logica, come l'assenza di intersezione tra curve di livello, l'assenza di compenetrazione di edifici o tra edifici e strade, e così via, per evitare problemi durante l'applicazione di certe procedure;
- congruenza geometrica: assenza di errori nella forma degli oggetti.

Ma è anche il caso della nascita di nuovi obiettivi da raggiungere a livello mondiale, quali la creazione di standard, l'unificazione delle rappresentazioni cartografiche, la normalizzazione dei termini tecnici, la creazione di banche dati comuni. Queste nuove esigenze vengono imposte dall'evoluzione tecnologica, dalle necessità di comunicazione, dalle nuove esigenze politiche ed economiche della società, dalla necessità di disporre in tempo reale di informazioni complete e aggiornate; tutti fattori, questi, di cui la cartografia numerica è espressione.

Con l'avvento del *Web mapping* (v. cap. 4.3), è oggi stato raggiunto un nuovo traguardo, ed è nata una nuova tendenza per la cartografia moderna. Tecnologie per la produzione di carte mettono quasi chiunque in grado di generarne di nuove, e diventare così un "provider di geodati". Questo fatto può essere visto come uno svantaggio, se si pensa alla discutibile

affidabilità di Internet, che mette l'informazione, in questo caso geocartografica, nelle mani di chiunque, ma anche come un vantaggio, se si pensa che il Web è in grado di disseminare l'informazione a ritmi accelerati, raggiungendo un pubblico sempre più vasto.

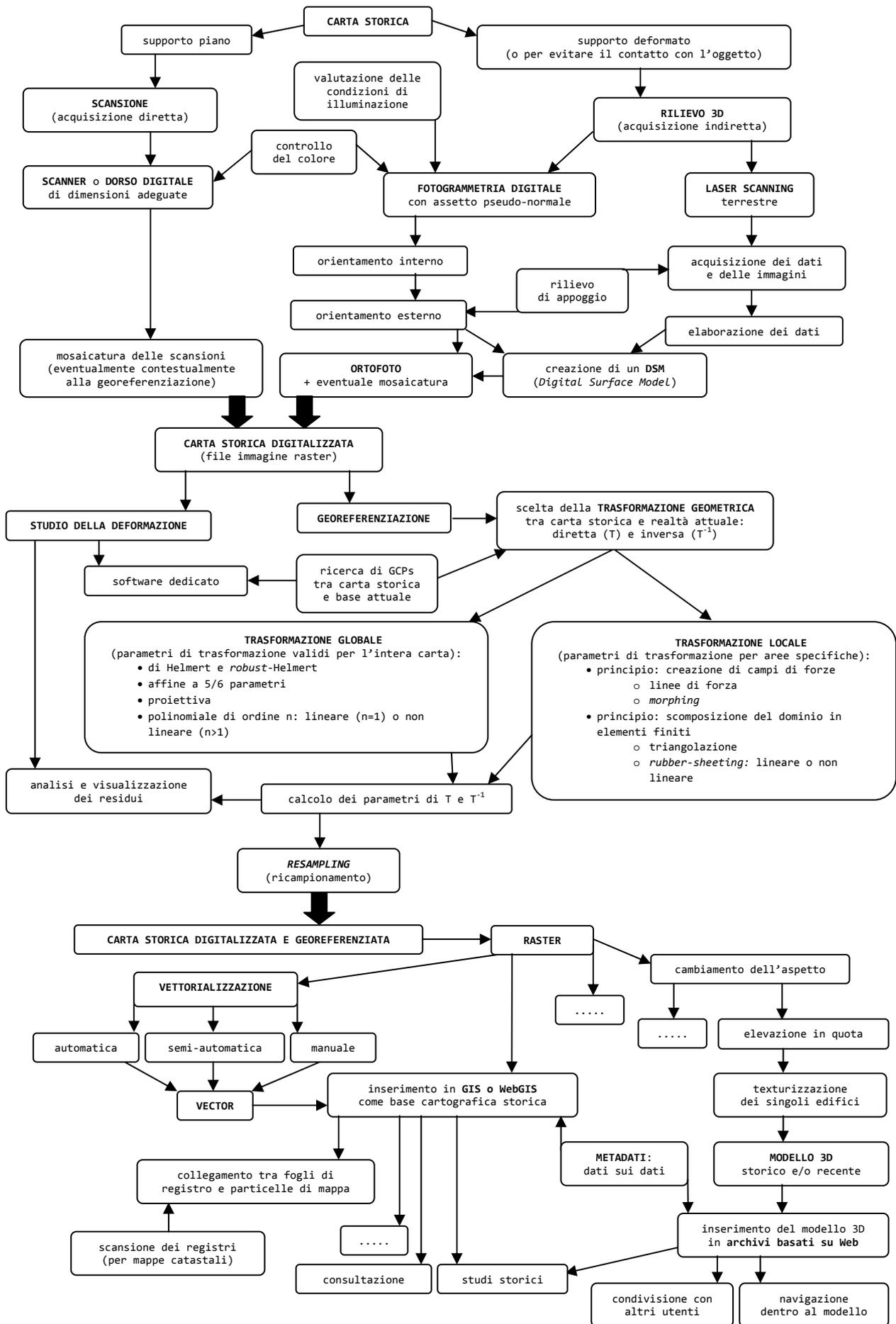
1.2.3. Recupero di cartografia storica in ambiente digitale

Argomento della presente tesi è l'illustrazione dell'intero processo di recupero di cartografia in ambiente digitale, intendendo con esso, come accennato nel paragrafo 1.2.1, non solo la fase di acquisizione, ma anche quella di trattamento della carta digitalizzata in ambiente digitale. Il processo può essere suddiviso in tre passaggi fondamentali:

- **acquisizione:** conversione della carta in ambiente digitale;
- **georeferenziazione:** assegnazione di coordinate oggetto (solitamente in un sistema di riferimento cartografico) al sistema immagine (costituito dalla carta digitalizzata);
- **elaborazione digitale:** tutta una serie di elaborazioni ulteriori sulla carta digitalizzata e georeferenziata, eseguite in funzione dello scopo prefissato: vettorializzazione, modellazione tridimensionale, inserimento in sistemi WebGIS, ecc.;

di ognuno dei quali ci si occuperà in un apposito capitolo, attraverso la descrizione di alcuni casi pratici affrontati.

Di seguito si riporta uno schema semplificato dell'intero processo, mediante diagramma di flusso, in cui si evidenziano i tre passaggi fondamentali; di questi si riporteranno i singoli schemi di dettaglio all'inizio di ogni capitolo.



1.2.4. Casi di studio

Si presentano di seguito gli oggetti di studio della presenti tesi, costituiti da carte storiche comprese nel periodo che va dal XVI al XIX secolo. Come sopra detto, ognuna di queste carte è stata utile al fine di analizzare una o più elaborazioni inerenti il recupero di cartografia storica. Le carte elaborate vengono di seguito presentate in ordine cronologico, e suddivise per aree tematiche.

Ove possibile, le carte illustrate sono state anche consultate in originale. E' infatti sempre auspicabile, per non dire necessario, avviare lo studio di una carta antica a partire dalla consultazione del prezioso documento in originale.

1.2.4.1. Carte del delta del Po

Le più antiche carte prese in considerazione risalgono alla fine del XVI secolo. Si tratta di tre carte dell'area deltizia del fiume Po, a sud di Venezia, rappresentanti una parte o l'intero territorio da Choggia (VE) fino al Castello della Mesola (FE), in direzione N-S, e da Boscochiario, frazione di Cavarzere (VE) lungo l'Adige, fino al mare, in direzione W-E (fig. 1.25).

Uno stesso cartografo, **Ottavio Fabri**, risulta autore di tutte e tre le carte, anche se unico autore in una sola di esse; nelle altre, invece, autori principali sono, rispettivamente, **Gerolamo Pontara** (perticatore e perito alle acque) e **Bonaiuto Lorini** (ingegnere fiorentino esperto in fortificazioni). Le prime due carte (d'ora in avanti "F" per quella di Fabri come unico autore, e "P" per quella di Pontara e Fabri, dove Pontara risulta primo autore) sono datate 1592 (l'anno è riportato in entrambe le carte, in numeri arabi in P e romani in F), mentre risulta di qualche anno successivo (12 luglio 1599) la terza carta (d'ora in avanti "L" per quella di Lorini e dei coautori Fabri, Pontara, Alessandro Betinzuoli e Bartolomeo Montini). Le carte sono oggi conservate presso l'Archivio di Stato di Venezia (ASVE), dove sono rimaste nascoste fino al 1881.

Tutte le carte sono orientate con l'ovest in alto, in modo da visualizzare il territorio dal mare verso l'entroterra. Le dimensioni fisiche sono notevoli, con valori attorno ad 1-4 m, ed estensione maggiore in senso N-S, secondo la direzione del braccio della rosa dei venti (presente solo sulle carte F e L, ad indicare il nord magnetico); la scala

media delle carte si aggira attorno a valori di 1:13.000 - 1:10.000 (v. par. 3.2.1.1). In figura 1.26 si riportano in dettaglio le dimensioni.



Fig. 1.25 - Carte del delta del Po, non in scala

(Archivio di Stato di Venezia):

P) Pontara, Fabri (1592);

F) Fabri (1592);

L) Lorini, Fabri, Pontara, Betinzuoli, Montini (1599).

P



F



L

CARTA	ANNO	DIMENSIONI [cm]	SCALA GRAFICA	ROSA VENTI
P	1592	285,0 x 159,0	assente	assente
F	1592	347,0 x 250,4	1000 pertiche padovane = 2.144,365 m	sì
L	1599 (12 luglio)	234,0 x 142,6	1000 passi veneti = 1.738,674 m	sì

Fig. 1.26 - Dimensioni fisiche e scala grafica delle carte di fig. 1.25.

Le carte sono incollaggi, su supporto di tela, di fogli di carta dipinti ad inchiostro seppia e acquarello colorato: sono visibili le zone di giunzione tra fogli adiacenti (fig. 1.27). Nel corso della loro storia probabilmente sono state sottoposte ad interventi di restauro, l'ultimo dei quali eseguito per conto dell'ASVE, almeno per quanto riguarda le carte F ed L. Il restauro, reso necessario dai problemi di usura del supporto (sia per quanto riguarda pieghe dovute al modo di conservazione passato, sia per quanto riguarda lacerazioni varie), ne ha reso possibile, presso l'ASVE stesso, l'acquisizione in formato digitale, ad elevata risoluzione (fig. 1.27). Il lavoro di digitalizzazione si inserisce all'interno del vasto progetto *Divenire*, che dal 2006 vede impegnato l'Archivio nell'operazione di salvaguardia, raccolta e diffusione (mediante consultazione via Web) del proprio patrimonio documentario ed anche cartografico (Archivio di Stato di Venezia, 2008). Ai fini del presente studio si disponeva dunque, per le carte F e L, di copie digitali ad alta risoluzione, ottenute mediante scanner per acquisizione di documenti di grande formato (per una descrizione più dettagliata di tali sistemi si rimanda al capitolo 2.1), eseguita dalla Sezione di fotoriproduzione dell'Archivio di Stato in Venezia. Inoltre, la carta F è anche stata consultata in sede.

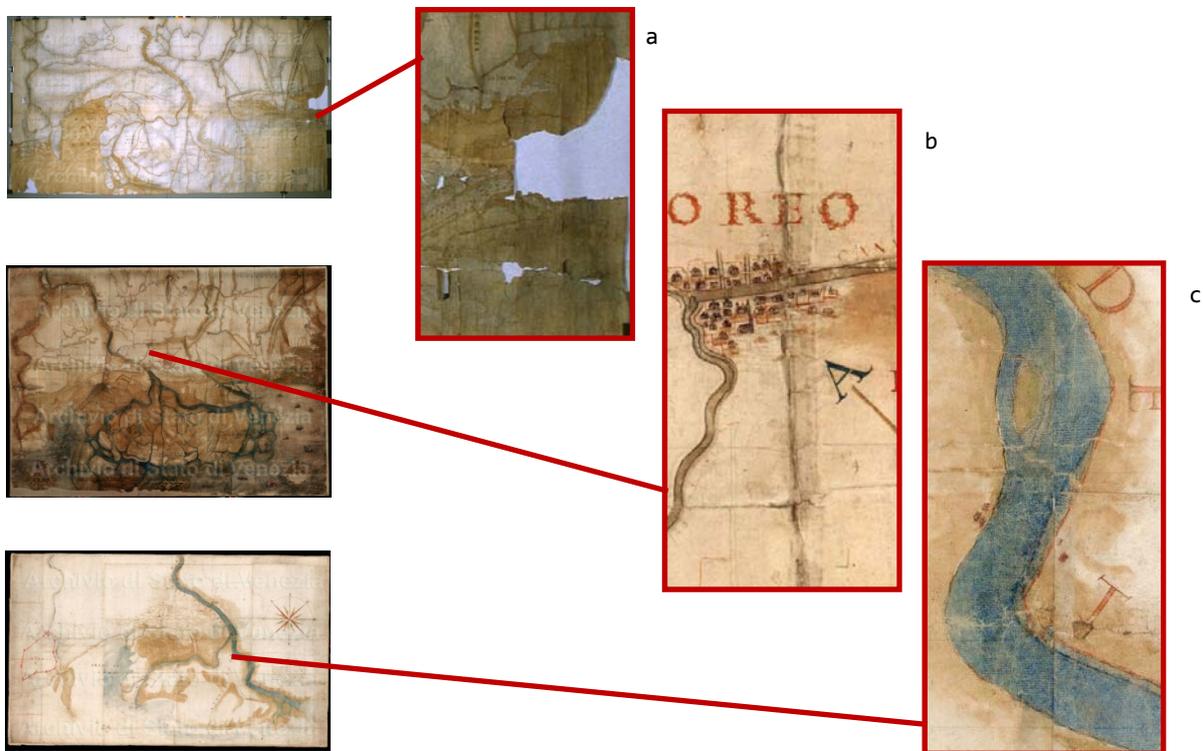


Fig. 1.27 - Dettagli dei segni di usura (lacerazioni (a) e pieghe (b)) e dell'assemblaggio dei fogli (c) per le carte di fig. 1.25.

Le stesse considerazioni non valgono per la carta P, per la quale l'Archivio dispone di una copia digitale da negativo in b/n, di non elevata risoluzione, e di un'altra fotoriproduzione a colori, sempre a bassa risoluzione; peraltro le cattive condizioni di conservazione del supporto non ne permettono al momento né la consultazione né l'acquisizione a risoluzione più elevata, senza un preventivo restauro. Di seguito si riportano le caratteristiche delle immagini digitali a disposizione ai fini del presente studio (Ministero per i Beni e le Attività Culturali, domanda di fotoriproduzione numero 924/2009 del 20/11/2009) (fig. 1.28).

IMMAGINE CARTA	FORMATO	RISOLUZIONE [dpi]	DIMENSIONI [pixel]	PIXEL REALE [mm]	METODO	PROFONDITA' [bit/canale]
P	jpeg	300	4.461 x 2.547	~ 0,6	b/n	8
P	jpeg	300	4.674 x 2.735	~ 0,8	RGB	8
F	jpeg	250	11.653 x 8.627	~ 0,3	RGB	8
L	jpeg	400	13.033 x 7.850	~ 0,2	RGB	8

Fig. 1.28 - Caratteristiche delle immagini digitali illustrate in fig. 1.25.

L'analisi di tali carte parte da una collaborazione col Dipartimento di Scienze della Terra e Geologico-Ambientali dell'Università di Bologna, per lo studio delle variazioni geomorfologiche dell'area deltizia del fiume Po. La zona risulta infatti interessata, per sua natura, da forti evoluzioni della morfologia nel tempo. La principale difficoltà incontrata nell'analisi consiste nella presenza, nella stessa area rappresentata, di dettagli morfologici differenti anche in carte redatte nell'arco di soli 7 anni (peraltro risulta sicuramente caso raro e fortuito poter disporre di tre carte storiche di una stessa area in un arco temporale così breve), ed oggi ovviamente non ritrovabili sul terreno, dato che tali dettagli riguardano elementi del territorio con gli anni scomparsi a causa dell'erosione deltizia. L'importanza di tali carte è data dal fatto che esse risalgono ad un periodo cruciale nella storia dell'evoluzione del sistema deltizio del fiume Po: quello in cui il vecchio sistema lobato

moriva ed uno nuovo, l'attuale, nasceva (Bondesan A., Meneghel M., 2004) (Furlanetto P., 2004) (Cremonini S., Samonati E., 2009).

L'origine della redazione delle tre carte è da ricercare nell'opera di censimento dei propri territori da parte della Repubblica di Venezia all'epoca della sua espansione, data la necessità di possedere una rappresentazione cartografica il più veritiera possibile dei territori che dovevano essere soggetti ad imposizione fiscale. Queste carte sono frutto dei numerosi sopralluoghi effettuati nel Delta in vista della realizzazione dell'intervento detto di **Taglio di Porto Viro**, tant'è vero che la zona risulta ben delineata in tutte e tre le carte (e in L molto similmente a P); in particolare la carta L nasce dal nuovo rilievo topografico che era stato ordinato in vista dell'imminente inizio dei lavori per la costruzione dell'opera, mentre ci rimane ancora ignoto il motivo della costruzione di due carte, P e F, della stessa area, nello stesso anno 1592 (fig. 1.29a). L'opera di Taglio di Porto Viro era stata suggerita come rimedio ai problemi del fiume Brenta e del Bacchiglione (a nord-ovest di Chioggia), in seguito allo scandaglio del Brondolo, effettuato il 21 giugno 1595 da Fabri ed altri collaboratori. Già da anni (il primo progetto risale al 1556) Venezia stava pensando di creare un taglio per incanalare le acque del Po di Tramontana verso sud, per far sì che il costante apporto di detriti non andasse ad interrare la Laguna, rendendo difficoltoso il passaggio delle imbarcazioni, ed escludendo così Venezia dal commercio marittimo. Prima del Taglio di Porto Viro esistevano 4 delta del Po, da nord a sud: Po delle Fornaci (con le tre foci del Po di Tramontana, ramo principale durante il '500, Po di Levante e Po di Scirocco), Po di Ariano (con le due foci del Po di Goro e Po dell'Abate) già in territorio ferrarese, Po di Primaro. Vari erano i porti che nel corso del tempo, dal Medioevo al '600, erano stati fondati; tra questi, Porto Viro (dal latino *vetus*, vetero), sulla sponda destra del Po delle Fornaci, era forse l'antico porto di Loreo.

Per eseguire i sopralluoghi per la realizzazione del Taglio vennero chiamati a lavorare, per conto della Serenissima Repubblica, diversi periti ("**Savi ed Esecutori delle Acque**"), tra i quali gli autori succitati, rilevatori e cartografi allora operanti nei territori veneti. Tutti e tre i personaggi furono coinvolti nell'operazione del Taglio di Porto Viro, partecipando alla commissione che, il 18 giugno 1599, fece una nuova visita ai luoghi preposti ai lavori; inizialmente, Lorini espresse parere contrario all'opera, ma poi si convertì al parere della maggioranza (Tchaprassian M., 2004). La *Convenzione di Papozze* (10 maggio 1600) tra Repubblica di Venezia e Papato (che nel 1598 aveva incamerato i territori ferraresi) sancì le condizioni per l'esecuzione dell'opera, e il taglio fu

eseguito nell'arco di 4 anni, tra il 1600 (16 settembre) e il 1604. L'opera, all'avanguardia per quei tempi, consistette in un canale lungo 7 km, tra Porto Viro e la Sacca di Goro (a nord della Mesola); questo intervento e altri che si succedettero nel corso di tutto il '600 condizionarono lo sviluppo futuro del delta del Po: in poco tempo la Sacca di Goro venne interrata dai sedimenti della nuova foce e i territori ferraresi vennero completamente invasi dall'acqua delle mareggiate (rendendo vana la grande bonifica, con la costruzione di numerose chiaviche, eseguita durante il '500 ad opera del Ducato ferrarese), mentre la sacca dell'Abate (attuale Sacca di Goro) andò ingrandendosi, e l'intero delta andò assumendo la forma attuale. Con il Taglio di Porto Viro svanì anche il timore dei Veneziani verso l'uso che i Ferraresi avrebbero potuto fare del Castello della Mesola (sull'omonima isoletta nel territorio ferrarese, compresa fra il Po di Goro, il Po dell'Abate e il mare), in particolare preoccupati per la possibile costruzione di un porto franco nella Sacca di Goro di allora (fig. 1.29b). Con il Taglio di Porto Viro la Sacca fu completamente interrata, e l'edificio cadde in disuso; la cortina muraria che circondava il castello fu abbatta solo nel 1830 (Emilia Romagna / Veneto).

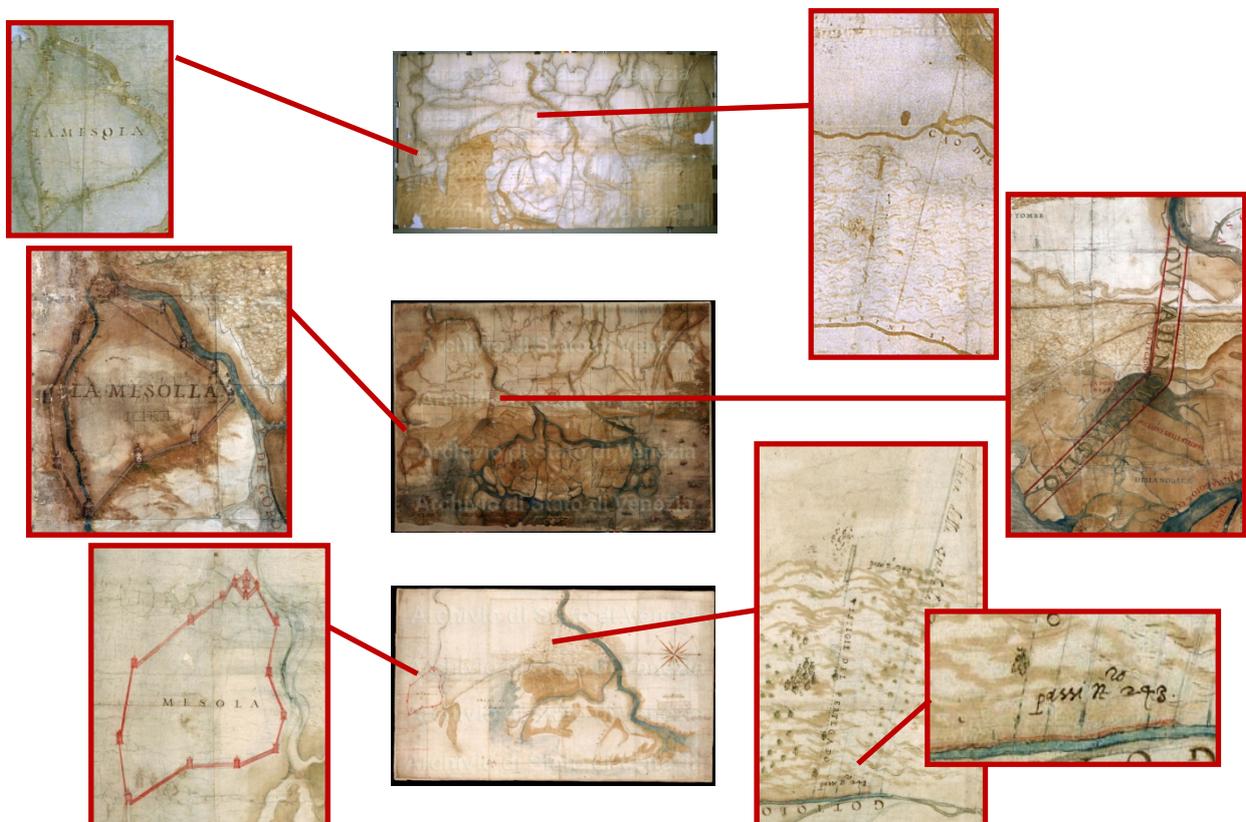
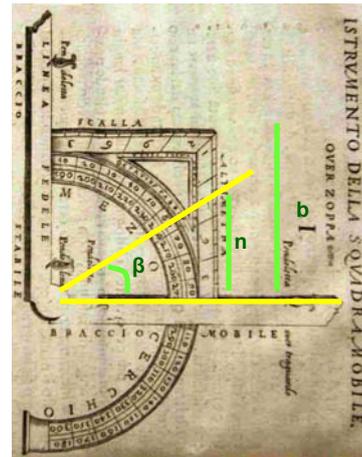
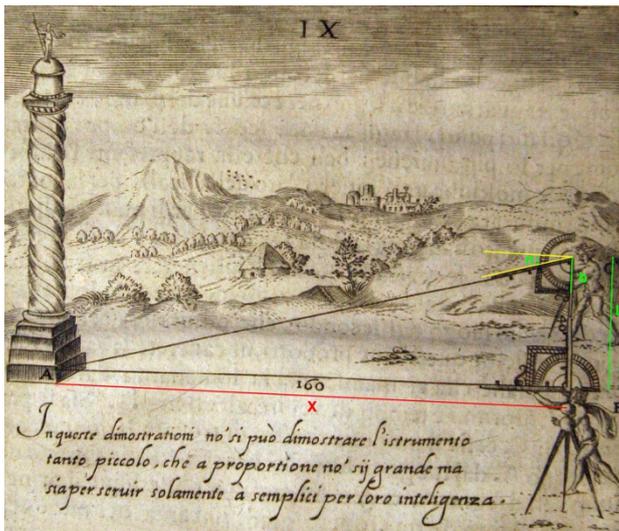


Fig. 1.29 - Dettagli sulle carte di fig. 1.25: a destra, futura zona di taglio di Porto Viro (in carta L sono evidenziate misure in passi veneti); a sinistra, castello della Mesola.

Ottavio Fabri è anche autore di un manuale tecnico, *L'uso della squadra mobile. Con la quale per teoria et per pratica si misura geometricamente ogni distanza, altezza, e profondità. S'impara à perticare, liuellare, et pigliare in disegno Le Città, Paesi, et Provincie. Il tutto con Le sue dimostrazioni intagliate in rame. Da Ottavio Fabbri messa in Luce* (1598), in cui illustra la costruzione e l'utilizzo dello strumento di sua invenzione, la *squadra mobile* o *zoppa* (v. par. 1.1.4 e fig. 1.19), a fini di rilievo, di misura di angoli, distanze, altezze e profondità, oltre che per la rappresentazione del disegno in carta (fig. 1.30). E' probabile che il manuale derivi in gran parte dall'esperienza maturata nel rilievo della zona deltizia del Po, e rappresentata nella carta F qui presa in esame. Come egli spiega nel suo manuale, il rilievo di territori può essere eseguito a partire da una base nota, dai cui due vertici (che sono punti sufficientemente alti sul piano campagna, in modo da poter vedere, e collimare, a partire da essi, altri punti nei dintorni) si possano collimare tanti altri punti, che siano ben distinguibili per le collimazioni sia da un vertice sia dall'altro. Le misure che si eseguono sono di tipo angolare, avendo come riferimento l'ipotetica retta congiungente il vertice (A o B), su cui si trova l'operatore, e un altro punto del piano campagna (punto C) (Bitelli G., Cremonini S., Gatta G., 2009). Nello stesso modo in cui le misure vengono eseguite in campagna, esse vengono riportate in carta, una volta fissata la lunghezza della base AB e il suo orientamento rispetto al nord (ma dell'orientamento rispetto al nord Fabri non parla espressamente nel suo manuale, mentre altri autori sì); lo stesso strumento utilizzato in campagna, viene utilizzato anche nella redazione della carta. In base alla scala stabilita per il riporto in scala della lunghezza AB, e quindi in base alla scala grafica adottata, è possibile calcolare qualunque altra lunghezza, semplicemente misurandola e moltiplicandola per la scala della carta. Ovviamente, la distanza AB, di base per l'intero disegno, deve essere misurata sul campo, ad esempio perticandola (fig. 1.30b) (Fabri O., 1673). Occorre precisare che in F e L è presente una scala (in 1000 pertiche padovane e in 1000 passi veneti, rispettivamente), mentre così non è per la P (fig. 1.26).

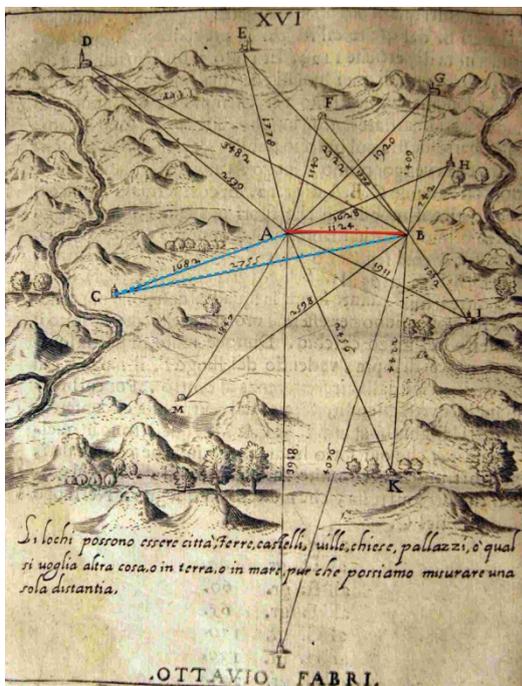
Fabri non parla di misure di orientamento rispetto al nord, da eseguire con la bussola, ma è inevitabile prenderle in considerazione, come chiaramente affermano altri autori dell'epoca (come ad esempio Cosimo Bartoli (Bartoli C., 1564)); infatti, almeno una misura angolare rispetto al nord era necessaria per orientare l'intero disegno.



a

$$X = \frac{Lb}{n}$$

- L = distanza misurata
- b = braccio della metra del quadrante
- n = lettura



b

- A, B = punti di stazione
- AB = base nota
- AC, BC = direzioni di riferimento
- CAD, CAE, ..., CBD, CBE, ... = angoli misurati

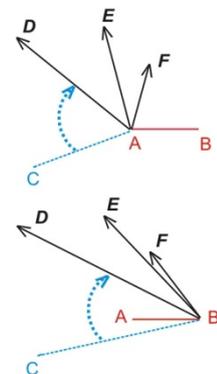


Fig. 1.30 - Disegni dal manuale di Fabri (*L'uso della squadra mobile*, 1673; conservato presso la Biblioteca Dore, Facoltà di Ingegneria, Università di Bologna):

- a) misura di distanza e formula esplicativa;
- b) intersezione in avanti e schema esplicativo.

Dichiarazione importante che Fabri fa nel cartiglio della sua carta è quella di ricavare in parte il disegno da altre fonti precedenti:

*Disegno fatto da me
Ottavio Fabri de commissione delle ecc.el.
s. savii et essecutori al.*

Le acque qvasi tutto tratto da me dalle [...] del loco et alcune parte cavata d'altri disegni.

La stessa cosa viene dichiarata anche da Lorini, nel cartiglio della carta L (fig. 1.31a). Egli, inoltre, spiega proprio come alcune misure siano state eseguite con l'uso della bussola, oltre che con metodi più precisi (ma non specificati):

Disegno fatto da noi sottoscritti periti et ingegneri, d'ordine de gl'ILL^{mi} [Illustrissimi] SS [Savi] XII Delegati sopra / Le acque, et regolazione dil fiume Po, di quelle parti che cascano in considerazione secondo la parte / dell'Ecc^{mo} [Eccellentissimo] Senato ultimamente presa di rimuovere, et far che più no' corri detto Fiume' Po di Tramontana, / Tolte' con le debite misure', venti, et scandagli, come dimostrano Le Linee Rosse. Avvertendo che / L'altra' parte' che non cascano in molta considerazione nel presente negozio, che sono espresse' fuori / de esse linee', sono state parte poste in detto disegno tolte' da noi con traguardi, et intersezioni / de venti con la bussolla, et parte' cavate da disegni vecchi dell'off^o. [ufficio] CL^{mi}. [Chiarissimi] dell'Acque, giudicati / più giusti, et veridieri, & incontrati gran parte' da noi sopra loro proprio, et co' l'atestazione / d'Sabbitanti, et pratici di detti Lochi.

In particolare, Lorini evidenzia con linee rosse (fig. 1.31g) zone in cui il rilievo è stato eseguito in modo più accurato, anche con l'uso di bussola (venti) e scandaglio (da cui si deduce che quelle zone sono state raggiunte a piedi), da altre in cui il rilievo è stato eseguito per mezzo di traguardi ottici a partire da punti raggiungibili a piedi (fig. 1.31f). Ciò che Lorini dichiara in legenda, visualizza in carta: si ritrovano così, a cavallo di alcuni rami fluviali, misure di profondità eseguite con scandaglio (fig. 1.31e), mentre altre misure in passi veneti (fig. 1.31c) sono visibili in carta, proprio in corrispondenza della zona “calda” dove a breve si sarebbe aperto il Taglio di Po (fig. 1.29a). Non a caso questo canale viene chiamato *pertegado*: lo si poteva “perticare” (fig. 1.31).

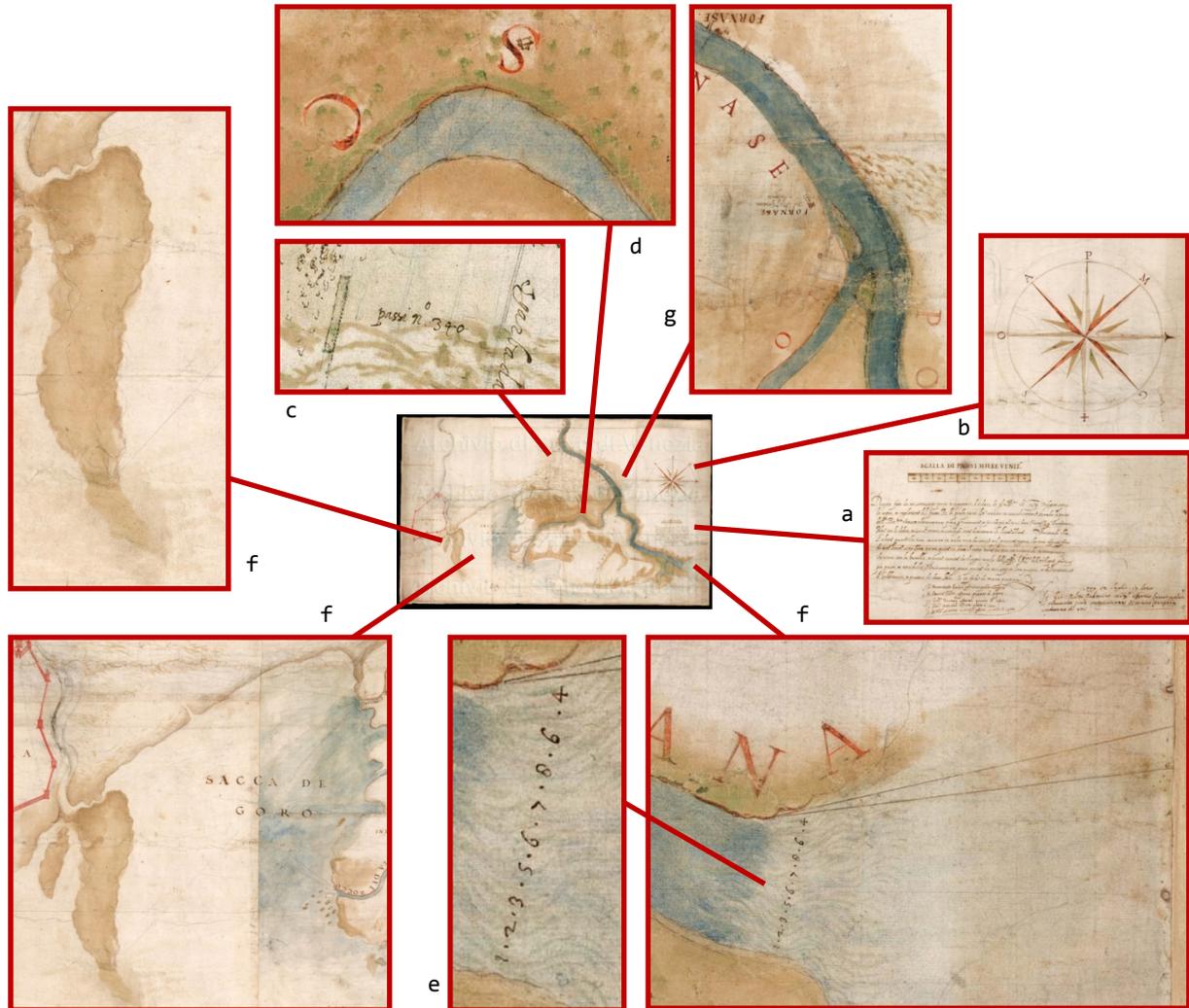


Fig. 1.31 - Particolari della carta L, relativi alle tecniche di rilievo:
 a) cartiglio e scala grafica; b) rosa dei venti; c) misure di lunghezza; d) misure di
 transetti fluviali; e) misure di profondità; f) traguardi ottici; g) linee rosse.

Coerentemente con quanto affermato nel cartiglio, i maggiori rami fluviali presentano sempre una sola delle due sponde delineata con linea rossa (fig. 1.31g), e da qui si dipartono, eventualmente (lungo il Po di Scirocco), linee di traguardo verso la sponda opposta (probabilmente per la misura della forma e della grandezza dell'alveo, fig. 1.31d); ancora, sono chiaramente visibili, e identificati da un numero o una sigla, alcune linee di traguardo da una parte all'altra del golfo (sacca di Goro) o dalla costa verso un punto esterno alla carta (che con tutta probabilità si tratta di Chioggia). Alcuni di questi traguardi cadono sulle torri del Castello della Mesola, mentre altri cadono esattamente sulla punta del dito della Mesola; è da notare che il dito della Mesola è delineato a matita (e i traguardi detti raggiungono la punta di questo disegno), ma

l'acquerello esce dal disegno (fig. 1.31f), come se si trattasse di un aggiornamento di un disegno preesistente (come se, quindi, nel tempo il dito si fosse accresciuto, cosa del resto probabile). Anche il Castello della Mesola ha un disegno a matita (probabilmente sottostante il colore) che non corrisponde al disegno colorato; anche in questo caso si potrebbe pensare ad un aggiornamento di una carta preesistente (peraltro cosa dichiarata in legenda), o ad incertezze nel disegno da parte dello stesso autore. E' interessante notare come gli stessi traguardi, disegnati da Lorini sulla sacca di Goro, si possano ritrovare esattamente identici in carta P, nonostante se ne riesca ad identificare solo l'inizio (fig. 1.32b). Inoltre, in P, è presente una scritta all'interno del dito della Mesola (1.32c), ma che purtroppo non è totalmente leggibile data la bassa risoluzione dell'immagine a nostra disposizione (fig 1.28).

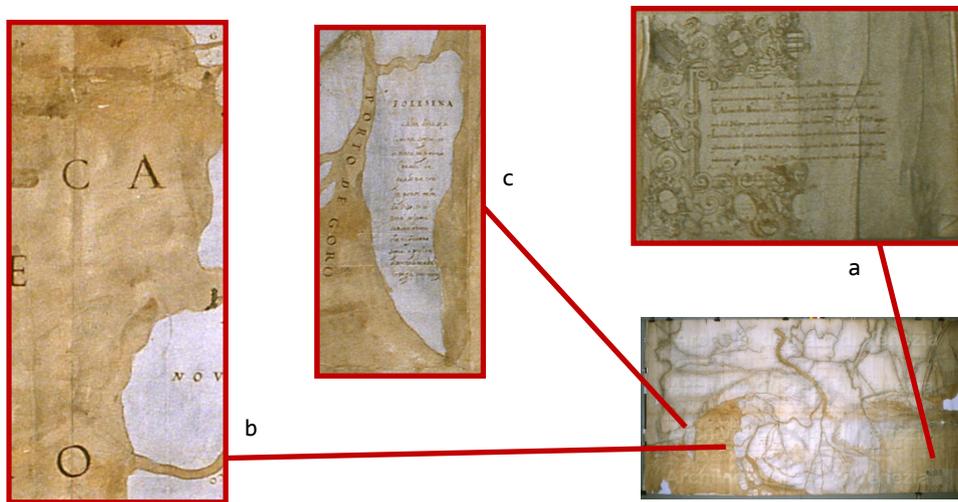


Fig. 1.32 - Particolari della carta P: a) cartiglio; b) traguardi ottici (analoghi a quelli di carta L, fig.1.31); c) scritta nel dito della Mesola.

Ridisegni, aggiornamenti o semplicemente incertezze degli autori sono chiaramente visibili sulle carte; anche in P è possibile notarne alcuni (fig. 1.33). Interessante, in particolare, risulta la cancellazione a matita di un tratto fluviale acquerellato: probabilmente si tratta di un aggiornamento fatto in anni successivi. In carta L tutta una serie di elementi è semplicemente accennata a matita (fig. 1.33); probabilmente in questo documento l'attenzione dell'autore si vuole concentrare, più che sulla rappresentazione dettagliata di un vasto territorio, sulla descrizione di dettaglio di un'area limitata, fulcro delle vicende che diedero origine a tale carta: il Taglio di Porto Viro.

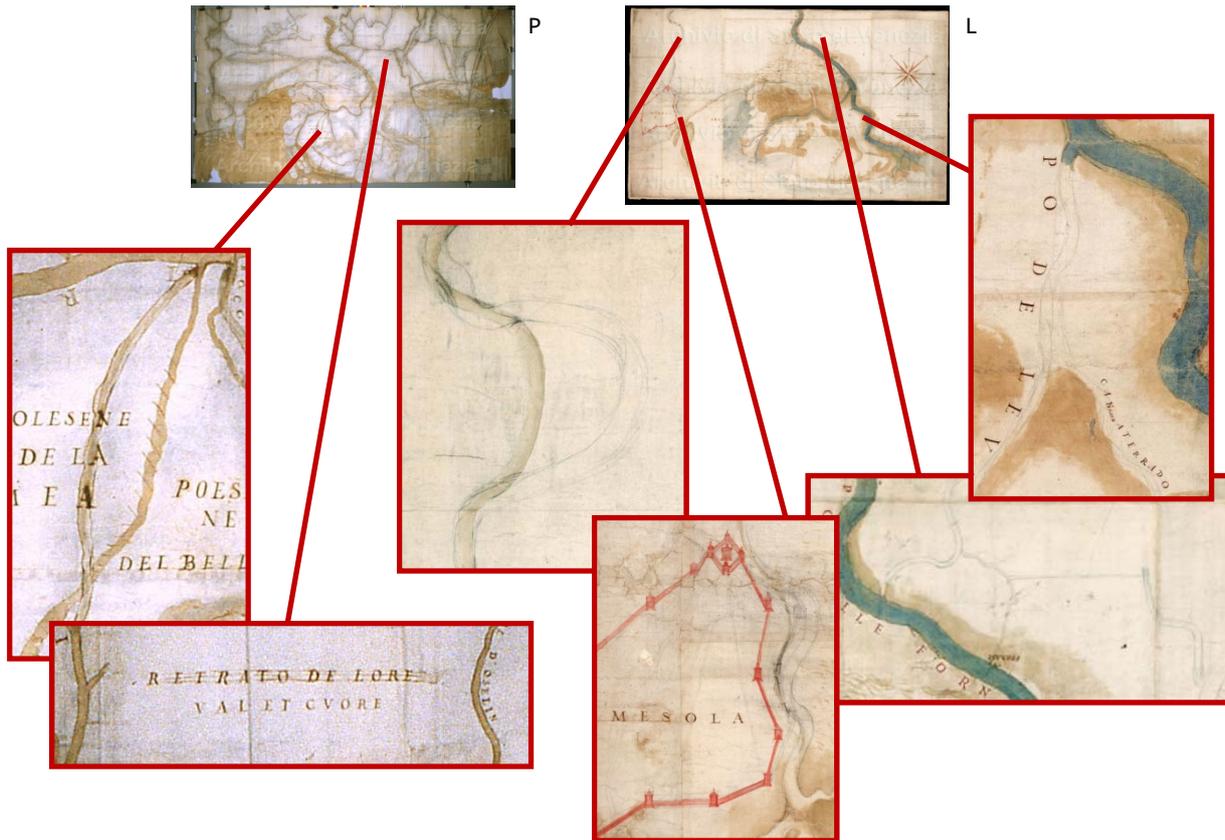


Fig. 1.33 - Particolari di ridisegni, aggiornamenti, schizzi, sulle carte P e L.

Lo stesso non può essere detto, invece, per la carta F, che in generale sembra essere più completa, con una colorazione molto forte, varie decorazioni (i venti, la rosa dei venti, le decorazioni della legenda o della scala della carta, le scritte color oro), vascelli ad ornamento applicati alla carta (e non semplicemente disegnati), grandi pesci (anche storioni, tipici di queste acque) disegnati in mare (fig. 1.34). Per contro, la carta P potrebbe quasi sembrare incompleta, dato che qui manca una scala grafica, la decorazione della legenda è terminata solo in parte (fig. 1.32a), nessun vascello è disegnato. La carta L, infine, è ornata solo nelle linee essenziali (la legenda e la scala grafica non sono decorate, il colore è molto leggero, poche sono le barche disegnate, e in modo molto essenziale), come ad evidenziare un fine maggiormente pratico per questa carta, oltre che tempi di esecuzione ridotti date le necessità di immediatezza nell'operazione del Taglio di Porto Viro.

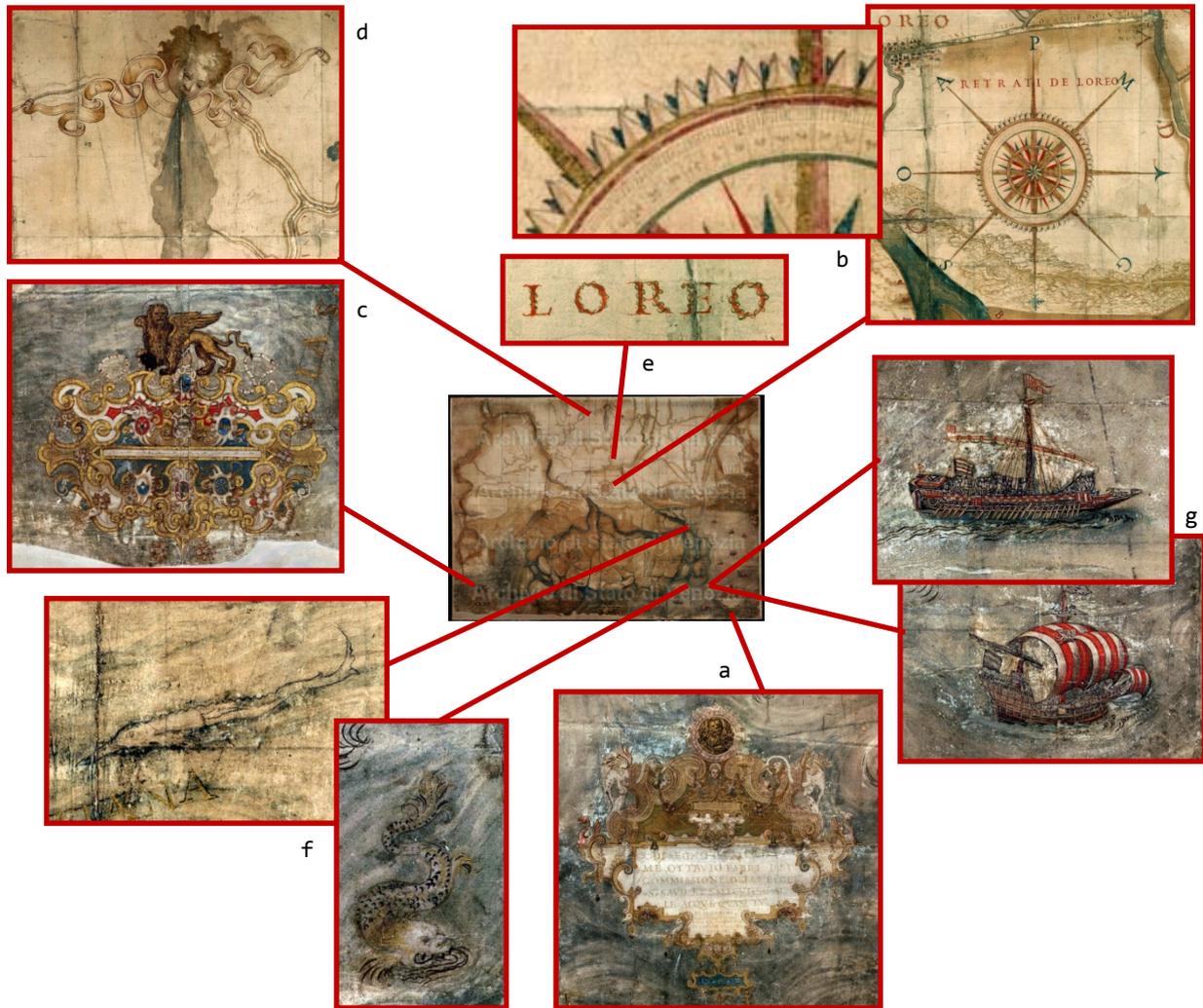


Fig. 1.34 - Particolari del disegno e dei decori di carta F:
 a) cartiglio; b) rosa dei venti; c) scala grafica; d) simboli dei venti;
 e) scritte decorate; f) grandi pesci; g) *appliques* di vascelli.

Infine, nelle carte P e L è più o meno marcatamente visibile un reticolo a maglia quadrata, tracciato a carboncino, probabilmente di ausilio per la trasposizione sul foglio delle misure angolari effettuate in campagna, in quanto:

- il reticolo è parallelo al bordo della carta e soprattutto direzionato secondo il nord indicato dalla rosa dei venti;
- la maglia del reticolo è piuttosto piccola (in P è 7,7 cm, quindi un po' meno di 1 km, in L è circa 4 cm, quindi poco più di 400 m);
- il reticolo sembra stare sotto al disegno e al colore acquerello.

In P le maglie sono anche numerate, sia su tre dei quattro lati (N, W, S), sia al centro, parallelamente ai due lati maggiori: probabilmente servivano ad individuare le zone mediante caselle. Anche in F è presente

un reticolo, ma esso si trova sopra al colore (ma sotto il ricalco delle scritte principali); la dislocazione delle linee del reticolato nell'assemblaggio dei singoli fogli potrebbe essere prova della carattere sinredazionale. Inoltre tali linee risultano infossate in corrispondenza di tutte le pieghe del supporto, a dimostrare la loro anteriorità rispetto a queste. Ciò non toglie, comunque, che un reticolo di base non esista anche sotto al colore, che in questa carta è molto coprente e potrebbe quindi aver oscurato un iniziale disegno a matita. Per quanto riguarda la dimensione della maglia del reticolo, in F è chiaramente pari a metà della lunghezza della scala grafica (poco più di 1 km); questo è prova ulteriore del fatto che, almeno in questo caso, il reticolo doveva essere d'ausilio per misure da effettuare in carta. Inoltre, in F sono visibili altri segni interessanti: sia due reticoli a maglia molto maggiore, non paralleli ai bordi della carta (uno di questi è probabilmente parallelo ad un canale artificiale), e disassati tra loro, sia cerchi ricalcati in rosso, a delimitare terreni confiscati (cosa dedotta dal confronto con altre carte dei primi anni del secolo successivo) (fig. 1.35) (Bitelli G., Cremonini S., Gatta G., 2010).

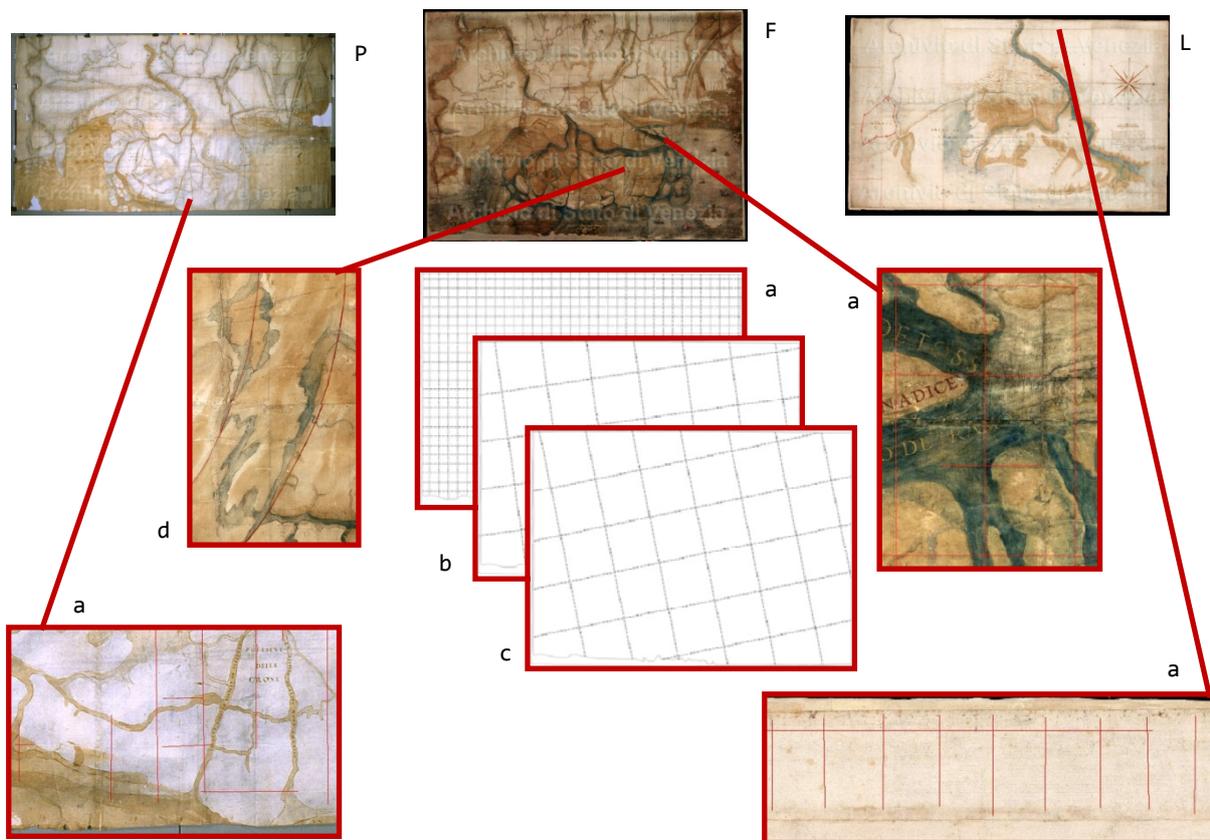


Fig. 1.35 - Dettagli dei reticoli paralleli al bordo del foglio (a) per le carte P, F e L (restituiti in rosso dove visibili); in carta F sono presenti anche due reticoli disassati (b, c) e cerchi rossi di delimitazione dei terreni confiscati (d).

1.2.4.2. *Ichnoscenografia* di Bologna

Il secondo gruppo di carte prese in considerazione nell'ambito della presente tesi riguarda la città di Bologna. La prima di queste carte risale all'inizio del XVIII secolo, ed è datata 1702.

I primi veri e propri "ritratti" di Bologna, sottoforma di vedute e cartografie, potrebbero dirsi risalire al Cinquecento. La più antica veduta a meritare questo nome è quella rappresentata nella parte inferiore della *Madonna del Terremoto*, dipinta nel 1505 da Francesco Francia (fig. 1.36a). Bologna, dipinta ai piedi dei Santi protettori della città, è ripresa dalle colline, e in visuale copre la zona che va da porta Saragozza a porta Castiglione (a sud di Bologna); il resto del disegno è interrotto dalla cornice del dipinto. La mappa più antica a noi giunta, invece, risale al 1575: si tratta del famoso affresco del Vaticano, fatto dipingere in Vaticano su una parete della stanza (detta per l'appunto Sala Bologna), da papa Gregorio XIII, non appena eletto pontefice, per ricordare la sua Bologna, in una ripresa a volo d'uccello (fig. 1.36b) (Comelli G.B., 1914). Da ricordare è anche la *Bononia* (1580-1581) di Egnazio Danti, dove, oltre alla città fortificata, è rappresentato il territorio esterno, con alcuni edifici in tre dimensioni (fig. 1.36c).



Fig. 1.36 - Antiche rappresentazioni di Bologna: a) *Madonna del Terremoto* di Francesco Francia, 1505 (Bologna, Palazzo Comunale); b) affresco del Vaticano (1575) (Città del Vaticano, Palazzi Vaticani); c) *Bononia* di Egnazio Danti, 1580-1581 (Città del Vaticano, Palazzi Apostolici) (fonte: <http://www.storiaeinformatica.it/nume>).

Queste carte, e le tante altre prodotte in quegli anni, si inseriscono in quel periodo della storia bolognese di forte sviluppo della produzione cartografica, sulla scia di quello che stava accadendo in altre città italiane: Firenze per prima (che già nel 1405 si era fatta inviare, direttamente dalla Grecia, il *Geographia* di Tolomeo), e a seguire Roma,

Milano, Napoli, Venezia. Per Bologna, i secoli XVII e XVIII furono dunque caratterizzati da pubblicazioni geografiche, xilografie di vedute della città e varie mappe. Nel 1702 il bolognese **Filippo de' Gnudi** pubblicò la sua mappa, "*Ichnoscenografia*", come lui stesso la chiamò. Si tratta di un'incisione su rame, all'acquaforte, di circa 1 m² (dimensioni: 0,990 x 1,045 m), in pianta prospettica scenografica su base icnografica (fig. 1.37). Essa è costituita dall'assemblaggio di 9 fogli di carta in un'unica matrice 3x3; a prova di ciò, sono chiaramente visibili le linee di giunzione, in corrispondenza delle quali il disegno tra fogli adiacenti non è continuo. La mappa originale presenta problemi di conservazione: sia pieghe del supporto, sia usura dei fogli di carta (attraverso i quali si intravede il supporto di tela) (fig. 1.38). La carta originale è oggi conservata presso la Biblioteca Archiginnasio di Bologna (Gabinetto Disegni e Stampe, raccolta *Piante della Città*). Oltre a questa, sono disponibili anche 8 dei 9 fogli di carta derivanti dalle matrici in rame (in teoria, a partire dalla matrice è possibile ottenere infinite copie); di queste ultime, invece, si sono purtroppo perse le tracce.

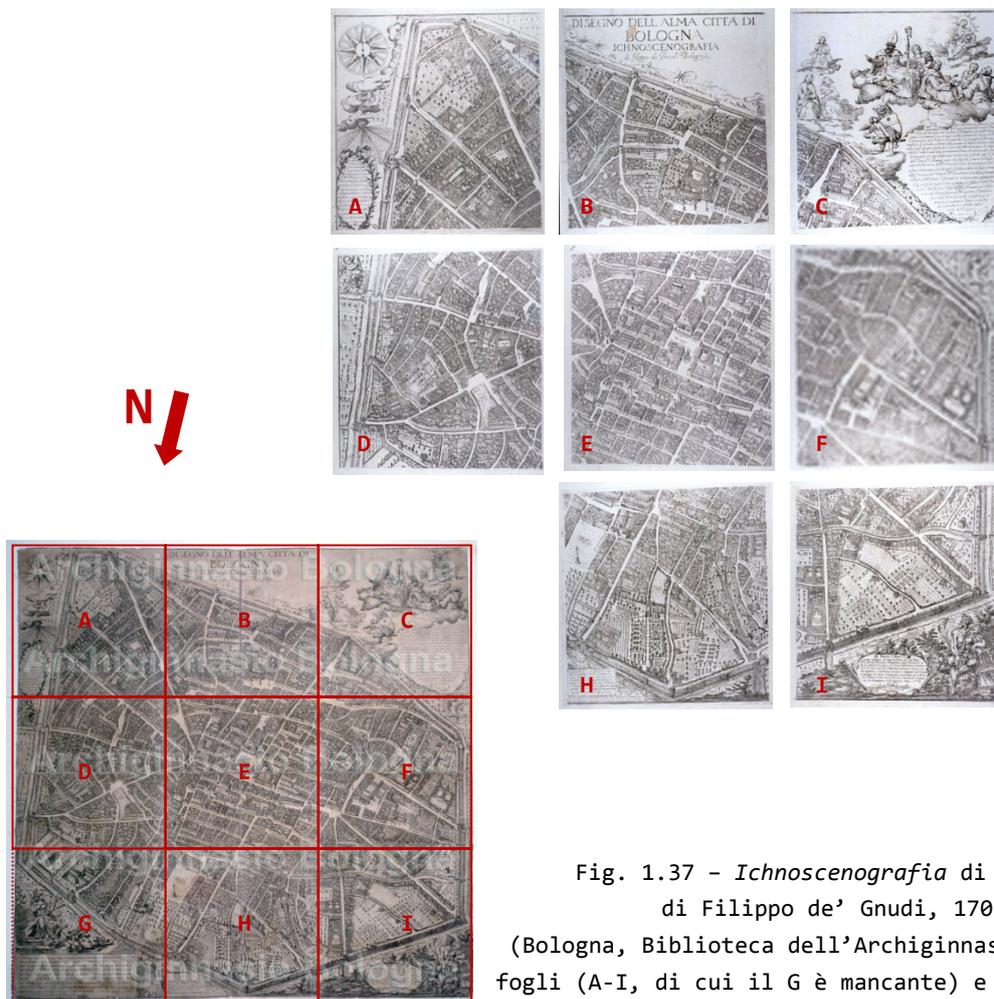


Fig. 1.37 - *Ichnoscenografia* di Bologna di Filippo de' Gnudi, 1702 (Bologna, Biblioteca dell'Archiginnasio, G.D.S.): fogli (A-I, di cui il G è mancante) e assemblaggio.

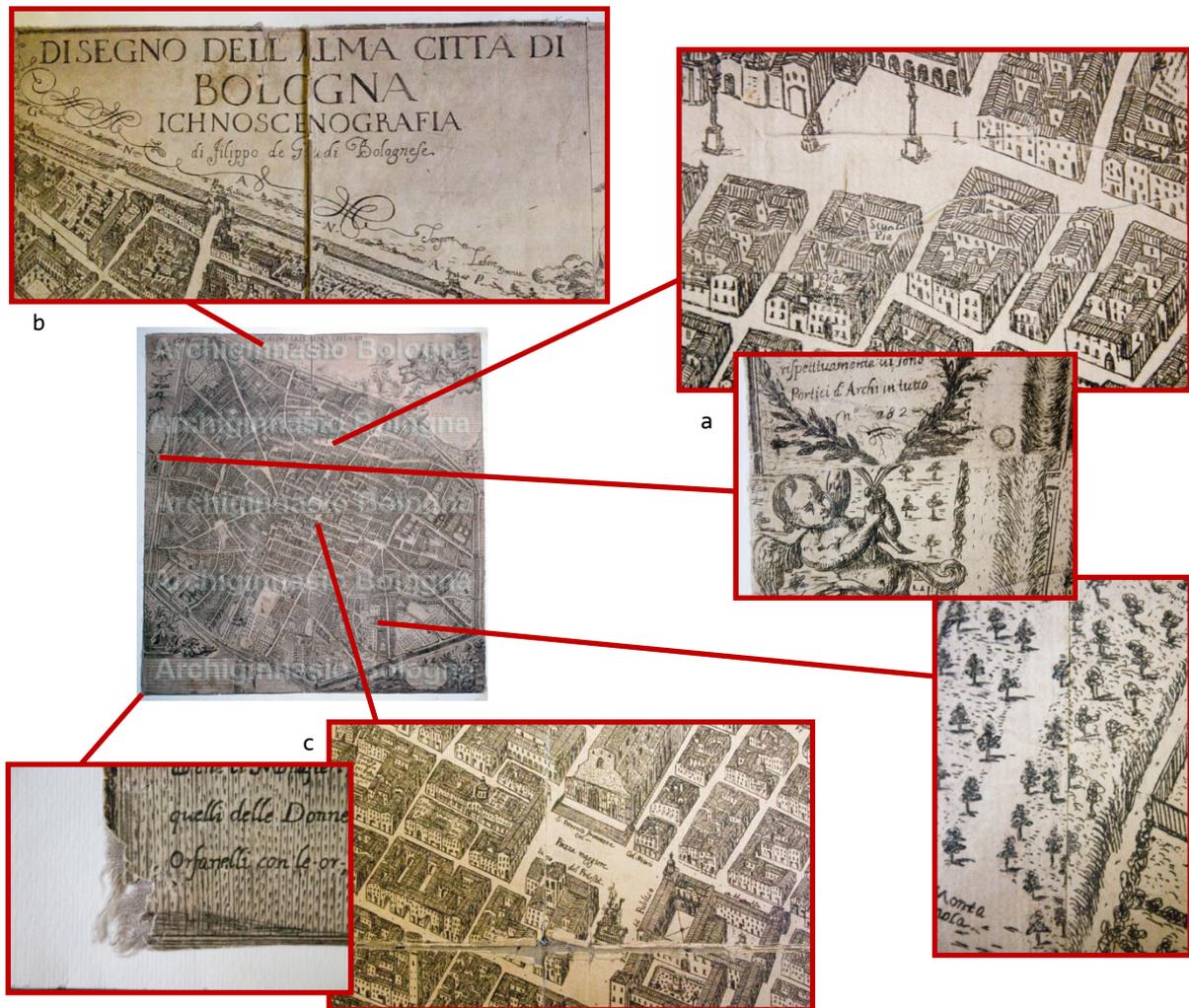


Fig. 1.38 - Dettagli del supporto e della conservazione della *Ichnoscenografia*:
 a) linee di giunzione tra fogli; b) pieghe; c) usura.

Nella storia cartografica bolognese, la prima icnografia, seppur ancora parziale ed imprecisa, era apparsa solo 10 anni prima, edita nel 1692 ma concepita e disegnata negli anni precedenti, redatta ad opera del pittore bolognese Agostino Mitelli. Con l'introduzione dell'icnografia, Mitelli aveva dato importanza al rilievo puramente geometrico, costituito dalla rappresentazione in pianta, in cui venne omessa del tutto la parte scenografica data dalle alzate degli edifici (fatta eccezione per alcuni particolari disegnati in alzata e prospetto: le porte della città, le torri Garisenda e Asinelli, la fontana del Nettuno, alcune chiese e colonne). Da questo punto di vista, quindi, la carta del Mitelli si staccò completamente dal genere usato fino a quel tempo, anche se la carta mancava ancora di geometricità, essendo priva di scala grafica (non a caso l'autore è anche pittore). L'intera rete stradale è corredata dai nomi,

così come per le costruzioni maggiori ed alcuni particolari: la carta del Mitelli viene a costituire uno dei più antichi glossari della toponomastica bolognese.

Con la sua *Ichnoscenografia*, il de' Gnudi tornò al tipo di rappresentazione in uso prima del Mitelli (quella prospettica), ma sarebbe stato per l'ultima volta su una mappa bolognese. Probabilmente il de' Gnudi non voleva abbandonare del tutto la tradizione (fino al 1692, le mappe bolognesi erano state sempre disegnate nella loro tridimensionalità, con le alzate degli edifici in prospettiva, per una rappresentazione in modo figurato della città), ma al tempo stesso voleva rimanere al passo coi tempi, per cui corredò la carta di una scala geometrica in 80 pertiche bolognesi (1 pertica bolognese equivale a 3,80 m), della rosa dei venti e di dichiarazioni varie sul metodo di realizzazione del disegno, avvicinandosi, in questo modo, a quella precisione geometrica ottenibile solo con rilievi topografici. Nella sua mappa, l'autore afferma che è possibile «vedersi la città di Bologna precisamente come stà, si può giustamente mediante la scala con le regole Geometriche conoscere quanto sia il suo giro, quanto il suo piano superficiale [...] e parimenti la distanza di qualsivoglia Luogo dall'altro a beneficio de Cittadini, non tanto per comodame portarsi a di Loro negozij, e per decider controuersie, quanto per condur pesi, acque ò per far altre operazioni per le vie più brevi come il tutto, et altro può giornalmente accadere» (fig. 1.39) (Casamorata C., 1947) (Comelli G.B., 1914).



Fig. 1.39 - Dettagli di "geometricità" della *Ichnoscenografia*:
a) scala grafica; b) rosa dei venti; c) cartiglio.

L'Icnoscenografia di Filippo de' Gnudi sembra quasi preannunciare i fotopiani che inizieranno a comparire due secoli più avanti: è infatti disegnata con una visione detta "a volo d'uccello", in cui il punto di vista aereo apparente è posto (in modo simile a scenografie precedenti) a nord-ovest, tra porta Galliera e porta delle Lame; la vista è quindi dalla pianura verso le colline, con adattamento del disegno alla cornice della carta. La *forma urbis* di Bologna, la prima evidenza della quale ci è data dal disegno Vaticano del 1575, è qui chiaramente evidenziata dalle mura (che in questa forma risalgono al 1374); essa sarebbe rimasta invariata fino al ventesimo secolo. Agli angoli della carta si trovano disegni e varie indicazioni (fig. 1.40):

- in alto a sinistra: rosa dei venti con Eolo soffiante;
- in alto a destra: immagini di S. Petronio e dei S.S. Protettori che danno il nome alle maggiori chiese della città, oltre alla Vergine Maria col Figlio; sotto si trova un angelo che sorregge lo stemma della famiglia Albani, a cui appartenne il papa Clemente V;
- in basso a sinistra: allegoria di Felsina, città papale, e scala di pertiche bolognesi;
- in basso a destra: allegoria del Reno, che elargisce acqua alla città; vi sono inoltre informazioni varie sui quartieri della città (Porta Piera, Porta Stiera, Porta Procula, Porta Ravegnana);
- ai lati: alcune notizie sugli edifici suburbani che non era stato possibile tracciare sulla pianta stessa.

La minuzia con cui l'autore incise la sua carta è degna di un miniaturista: i luoghi e i particolari monumenti sono tutti rappresentati (e le denominazioni, quando presenti, sono applicate direttamente sui luoghi), giardini ed orti privati sono decorati, gli edifici sono tutti pazientemente ricopiati dal vero e riportati sul disegno, inquadrati nello spazio ed elevati in prospettiva. A caratterizzare gli edifici, sono minuziosamente disegnati anche i portici, per i quali tutt'ora è famosa Bologna: quei portici, nati probabilmente per sorreggere gli sporti, che si rendevano utili per sfruttare al massimo lo spazio carente, oltre che per evitare l'umidità del piano terra, nel corso del tempo divennero luogo di integrazione sociale, dando protezione ai passanti e agli studenti forestieri, e ospitando attività artigianali e commerciali, in un perfetto esempio di compenetrazione tra la proprietà privata e quella pubblica; nella mappa del de' Gnudi quei portici sembrano essere, come oggi, un vero e proprio simbolo della città. Tuttavia, nonostante la scala di pertiche e la base icnografica, la rappresentazione non è sempre del tutto fedele alla realtà, per il fatto che nella carta compaiono delle semplificazioni: le strade sono a volte leggermente dilatate e l'altezza di certi edifici è

leggermente inferiore, in modo da consentire la visione dei fronti degli edifici nella convenzionale restituzione in assonometria, privilegiando quindi gli effetti scenici della veduta rispetto a quelli scientifici; inoltre giardini ed orti interni non sono del tutto aderenti al vero, in quanto un tale lavoro avrebbe richiesto una visita diretta dei luoghi e rilievi puntuali (Bitelli G., Gatta G., 2008).

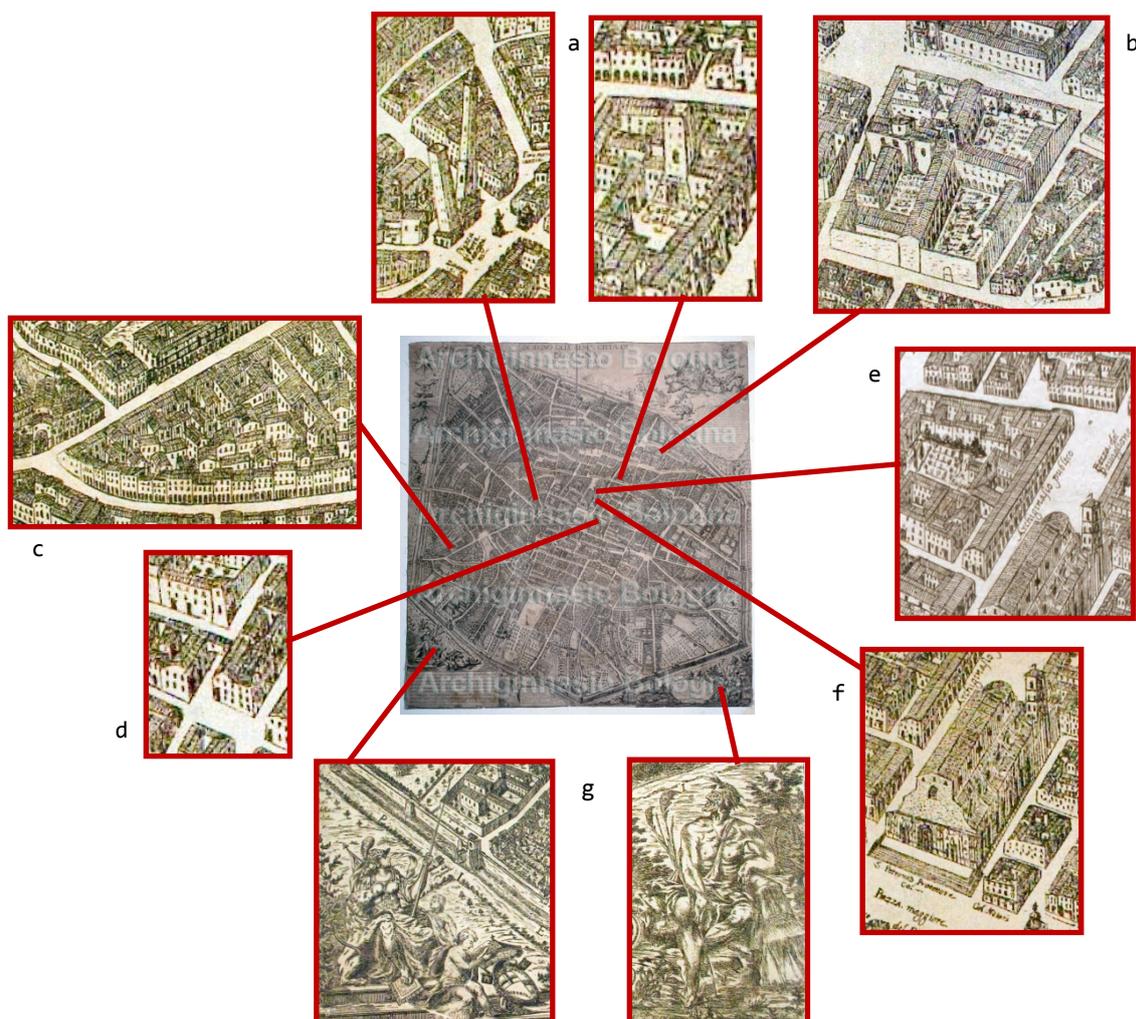


Fig. 1.40 - Alcuni dettagli della *Ichnoscenografia*:

- a) torri e case-torri; b) orti e giardini; c) portici; d) sporti; e) Archiginnasio, sede dello Studio; f) basilica di S. Petronio; g) allegorie (Felsina e Reno).

La Bologna che emerge dalla mappa del de' Gnudi è quella di una città che aveva subito una forte crescita nei secoli precedenti (nel Duecento Bologna era una delle città più vaste e popolate d'Italia e d'Europa, e ad inizio Settecento il numero di abitanti si aggirava tra 65.000 e 70.000), e in certe zone era addirittura in saturazione. Bisogna infatti

considerare che lo Studio fu uno dei motori principali dello sviluppo demografico, oltre che urbanistico ed economico: l'elevato numero di studenti (probabilmente attorno ai 2.000 agli inizi del Duecento) influì su diversi settori, basti citare l'artigianato, la finanza e l'edilizia (essendoci la necessità di alloggiare gli studenti provenienti da fuori Bologna). Grazie alle grandi dimensioni della mappa e alle particolarità del disegno, si notano varie torri e case-torri, appartenenti alle famiglie ricche consolidate da anni all'interno della città (come dimostrano i nomi di alcune vie, relativi ad antiche casate), molte aree interne private e molti giardini. Si notano anche sporti ed archi di collegamento al di sopra delle vie, per mettere in comunicazione le case di uno stesso proprietario: espediente spesso adottato in città, anche se vietato dal Comune (fig. 1.40).

Inoltre, con la mappa del de' Gnudi, per la prima volta in carta appare evidente la forte differenziazione tra le due aree agli estremi del decumano: a est, presso il complesso di S. Stefano, l'addizione longobarda con forma a ventaglio (con un profilo semicircolare congiungente le attuali vie Zamboni e Castiglione), legata a funzioni militari, mentre ad ovest lo sviluppo edilizio lineare lungo le radiali, avvenuto prima del 1000 a causa del massiccio insediamento di conventi a ridosso delle mura (Ricci G., 1985). Nella mappa è visibile un gran numero di edifici religiosi: all'inizio del XVIII secolo, infatti, circa 1/6 delle proprietà terriere era occupato da chiese e monasteri, anche se la popolazione religiosa era circa il 6% del totale. Si nota la differenza tra est ed ovest anche dai toponimi: solo a oriente ve ne sono molti di origine longobarda (come ad esempio via *Alemagna* = *Arimannia*) (fig. 1.41). Inoltre, sappiamo che Dante aveva rilevato variazioni di dialetto tra gli abitanti di Strada Maggiore e quelli di Borgo San Felice, che erano rimasti fino al XIV secolo.



Fig. 1.41 - Differenza tra le aree estreme del decumano sulla *Ichnoscenografia*:
a) ad est, addizione longobarda a ventaglio; b) ad ovest, sviluppo lungo le radiali.

A causa dei problemi di conservazione della mappa del de' Gnudi, a cui sopra si è accennato, considerati i fini del lavoro presentato nell'ambito della presente tesi (di cui più avanti si discuterà), è stata analizzato un **rifacimento moderno** della carta originale. Si tratta di una mappa disegnata da Lorenzo Confortini (con la consulenza storica di Mario Fanti), ed editata dalla ditta SABIEM nel 1985 (fig. 1.42) (Confortini L.). La copia è avvenuta in modo molto fedele all'originale, mediante ricalco a china, su lucido, di una stampa 1:1 da negativo fotografico della carta; il lucido, a cui è stata aggiunta una cornice decorativa esterna, è così stato fotografato, per poi essere stampato. Rispetto all'originale settecentesco, nella copia moderna:

- sono stati eliminati i difetti dovuti alla cattiva giunzione tra fogli adiacenti, di usura del supporto: il disegno è un *continuum*;
- le linee sbiadite sono state ravvivate;
- il nome di alcuni luoghi è scritto in modo leggermente differente;
- è stata aggiunta una cornice al bordo della carta, al fine di localizzare i luoghi per mezzo di lettere e numeri, in riferimento ad una lista presente nel lato destro del foglio;
- al bordo sono stati aggiunti altri elementi decorativi, per rendere la mappa più attraente.

Per le elaborazioni digitali che verranno presentate nei capitoli seguenti, una copia della carta rifatta da Confortini è stata convertita in forma digitale, mediante scanner a rullo.

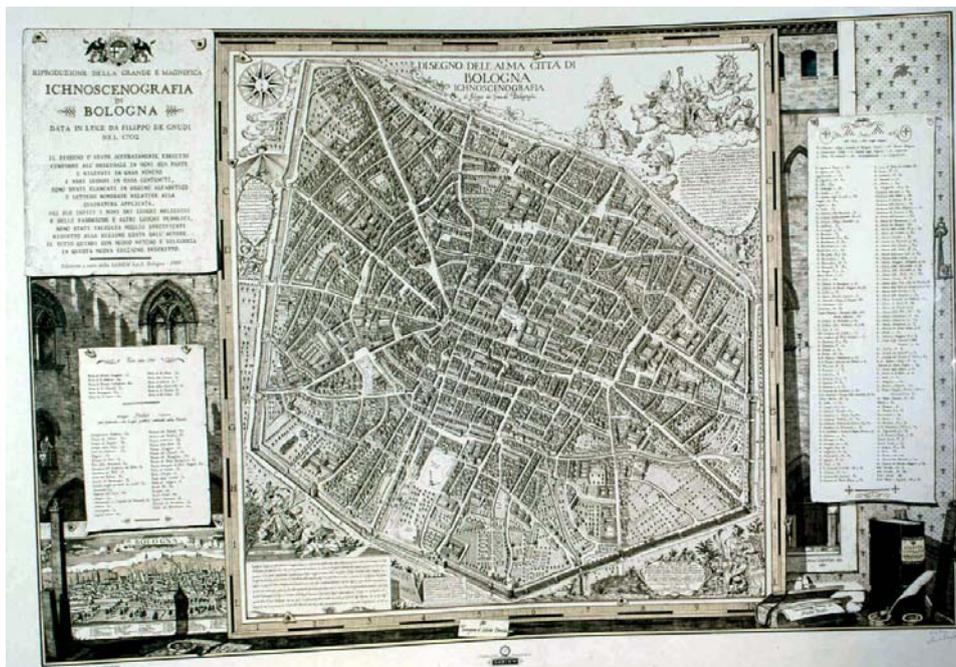


Fig. 1.42 - Rifacimento moderno della *Ichnoscenografia* (Lorenzo Confortini, SABIEM, 1985); una copia è conservata presso la Biblioteca dell'Archiginnasio di Bologna.

1.2.4.3. La carta Monari-Laghi

Se il de' Gnudi aveva voluto accostarsi a quella precisione geometrica che solo un accurato rilievo topografico può dare, un passo avanti in questa direzione venne compiuto con la **carta Monari-Laghi** del 1711-1712 (fig. 1.43). Questa è la seconda carta di Bologna presa in considerazione nell'ambito della presente tesi. Pur essendo stata compiuta solo 10 anni dopo l'*Ichnoscenografia*, la carta dei periti Gregorio Monari e Antonio Laghi introdusse nella storia di Bologna una vera innovazione, essendo la prima ricavata da misure topografiche della città: con questa carta il prodotto artistico, preferito fino ad allora ed anche dal de' Gnudi, venne sorpassato da quello scientifico proprio del rilievo catastale (anche se rigorosamente la Monari-Laghi non è ancora una vera mappa catastale). La carta costituisce il primo vero esempio di restituzione planimetrica, senza alzato, di Bologna; infatti, l'esperimento seicentesco del Mitelli non era stato a rigore una restituzione planimetrica, avendo mantenuto ancora la tridimensionalità per vari edifici.

Dato il pessimo stato delle strade di Bologna di quel tempo (anche perché era lasciata ai cittadini la responsabilità di curare il tratto di propria competenza), i senatori Assunti d'Ornato ordinarono la redazione di una carta per *«avere in pianta giusta, e regolata nelle vere misure tutta la Città»*, e poter dunque calcolare la superficie stradale di competenza di ogni singolo proprietario (a quel tempo la contribuzione spettante ad ogni singolo proprietario per il rifacimento e la manutenzione del fronte stradale antistante l'edificio avveniva in modo proporzionale all'estensione del fronte dell'edificio sulla via pubblica, quindi indipendentemente dall'estensione interna dello stesso, o del numero di vani e piani di cui si componeva), oltre che rendersi conto delle strade da livellare e selciare, *«ad effetto di considerare qualche buon ripiego stabile e facile per mantenerla salicata, e per diverse altre pubbliche occorrenze»*. Il compito di rilevare le strade e l'edificato venne affidato ai periti Gregorio Monari e Antonio Laghi, i quali iniziarono i lavori nel 1711 e li portarono a termine l'anno successivo, producendo quella che venne a costituire la prima mappa bolognese ricavata da una **misura generale della città**. Essendo lo scopo il calcolo delle superfici stradali, fu stabilito che *«si facesse la pianta suddetta senza elevazione di edifici»* (Assunteria d'Ornato, 1711). Ed è così che in questa mappa a predominare sono le strade, con i portici a scandire il limite tra due proprietà (che non vengono rappresentate nella loro scomposizione particellare, siccome la tassazione si basava unicamente sulla larghezza del fronte di ogni singolo edificio), tutti

icnograficamente rappresentati; una siffatta rappresentazione dei portici apparve, con questa mappa, per la prima volta per la cartografia bolognese (basti pensare a quanto differentemente erano stati rappresentati i portici dal de' Gnudi, sulla sua carta prospettica). I periti dovettero consegnare all'Assunteria d'Ornato bozze e misure, in modo che chiunque potesse ottenere una copia della mappa; nel tempo furono eseguite svariate copie, anche in formato ridotto (Comelli G.B., 1914).

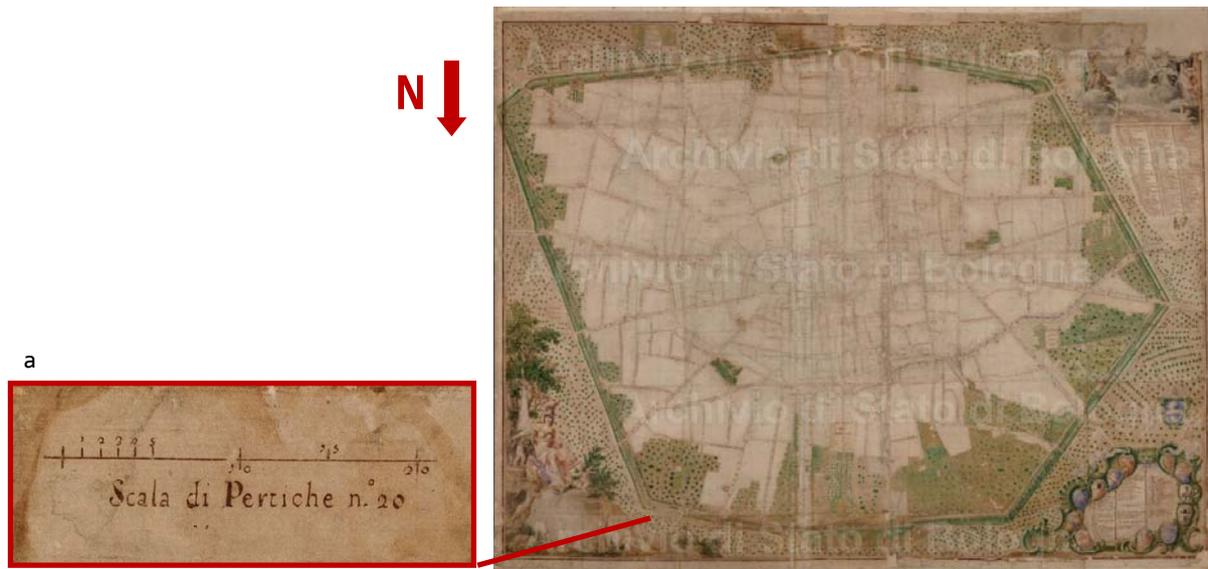


Fig. 1.43 - Carta Monari-Laghi, 1711-1712 (Archivio di Stato di Bologna), con evidenziata la scala grafica (a).

La carta è un assemblaggio su tela di fogli di carta, evidente data la non corrispondenza, talvolta, del disegno tra un foglio e l'altro. E' a colori, ed ornata ai lati (fuori dalle mura) di stemmi e figure (per i quali i due periti ricorsero alla mano di Fiore Pilati), oltre che di alberi a rappresentare la campagna. Una scala grafica (in 20 pertiche bolognesi) testimonia il fine tecnico del documento; in base a questa, la scala della carta risulta circa 1:1.080. La carta mantiene ancora l'orientamento, classico per allora, con il nord in basso, in modo simile alla mappa di de' Gnudi, ma non è presente alcuna indicazione del nord (almeno nelle parti in cui è ancora intatto il supporto originale). Il disegno è essenziale nella tipologia di oggetto rappresentato (le strade, la pianta di pochissimi edifici e simboli ad indicare gli edifici religiosi, di cui è riportato un elenco sul lato sinistro del documento), ma preciso nel delineare i portici ad uno ad uno. Anche qui il disegno si concentra all'interno delle mura, eccetto pochissimi complessi edilizi, alcune strade e corsi d'acqua esterni; all'interno delle mura, e a ridosso

di queste, appaiono ancora, inalterate, le aree inedificate semirurali che si notano anche sulla mappa di de' Gnudi. Oltre a queste, compaiono ancora due cumuli di macerie: nel centro il cosiddetto "Guasto", detto "dei Bentivoglio" in quanto nato dalle macerie del palazzo Bentivoglio, distrutto nel 1507 dal popolo (solo a partire da metà Settecento sarebbe iniziata la costruzione del teatro comunale), e a nord la "Montagnola", collina formata dalle macerie di una rocca più volte costruita ed altrettante volte distrutta da rivolte popolari nel corso del XIV e del XV secolo; a differenza della mappa del de' Gnudi, nella Monari-Laghi si osserva la costruzione di un passeggio sopra alla Montagnola (Ricci G., 1985). Nella stesura del disegno si può notare un reticolato a matita (a maglia di circa 50 m a terra), parallelo ai bordi della carta, e dislocato tra fogli adiacenti, simile a quello individuato sulle carte del delta del Po; possiamo supporre che anche qui il reticolato sia stato d'ausilio nel riportare in carta le misure effettuate (alcune ancora ben visibili).

La carta originale, di elevate dimensioni (2,011 x 2,730 m), è conservata presso l'Archivio di Stato di Bologna. L'analisi della carta Monari-Laghi e delle successive di tipo catastale rientra all'interno del progetto *Creare e divulgare cultura attraverso gli archivi storici*, finanziato dalla Fondazione Cariplo (bando 2007.6001: *Ritratti di città in un interno. Consolidare la memoria collettiva della città attraverso l'informatizzazione e la divulgazione della cartografia storica*), e il cui gruppo di ricerca è costituito dalle Università di Milano, Bologna (dipartimenti DISTART, attuale DICAM, e DAPT) e Roma, oltre ai relativi Archivi di Stato.

Sarà con la mappa catastale di Bologna del 1811-1814, redatta in base ad un decreto napoleonico del 1807, che ordinava la redazione di un catasto generale per il Regno Italico (l'ingresso di Napoleone a Bologna nel giugno del 1796 interruppe per circa 20 anni la dominazione pontificia), che la pratica dei rilevamenti topografici avrà modo di essere perfezionata, ricorrendo alla tavoletta pretoriana. Questa mappa sarebbe poi servita alla costituzione del nuovo catasto, nel 1835. Con i Catasti ottocenteschi nascerà anche un nuovo tipo di tassazione, calcolata non più in funzione della larghezza del fronte stradale dell'edificio, ma in funzione dell'effettiva estensione interna della singola proprietà.

Tra la carta Monari-Laghi e le prime carte catastali, nella storia cartografica bolognese si inserisce un altro documento, la carta Monari-Scarselli, edita nel 1745 e dedicata al Pontefice Benedetto XIII: un'incisione all'acquaforte per mano dell'intagliatore Antonio Alessandro Scarselli. Qui ancora si fa sentire il delicato passaggio tra il classico prodotto artistico e quello nascente totalmente tecnico: in qualche modo

questa mappa riprende l'esecuzione in pianta del Mitelli, e la precisione del de' Gnudi, associata ad una scala in pertiche bolognesi (Casamorata C., 1947).

1.2.4.4. Mappe catastali di Bologna

Con l'inizio del nuovo secolo, nei diversi Stati della Penisola prese avvio la redazione di carte di tipo catastale. Dopo il *capitastrum* di epoca romana, infatti, l'istituzione estimativa e catastale nella penisola italiana aveva subito una battuta d'arresto, per poi riprendere in modo vigoroso soprattutto nei secoli XVII e XVIII, all'interno del quadro di un generale movimento riformatore puntato a modernizzare la società, anche se sotto diverse forme nelle varie città e nei vari Stati della Penisola (Costa A., 1983).

Al tempo dell'Unità d'Italia, i catasti vigenti erano circa 25. In particolare, nei territori dello Stato Pontificio (tra cui rientrava anche la provincia di Bologna) era allora in uso il **Catasto Gregoriano** (noto anche col nome di Catasto Pontificio), dal nome di papa Gregorio che lo aveva attivato nel 1835. Si trattava di un catasto geometrico-particellare, in quanto si avvaleva di mappe per l'identificazione degli immobili (da cui il nome "geometrico"), distinguendo i possessori delle singole proprietà terriere (da cui il nome "particellare"); il primo catasto basato su mappe particellari era stato realizzato a Milano circa un secolo precedente, nel 1718, sulla base delle misure effettuate dal matematico Jacopo Giovanni Marinoni mediante la tavoletta pretoriana.

Il Catasto Gregoriano era stato promosso inizialmente da Pio VII, nel 1816, quale elemento fondamentale per una riorganizzazione complessiva dello Stato Pontificio. Un ente appositamente costituito, la Congregazione dei Catasti, presieduta da un Direttore generale del Catasto, aveva assunto l'incarico di occuparsi del nuovo lavoro: dalla redazione di norme e leggi in merito al Catasto, alla definizione dei criteri per il calcolo dei fondi urbani e di campagna, dalla gestione delle operazioni di rilievo, alla gestione delle operazioni di censimento degli edifici.

Un'importante norma stabilita dalla Congregazione era stata l'utilizzo del **sistema metrico decimale**, per uniformare su tutto il territorio il sistema di misura, come prima di allora non era mai stato fatto nello Stato Pontificio. Tra l'altro, questo aspetto rientrava nella volontà di adattarsi il più possibile alla catastazione napoleonica già realizzata negli anni precedenti (per Bologna negli anni 1811-1814) dall'ex Regno

Italico (di cui anche Bologna aveva fatto parte, come “Dipartimento del Reno”), catastazione che per l'appunto era stata eseguita utilizzando il sistema metrico decimale (con carte a scala 1:1.000 per i centri urbani e 1:2.000 per i rustici). Oltre alle caratteristiche delle mappe catastali, e alle misure topografiche eseguite per redigerle (per mezzo della **tavoletta pretoriana**), furono mutate anche le modalità di compilazione dei registri e molte norme inerenti il Catasto, ed inserite dalla Congregazione dei Catasti nel *Regolamento sulla misura dei terreni e formazione delle mappe*. In particolare, vennero mutuati i termini relativi a vecchie unità di misura e adattati al sistema decimale, suddividendo le lunghezze in canne (1 canna = 1 m), e nei sottomultipli palme (decimetri), once (centimetri) e minuti (millimetri); per le superfici si adottarono 10 tavole al quadrato (corrispondenti ad 1 ha = 10.000 m²), 1.000 canne quadrate (= 1.000 m²), la canna quadrata (= 1 m²) e i suoi sottomultipli al quadrato. Il disegno venne eseguito a mano, con l'ausilio del tiralinee, e acquerellato (Capoferro Cencetti A.M., 1981).

Le norme prevedero dunque che per ogni territorio comunale dovessero essere redatti:

- una **mappa** in un solo foglio (o, nel caso di territori estesi, in più sezioni, ognuna denominata in base al toponimo più importante ivi compreso), in duplice copia (una originale, in un unico foglio, e l'altra in fogli sciolti, numerati con riferimento ad un quadro di unione), a scala 1:2.000 (1:1.000 per i centri urbani più rilevanti), e orientate col nord in alto (aspetto nuovo per la cartografia in uso fino al XVIII secolo) (fig. 1.44); per individuare le singole proprietà, ogni particella era delimitata dal suo perimetro, e identificata da un numero (o una lettera, per edifici pubblici ed ecclesiastici, come teatri, ospedali, fabbriche camerale, chiese, conventi, canoniche, cimiteri, ecc.), secondo una progressione unica per una stessa mappa;
- le cosiddette “**mappette**”, altre doppie copie rappresentanti lo stesso territorio in scala ridotta (1:8.000 o 1:4.000);
- i relativi “**sommarioni**” e “**brogliardi**” (i primi più sommari dei secondi), registri catastali a corredo delle mappe, in cui per ogni numero identificativo della particella (o ad ogni lettera, identificativa degli edifici pubblici o sacri), venivano riportati il nome del proprietario ed altre specifiche; come per le mappe, anche i registri dovevano essere redatti in duplice copia.

In tal modo, i registri, le mappe originali e le mappette confluivano nella Presidenza del Censo a Roma (dove facevano fede in caso di controversia), mentre le copie di brogliardi e mappe (queste ultime in

fogli sciolti) giungevano alle Cancellerie del Censo, uffici che, distribuiti sul territorio dello Stato Pontificio, erano destinati all'aggiornamento delle mappe e dei relativi brogliardi. Sono quindi queste copie ad essere conservate oggi presso gli Archivi di Stato delle varie città allora assoggettate allo Stato Pontificio (fatta eccezione per l'Archivio di Stato di Roma, che oggi conserva i documenti allora spettanti alla Presidenza del Censo).

Le operazioni di rilevamento di tutte le province dello Stato Pontificio, fatta eccezione per il Suburbio e l'Agro romani, spettarono ad ingegneri milanesi, già avvezzi al tipo di lavoro per via del catasto dell'ex Regno Italicò. Le operazioni di misura impegnarono gli ingegneri dal 1817 al 1821 (Archivio di Stato di Roma, 2002).



Fig. 1.44 - Quadro di unione del Catasto Gregoriano di Bologna ed. 152bis (Archivio di Stato di Bologna), con evidenziati:
a) scala grafica; b) indicazione del nord.

Ai fini dello studio presentato in questa tesi, sono state analizzate le mappe del Catasto Gregoriano urbano di Bologna, conservate oggi presso l'Archivio di Stato della città (Archivio di Stato di Bologna, 2007). Come sopra spiegato, si tratta delle copie delle mappe originali; queste ultime, invece, si trovano oggi all'Archivio di Stato di Roma (in un unico foglio e in uno stato di conservazione migliore). Le mappe in oggetto si riferiscono agli edifici presenti all'interno della terza cinta muraria di

Bologna (di cui oggi rimane traccia attraverso le porte di ingresso al centro cittadino), oggi delimitata dai viali di circonvallazione. Tali mappe hanno visto vari aggiornamenti nell'arco temporale che va dal 1812 al 1900 circa, e come risultato oggi esistono diverse edizioni di tale Catasto, nominate con una sigla diversa durante le operazioni di inventariazione da parte dell'Archivio di Stato di Bologna, per un totale di 140 fogli (figg. 1.44 e 1.45):

- **152bis** (del 1831, sulla base di un originale napoleonico del 1811-1814 conservato presso l'Archivio di Stato di Roma: rispetto alla base originale si notano infatti alcune modifiche, ad esempio l'aggiunta di numeri di particella, evidenziati con colore differente):
 - il centro storico è diviso in $3 \times 5 - 1 = 14$ settori (numerati da I a XIV) + 1 quadro di unione (differentemente dalla copia conservata a Roma, costituita da un unico foglio) (fig. 1.44);
 - ogni settore riporta più fogli (per un totale di 83 fogli), uno per ogni piano degli edifici (dove il piano terra è definito "1° piano sottoposto" e il piano cantine è definito "2° piano sottoposto"); ad esempio il settore VIII (contenete piazza Maggiore) è composto da piano terra, piano cantine, ed ulteriori 6 piani sopraelevati;
 - dimensioni di mappa uguali per tutti i fogli: 94,5 x 58 cm;
 - scala grafica di 1:1.000 (nel quadro di unione si dichiara: «*Scala di metri 1680 per il presente modello che risulta la 144esima parte della mappa originale*») (fig. 1.44);
 - firmato da Angelo d'Emiliani perito architetto e Francesco Bertelli ingegnere (le stesse firme che appaiono sui brogliardi serie II);
- **152ter** (del 1873, il primo vero aggiornamento della levata napoleonica):
 - il centro storico è diviso in $4 \times 5 - 1 = 19$ fogli + 1 quadro di unione;
 - vengono riportati solo i piani terra;
 - le dimensioni di mappa sono uguali per tutti i fogli: 69,5 x 54 cm (dimensioni del quadro di unione: 68 x 54 cm);
 - come scala grafica viene definita la «*Scala di Canne 50 di 3 metri cadauna, nel rapporto di 1 a 1000*»;
- **152** (1889-1901, con aggiornamenti fino al 1927):
 - il centro storico è diviso in $4 \times 5 - 1 = 19$ settori + 1 quadro di unione (identico a quello della 152ter) + 17 allegati di aggiornamenti successivi (di cui 6 relativi a fine '800, e 11 relativi agli anni '20 del '900, fino al 1927);

- vengono riportati solo i piani terra (con indicazione della nuova numerazione civica apportata dopo il 1878);
- le dimensioni di mappa sono uguali per tutti i fogli (69,5 x 51 cm), mentre sono variabili per gli allegati; le dimensioni del quadro di unione sono 59 x 45 cm;
- scala grafica di 1 a 1.000.

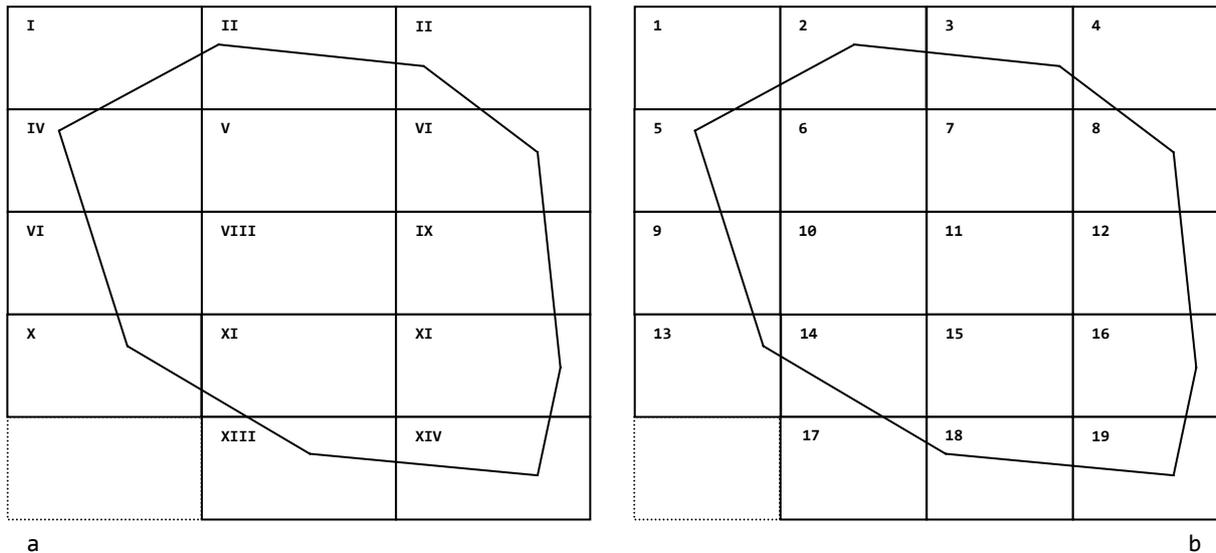


Fig. 1.45 - Schema della suddivisione in settori del Catasto Gregoriano di Bologna:
 a) edizione 152bis (14 settori, identificati con numeri romani);
 b) edizioni 152ter e 152 (19 settori, identificati con numeri arabi).

Durante l'Ottocento e parte del Novecento queste carte sono state ampiamente utilizzate a fini pratici, tant'è vero che si notano alcune correzioni a matita, riguardanti alcune particelle o alcune vie (ad esempio *via S. Felice* modificata in *via Ugo Bassi*), o linee rette a formare grigliati probabilmente di ausilio all'effettuazione di misure in carta. Di conseguenza le carte sono andate soggette a forte usura (macchie, pieghe, lacerazioni e soprattutto bordi sfrangiati sono ancora ben visibili), motivo per cui nel corso del '900 sono state tutte sottoposte a restauro, mediante incollaggio su cartoncino (fig. 1.46).



Fig. 1.46 - Particolari di pieghe (a), macchie (b), e lacerazioni (c) di alcuni fogli del Catasto Gregoriano di Bologna, e di alcuni aggiornamenti otto-novecenteschi (d).

A corredo ed integrazione di tali mappe, è indispensabile prendere in considerazione anche i relativi brogliardi. Si tratta di alcuni volumi (anch'essi recentemente restaurati, mediante rilegatura), divisi in due serie, differenti tra loro per data, tipologia delle informazioni e classificazione delle particelle catastali (fig. 1.47):

- **Sommarioni serie I:** 3 registri di impianto, eseguiti nell'arco cronologico che va dal 1812 al 1814 (si tratta quindi degli originali napoleonici) + 1 registro non datato (ma probabilmente del 1873, epoca di individuazione dell'aggiornamento per l'edizione 152ter), tutti di dimensione 30,5 x 45 cm circa:
 - *tomo I* (dal n° 1 al n° 2182, e lettere A-Z) (1812), con circa 400 pagine (fig. 1.49);
 - *tomo II* (dal n° 2183 al n° 4940, e lettere A1-F3) (1813), con circa 430 pagine;
 - *tomo III* (dal n° 4941 al n° 9568, e lettere G3-04) (1814) con circa 510 pagine (le ultime 2 pagine contengono le istruzioni ai geometri del 1811);
 - *Sommarione della città di Bologna* (dal n° 1 al n° 5020, quindi mancano circa metà degli aggiornamenti: è l'unico volume conservato di una serie non più esistente) (post 1873), con circa 440 pagine;
- **Brogliardi urbani serie II:** 8+4 volumi (compilati nel 1831), differenti dai precedenti per la diversa strutturazione, che qui avviene mediante raggruppamento delle particelle catastali nelle 273

“isole” (da *insula* = “piccolo insediamento”, “isolato”, raggruppamento di edifici per vie o complessi edilizi), identificate da numeri romani; sono relativi ai fogli di mappa del piano terra nell’edizione 152bis (per cui sono il documento di registro più fedele alle mappe di questa edizione, ma potrebbe non esserci corrispondenza con le mappe edite successivamente, per via di particelle nuove o differenti) ed hanno dimensioni superiori ai registri serie I (43 x 60,5 cm circa):

- 1, isole 1-29 (1831), con circa 210 pagine (fig. 1.48);
- 2, isole 30-63 (1831), con circa 200 pagine;
- 3, isole 64-94 (1831), con circa 220 pagine;
- 4, isole 95-123 (1831), con circa 200 pagine;
- 5, isole 124-160 (1831), con circa 210 pagine;
- 6, isole 161-193 (1831), con circa 280 pagine;
- 7, isole 194-229 (1831), con circa 290 pagine;
- 8, isole 230-273 (1831), con circa 260 pagine;
- 9, isole 1-63 (1831);
- 10, isole 64-94 (1831);
- 11, isole 95-160 (1831);
- 12, isole 213-273 (1831).

I volumi 9, 10, 11 e 12 formano una serie che accorpa in un numero inferiore di registri gli stessi dati riportati nei primi 8 volumi; tra questi manca però il volume relativo alle isole 161-212. Per tale ragione gli ultimi 4 volumi non sono stati presi in esame nell’ambito di questo progetto. Nel complesso i brogliardi considerati danno origine ad oltre 3.600 pagine.

Esiste infine una serie composta da 3 registri catastali che riportano gli aggiornamenti dal 1874 al 1900, riguardanti cambi di proprietario, di estimo o di destinazione d’uso dei beni immobili, inserimento di edifici nuovi o cancellazione di edifici demoliti. Anche tale serie, non essendo di interesse per l’Archivio di Stato di Bologna, non è oggetto di studio nell’ambito del progetto.

L’antico rilevamento topografico effettuato per la redazione del Catasto napoleonico sarebbe stato alla base di tutte le carte bolognesi degli anni e dei secoli seguenti; tale Catasto, infatti, con la copia pontificia e i suoi vari aggiornamenti, sarebbe rimasto in vigore fino al 1915, anno di entrata in vigore del nuovo catasto italiano, redatto sulla base del rilievo eseguito tra il 1909 e il 1914, mediante teodoliti e tacheometri (Comelli G.B., 1914).

SERIE I		SERIE II
vol. 1-3	vol. 4	
<ul style="list-style-type: none"> • n° di particella + eventuale subalterno • nome del proprietario • ubicazione proprietà • destinazione d'uso 	<ul style="list-style-type: none"> • numerazione generica di registrazione • ubicazione proprietà • n° civico • n° di particella • destinazione d'uso • posizione • stato del fabbricato • n° di vani per ciascun piano • superficie • nome del proprietario 	<ul style="list-style-type: none"> • isola • n° di mappa (intero o frazionato) • ubicazione proprietà • n° civico • destinazione d'uso • nome del proprietario • n° di vani per ciascun piano • superficie • pigione • estimo • osservazioni varie

Fig. 1.47 - Legenda dei brogliardi serie I e II del Catasto Gregoriano di Bologna.

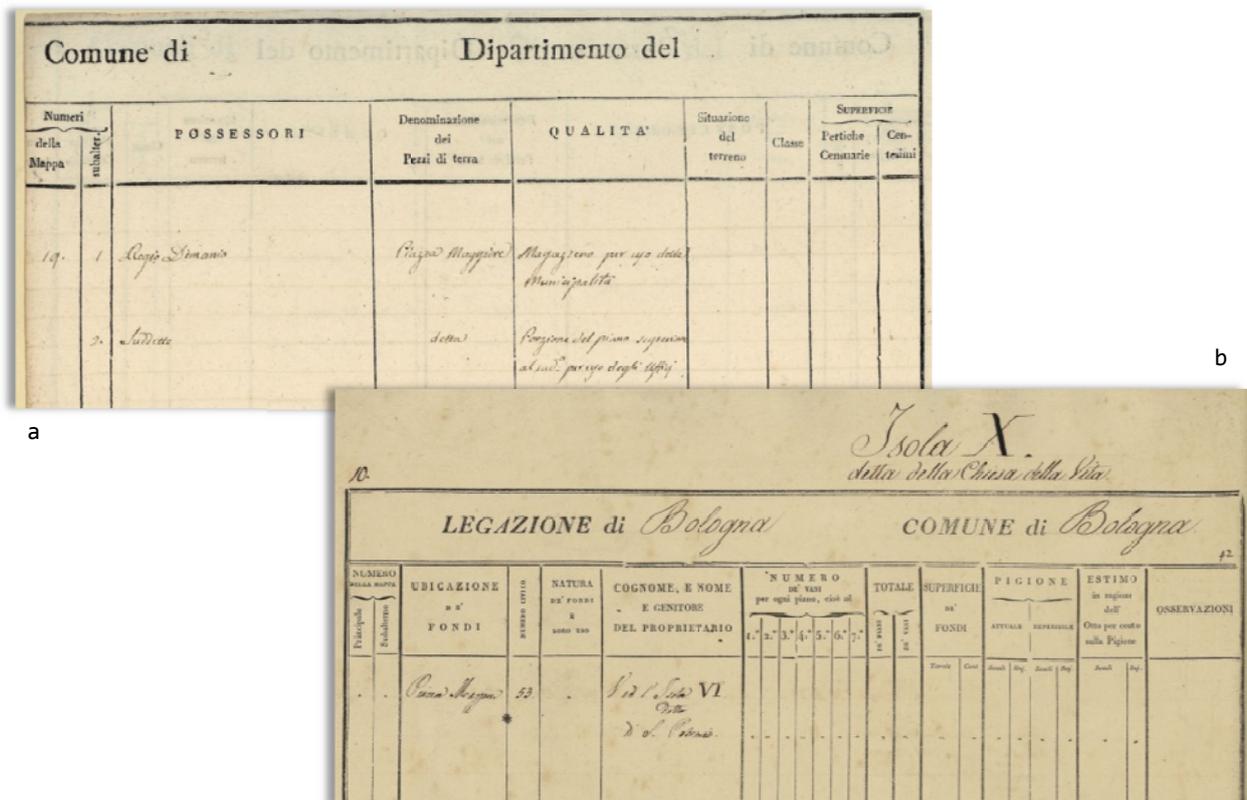


Fig. 1.48 - Particolare di due pagine di brogliardo del Catasto Gregoriano di Bologna: a) serie I, volume 1, pag. 2 verso; b) serie II, volume 1, pag. 21 verso.

Per completezza, si riporta anche qualche nota descrittiva del cosiddetto **Catasto Boncompagni**, edito anch'esso nel 1835 (e con revisioni fino al 1839), ma riguardante la zona campagna, esterna alla città di Bologna. Il catasto, istituito con chirografo di Pio VI del 25 ottobre 1780 (quindi precedentemente al Catasto Gregoriano), si inseriva in un provvedimento finalizzato ad un generale riordinamento del sistema finanziario bolognese, in particolar modo atto a sanare la grave situazione debitoria cittadina, attraverso l'introduzione del terratico, un'imposta fondiaria (basata sull'estimo per "*aes et libram*") che doveva essere pagata da tutti i proprietari terrieri, compresi nobili ed ecclesiastici che fino a quel momento ne erano stati esenti. Occorreva dunque attuare un catasto *ad hoc*, che fu il primo catasto geometrico-particellare a stima peritale indiretta (cioè formata su tariffe comunali) della zona bolognese, e che prese il nome dal cardinale Boncompagni da cui furono curati e diretti i lavori. Esso si basò su un rilievo effettuato diversi anni prima dell'edizione del Catasto (tra il 1781 e il 1796), ad opera di periti agrimensori appositamente incaricati, le cui misure furono controllate da Giuseppe Cantoni di Como.

Il Catasto Boncompagni, attualmente conservato presso l'Archivio di Stato di Bologna, consiste in 745 mappe acquerellate, 30 delle quali (dalla 25 alla 54, serie I), sono relative a Bologna (settore VII). Le mappe hanno dimensioni differenti tra loro; su ognuna di esse è segnato l'orientamento rispetto al nord, ed è riportata una scala di pertiche (fig. 1.49).

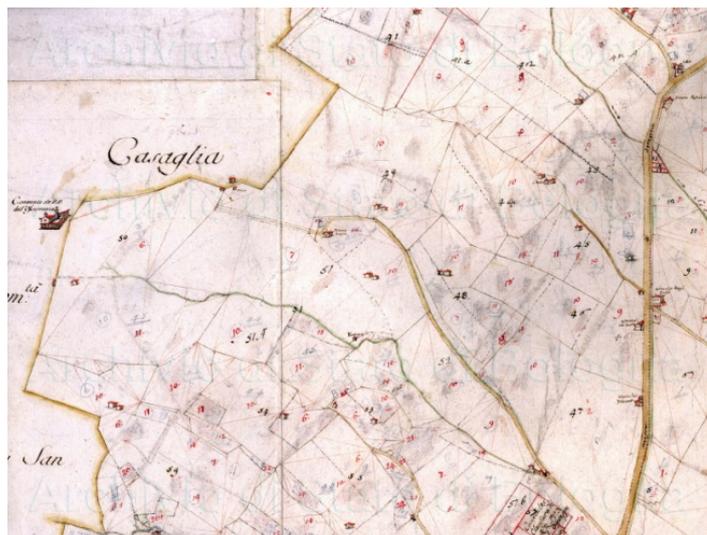


Fig. 1.49 - Particolare di un foglio del Catasto Boncompagni, relativo alla zona di Casaglia, SW di Bologna (Archivio di Stato di Bologna).

La scala di redazione delle carte è differente per territori della Pianura (a nord delle vie Emilia e Bazzanese) e territori della Collina e della Montagna (a sud delle stesse vie), in quanto differenti erano stati i rilevamenti adottati: per accelerare i tempi, per le zone a nord erano stati utilizzati precedenti rilevamenti eseguiti in occasione di alcuni lavori di sistemazione idraulica, mentre le zone a sud erano state rilevate *ex novo* mediante la tavoletta pretoriana. Anche per questo catasto furono redatti i relativi registri, suddividendoli tra territori a nord e territori a sud delle vie Emilia e Bazzanese; di conseguenza quelle mappe rappresentanti territori a cavallo delle due vie devono far riferimento a due brogliardi differenti.

2. ACQUISIZIONE DI CARTOGRAFIA STORICA

Digital images are often defined as “surrogate” of the originals. In common language, the concept of surrogate implies low quality, and in our opinion a copy is almost always a “bad” copy: expressing this with a metaphor, when we get in a coffee house, a very few of us would ask for a “surrogate” of coffee.

Les tendances en matiere d'imagerie numerique
(Buonora P., Anderson H., Withington K., 2004)

La predisposizione di un lavoro di recupero di cartografia storica consiste in una fase di studio del contesto storico e socio-economico in cui la carta ha avuto origine, e in una fase di raccolta dei dati inerenti il documento in esame, mediante ricerca bibliografica e di archivio di tutte le informazioni del caso specifico, come possono essere i libretti di campagna redatti in fase di rilievo, o documenti ufficiali di prescrizione del lavoro da eseguirsi o di descrizione del lavoro svolto. Questa è una norma valida in generale, qualunque siano le finalità del lavoro e i mezzi per effettuarlo.

All'interno di Archivi, Biblioteche e Musei, da decenni si impiegano tecniche analogiche come la microfilmatura e la fotografia tradizionale ai fini della riproduzione in sicurezza dei documenti storici, compresi quelli cartografici: per permettere all'utente una consultazione alternativa a quella condotta sugli originali, onde evitare problemi di logoramento, per avere una copia di sicurezza in caso di smarrimento o per poter fornire all'utenza, su richiesta, una copia del documento. Ma negli ultimi anni si è andato diffondendo l'impiego di tecniche digitali. In tal caso, il recupero di cartografia storica prevede innanzitutto la sua digitalizzazione, cioè il trasferimento della carta dal supporto analogico a quello digitale. Si tratta di un passaggio importante e delicato, in quanto deve soddisfare a due necessità: da un lato non danneggiare il supporto originario, dall'altro assicurare una precisione elevata, diminuendo il più possibile le deformazioni dovute al processo di acquisizione (sulla base del risultato di questa fase dipenderanno infatti le elaborazioni successive). Il risultato dell'intero processo, che a seconda dei casi può essere anche lungo e complesso, è dato da uno o più

file immagine, in formato raster, che riproducono il documento cartografico.

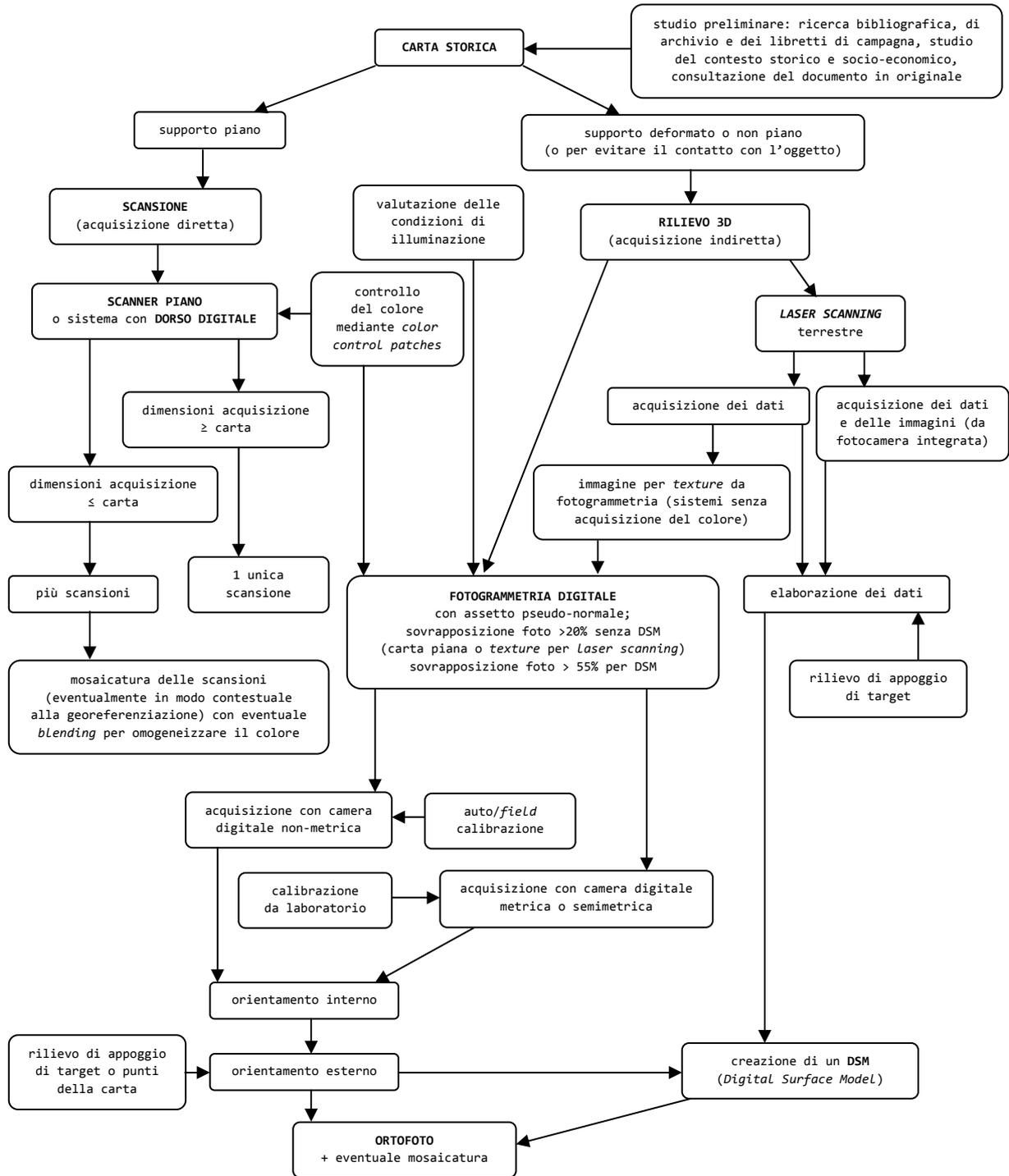
Il passaggio da un prodotto analogico ad uno digitale può avvenire secondo diverse modalità. La scelta dipende dalle condizioni di conservazione della carta, dalle sue dimensioni, dall'ambiente in cui essa viene conservata, e soprattutto dal tipo di supporto della carta. In particolare, per quanto riguarda quest'ultimo:

- se il supporto è piano, si può optare per l'**acquisizione diretta** (tecnica "a contatto" con l'oggetto), mediante scansione del documento: questa è la soluzione più frequente (v. cap. 2.1);
- se il supporto non è piano, perché così d'origine (è il caso di carte su legno, tessuto o altri materiali, carte stampate su atlanti, mappamondi o modelli tridimensionali) o perché ha subito forti deformazioni nel corso del tempo, allora si deve optare per un'**acquisizione indiretta** (tecnica "senza contatto" con l'oggetto), mediante rilievo tridimensionale, che può avvenire attraverso due modalità:
 - **fotogrammetria** (solitamente digitale) (v. cap. 2.2);
 - **Laser scanning** (terrestre) (v. cap. 2.3).

Queste ultime due modalità risultano convenienti anche nel caso in cui non si voglia entrare in contatto con l'oggetto, ad esempio quando esso si trova in uno stato di usura avanzato (Daniil M., Tsioukas V., Papadopoulos K., Livieratos E., 2003) (Bitelli G., Gatta G., 2008). Sotto si riporta uno schema a blocchi esplicativo della fase di acquisizione.

L'esperienza dimostra che l'operazione di acquisizione di cartografia storica è difficilmente standardizzabile, in quanto ogni carta è un caso a sé, possedendo proprie caratteristiche fisiche, chimiche e geometriche. Ogni mappa necessita dunque di un processo di digitalizzazione specifico e ben studiato. (Adami A., Fregonese L., Guerra F., Livieratos E., Tsioukas V., 2007). In questo capitolo verrà fatta una panoramica sulle tecniche, e le problematiche, relative alla fase di acquisizione di cartografia storica. I casi esemplificativi trattati consistono nelle carte del catasto Gregoriano della città Bologna e nelle carte del Delta del Po (per i dettagli sulle carte in esame, v. paragrafo 1.2.4).

2. ACQUISIZIONE DI CARTOGRAFIA STORICA



2. ACQUISIZIONE DI CARTOGRAFIA STORICA

2.1. SCANSIONE

L'acquisizione diretta (scansione del documento) è il metodo più frequentemente utilizzato per la digitalizzazione di cartografia storica. E' però attuabile solo nel caso in cui il supporto sia piano, o comunque non presenti forti deformazioni. Per questo tipo di operazione l'utilizzo di scanner a rullo non è in genere opportuno, sia per il fatto che il tipo di scanner non garantisce la precisione geometrica necessaria, sia perché il meccanismo in cui avviene la scansione potrebbe seriamente danneggiare il documento antico, essendo questo spesso usurato per via del tempo.

2.1.1. Sistemi per digitalizzazione di carte di grande formato

Per digitalizzare una carta antica solitamente si ricorre a scanner piani, che forzano la mappa a rimanere piana e senza deformazioni sotto un coperchio o un piano trasparente (si tratta dunque di una tecnica "a contatto"), oppure a sistemi basati su dorsali digitali ad alta risoluzione. Uno **scanner piano** è un apparecchio fotografico digitale a fuoco fisso, dotato di luci fisse e di un piano di ripresa fisso in fase di scansione. Sono piani gli scanner tradizionali e quelli per diapositive, negativi e microfilm. Un **dorso digitale**, invece, è una lastra elettronica che, applicata a macchine fotografiche professionali tradizionali, sostituisce la pellicola (lastra analogica).

Sia lo scanner piano sia il dorso digitale operano grazie ad un sensore digitale, che solitamente è tri-lineare (costituito cioè da tre linee di celle affiancate, ognuna sensibile ad uno dei tre colori di base rosso R, verde G e blu B), ma può essere anche monocromatico (ed in tal caso per ottenere l'immagine a colori si utilizzano sequenzialmente filtri per il R, il G e il B, sovrapponendo i tre strati in uno unico); è il primo il tipo più diffuso. Attualmente, il costante miglioramento di questi dispositivi è diretto verso l'aumento del numero di celle dei sensori, e quindi della risoluzione ottica, con contemporaneo aumento delle dimensioni fisiche del piano di ripresa, e quindi della massima

dimensione scandibile per un documento (Buonora P., Anderson H., Withington K., 2004) (Bramoullé P., 2008).

2.1.1.1. Scanner piani

Esistono due famiglie di scanner piani: quella dei comuni scanner e quella degli **scanner metrici**, ad elevata precisione, appositamente realizzati per la scansione di grandi carte. Ovviamente, nel caso di acquisizione di documenti cartografici di valore, o per grandi progetti di recupero di cartografia storica (come nel caso di progetti di digitalizzazione di fondi archivistici), è preferibile ricorrere a scanner appartenenti a questa seconda famiglia. Nelle varie soluzioni cambiano il formato acquisibile, da quello A3 al doppio A0, e così pure le risoluzioni geometriche e radiometriche massime.

Col crescere dell'interesse verso i problemi di conservazione sottoforma digitale dell'ingente patrimonio documentaristico e cartografico conservato presso archivi e biblioteche, negli ultimi anni sono andati sviluppandosi sistemi in grado di acquisire in forma digitale tali documenti (anche quelli cartografici), in modo il più possibile veloce, con la garanzia di ridotte distorsioni geometriche e alta fedeltà nella riproduzione dei colori, con la possibilità di acquisire originali di grande formato e talvolta di un certo spessore, sempre garantendone la non alterazione (si devono trattare documenti delicati). A tali scopi, in genere i sistemi per digitalizzazione di carte di grande formato si basano su un principio di acquisizione ottico-digitale a CCD mono o tri-lineare, e sono caratterizzati da bassa distorsione ed elevata fedeltà nella riproduzione dei colori.

I sensori lineari (o *linear array*) sono formati da un'unica riga di elementi fotosensibili, e fungono da sistemi di acquisizione della carica durante il tempo di integrazione, e a seguire da registro di scorrimento, per far pervenire le cariche accumulate al convertitore A/D (fig. 2.1). Nei dorsi digitali che lo integrano, il sensore lineare acquisisce l'immagine per strisce, traslando sul piano focale. Quindi in teoria, per avere un'immagine a colori RGB, si potrebbe far scorrere il sensore lineare per 3 volte consecutive sul piano focale, antepoendo all'obiettivo, di volta in volta, un filtro colorato per far passare una sola componente di luce. Un modo più semplice è quello di utilizzare un sensore tri-lineare, costituito da 3 sensori lineari, vale a dire 3 file di elementi fotosensibili, ognuno deputato a raccogliere la giusta

componente luminosa, R, G o B, grazie ai filtri applicati direttamente sui fotodiodi. Per come avviene l'acquisizione, questi dorsi digitali hanno lo svantaggio di poter riprendere solo soggetti fermi; d'altro lato hanno il grande vantaggio di raggiungere risoluzioni più elevate rispetto ai sensori matriciali CCD: la dimensione massima finora raggiunta per i sensori lineari è 14.400 pixel, mentre per quelli matriciali si è arrivati fino a 9.000 x 9.000 pixel (il fattore limitante dei CCD è il fatto che, per aumentare la risoluzione, occorre ampliare il numero dei pixel in due direzioni). I sensori lineari si applicano quindi bene all'acquisizione di documenti cartografici, che spesso raggiungono elevate dimensioni (Galetto R., 2004) (Russ J.C., 2007).



Fig. 2.1 - Sensore CCD lineare, di lunghezza 41 mm.

Un'importante differenza tra scanner tradizionali e scanner metrici sta nella scala di acquisizione. Uno scanner tradizionale è in grado di garantire l'acquisizione del documento alla scala 1:1, cioè senza riduzioni delle dimensioni, in quanto il sensore lineare di acquisizione scorre aderente al documento, senza interposizione di obiettivi. Nei sistemi di acquisizione di documenti di grande formato, invece, onde evitare di introdurre un sensore lineare troppo lungo (con conseguenti problemi costruttivi e problemi meccanici relativi al movimento del sensore), viene inserito un obiettivo tra il documento e il sensore, o meglio si inserisce il sensore all'interno di una macchina fotografica (dotata quindi di obiettivo) (fig. 2.2). In fase di scansione nasce dunque un fattore di riduzione, vale a dire che il documento viene acquisito secondo una scala 1:x, rapporto generato da c/H (dove c è la focale e H è la distanza tra l'obiettivo e il documento). L'unico modo per aumentarla è variare la focale dell'obiettivo, essendo generalmente fissa la distanza di presa.



Fig. 2.2 - Esempi di scanner di grande formato:

- a) *Omniscan 14000 A1* (formato massimo A1, risoluzione ottica massima 600 dpi);
- b) *DigiBook SupraScan A0* (formato massimo A0, risoluzione ottica massima 400 dpi);
- c) *Metis DRS5070 book* (formato massimo 50x70 cm, risoluzione ottica massima 400 dpi);
- d) *Metis DRS A1+* (formato massimo 65x100 cm, risoluzione ottica massima 300 dpi);
- e) *Metis DRS A0* (formato massimo A0, risoluzione ottica massima 800 dpi).

Tra i sistemi di digitalizzazione di carte di grande formato, diffusi sono i prodotti dell'azienda Metis. Gli scanner metrici sono definiti DRS (*Digital Reproduction System*), sistemi completi per la riproduzione digitale, in quanto integrano:

- camera digitale con sensore CCD tri-lineare, il cui movimento avviene assieme all'ottica, in modo da sfruttare sempre la parte centrale dell'obiettivo e contenere quindi il più possibile le distorsioni (test di distorsione sono stati eseguiti dalla casa produttrice); l'acquisizione avviene via via in corrispondenza della zona illuminata (che viene illuminata per pochissimo tempo) mentre il diaframma (di apertura impostabile) resta aperto; la messa a fuoco è automatica;

- *SynchroLight*: un sistema di illuminazione studiato *ad hoc*: una “lama di luce” (fascio di luce concentrato) scorre sul documento in fase di scansione, in modo sincronizzato col movimento del sensore digitale di acquisizione; la luce è fredda (5.400 K) e priva di emissioni IR/UV potenzialmente dannose per i documenti, inoltre, per come agisce, talvolta consente di ottenere un’immagine in cui sono visibili particolari difficilmente distinguibili ad occhio (come ad esempio tratti cancellati nel disegno);
- sistema motorizzato per il supporto della camera e la modifica della risoluzione;
- tavolo di appoggio basculante, di formato specifico per ogni modello;
- piano di cristallo per mantenere steso il documento.

I vari modelli si differenziano tra loro per la dimensione massima del documento scandibile e per la massima risoluzione ottica raggiungibile. Col cosiddetto “sistema a piramide” (modello *DRS 2A0 map*, fig. 2.3), che sfrutta la camera DRS (v. par. 2.1.1.2), la massima dimensione degli originali può essere:

- 64x128 cm (a 400 dpi, con CCD da 10200 pixel);
- 80x180 cm (a 400 dpi, con CCD da 14400 pixel).

Tale sistema è attualmente in uso presso alcune librerie e Archivi di Stato, sia in Italia sia all’estero; un esempio è la libreria cartografica di Catalonia (Roset R., Ramos N., 2008) (METIS group).



Fig. 2.3 – Esempio di scanner di grandissimo formato: sistema a piramide *Metis DRS 2A0 map* (formato massimo doppio A0, risoluzione ottica massima 600 dpi).

Uno dei primi fattori da valutare, prima di eseguire la scansione di documenti cartografici, è la dimensione dello scanner. E’ preferibile adottare uno scanner di dimensioni adeguate alla carta da acquisire; in

alternativa, occorre eseguire la scansione in più parti, garantendo una certa sovrapposizione tra acquisizioni successive. Nel caso di acquisizione del documento in più parti nasce dunque il problema dell'unione delle varie scansioni in un'unica immagine: è possibile eseguire l'operazione sia subito dopo l'acquisizione e prima di successive elaborazioni, sia come mosaicatura in uscita dalla fase di georeferenziazione (Tsioukas V., Daniil M., Livieratos E., 2006) (per quest'ultimo caso, v. par. 3.1.3). Nell'unione delle scansioni eventualmente prodotte diventa importante l'omogeneizzazione del colore, per evitare che il mosaico presenti differenze radiometriche; l'operazione può essere fatta sia correggendo le differenze di colore sulle singole immagini, sfruttando appositi sistemi di controllo del colore (*color control patches* o *color checker*) (v. par. 2.1.2.1), sia mediante algoritmi specifici, come ad esempio quello di *blending*, in fase di mosaicatura.

2.1.1.2. Dorsi digitali

Come già accennato, un dorso digitale è una lastra elettronica applicata a macchine fotografiche professionali tradizionali (fig. 2.4). Il rapporto di scala con cui si acquisisce l'immagine non è fisso, bensì variabile in funzione della distanza che si mantiene dall'oggetto e dell'obiettivo che si utilizza; addirittura utilizzando obiettivi macro è possibile invertire il rapporto di scala, ottenendo cioè un'immagine ingrandita.



Fig. 2.4 - Esempio di macchina fotografica con dorso digitale:
Linhof Technika (sensore *David2*)

Sempre in campo Metis, è oggi disponibile sul mercato la camera DMC (*Digital Macro Camera*), un sistema per la fotografia digitale di oggetti di grandi dimensioni con altissima risoluzione di acquisizione (fig. 2.5a). Le risoluzioni, infatti, arrivano anche oltre i 1.000 pixel/mm², corrispondenti ad una dimensione del pixel di 31,62 µm. Questa camera è adatta per acquisizione di mappe di grandi dimensioni, laddove sia necessario vedere tratti e segni fini fino a 20-30 µm di spessore. Le caratteristiche della camera sono:

- sensore CCD tri-lineare Sony da 10.500 pixel (cella del sensore di circa 7 µm);
- metodo di acquisizione: scansione dinamica lungo gli assi X e Y;
- massima risoluzione ottica: 800 dpi;
- sistema ottico intercambiabile;
- focale standard di 470 mm (diametro dell'obiettivo: circa 10 cm); ne risulta che, ad esempio, la distanza da tenere per scansione a 400 dpi di un oggetto di 2,42 x 1,98 m è 4,23 m, mentre la distanza per scansione a 300 dpi di un oggetto 3,22 x 2,64 m è 5,45 m;
- messa a fuoco automatica;
- scansioni native a 16 bit per canale (quindi produzione di un'immagine a 3 x 16 = 48 bit);
- rapporto di riproduzione da ∞:1 fino a 4:1;
- massima dimensione degli originali: 38,7 x 31,7 m (a 25 dpi); a 800 dpi la dimensione di acquisizione è 1,21 x 0,99 m;
- caratteristiche fisiche: altezza x larghezza x lunghezza = 76,5 x 77 x 71 cm, peso di 160 kg (di conseguenza alla camera occorrono appositi piedini per essere sorretta).

Per utilizzare la camera occorrono: un idoneo sistema di illuminazione, un supporto per la camera e un supporto per gli originali, un computer con software specifico. Per quanto riguarda il sistema di illuminazione, risultano particolarmente adatti gli illuminatori HMI, agli ioduri metallici, in quanto caratterizzati da elevata potenza luminosa associata a bassi consumi e ad una vita media elevata, assenza di radiazioni UV e bassa emissione di calore sugli originali, alta stabilità di luce (vengono mantenute le stesse condizioni di luce durante il periodo di uso) che previene disuniformità di colore e di densità durante la scansione.

Risoluzioni minori rispetto alla DMC, ma comunque buone, possono essere raggiunte con la camera DRC (*Digital Repro Camera*) (fig. 2.5b). A differenza della prima, questa è stata progettata per l'utilizzo integrato all'interno dei sistemi DRS (in cui raggiunge le sue massime prestazioni, in termini di velocità e qualità), in particolare all'interno del DRS 2A0 (v. par. 2.1.1.1); comunque può essere usata anche da sola. In tal caso

saranno indispensabili: un sistema di illuminazione, un supporto per la camera ed uno per gli originali, ed un computer.

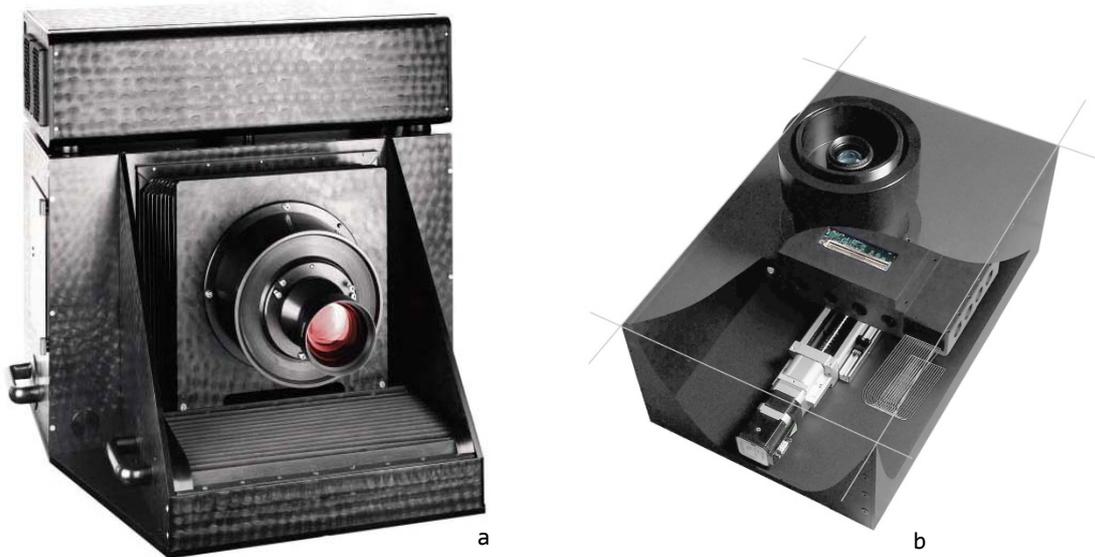


Fig. 2.5 - Esempi di macchine fotografiche con dorso digitale:
a) Metis DMC (sensore Sony); b) Metis DRC (solitamente montata sui sistemi Metis DRS).

2.1.2. Parametri di scansione

In preparazione della fase di scansione, occorre stabilire, in funzione dello scopo del lavoro, i valori da adottare per una serie di parametri caratteristici delle immagini digitali. La recente pubblicazione delle *Linee guida per la digitalizzazione del materiale cartografico* (Sgambati G., Benassati G., Biancini L., Buonora P., Sinisi D., Cantile A., Delfino L., Di Angelo Antonio M., Falchetta P., Mancinelli M.L., Sanguineti M.T., Serratrice G., Truci I., Valerio V., 2006), messe a punto dall'Istituto Centrale per il Catalogo Unico (ICCU) e predisposto da un gruppo di lavoro composto da esperti, ha evidenziato un tentativo di individuazione di norme comuni per la coordinazione di quei progetti di digitalizzazione del patrimonio cartografico che hanno preso avvio, in Italia, in diversi Istituti, sia pubblici che privati. Le *Linee guida* indicano criteri generali da seguire per quanto riguarda la selezione dei documenti cartografici, l'acquisizione di immagini, la conservazione del supporto magnetico e l'accessibilità al pubblico, attraverso la consultazione su Web (Federzoni L., 2008). Per quanto riguarda il problema dell'acquisizione delle immagini, le *Linee guida* forniscono consigli in

merito, lasciando comunque all'utente la scelta del preciso valore numerico da adottare; è però vero che ormai, nel campo della cartografia storica, l'attenersi, il più delle volte, a certe caratteristiche inerenti l'immagine digitale piuttosto che ad altre ha fatto sì che queste siano diventate di fatto uno standard:

- **tipo di dato** in uscita dalla fase di scansione: immagine raster; essa è eventualmente convertibile in formato vettoriale come fase del processo di elaborazione (Zentai L., 2006);
- **risoluzione** (misura del dettaglio di un file immagine, solitamente espressa in dpi, *dots per inches*): è preferibile adottare, come "alta risoluzione", quella che permette di mantenere il contenuto informativo della carta (cioè consentire l'agevole lettura di tutti i particolari scritti o disegnati su di essa) mantenendo contenute le dimensioni del file immagine, quindi non necessariamente è coincidente con la massima possibile; usualmente per carte storiche si adotta 300 dpi (standard di ripresa in uso presso la Library of Congress, valore utilizzato anche in alcuni progetti Imago negli archivi di Stato italiani e presso l'IGM), con conseguente dimensione del pixel pari a 86,67 μm (Buonora P., Anderson H., Withington K., 2004) (Gruppo di lavoro sulla digitalizzazione del materiale cartografico (coord. Sgambati G.), 2006) (McGrath P., Firth S., 2006); ovviamente la dimensione del pixel sulla carta deve essere inferiore all'errore di graficismo, convenzionalmente assunto in 0.2 mm;
- **scala, geometria, proprietà radiometriche**: parametri che sulla copia sono da mantenere i più fedeli possibili a quelli dell'originale (Tsioukas V., Daniil M., Livieratos E., 2006);
- **profondità di colore** (numero di colori o di toni di grigio che possono essere rappresentati in un'immagine digitale): il limite è dato dal formato del file immagine, comunque usualmente si adottano 8 bit (per immagini a toni di grigio) o $3 \times 8 = 24$ bit (per immagini a colori) (Buonora P., Anderson H., Withington K., 2004) (Corsmeier T., 1998);
- **calibrazione del colore**: quando è importante la riproduzione fedele del colore, o quando l'acquisizione della carta avviene mediante mosaicatura di più scansioni, è necessario adottare specifiche procedure in ambiente di *image processing* per calibrare il colore; tali procedure richiedono in genere la presenza di appositi target (*color control patches* o *color checker*) acquisiti contestualmente all'immagine (v. par. 2.1.2.1);
- **miglioramento della qualità dell'immagine**, mediante uso di software specifici: può essere fatto, ma solo in modo strettamente

indispensabile ad aumentare la distinzione delle caratteristiche della mappa (Corsmeier T., 1998);

- **formato** di salvataggio dei file immagine: si preferiscono immagini multirisoluzione, come JPEG2000 del *Joint Photographic Experts Group*, MrSID di *Lizartech*, ECW di *Er Mapper*, XL di *Italian Centrica*; in alternativa, soprattutto per cartografia di piccolo formato, si adotta il formato TIFF per il *master file*, ed eventualmente copie in formato JPEG compresse o a minor risoluzione (*access file*) per una consultazione più agevole (v. par. 4.3.2);
- salvataggio dei file immagine: in dischi rigidi di memoria, avendo cura di fare almeno una copia di backup (Buonora P., Anderson H., Withington K., 2004) (Gruppo di lavoro sulla digitalizzazione del materiale cartografico (coord. Sgambati G.), 2006) (McGrath P., Firth S., 2006);
- **metadati** (autore, titolo, data, proprietario, ecc.): sia dati che descrivono l'oggetto originale, sia dati che descrivono l'immagine digitale, e servono per localizzare ed accedere a tale informazione all'interno di un database (v. par. 4.3.1) (Buonora P., Anderson H., Withington K., 2004) (McGrath P., Firth S., 2006);
- scansione di eventuali registri (ad esempio per mappe catastali): da fare in parallelo alla scansione delle mappe per consentire, una volta inseriti mappa e registro in un database e creato un link reciproco, un accesso digitale a doppio senso: dalla mappa al registro, e dal registro alla mappa (v. par. 4.3.4.1) (Buonora P., Anderson H., Withington K., 2004);
- **scala di digitalizzazione**: 1:k (con $k \geq 1$, e da mantenere il più piccolo possibile) (Tsioukas V., Daniil M., Livieratos E., 2006) (McGrath P., Firth S., 2006).

2.1.2.1. Controllo del colore

La riproduzione fedele del colore è una problematica molto delicata, e particolarmente sentita nella scansione di cartografia, soprattutto laddove il colore ha un significato ben preciso (come risulta nelle carte tematiche), o laddove alla componente geometrico-cartografica si affianca anche un contenuto di valore artistico (è questo il caso di molta cartografia storica).

Diversi sistemi possono essere utilizzati per rappresentare i colori delle immagini. I più comuni sono:

- **RGB:** spazio additivo dei colori, utilizzato per esprimere qualsiasi colore con una tripletta di valori corrispondenti alle componenti *Red*, *Green* e *Blue* (R, G e B) che si sommano nella luce diretta (la loro compresenza al valore massimo fornisce il bianco, *White*, W); si può pensare ad uno spazio colore RGB come alla sovrapposizione di 3 immagini (“canali”) che usualmente hanno una risoluzione radiometrica ad 8 bit, per cui l’immagine finale è usualmente a 24 bit (fig. 2.6);
- **CMY:** spazio sottrattivo dei colori, che combina variazioni di *Cyan*, *Magenta* e *Yellow* (C, M, Y), componenti di base nella descrizione di luce riflessa, tipicamente utilizzate nella realizzazione di stampe con pigmenti (la loro compresenza al valore massimo fornisce il nero, *Black*, K); nel processo di stampa, a causa della difficoltà di ottenere il nero puro dalla sovrapposizione di questi tre colori, si aggiunge una componente di nero (K), per cui si parla di sistema CMYK (fig. 2.6);
- **IHS:** spazio colore che utilizza delle componenti di più semplice comprensione da parte dell’utente finale: l’Intensità (I) è equivalente al termine *Luminanza o brillantezza*, ed esprime quanto una luce sia intensa, cioè chiara o scura (100% = bianco, 0% = nero); la Hue (H) è l’equivalente del concetto comune di *tonalità* di colore, e si riferisce dunque ad una certa lunghezza d’onda dello spettro elettromagnetico; infine la Saturazione (S) è equivalente al concetto di *vividezza*, ed esprime quanto sia intenso e puro un colore (100% = colore puro, 0% equivale ad un livello di grigio);
- **CIE-L*a*b*:** spazio colore matematico, creato dal CIE (*Commission Internationale de l’Eclairage*) per descrivere tutti i colori visibili per l’occhio umano, e che divide il colore in *Luminosity* (una sorta di informazione a toni di grigio), informazione da rosso (+a) a verde (-a), ed informazione da blu (+b) a giallo (-b), dove le coppie ±a e ±b sono colori complementari; lo spazio colore CIE-L*a*b* (o più semplicemente LAB), essendo stato creato per essere un modello di riferimento, è indipendente dal dispositivo adottato, quindi, a differenza degli spazi RGB e CMY, non è specifico di alcun dispositivo di output; un’immagine digitale a colori LAB consiste di 3 canali ognuno di 8 bit, per cui nell’insieme è a 24 bit (Northeast Document Conservation Center, 2000).

Esiste un’algebra dei colori che esprime anche le relazioni tra colori complementari (additivi e sottrattivi):

- $Y = W - B = G + R$
- $M = W - G = B + R$
- $C = W - R = G + B$

- $R+G+B = W$
- $C+M+Y = K$

e sono state definite relazioni analitiche che consentono il passaggio tra spazi diversi. Tra gli spazi colore RGB e IHS sussistono le seguenti relazioni:

$$\begin{bmatrix} I \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ -\sqrt{6}/6 & -\sqrt{6}/6 & \sqrt{6}/3 \\ \sqrt{6}/6 & -\sqrt{6}/6 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad H = \tan^{-1}\left(\frac{v_2}{v_1}\right) \quad S = \sqrt{v_1^2 + v_2^2}$$

e viceversa:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\sqrt{6}/6 & \sqrt{6}/2 \\ 1 & -\sqrt{6}/6 & -\sqrt{6}/2 \\ 1 & \sqrt{6}/3 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}$$

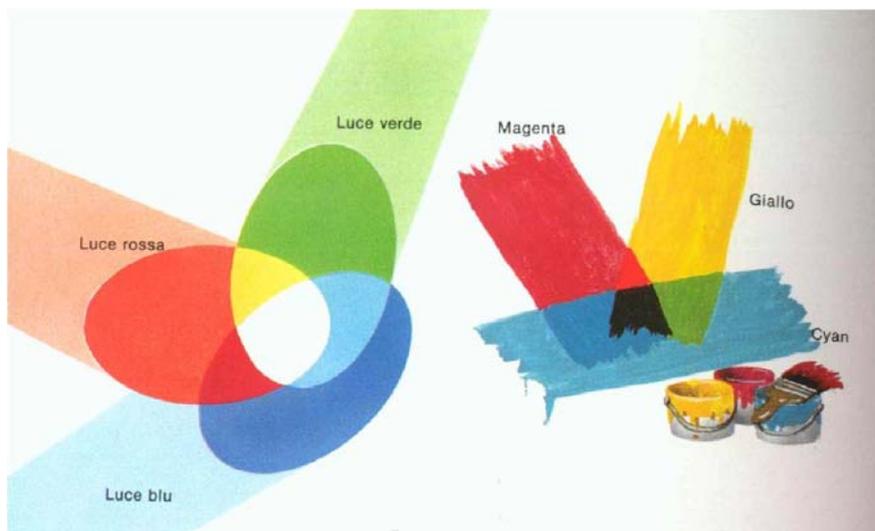


Fig. 2.6 - Rappresentazione degli spazi colore RGB e CMYK.

Gli apparecchi di *color imaging* come scanner, ma anche monitor, stampanti e fotocamere digitali, hanno caratteristiche di gestione del colore specifiche, per cui i metodi di riproduzione del colore e le gamme cromatiche vengono interpretate in modo diverso a seconda dei diversi dispositivi. Di conseguenza si rende necessaria una efficace gestione del colore che sia indipendente dal tipo di dispositivo utilizzato: la risposta moderna a tale problema, specificata dal comitato internazionale del colore ICC (*International Colour Consortium*), è il sistema di gestione digitale del colore CMS (*Color Management System*). Il profilo ICC è un

file che corregge le differenze di colore che nascono nell'utilizzo di dispositivi differenti, traducendole in spazi colore indipendenti dalla periferica, e garantendo così un ambiente di riproduzione del colore affidabile: il ruolo che gioca nella gestione del colore è dunque importantissimo. I sistemi CMS si basano su sistemi di misurazione del colore detti CIE, standardizzati. Uno dei sistemi CIE più usati è il già citato CIE-L*a*b* (spesso abbreviato in LAB), creato nel 1976 a partire dal master *CIE 1931 XYZ color space*, creato nel 1931 (Russ J.C., 2007).

La creazione del profilo ICC di una periferica avviene in tre fasi:

- calibrazione: il portare ad uno stato noto e misurabile i parametri regolabili della periferica (i colori primari, il bianco e il gamma in un monitor, la carta e gli inchiostri in una stampante, il sensore, il software di gestione e le condizioni di illuminazione al momento di scatto in una fotocamera digitale);
- caratterizzazione: la registrazione del comportamento della periferica calibrata in una tabella di caratterizzazione;
- profilazione: la costruzione del profilo ICC a partire dalla tabella di caratterizzazione.

Queste tre fasi sono spesso intrecciate tra loro e talvolta vengono presentate all'utente come un unico procedimento.

Per creare il profilo in uno scanner, così come in una fotocamera digitale, è sufficiente disporre di un apposito target di controllo del colore (detto *color control patch* o *color checker*), disponibile sul mercato dal 1976. Nella versione della ditta *X-rite* (fig. 2.7), il target contiene, in 24 *patch*, i campioni di colore standardizzati (ad ognuno è cioè associato il valore numerico di colore RGB): 6 gradazioni di grigio, dal "quasi-bianco" (RGB = 243, 243, 242) al "quasi-nero" (RGB = 52, 52, 52), i 3 colori primari additivi RGB (*Red*, *Green* e *Blue*) e i 3 sottrattivi CMY (*Cyan*, *Magenta*, *Yellow*) e 12 campioni di colore studiati per avere risposte spettrali simili a differenti tonalità naturali, frequenti nelle riprese fotografiche (come la carnagione, l'erba, il cielo). La calibrazione della risposta tonale di un dispositivo quale uno scanner o una fotocamera avviene riprendendo il target assieme all'oggetto di interesse, o sotto le medesime condizioni con cui verrà acquisito l'oggetto, e successivamente misurandolo ("caratterizzandolo") sull'immagine digitale. L'operazione di caratterizzazione viene eseguita all'interno di software specifici, in grado di linearizzare le condizioni di acquisizione e generare il profilo del dispositivo, oltre a permettere la rapida correzione di una serie di acquisizioni eseguite sotto le medesime condizioni, riferendole al campione standard calibrato (Pascale D., 2006).

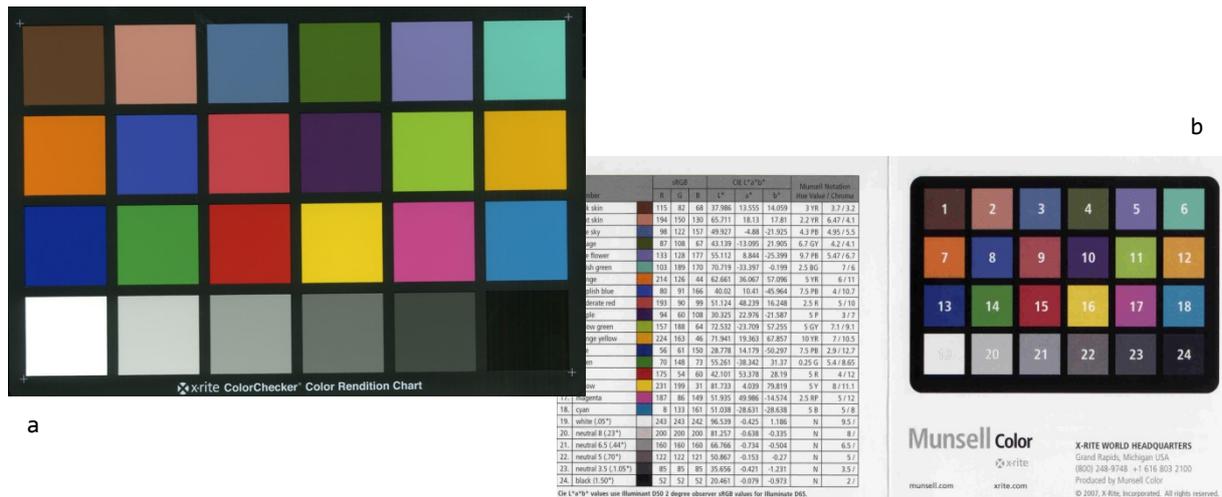


Fig. 2.7 - Color checker della ditta X-rite (a) e tabella dei valori numerici standardizzati di colore dei patch, fornita dalla ditta (b).

Tali sistemi di controllo del colore utilizzati nella scansione di carte risultano indispensabili quando il colore è un fattore caratterizzante la carta, per cui è necessario riprodurlo il più fedelmente possibile, ma risultano vantaggiosi anche per effettuare l'unione di più scansioni senza ricorrere ad algoritmi di omogeneizzazione del colore. Inoltre risultano utili anche nel caso di acquisizione della carta per via fotogrammetrica (v. par. 2.2.1.1).

All'interno della presente tesi, è stato eseguito un test di calibrazione di immagini digitali, sia originate da un documento scandito, sia da un oggetto fotografato (per quest'ultimo caso, v. par. 2.2.1.1) mediante utilizzo di *color checker* (di fig. 2.7). Per effettuare il test di scansione, si è utilizzato uno scanner desktop *Epson GT 12000* (in formato A3). E' stata eseguita sia la scansione del solo *color checker*, al fine di verificare e testare le effettive correzioni, sia la scansione di una carta catastale unitamente al target, al fine di analizzare l'effetto delle correzioni direttamente sull'immagine di interesse.

Nel test di scansione del solo *color checker*, è stato utilizzato un target di dimensioni pari circa ad un formato A4, scandendolo in formato TIFF. In seguito alla calibrazione dell'immagine, avvenuta all'interno di un comune software di elaborazione di immagini, mediante uno specifico strumento di correzione colore, alcune celle del *color checker*, più sensibili delle altre alle variazioni di luce, hanno mostrato una variazione di tinta visivamente più marcata (fig. 2.8).

Nel test di scansione di un foglio del Catasto Gregoriano (per i dettagli sul Catasto, v. par. 1.2.4.4) è stato scandito contemporaneamente

anche un *color checker* di dimensioni inferiori rispetto al precedente test, ottenendo un'unica immagine in formato TIFF. In tal modo le correzioni del colore, apportate in fase di elaborazione dell'immagine ai singoli *patches* del *color checker*, sono state applicate allo stesso tempo all'intera immagine digitale riprodotte la carta catastale (fig. 2.9).

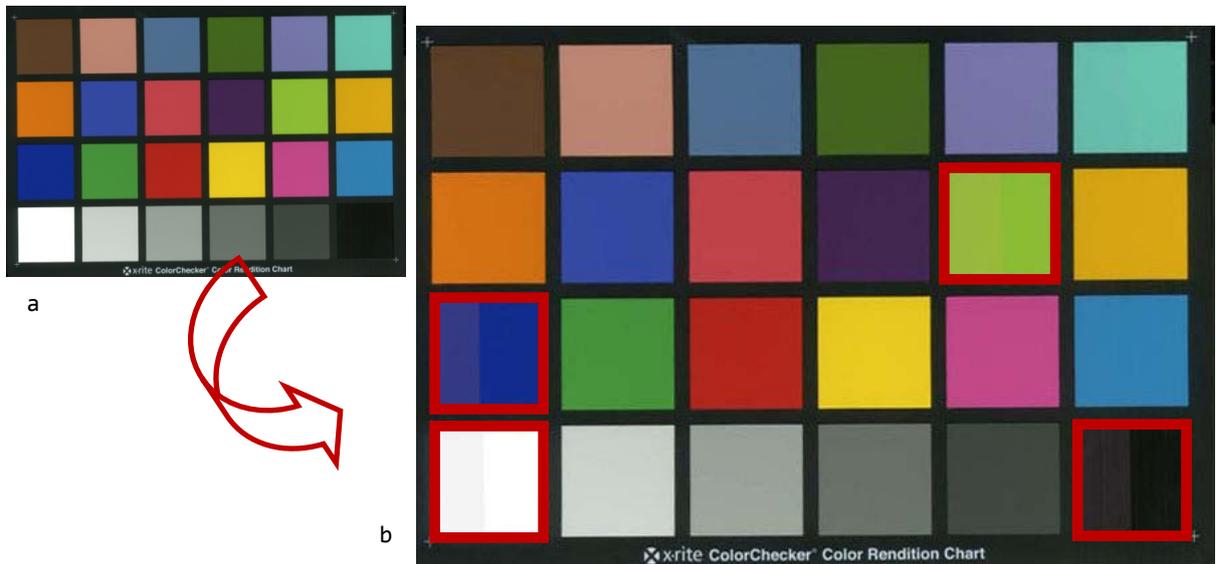


Fig. 2.8 - Scansione del *color checker*: a) immagine originale; b) immagine dopo la correzione del colore, eseguita solo in un'area limitata all'interno di ciascun *patch* (evidenziati i *patch* che sono risultati più sensibili alle variazioni).



Fig. 2.9 - Scansione di un foglio del Catasto Gregoriano assieme al *color checker*: a) immagine originale; b) immagine dopo la correzione del colore, eseguita solo per metà immagine (quella di sinistra), in modo da evidenziare variazioni di colore; c) un particolare dell'immagine b.

2.1.3. Casi esemplificativi

Si riportano di seguito due casi esemplificativi di scansione di carte storiche, tra quelle prese in esame all'interno della presente tesi, che risultano utili per illustrare il processo: l'acquisizione delle mappe del Catasto Gregoriano, con i relativi brogliardi (par. 2.1.3.1), e l'acquisizione delle carte del delta del Po (par. 2.1.3.2).

2.1.3.1. Acquisizione del Catasto Gregoriano

Come fase iniziale del progetto *Creare e divulgare cultura attraverso gli archivi storici*, finanziato dalla Fondazione Cariplo, si sono trasferiti in forma digitale i documenti del Catasto Gregoriano (composti, si ricorda, da 140 mappe, e 12 volumi di registro per un totale di oltre 3.600 pagine). Per quanto riguarda le caratteristiche di acquisizione, in accordo con gli aderenti al progetto e con l'Archivio di Stato di Bologna, proprietaria degli originali, si è scelto di rispettare quei criteri ormai divenuti uno standard in questo settore (Buonora P., 2009):

- **risoluzione** di 300 dpi, con conseguente dimensione del pixel pari a circa 86,67 μm ;
- immagini a colori, con **profondità di colore** pari a 8 bit per canale, quindi 24 bit per immagine;
- **controllo del colore** via software prima della scansione;
- **formato** di salvataggio dei file immagine: TIFF, più una copia in formato JPEG, alla massima qualità e alla stessa risoluzione di acquisizione, per una consultazione più agevole; in un secondo tempo sono state eseguite copie in formato JPEG2000 (v. par. 4.3.2);
- salvataggio dei file immagine: su disco rigido dedicato, di cui è stata fatta una copia di backup per le sole immagini originali in formato TIFF;
- **metadati** (autore, titolo, data, proprietario, ecc.): eseguiti in un secondo momento, come fase di elaborazione (v. par. 4.3.1).

L'operazione di digitalizzazione delle carte e dei relativi brogliardi è stata eseguita presso una società specializzata mediante due scanner Metis del tipo DRS (*Digital Reproduction System*, sistema completo per la riproduzione): A1+ e 5070 (fig. 2.2). In particolare il modello DRSA1+ è stato utilizzato per le mappe e i brogliardi più grandi (Brogliardi urbani

serie II), mentre il DRS5070 per i brogliardi piccoli (Sommarioni serie I).

Le caratteristiche tecniche di questa famiglia di scanner sono già state elencate nel paragrafo 2.1.1.1. Si riportano qui le caratteristiche specifiche dei due modelli utilizzati.

L'obiettivo dietro al quale si trova il sensore CCD tri-lineare di acquisizione è di marca tedesca *Rodenstock*, con focale di 80 mm (ciò significa che a distanza 1 m la scala di acquisizione risulta $c/H = 1/12,5$). Come già detto, l'apertura del diaframma è regolabile, ma è consigliabile tenere valori attorno a 5,6, con una profondità di campo di 3 cm circa, mentre il fuoco è automatico, in base all'altezza del piano mobile. La massima risoluzione ottica ottenibile è pari a 300 dpi e 400 dpi, per i modelli DRSA1+ e DRS5070 rispettivamente.

Il sistema di illuminazione si trova molto prossimo al piano di cristallo (a 3 cm da questo) per il sistema DRSA1+, per cui lo scanner risente poco della luce ambiente, mentre si trova molto più in alto nel sistema DRS5070, quindi questo scanner è maggiormente sensibile alla luce esterna. D'altro canto quest'ultimo modello prevede la possibilità di montare 2 luci laterali per eliminare le riflessioni di luce indotte da superfici molto riflettenti (come ad esempio foto o documenti con scritte dorate).

Questi scanner sono ideati per acquisizione, oltre che di documenti cartografici, anche di documenti stampati. Per questo motivo il piano di appoggio basculante è costituito da due parti, su cui poggiano i due dorsi del libro da scandire; in base al carico le due parti oscillano in altezza, per evitare di forzare le pagine a piegarsi sotto la spinta del piano di cristallo. Nel caso di scansione di una carta, le due parti vengono mantenute allo stesso livello.

Nella scansione delle pagine di un libro, il piano di cristallo che mantiene steso il libro si appoggia alla parte più alta del documento, con una pressione che l'operatore può regolare; siccome esiste una certa profondità di campo, anche la parte di documento non a contatto col piano verrà a fuoco. Il piano è utilizzabile sia nelle operazioni non in continuo (in tal caso lo si può alzare e abbassare di scansione in scansione), sia nelle operazioni in continuo (in tal caso, anziché alzare il piano di cristallo, si abbassa quello di appoggio per voltar pagina, cosicché, una volta rialzato, la testa di scansione possa subito rimettersi in moto) (fig. 2.10).

L'immagine viene quindi acquisita per linee, e via software essa viene ricostruita per intero. Gli scanner sono infatti collegati ad un computer e gestiti da un software dedicato.



Fig. 2.10 - Alcune fasi di scansione di mappe e brogliardi del Catasto Gregoriano, con scanner *Metis DRS A1+* (a) e *DRS5070* (b); nei particolari ingranditi: c) computer dedicato; d) obiettivo della camera; e) brogliardo; f) scansione di un foglio di mappa.

In fase preliminare, è stata decisa una modalità di nomenclatura dei file immagine. Il nome del file immagine risulta composto da una parte fissa, riportante indicazioni del proprietario degli originali e della cartella di riferimento, e da un numero progressivo, ad indicare i vari fogli. Un esempio di nome può essere *ASBO_CatastoGregoriano_152ter_1_000*, dove:

- *ASBO*: indica il proprietario degli originali (in questo caso l'Archivio di Stato di Bologna);
- *CatastoGregoriano*: indica l'oggetto scandito;
- *152ter*: indica l'edizione;
- *1*: indica il settore di appartenenza del foglio;
- *000*: indica il piano (nel caso specifico il piano terra di tutti i settori è stato identificato col numero 000, mentre gli altri piani con un numero progressivo e differente anche tra settori diversi).

La nomenclatura delle pagine di registro è analoga, fatta eccezione per il suffisso *r* o *v* ad indicare, rispettivamente, il *recto* e il *verso* di ogni foglio.

La correzione del colore è stata eseguita in fase iniziale, impostando via software il punto di bianco e quello di nero (in sostanza aumentando il contrasto mediante *stretch* dell'istogramma), e mantenendo l'impostazione per tutte le mappe con le stesse caratteristiche radiometriche, o per le pagine di uno stesso registro.

L'acquisizione delle pagine di registro è avvenuta scandendo, per ogni volume, le facciate a due a due, per poi tagliare le due pagine via software. Il taglio può avvenire sia in automatico, in base alle differenze di tonalità, sia manualmente (di solito è questo il metodo ottimale, scelto anche in questo caso), impostando preliminarmente, in base alle dimensioni del documento, l'area di taglio. In quest'ultimo caso tra le due facciate viene mantenuta una leggera sovrapposizione (di circa 1 cm), per avere il controllo dell'effettiva continuità tra le pagine. Inoltre è d'uso lasciar vedere il bordo del volume (la copertina), anche se potrebbe essere non perfettamente focata, in quanto ritenuto di maggior effetto. Per scansioni particolari è anche possibile impostare suddivisioni multiple dell'immagine scandita. E' possibile quindi impostare il salvataggio automatico delle sole sotto-immagini (per i brogliardi in questione, le due facciate) o delle sotto-immagini più l'immagine intera (fig. 2.11).

Per quanto riguarda la catalogazione dei file immagine, questa avviene mediante la riproduzione, attraverso cartelle e sotto-cartelle, dello schema gerarchico adottato nei documenti originali. I file immagine in uscita hanno dimensioni molto elevate (quelli relativi ai fogli di mappa si aggirano attorno ai 250 MB, quelli relativi alle facciate di registro attorno ai 70 MB), e nell'insieme (mappe e registri, sia in formato TIFF sia in formato JPEG) occupano oltre 500 GB in memoria (fig. 2.12).

Comune di		Dipartimento del		POSSESSORI	Deduzione di Mod. di terra	QUALITÀ	Misure in Mod. di terra	Cassa	Fondo	Cassa	Misure in Mod. di terra
Nome	Indirizzo	Indirizzo	Indirizzo								
19			
20			
21			
22			
23			
24			
25			
26			
27			
28			
29			
30			
31			
32			
33			
34			
35			
36			
37			
38			
39			
40			

Fig. 2.11 - Immagine derivante dalla scansione di una pagina di registro del Catasto Gregoriano di Bologna (serie I vol. 1, relativa all'edizione 152bis di fig. 2.12).

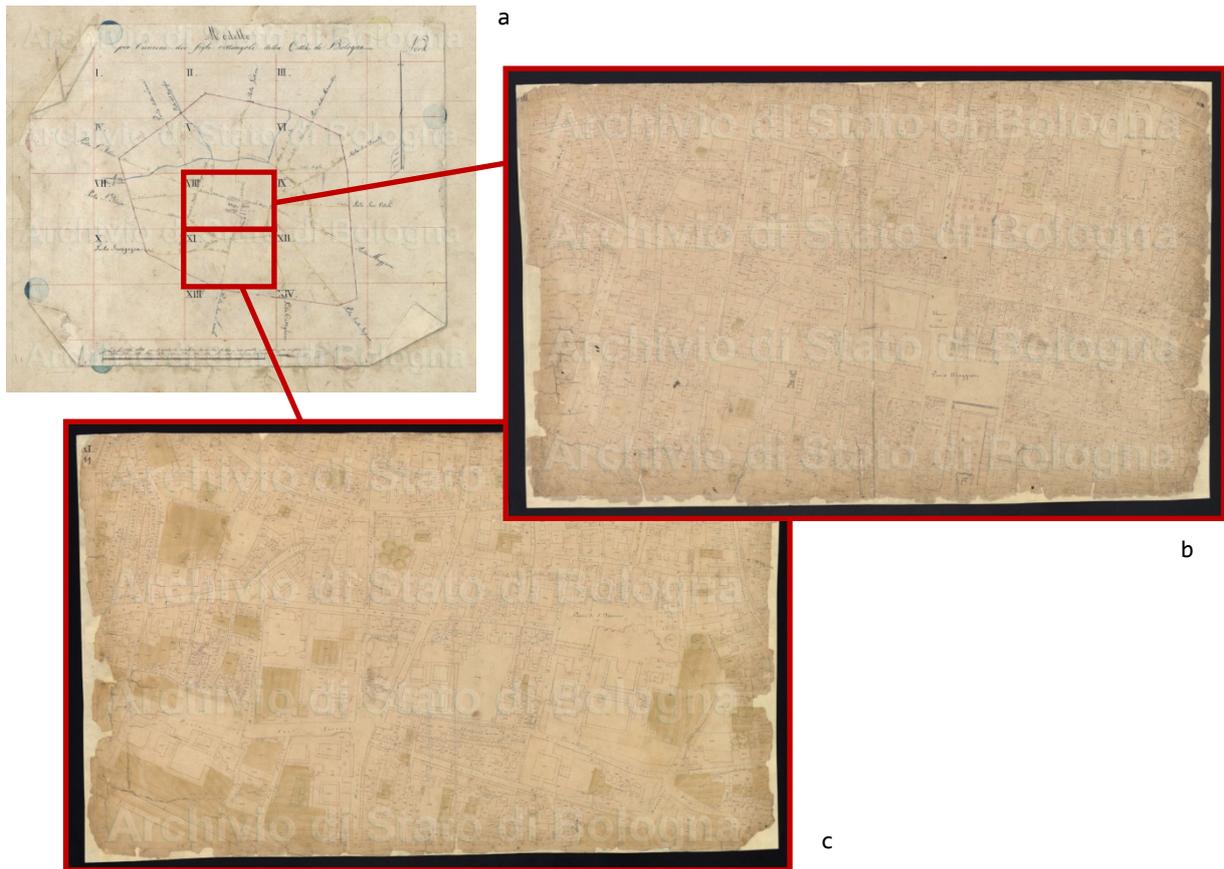


Fig. 2.12 - Alcune immagini derivanti dalla scansione del Catasto Gregoriano: quadro di unione ed. 152bis (a), con i fogli di piano terra dei settori VIII (b) e XI (c).

2.1.3.2. Acquisizione delle carte del Delta del Po

Le immagini delle carte del Delta del Po a disposizione sono il risultato dell'opera di digitalizzazione effettuata dall'Archivio di Stato di Venezia del proprio patrimonio documentaristico e cartografico. Circa dieci anni fa l'Archivio si è dotato di una strumentazione per scansione ad alta risoluzione di documenti cartografici di elevate dimensioni, con la quale ha effettuato, e in parte sta ancora effettuando, una nuova fase di digitalizzazione delle carte di grande e grandissimo formato, primo passo per la messa a disposizione on-line ad alta risoluzione delle immagini all'interno del progetto *Divenire*.

Si tratta di un sistema di acquisizione a marchio Metis, oggi non più in commercio, costituito da una camera DMC (con sensore tri-lineare Sony da 10.500 pixel e obiettivo di focale 470 mm) e un pannello di vetro dietro al quale viene collocato l'originale da scandire, sorretto e tenuto premuto contro il vetro da una serie di pannelli di legno rivestiti di velluto (in modo da non danneggiare l'originale). Davanti al pannello di vetro, e radente ad esso, scorre il sistema di illuminazione *Syncrolight*, che funziona in modo del tutto analogo a quello montato sugli scanner Metis della serie DRS: due pannelli paralleli, montati a formare una fessura, emettono una luce priva di radiazioni UV e IR, e l'acquisizione avviene in corrispondenza della fessura luminosa. Il pannello di vetro ha dimensioni base x altezza = 2,75 x 1,98 m, che quindi condizionano le dimensioni massime acquisibili: se l'originale ha dimensioni maggiori, dovrà essere scandito in due o più parti. In tal caso la carta viene appesa tenendo arrotolato su un apposito supporto a grondaia, posto nella parte alta del pannello, la parte eccedente, e viene sorretta semplicemente a pressione, grazie ai pannelli di legno retrostanti.

L'acquisizione avviene mediante movimento del sensore lineare (rispetto all'obiettivo, fermo, quindi le distorsioni ottiche sono generalmente superiori a quelle dei sistemi DRS A1+ o 5070 sopra descritti), in sincronia con lo scorrimento della lama di luce del sistema *Syncrolight* da destra a sinistra. Poiché creare un sensore lineare più grande comporterebbe problemi costruttivi, oltre a problemi di ingombro della camera, già larga quasi 80 cm (per via della geometria ottica delle camere), ed esso non riesce a "coprire" l'intera immagine (l'altezza del pannello di vetro è 1,98 m), l'acquisizione avviene in 2 o 3 strisciate parallele (calcolate in automatico dal software di gestione, sulla base dell'area da riprendere), unite automaticamente dal software: completata ogni strisciata, il sistema *Syncrolight* torna alla posizione iniziale, il sensore trasla in una posizione più bassa, ed ha inizio una nuova

scansione (per il sensore in direzione opposta rispetto al sistema di illuminazione).

L'acquisizione dell'intera area di 2,75 x 1,98 m richiede circa 1 ora, a cui va sommato il tempo per il salvataggio dell'immagine. Il sistema è influenzato dalla luce ambiente, per cui la scansione deve avvenire al buio. Presso l'ASVE le acquisizioni vengono eseguite sempre con *color checker* per l'eventuale successivo controllo del colore.

Il sistema di scansione è stato utilizzato per la scansione di due delle tre carte del delta del Po qui esaminate; come già illustrato nel paragrafo 1.2.4.1. si tratta delle carte F (Fabri, 1592) e L (Lorini et al., 1599). La carta P (Pontara e Fabri, 1592), infatti, è in condizioni di conservazione tali da non permetterne né la consultazione né una nuova acquisizione (l'immagine a disposizione deriva da copia digitale di un negativo).

2.2. RILIEVO FOTOGRAMMETRICO

Esistono strumenti e tecniche che nascono in particolari discipline scientifiche, e successivamente vengono impiegati in altri campi. Ne è esempio la Fotogrammetria, che, nata per scopi di rilievo del territorio, di oggetti o di beni culturali, trova oggi efficaci applicazioni anche nella salvaguardia dell'eredità culturale cartografica. D'altronde la tecnica fotogrammetrica è connessa alla Cartografia sotto diversi punti di vista: innanzitutto, la fotografia nasce sull'onda di una lunga esperienza maturata nelle riprese panoramiche (che sono rappresentazioni del territorio, anche se differenti da una carta) dipinte con metodi xilografici; in secondo luogo, la Fotogrammetria da aereo è attualmente il metodo di rilievo tradizionale per la generazione di carte topografiche, e l'ortofoto (fotografia e carta allo stesso tempo) ne è il prodotto finale principe (senza contare che le moderne riprese oblique da aereo ricordano perfettamente le antiche rappresentazioni scenografiche delle città); infine, recentemente la Fotogrammetria ha trovato applicazione nelle operazioni di digitalizzazione senza contatto delle mappe storiche (Adami A., Fregonese L., Guerra F., Livieratos E., Tsioukas V., 2007).

Nell'acquisizione di carte storiche, l'approccio fotogrammetrico, generalmente sempre applicabile, è sicuramente da preferirsi nel caso in cui l'oggetto non sia piano (come avviene per atlanti, mappamondi, o semplicemente carte il cui supporto si sia deformato nel tempo), o nel caso in cui si voglia evitare qualunque contatto con la superficie; inoltre risulta una soluzione alternativa nel caso di carte di grandi dimensioni che rendano difficoltosa la scansione. Essendo oggi le operazioni di restituzione condotte all'interno di stazioni fotogrammetriche digitali, si predilige lavorare con un dato digitale già all'origine. In alternativa, è sempre possibile acquisire i fotogrammi su pellicola, e trasferirli in forma digitale preferibilmente mediante scanner fotogrammetrici.

Le differenze primarie tra l'acquisizione per via fotogrammetrica e quella mediante scanner piani risiedono nel fatto che le immagini fotografiche presentano una geometria di presa a proiezione centrale e sono affette da distorsioni legate all'ottica (situazione che in parte si presenta anche con scanner cartografici non a contatto). Occorrerà quindi attuare idonei procedimenti atti ad eliminare, o diminuire il più possibile, queste deformazioni: da una parte la calibrazione della camera,

dall'altra un processo di ortorettifica per trasformare la proiezione centrale in proiezione ortogonale. Un'altra differenza di base con la scansione attraverso scanner piani consiste nel fatto che, nell'acquisizione per via fotogrammetrica, il fattore di scala è in genere superiore (la scala è $1:k$, con $k > 1$) (Tsioukas V., Daniil M., Livieratos E., 2006).

2.2.1. Progetto del rilievo e acquisizione

Il metodo di rilievo fotogrammetrico per un documento cartografico prevede l'acquisizione mediante uno, due o più fotogrammi, in modo da garantire sovrapposizione reciproca ed eventualmente copertura stereoscopica. Quest'ultima si rende necessaria quando l'oggetto non è piano, se lo si vuole esplorare con tecniche stereoscopiche e se si prevede di estrarre un modello digitale di superficie (DSM, *Digital Surface Model*). E' quindi bene mantenere una sovrapposizione di almeno il 20% nel caso in cui non interessi l'estrazione del DSM (quando il supporto è piano, o per utilizzare le immagini come texture per un rilievo *Laser scanning*), mentre è consigliabile una sovrapposizione di almeno il 55% quando occorre estrarre un DSM, per sfruttarne l'informazione al fine della generazione di ortofoto.

Il rilievo deve essere progettato in funzione delle caratteristiche dell'oggetto (dimensioni, oggetto piano o non), stabilendo il numero di acquisizioni da effettuare e la loro disposizione nello spazio, tenendo conto della scala di rappresentazione (e di conseguenza della scala fotogramma) e della sovrapposizione da garantire tra fotogrammi adiacenti. La scala fotogramma sarà in generale $1:k$, con k maggiore di 1; è bene mantenere il valore di k il più piccolo possibile, ovviamente in base alle caratteristiche dell'oggetto, della camera e della scala (e quindi della precisione) che si intende raggiungere nella copia finale.

Nell'acquisizione è buona norma mantenere un assetto il più possibile pseudo-normale, cioè con gli assi ottici paralleli tra loro e perpendicolari all'oggetto da acquisire (fig. 2.13). Altra precauzione è mantenere focale fissa in fase di scatto e non utilizzare tecniche di auto-focus, onde evitare la piccola variazione di lunghezza focale in fase di messa a fuoco. Questo risulta importante quando si adottano camere non-metriche, che occorre calibrare a valori fissi di focale e distanza di messa a fuoco (Kraus K., 1997).

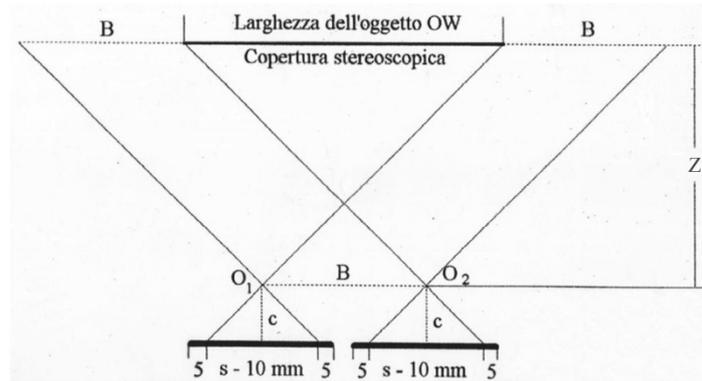


Fig. 2.13 - Schema di presa fotografica stereoscopica in assetto pseudo-normale.

Oltre alle caratteristiche dell'oggetto, in fase di acquisizione occorre prendere in esame le caratteristiche dell'ambiente, in particolare lo spazio fisico disponibile per le operazioni di rilievo e le condizioni d'illuminazione. Quest'ultimo è un fattore importante, soprattutto per il rilievo di carte antiche: è bene avere una buona illuminazione del documento cartografico, preferibilmente luce ambiente, altrimenti luce artificiale di lampade idonee (come gli illuminatori HMI, agli ioduri metallici, in grado di sviluppare elevata potenza luminosa, garantendo al contempo di non danneggiare gli originali con calore o radiazioni UV, e in grado di mantenere una densità luminosa costante nel tempo e uniforme sull'oggetto). Per le carte storiche, la mancanza di idonea illuminazione è frequente, basti pensare al fatto che all'interno di archivi e biblioteche esse sono spesso conservate in stanze buie per evitare l'alterazione dei materiali, e raramente sono conservate in sale aperte al pubblico dunque ben illuminate.

2.2.1.1. Controllo del colore

Altro fattore da prendere in considerazione, nell'acquisizione di una carta per via fotogrammetrica, è il controllo del colore. A tal fine può essere d'ausilio, qui come in fase di scansione (v. par. 2.1.2.1), l'utilizzo di un apposito target (*color control patch* o *color checker*).

A differenza della scansione, in una ripresa con fotocamera digitale si può impostare il formato del file di uscita come **RAW**. È un formato che sta diventando sempre più conosciuto nei flussi di fotografia digitale, in quanto offre all'utente, anche professionista, un maggior controllo nella

gestione delle immagini. Infatti, la principale caratteristica, e il vantaggio, del formato RAW è quella di consentire post-elaborazioni senza alterare il contenuto informativo dell'immagine acquisita. Lo svantaggio di tale formato è che le fotocamere utilizzano spesso formati RAW proprietari, le cui specifiche non sono sempre disponibili. Di conseguenza, l'utilizzo di file raw (alla lettera "grezzi") proprietari come soluzione di archiviazione a lungo termine può risultare rischioso, in quanto i file potrebbero in futuro non essere più leggibili (cosa che accade se il supporto di un formato proprietario viene interrotto); inoltre può risultare estremamente difficile la condivisione di tali file attraverso complessi flussi di lavoro. La soluzione al problema è il formato DNG (*Digital NeGative*, il cui nome suggerisce che il file immagine è paragonabile ad un negativo, ma in forma digitale), un formato per memorizzare i dati raw, col vantaggio di essere non proprietario, documentato pubblicamente e ampiamente supportato. Di conseguenza i software di elaborazione di immagini non necessitano di informazioni specifiche sulla fotocamera per decodificare i file in formato DNG, e viene così garantito un flusso di lavoro flessibile per l'elaborazione e l'archiviazione di dati raw, ed una scelta più sicura per l'archiviazione delle informazioni relative all'immagine.

Per quanto riguarda il controllo del colore mediante *color control patch*, esistono software specifici per effettuare le elaborazioni a partire da immagini raw. Potendo disporre, tramite una camera digitale, di un'immagine raw, vi è dunque la possibilità di un migliore controllo del colore.

Al fine di sperimentare le possibilità offerte da questo tipo di formato, è stato eseguito un test di correzione cromatica per una immagine digitale ottenuta da fotocamera digitale reflex Canon EOS 350D (calibrata in laboratorio, per cui utilizzabile anche a fini fotogrammetrici). Il punto di partenza dell'esperimento è coinciso con la fotografia di un soggetto qualsiasi esposto alla luce naturale, sia con il *color checker* X-rite (lo stesso usato per il test di scansione del foglio del Catasto Gregoriano, v. par. 2.1.2.1), sia senza, con scatti temporalmente vicini per sfruttare le stesse condizioni di illuminazione (fig. 2.14).

Una volta convertiti in DNG i file salvati dalla macchina in RAW proprietario (esistono vari software per effettuare questo tipo di conversione), si è creato il cosiddetto "**profilo colore**" (anche in questo caso esistono software appositi) a partire dall'immagine con ripreso il *color checker*. La creazione del profilo (in sostanza la correzione cromatica per quelle specifiche condizioni di ripresa) si basa sul riconoscimento, in automatico da parte del software (grazie ad una propria

matrice interna), dei vari *patch* del target, una volta indicati dall'utente i 4 *patch* posti ai vertici. Esportato il profilo, esso è applicabile all'immagine d'interesse (normalmente quella senza *color checker*) ripresa sotto le stesse condizioni di illuminazione, semplicemente caricando tra i profili utente quello appena creato; per rendere effettive le correzioni, è possibile sia salvare in formato standard (JPEG o TIFF) l'immagine corretta, sia esportare le impostazioni in XMP, che si associano al file RAW di partenza, senza tuttavia modificarlo (fig. 2.14).

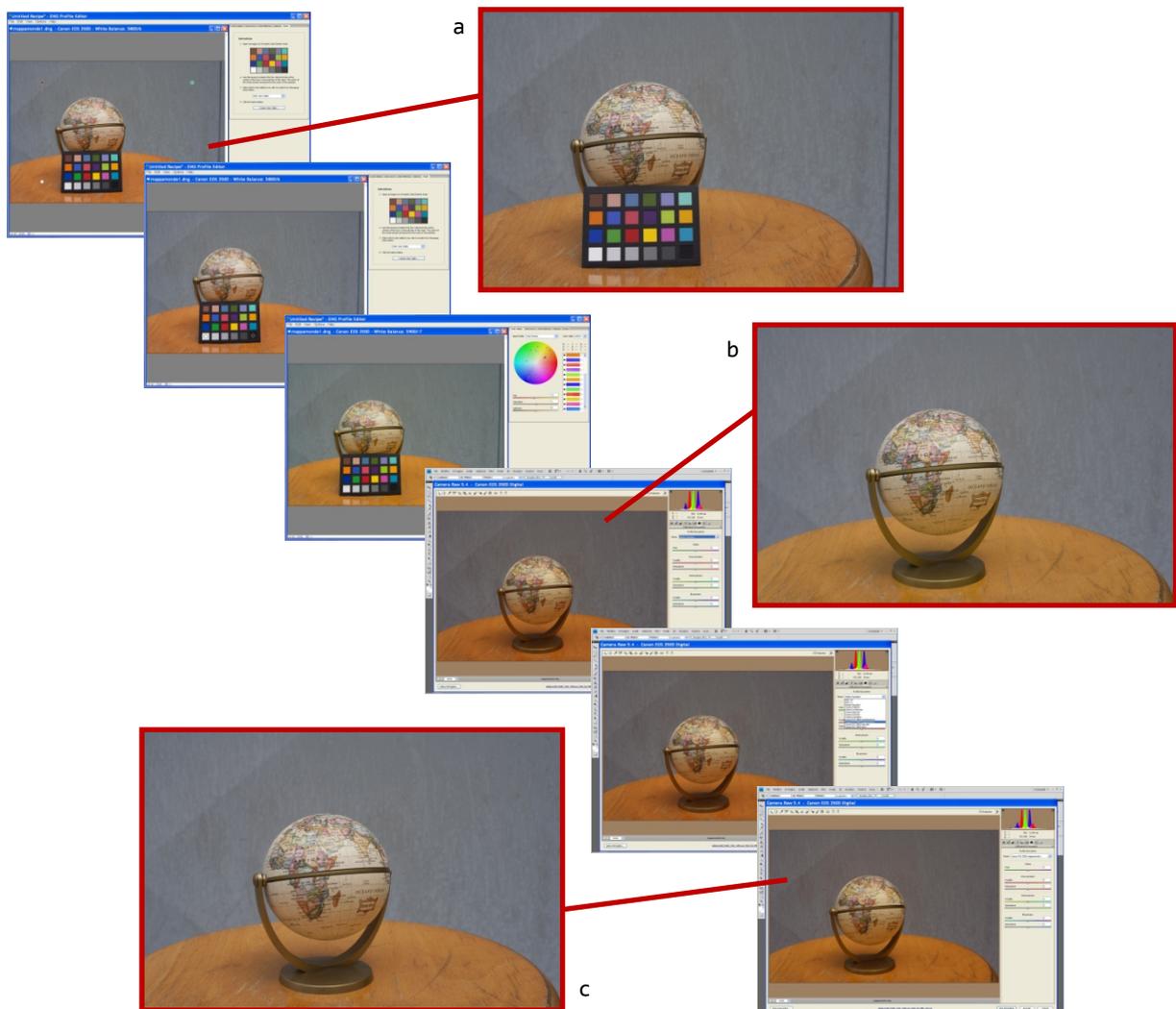


Fig. 2.14 - Alcune fasi del processo di correzione del colore (software *DNG Profile Editor*) per immagini acquisite con fotocamera digitale mediante *color checker X-rite*:
 a) immagine del *color checker*; b) immagine da correggere;
 c) immagine corretta col profilo creato dall'immagine b.

2.2.2. Calibrazione della camera

Le camere digitali utilizzate per fotogrammetria terrestre ricadono in due categorie:

- camere digitale metriche o semimetriche;
- camera digitali non-metriche.

La differenza tra le due categorie è valutabile in termini di precisione teorica, conseguita in due modi differenti:

- nel primo caso, trattandosi di camere nate, o comunque adattate, per scopi fotogrammetrici, la **calibrazione** viene eseguita in laboratorio specializzato, che garantisce elevati requisiti di precisione;
- nel secondo caso, trattandosi di camere amatoriali o professionali nate non a scopo fotogrammetrico, la calibrazione viene eseguita da parte dell'utente con procedure di *field-calibration* in laboratorio, o con procedure di *self-calibration* in fase di orientamento simultaneo interno-esterno dei fotogrammi.

In entrambi i casi, la procedura di calibrazione porta a conoscere i parametri di orientamento interno della camera: lunghezza focale corretta, posizione del punto principale e distorsione radiale e tangenziale dell'obiettivo.

Oggi, i costi contenuti e la facile disponibilità inducono il ricorso all'acquisizione con camere non-metriche, dotate di obiettivi con ottica non sempre di livello professionale, e alla loro calibrazione mediante algoritmi implementati in software anche commerciali diffusi sul mercato. Come già detto, una precauzione, quando si lavora con camere non-metriche, è di mantenere fissi i valori di focale (e pari a quelli di calibrazione) in fase di scatto, e non utilizzare tecniche di auto-focus, onde evitare leggere variazioni della lunghezza focale.

2.2.3. Orientamento dei fotogrammi

Le procedure di orientamento consistono nelle fasi di:

- **orientamento interno**, noti da calibrazione il valore di focale calibrata e le distorsioni dell'obiettivo;
- **orientamento esterno**, previo rilievo fotogrammetrico di appoggio di target o di punti specifici della carta, per conoscere l'assetto della camera al momento dello scatto (vale a dire definire la relazione esistente tra la superficie del documento cartografico e la superficie

del sensore). Il rilievo di appoggio al fine dell'orientamento esterno può avvenire come in un classico caso di fotogrammetria terrestre, per mezzo di strumentazione topografica classica, o con mezzi alternativi, come verrà illustrato successivamente mediante alcuni esempi (v. par. 2.2.5). Nel caso di auto-calibrazione sono affrontati insieme i problemi degli orientamenti interno ed esterno, con procedura assimilabile ad una triangolazione aerea a fasci proiettivi.

2.2.4. DSM e ortofoto

Una volta risolto il problema dell'orientamento, è possibile generare il modello digitale della superficie della mappa (generalmente indicato con gli acronimi **DSM**, *Digital Surface Model*, o **DOM** *Digital Object Model*) e conseguentemente le ortofoto, dalla cui eventuale mosaicatura deriva l'immagine finale. DSM e ortofoto sono prodotti finali tipici di un rilievo tridimensionale e quindi comuni anche al rilievo con *Laser scanner* di cui si parlerà nel capitolo seguente (v. cap. 2.3).

Il poter disporre di un modello digitale della superficie dell'oggetto risulta necessario nel caso in cui il documento cartografico abbia un supporto non piano, e diventa particolarmente utile nel caso in cui il supporto della mappa antica, anche se cartaceo, non sia perfettamente piano (cosa che si verifica frequentemente). Infatti, la conoscenza dell'andamento reale del supporto permette, in fase di ortorettifica, di correggere le deformazioni presenti: qui è doppiamente vero che l'**ortofoto** ha una valenza metrica al pari di una carta, essendo fotografia di una carta e carta al tempo stesso.

Nel caso in cui il rilievo fotogrammetrico di un oggetto non sia realizzabile con una sola acquisizione, la mosaicatura delle singole ortofoto è possibile sia come fase successiva alla loro generazione (caso che si riconduce alla mosaicatura di immagini scandite e georeferenziate: v. par. 3.1.3), sfruttando algoritmi specifici per l'omogeneizzazione del colore, sia in fase di ortorettifica simultanea di più immagini, dove è ugualmente possibile l'eliminazione delle eventuali disuniformità radiometriche (ad esempio con algoritmi del tipo *histogram matching*).

2.2.5. Esempi da bibliografia

Esistono già numerose esperienze di applicazione della tecnica fotogrammetrica all'acquisizione di cartografia storica. Esse si possono distinguere essenzialmente in **soluzioni di raddrizzamento** e **soluzioni 3D**, a seconda che l'interesse sia rivolto al solo raddrizzamento dei fotogrammi (possibile quando il documento ripreso ha un supporto piano o senza forti deformazioni), o alla preventiva creazione di un DSM per ottenere l'ortofoto finale. Tra le esperienze desunte da bibliografia, di seguito se ne illustrano alcune ritenute particolarmente significative.

2.2.5.1. Soluzioni di raddrizzamento

Il caso più semplice è il raddrizzamento di fotogrammi, in cui si suppone piano l'oggetto (la mappa in questo caso). Il metodo è quindi applicabile solo a carte piane o in cui possa trascurarsi la deformazione del supporto. Il raddrizzamento si basa sull'applicazione di una trasformazione omografica, previa l'individuazione di un certo numero di punti di controllo planimetrici. Escludendo l'informazione di quota, non viene generato un DSM dell'oggetto, per cui non è indispensabile la copertura stereoscopica dei fotogrammi; è soltanto consigliabile mantenere una sovrapposizione di almeno il 20% per assicurare una buona mosaicatura delle immagini una volta rettificata o direttamente in fase di rettifica.

Nel caso di studio descritto in (Tsioukas V., Daniil M., Livieratos E., 2006) si è acquisita una carta mediante camera digitale amatoriale Nikon 8700 da 6 Mpixel. Si può vedere che se con questa camera si volesse garantire un pixel inferiore ad 80 μm , corrispondente ad una risoluzione di 300 dpi, e si volesse acquisire la carta storica con una sola immagine, questa dovrebbe avere dimensione massima 3,72 x 2,5 cm, valore certamente inusuale per una carta. Si rende quindi necessaria l'acquisizione di più immagini con sovrapposizione di almeno il 20%. Lo studio mostra l'utilizzo di un pannello di plexiglass per forzare la mappa a restare piana durante la fase di acquisizione; da una analogo acquisizione di un foglio con sovraimpressi punti di riferimento circolari di posizione nota con elevata precisione (posto sotto al plexiglass), eseguita mantenendo inalterato l'assetto di presa, si risale ai parametri necessari a rettificare l'immagine del reticolo, così come qualunque altra immagine presa con lo stesso assetto. Poiché i modelli della proiezione centrale non contemplano parametri per la correzione delle distorsioni radiali, una tale soluzione

di raddrizzamento porterebbe ad immagini che soffrono delle distorsioni dovute alle lenti, soprattutto se gli obiettivi utilizzati sono di bassa qualità (come spesso avviene per le camere digitali amatoriali). Quindi la soluzione proposta è l'utilizzo di una trasformazione polinomiale di 3° ordine, in quanto è un modello generale che descrive bene la geometria dell'immagine e approssima bene anche i parametri di distorsione radiale. La mosaicatura viene eseguita sfruttando il software in dotazione con la camera.

2.2.5.2. Soluzioni 3D

La soluzione 3D è invece il caso più generale, riconducendosi ad un classico rilievo fotogrammetrico (come illustrato, nelle linee essenziali, nei paragrafi precedenti). Di questo tipo di soluzione si riportano due esempi, il primo in cui si fa uso di fotogrammi su supporto analogico, il secondo in cui l'acquisizione dei fotogrammi avviene direttamente in digitale.

Il primo esempio (Nuikka M., Díaz-Kommonen L., Haggrén H., 2004) (fig. 2.15) riguarda l'acquisizione di una mappa (di dimensioni 114 x 78 cm) su pergamena deformata; essendo il supporto deformato, si rende necessaria una soluzione 3D, che passi quindi attraverso la descrizione digitale della superficie della mappa. L'acquisizione è avvenuta mediante repro camera analogica Sinar di formato 10 x 12,5 cm e con obiettivo macro da 180 mm, mantenendo una distanza tra mappa e camera di circa 66 cm. I 55 fotogrammi (successivamente scanditi a 1.200 dpi) sono stati acquisiti con sovrapposizione del 55%, e a scala 1:2 (in modo da distinguere anche i più piccoli dettagli). Un reticolo di fili a maglia nota e pari alla dimensione dell'immagine acquisita (20 x 25 cm), posto sopra alla mappa a distanza di circa 7 cm da essa (in modo da non coprirne nessun particolare), funge sia da guida per l'acquisizione dei fotogrammi, sia da rete di punti di controllo (per l'intero blocco sono stati utilizzati 5 GCPs noti in XYZ e 4 noti in Z, ed oltre 500 *tie-points*). Il DSM è stato estratto a passo 2 mm, e l'ortofotomosaico è stato generato con pixel di 0,1 m.

Il secondo esempio (Tsioukas V., Daniil M., 2009) (fig. 2.16) riguarda l'acquisizione fotogrammetrica (anche in scala 1:1) mediante un sistema trasportabile di bicamera, costituito da un piano (di dimensioni 1,25 x 0,90 m) e da un'asta, regolabile in altezza, di sostegno per la barra su cui sono montate le due camere (digitali non-metriche, a marca Canon), con

base di presa nota, e variabile fino ad un massimo di 53 cm. Il preventivo utilizzo di speciali cubi LEGO® 3D come *control points* (consistente nell'acquisizione fotogrammetrica e nella misurazione di questi) permette il calcolo dei parametri di orientamento esterno e il contemporaneo calcolo dei parametri di calibrazione, valori da utilizzare per la restituzione dei fotogrammi relativi alla mappa, quindi per l'estrazione del modello 3D e la generazione delle ortofoto.

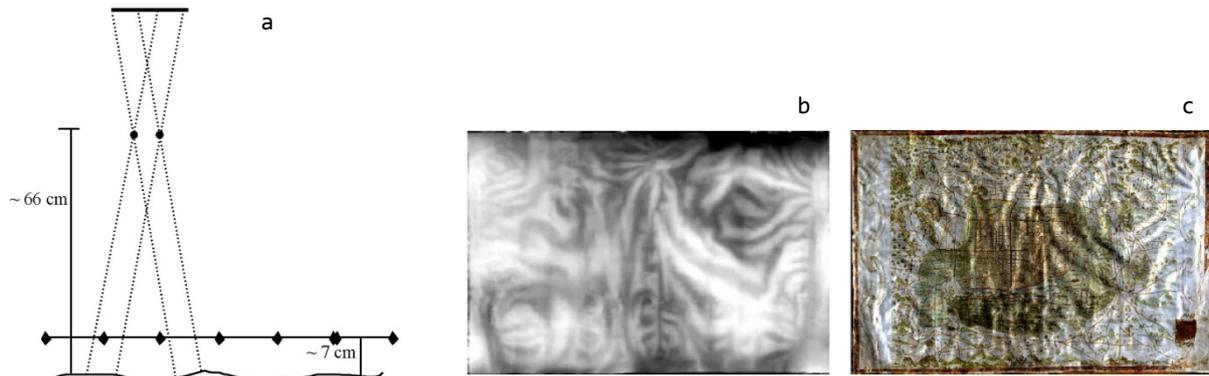


Fig. 2.15 - Studio descritto in (Nuikka M., Díaz-Kommonen L., Haggren H., 2004):
a) schema di acquisizione; b) DSM; c) DSM texturizzato con l'ortofotomosaico.

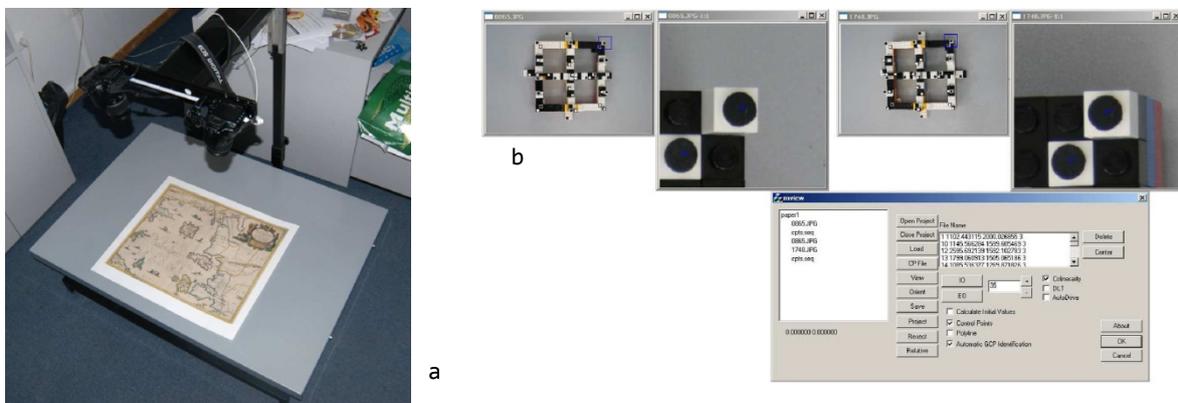


Fig. 2.16 - Studio descritto in (Tsioukas V., Daniil M., 2009):
a) sistema di bicamera; b) fase di calcolo dei parametri di orientamento, mediante utilizzo di speciali cubi come *control points*.

Un progetto di rilievo fotogrammetrico tridimensionale è stato messo a punto anche per la carta settecentesca Monari-Laghi (v. par. 1.2.4.3), conservata presso l'Archivio di Stato di Bologna, considerando le elevate dimensioni (2,011 x 2,730 m), la leggera deformazione del supporto, la sua collocazione e l'ambiente di conservazione.

2.3. RILIEVO CON LASER A SCANSIONE

Gia da tempo la tecnica *laser scanning* terrestre ha trovato valide applicazioni nel campo del rilievo dei beni culturali, tra i quali si inserisce anche la cartografia storica. Probabilmente questo campo di applicazione, nell'ambito dei beni culturali, non è il più comune per tale tecnica, tuttavia non mancano esempi da bibliografia anche in questo settore.

L'approccio della tecnica *laser scanning* è analogo a quello fotogrammetrico: si tratta di un tipo di rilievo tridimensionale, senza contatto con l'oggetto. Anche in questo caso, dunque, la tecnica è applicabile per carte con supporto non piano, perché così d'origine o per via di problemi di conservazione nel tempo. Il fatto che le due tecniche siano molto vicine tra loro, anzi spesso integrate ed anche in soluzioni di rilievo innovative che si pongono in mezzo tra le due, è indice del fatto che i dati che trattano possono essere facilmente scambiati tra loro. L'integrazione tra le due tecniche ha il pregio di unire i vantaggi dell'una e dell'altra, colmando le reciproche lacune. Nel campo del rilievo di beni culturali, sino a pochi anni fa la tecnica principalmente utilizzata era la Fotogrammetria, unita ad un rilievo topografico di appoggio per l'acquisizione di punti significativi; la diffusione del laser a scansione ha raggiunto anche quest'ambito, soprattutto perché permette di ottenere un'enorme quantità di dati con una velocità di acquisizione molto minore rispetto a quella di un rilievo fotogrammetrico e con un grado di automazione superiore nella successiva elaborazione. È stato l'inizio di un utilizzo integrato delle due tecniche, per ottenere un rilievo accurato dal punto di vista metrico (alcuni tipi di *laser scanner* per oggetti di piccole dimensioni offrono accuratissime di ordine submillimetrico) ed anche dotato di quella ricchezza di particolari, e quella realtà di colore, che solo una fotografia può dare. Entrambi questi fattori sono indispensabili per descrivere in modo completo, preciso e realistico l'oggetto, cosa particolarmente sentita nel campo dei beni culturali.

2.3.1. Tipi di *Laser scanner*

Il *Laser scanner* è uno strumento che, sfruttando il fascio di luce *Laser* da lui stesso generato (in tal senso lo si può definire “sensore attivo”), riesce a “scandire”, dunque rilevare, un oggetto. Si parla di *scanner* poiché l’acquisizione avviene secondo specifici criteri di organizzazione dei dati, analoghi a quelli dei comuni scanner piani: la capacità di operare in modo automatico e sistematico, e la possibilità di avere accesso ai dati in tempo reale. Il suo principio di funzionamento può essere sintetizzato in 2 fasi:

- proiezione sull’oggetto di un **raggio laser** (o di un pattern): invio di un fascio di radiazione elettromagnetica caratterizzata da una sola frequenza e da coerenza spaziale (unidirezionalità dell’onda nella sua propagazione), che deriva da un fenomeno di emissione di luce “a cascata”, indotta da un fascio di luce stimolante (il termine L.A.S.E.R. è acronimo di *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, amplificazione della luce da emissione stimolata di radiazione), i cui fotoni, andando a colpire atomi eccitati, inducono questi ultimi ad emettere fotoni identici, in una cascata di emissioni;
- analisi del segnale di ritorno (l’acquisizione laser avviene in base al principio di riflessione di un’onda elettromagnetica su una superficie).

In base alla modalità in cui avviene l’acquisizione del segnale, è possibile distinguere i *Laser scanner* in due grandi famiglie:

- **sistemi distanziometrici** (*ranging scanner*), il cui principio di funzionamento è assimilabile a quello di una *total station*, in quanto la misura della posizione 3D del punto avviene in coordinate sferiche (angolo azimutale e zenitale imposti, distanza misurata) rispetto al centro strumentale (fig. 2.17a);
- **sistemi triangolatori** (*triangulation scanner*), coi quali ogni punto viene rilevato secondo il principio di intersezione in avanti: il raggio laser, deflesso da uno specchio rotante secondo un fissato passo incrementale, colpisce l’oggetto con una scansione regolare (per punti o per linee), quindi il segnale riflesso viene rilevato da un sensore posto a distanza nota (“base”) dal diodo di emissione; dalla misura dei 2 angoli, quello tra raggio emesso e base e quello tra raggio riflesso e base, e dalla conoscenza della base stessa, è possibile il calcolo della posizione del punto oggetto nello spazio (fig. 2.17b).

La differenza tra i due sistemi è in termini di velocità, portata (distanza massima raggiungibile) e precisione: con i sistemi distanziometrici le misure sono veloci (>10.000 pti/s) e la portata varia da 1 m a qualche chilometro, raggiungendo precisioni elevate (da 5 mm a qualche centimetro); con i sistemi triangolatori velocità e portata si riducono (la portata normalmente varia tra 0,1 e 500 cm), ma le precisioni aumentano molto (fino al sub-millimetro: $50 \mu\text{m}$). Spesso, quindi, i sistemi triangolatori risultano ideali per il rilievo di piccoli oggetti e beni culturali di modeste dimensioni, compresa la cartografia antica.

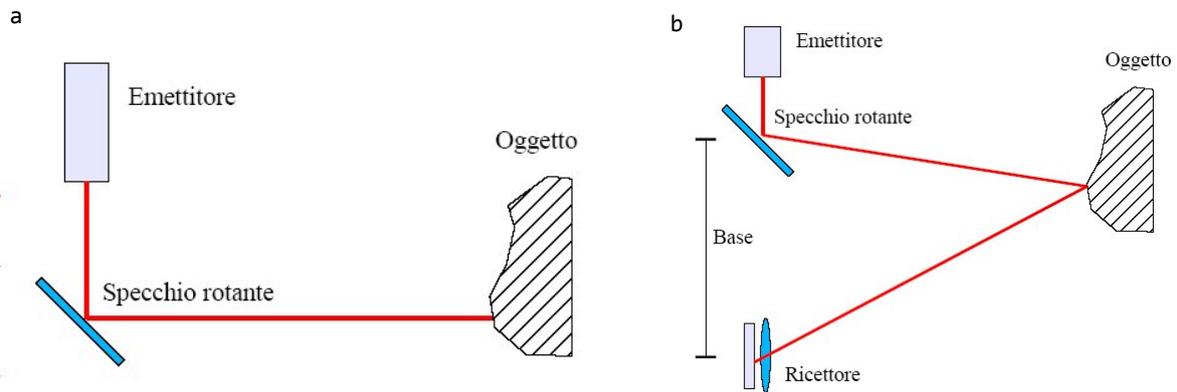


Fig. 2.17 - Principio di funzionamento dei sistemi laser distanziometrici (a) e triangolatori (b).

2.3.2. Progetto del rilievo e acquisizione

Ogni rilievo risulta un caso a sé, per cui la scelta del tipo di strumento e delle modalità di rilievo deve essere fatta di volta in volta in base alle specifiche condizioni ed esigenze, come l'oggetto e lo scopo del rilievo, le condizioni al contorno, le risorse tecniche. In fase di progettazione di un rilievo laser occorre prestare attenzione ad alcuni fattori:

- riduzione di ombre ed occlusioni, che potrebbero essere causate dagli spigoli dell'oggetto stesso o da ostacoli presenti in sito;
- riduzione dell'angolo di acquisizione (l'angolo con cui il raggio laser incide sulla superficie dell'oggetto), per l'esecuzione corretta della misura e per il miglioramento della qualità del modello finale e della sua mappatura con le immagini;

- buona sovrapposizione tra le scansioni, per garantire completezza nel rilievo e una buona unione delle nuvole (soprattutto nel caso in cui non si utilizzino target allo scopo);
- omogeneità di risoluzione delle scansioni, sia in termini di densità della maglia di punti da rilevare, sia in termini di accuratezza geometrica nella misura della distanza;
- visibilità dei target riflettenti (se utilizzati) dai punti di stazione, per l'inquadramento del rilievo e l'unione delle scansioni.

Il rilievo mediante laser a scansione consiste essenzialmente nell'acquisizione di 2 tipi di informazione:

- la posizione nello spazio di ogni punto rilevato, secondo il passo di scansione impostato;
- un valore di **riflettanza** per ogni punto acquisito: risposta, in termini di intensità, di ogni punto dell'oggetto colpito dal raggio laser.

La descrizione del rilievo, in uscita dal processo di scansione, consiste in un file, in codice binario oppure in formato ASCII, contenente i punti a coordinata misurata, assieme ai relativi valori di riflettanza.

Al rilievo *laser scanning* si accompagna di solito anche un rilievo di inquadramento, al fine di rilevare le coordinate di speciali target retroriflettenti (in quanto riconoscibili in automatico su tutte le nuvole), utilizzati per registrare le diverse nuvole di punti. I target permettono sia di georiferire le singole scansioni rispetto ad un certo sistema di riferimento, per poi unirle in un unico modello, sia di allineare le scansioni in modo automatico ed eventualmente georiferire poi l'intero modello.

2.3.3. Elaborazione dei dati

Il dato digitale in uscita dalla fase di acquisizione è ancora grezzo, e deve essere trattato all'interno di software specifici, secondo elaborazioni proprie della tecnica laser, che in generale si possono riassumere in:

- **registrazione** delle scansioni: allineamento, mediante rototraslazione, delle diverse nuvole, per portarle su un unico sistema di riferimento;
- **filtraggio**: semplificazione dei dati in uscita dalla fase di scansione, mediante eventuale riduzione del numero di punti ed eliminazione di quelli superflui;

- **triangolazione:** creazione di un modello della superficie dell'oggetto scandito, mediante una *mesh* poligonale (rete a maglia triangolare irregolare, definita dai lati di triangoli nello spazio, con vertici nei punti acquisiti in scansione);
- **texturizzazione:** spalmatura di un'informazione 2D (l'immagine) sulla geometria 3D dell'oggetto, con classico procedimento fotogrammetrico (in quanto basato sulle equazioni di collinearità, per far corrispondere ad ogni punto X, Y e Z definito dalla scansione uno specifico punto x, y dell'immagine);
- generazione di eventuali prodotti finali.

Oltre alla creazione di un modello fotorealistico (mediante texturizzazione della *mesh*), il DSM associato all'immagine fotografica permette la creazione dell'**ortofoto** finale. Infatti, l'ortofoto è il prodotto finale principale di un rilievo tridimensionale di cartografia storica, fotogrammetrico o *Laser scanning* che sia; la procedura per ottenerla è analoga nei due casi, ed è già stata illustrata nel paragrafo 2.2.4.

2.3.4. L'informazione RGB

In base all'informazione di posizione nello spazio di ogni punto acquisito per scansione, è possibile organizzare i dati di riflettanza in una "**immagine di riflettanza**", che è una immagine (quindi un oggetto bidimensionale), in toni di grigio o a colori, ad ogni pixel della quale è associata la posizione X, Y, Z del punto nello spazio, oltre alla posizione del punto di acquisizione. L'immagine di riflettanza 2D può essere automaticamente mappata sulla nuvola di punti, che rappresenta la geometria 3D dell'oggetto. Il processo consente in generale di aumentare molto il contenuto informativo del risultato di scansione, soprattutto se a colori.

Nel caso di acquisizione di carte antiche il fattore "informazione RGB" diviene di fondamentale importanza, in quanto è indispensabile avere, come prodotto finale, un'immagine, ortorettificata, della carta. In generale esistono tre differenti tipologie di *Laser scanner*, in base alla modalità in cui avviene l'acquisizione dell'informazione radiometrica:

- laser con **sensore a singolo spot**, coassiale col raggio: per ogni punto acquisito, viene registrato anche il valore radiometrico; il metodo è

più comodo, ma la risoluzione finale dell'immagine è solitamente bassa (a causa della limitatezza delle dimensioni dell'apparecchiatura);

- laser con **fotocamera integrata**, esterna allo strumento (per cui risoluzione e focale possono essere modificate dall'utente), calibrata e con centro di presa a distanza fissa e nota rispetto al centro del laser scanner;
- laser e **fotocamera esterna**, utilizzata direttamente dall'operatore; in tal caso occorre calibrare le immagini acquisite per poterle utilizzare all'interno del software di gestione dei dati laser.

Nel rilievo di carte antiche si può optare per l'utilizzo di scanner che accoppino al sistema di misura 3D l'acquisizione radiometrica del colore, oppure si può optare per la generazione del DSM su cui poi effettuare il *texture mapping* con le immagini. Probabilmente quest'ultima è la scelta vincente per la digitalizzazione di cartografia storica, in quanto la buona qualità dell'immagine qui più che mai è un fattore di fondamentale importanza. Infatti l'utilizzo di immagini da fotocamera esterna consente solitamente di raggiungere una qualità radiometrica superiore rispetto all'utilizzo di un sistema laser con fotocamera integrata. Si tratta di acquisire le immagini come in un rilievo fotogrammetrico, ma senza la necessità di sovrapposizione stereoscopica tra i fotogrammi, in quanto la descrizione della geometria tridimensionale dell'oggetto viene derivata dal rilievo laser (Sgrenzaroli M., Vassena G.P.M., 2007).

2.3.5. Esempi da bibliografia

Si riporta da bibliografia un esperimento di utilizzo integrato delle tecniche *Laser scanning* e fotogrammetrica per l'acquisizione digitale di cartografia stampata su libri e atlanti; l'esperimento è descritto in (Adami A., Fregonese L., Guerra F., Livieratos E., Tsioukas V., 2007).

In particolare, la scansione laser permette la creazione di un DSM della carta, mentre la Fotogrammetria permette l'acquisizione delle immagini per texturizzare il modello e generare l'ortofoto. Lo scanner utilizzato è *Handyscan* di Creaform (centro tecnologico canadese per soluzioni digitali 3D), il cui nome delinea la sua principale caratteristica, quella di poter essere utilizzato con una sola mano (fig. 2.18). Si tratta di uno scanner ad alta risoluzione (0,1 mm, con precisione sulle coordinate Z di 0,05 mm), di tipo triangolatore, con un emettitore del raggio laser e due camere di acquisizione simultanea del

segnale di ritorno; per l'orientamento utilizza un sistema di riferimento da realizzare con piccoli target riflettenti. Per evitare di attaccare i target direttamente sulla carta, col rischio di danneggiarla, è stato testato l'utilizzo di un reticolo 3D sul quale attaccare i target, e da porre davanti, ma non a contatto, con il documento da rilevare.



Fig. 2.18 - Un esempio di laser scanner triangolatore (*Handyscan* di Creafom).

L'acquisizione dell'immagine digitale della carta è stata eseguita con camera digitale non-metrica Nikon D2X, con sensore da 12 Mpixel e dotata di obiettivo di focale 24 mm, fotografando la carta prima con il reticolo posto anteriormente (per sfruttare il sistema di target per il calcolo dei parametri di orientamento, mediante trasformazione lineare diretta DLT), poi senza reticolo (per avere un'immagine da usare come *texture*), e mantenendo inalterato l'assetto di presa (per sfruttare nella seconda immagine i parametri calcolati con la prima). Durante l'acquisizione dei fotogrammi, una buona illuminazione viene garantita da un opportuno sistema costituito da quattro lampade orientabili, mentre il controllo del colore viene garantito dall'utilizzo di *color control patch* (fig. 2.19). Oltre alla texturizzazione del modello, l'immagine fotografica, associata al DSM, permette la creazione dell'ortofoto finale.

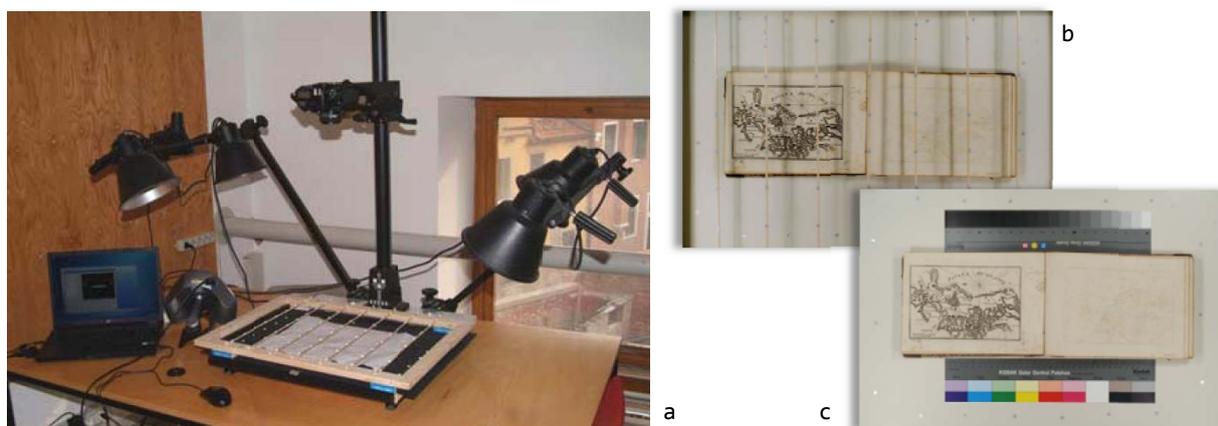


Fig. 2.19 - Studio descritto in (Adami A., Fregonese L., Guerra F., Livieratos E., Tsioukas V., 2007): a) il sistema di acquisizione *laser scanning* e fotogrammetrico; b) acquisizione fotogrammetrica del reticolo per la risoluzione dell'orientamento; c) acquisizione fotogrammetrica dell'immagine per la *texture*.

3. GEOREFERENZIAZIONE

There are many situations in which it is of interest to compute the degree of resemblance between two plane figures. Suppose we have pictures of the faces of two people, for example. Can we measure the degree of similarity of these faces? Or of two signatures? Or of two leaves? Or of two geographical maps?

*Bidimensional regression
(Tobler W.R., 1994)*

Normalmente la prima fase di elaborazione di una carta digitalizzata consiste nella sua **georeferenziazione**. Con tale termine si intende il processo di assegnazione di coordinate oggetto, in un certo sistema di riferimento (solitamente geodetico-cartografico), al sistema immagine; significa restituire alla geometria dell'immagine quel contenuto metrico e geometrico posseduto inizialmente dalla carta su supporto analogico, e in qualche modo andato perduto durante il processo di acquisizione. In questo contesto si utilizzerà il termine di georeferenziazione in senso lato, comprendendo con esso anche il processo di geocodifica, legato all'assegnazione delle coordinate ad uno specifico sistema geodetico-topografico in uso. Nel capitolo seguente (3.1) verrà esaminato in che modo avviene la georeferenziazione di una carta.

Con l'assegnazione di coordinate geografiche o cartografiche, il processo di georeferenziazione dà la possibilità di:

- analizzare la qualità metrica del documento cartografico, mediante l'analisi dei residui di georeferenziazione;
- correggere, almeno in parte, le deformazioni presenti in carta (dovute a molteplici fattori), mediante il ricampionamento dell'immagine;
- confrontare la realtà storica con quella moderna, secondo diverse metodologie, tra le quali quella principalmente adottata è la sovrapposizione della carta trasformata ad una base cartografica moderna;
- confrontare la realtà storica con altre realtà storiche (di periodi, o autori, differenti);

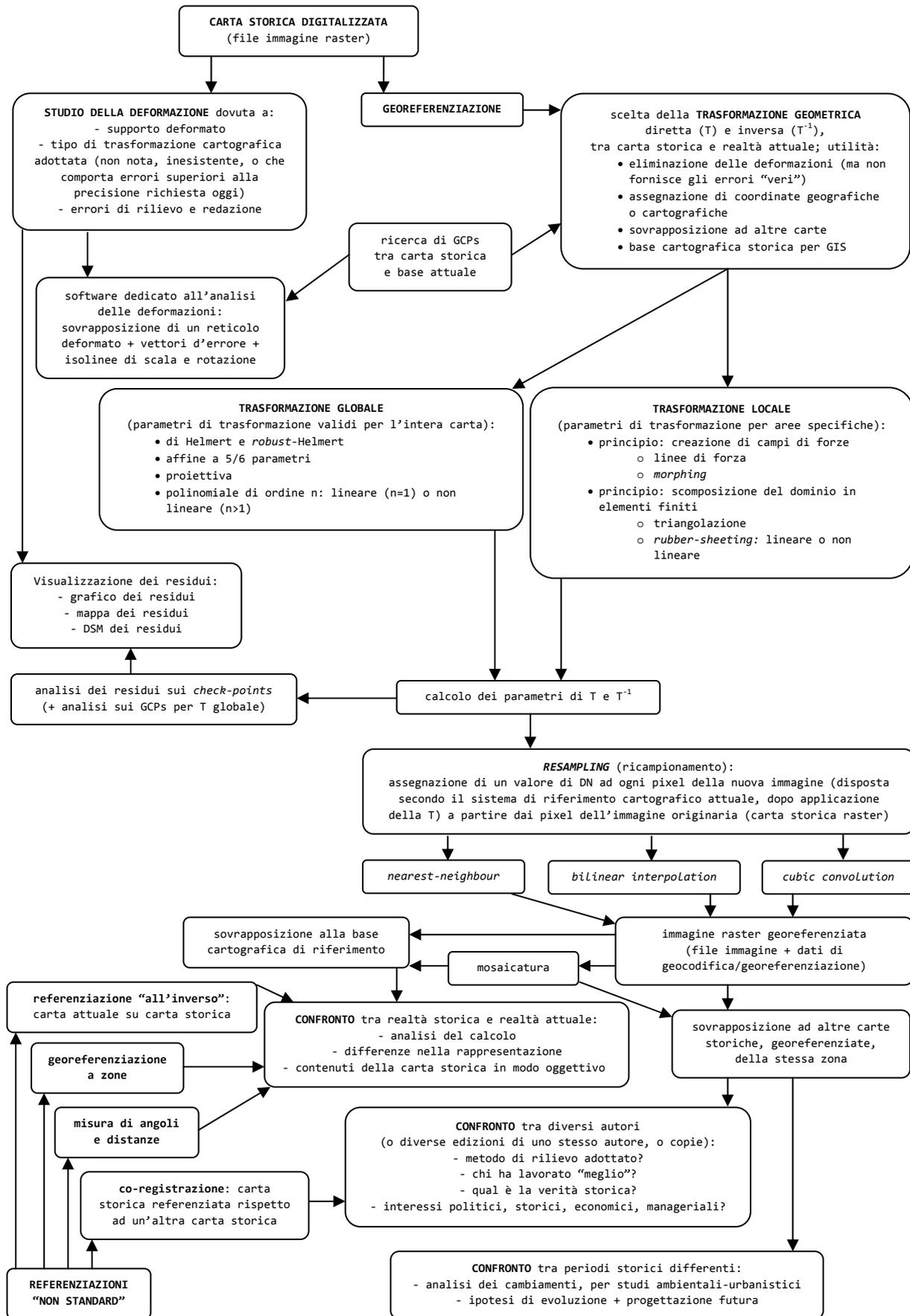
3. GEOREFERENZIAZIONE

- inserire la carta trasformata in GIS storici, sovrapponendola ad altre carte, storiche e/o recenti.

Dei primi due punti ci si occuperà nel capitolo 3.2 (analisi delle deformazioni), del terzo e quarto punto ci si occuperà nel capitolo 3.3 (analisi comparate tra cartografie), ed infine l'ultimo punto sarà argomento del capitolo 4, essendo inerente alla gestione e fruizione del dato digitale.

Di seguito si riporta il diagramma di flusso relativo alla fase di georeferenziazione.

3. GEOREFERENZIAZIONE



3. GEOREFERENZIAZIONE

3.1. GENERAZIONE DELLA CARTA GEOREFERENZIATA

La georeferenziazione di una carta è un processo che si realizza mediante due passaggi fondamentali, al termine dei quali si disporrà di una immagine nuova della carta:

- un processo di **trasformazione geometrica** tra sistema immagine e sistema oggetto di riferimento;
- il successivo **ricampionamento** (*resampling*) dell'immagine, una volta applicati a tutti i pixel dell'immagine i parametri di trasformazione calcolati nella fase precedente.

Si trattano i due passaggi in due paragrafi separati.

3.1.1. Trasformazione geometrica

Il procedimento di calcolo dei parametri della trasformazione diretta (T) e di quella inversa (T^{-1}), al fine di individuare una corrispondenza biunivoca tra due set di punti giacenti su due piani differenti (quello immagine, nel sistema oxy, e quello oggetto, nel sistema OXY), si realizza tramite un processo di “*best-fitting*”. Infatti, la determinazione dei parametri della trasformazione avviene di norma conoscendo le coordinate, nei due sistemi, di un certo numero di “punti di controllo a terra” (GCPs, *Ground Control Points*), sulla base dei quali il processo calcola il miglior adattamento tra piano immagine e piano oggetto. Usualmente il sistema di riferimento oggetto è un sistema cartografico, per cui le coordinate possono essere ricavate per mezzo di un rilievo a terra o dedotte da un'altra cartografia, di qualità e caratteristiche note, della stessa zona (Boutoura C., Livieratos E., 2006). Lavorando con cartografia storica, questo passaggio fondamentale è abbastanza delicato per due motivi:

- gli elaborati storici mancano spesso di un sistema di riferimento geografico, o ne possiedono uno diverso da quelli utilizzati attualmente;
- può risultare molto difficile l'identificazione su di essi di GCPs corrispondenti a punti rimasti invariati nel tempo, che siano ancora esistenti e riconoscibili su una carta attuale o direttamente sul terreno.

Questo fatto si fa rilevante sia nel caso di carte storiche di città, per le quali il tessuto urbano può essersi modificato alquanto nel corso del tempo (all'interno del capitolo si riporta l'esempio di georeferenziazione delle carte di Bologna del Settecento e dell'Ottocento), sia nel caso di carte di paesaggi naturali, per le quali l'ambiente stesso è andato evolvendosi (all'interno del capitolo si riporta l'esempio di georeferenziazione delle carte tardo-cinquecentesche del delta del Po).

Il numero minimo di punti di controllo richiesto è legato al tipo di trasformazione piana adottata, in quanto dipende dal numero di parametri della trasformazione stessa. Evidentemente è sempre opportuno, quando possibile, lavorare con un numero di punti superiore allo stretto necessario, poiché solo in tal modo è consentita una valutazione della qualità della trasformazione, ad esempio mediante l'analisi dei residui di una compensazione ai minimi quadrati. A questo valore si può associare anche l'analisi dei residui su punti particolari, detti *check-points* (CPs), le cui coordinate, note ma non utilizzate al fine del calcolo dei parametri della trasformazione geometrica, vengono confrontate con quelle calcolate in uscita dalla fase di trasformazione geometrica (v. par. 3.1.1.3) (Bitelli G., Gatta G., 2007).

Esistono diversi tipi di trasformazione geometrica di possibile utilizzo per la georeferenziazione di una carta e numerosi prodotti software che le realizzano, molti dei quali disponibili in ambiente GIS. In particolare è possibile distinguere due classi di trasformazione, che vengono prese in esame nel dettaglio nei paragrafi che seguono:

- **trasformazioni globali;**
- **trasformazioni locali;**

a seconda che i parametri di trasformazione calcolati valgano per l'intera carta o solo per aree specifiche, rispettivamente. (Livieratos E., 2006)

3.1.1.1. Trasformazioni globali

Una trasformazione globale è una trasformazione i cui parametri vengono calcolati tutti insieme per l'intera area, e di conseguenza sono validi per l'intero piano immagine. Le caratteristiche di questo processo determinano che, come risultato finale, si abbia:

- la visualizzazione della deformazione complessiva, globale;
- la variazione delle coordinate oggetto per i GCPs inseriti (per via della stima dei parametri con una compensazione ai minimi quadrati),

col risultato di uno spostamento dei GCPs dalla loro posizione reciproca iniziale.

Uno dei problemi delle trasformazioni globali, consiste negli effetti degli algoritmi di interpolazione in quelle parti dell'immagine in cui non esistono informazioni, in quanto non sono presenti GCPs; a rigore si tratta di processi di estrapolazione. Un esempio illuminante è costituito dalle carte del delta del Po, su cui non sono stati riconosciuti GCPs per ampie aree rappresentate in carta in quanto oggi non più esistenti a causa della variazione della morfologia deltizia. Trattandosi di trasformazioni di tipo globale, i parametri vengono calcolati sulla base delle sole informazioni (in termini di coordinate dei GCPs) inserite dall'utente, e vengono applicati allo stesso modo sull'intera immagine, senza tenere in considerazione quindi che una logica diversa potrebbe aver presieduto al rilievo ed alla rappresentazione delle diverse porzioni di territorio che sono contenute nella carta; le deformazioni su alcune aree su cui non sono disponibili GCPs possono risultare quindi inaccettabili.

Le possibili trasformazioni di tipo globale si differenziano tra di loro per il numero di parametri coinvolti, e dunque per il tipo di deformazione, in carta, che sono in grado di correggere:

- **conforme** (o di Helmert), a 4 parametri:

$$X = X_0 + (m \cos \alpha)x - (m \sin \alpha)y$$

$$Y = Y_0 + (m \sin \alpha)x + (m \cos \alpha)y$$

- X_0 = traslazione orizzontale
- Y_0 = traslazione verticale
- m = fattore di scala
- α = rotazione in senso antiorario
- **di Helmert robuste**, a 4 parametri, più alcuni stimatori (con valori modificabili dall'utente), per assegnare un peso diverso ad ogni coppia di punti in fase di calcolo:
 - con Huber-Estimator: grado di influenza (peso), ad esempio $k = 1,5$;
 - con V-Estimator: grado di influenza (peso), ad esempio $k = 1,5$, e grado di contaminazione (errore), ad esempio $e = 0,6$;
 - con Hampel-Estimator: grado di influenza (peso), ad esempio $a = 1,0$, split point (peso ulteriore), ad esempio $b = 2,0$, e valore di soglia, ad esempio $c = 4,0$ ($a < b < c$);
- **affine**, a 5 o 6 parametri:

$$X = X_0 + (m_x \cos \alpha)x - (m_y \sin \beta)y$$

$$Y = Y_0 + (m_x \sin \alpha)x + (m_y \cos \beta)y$$

- X_0 = traslazione orizzontale
- Y_0 = traslazione verticale

- m_x = fattore di scala orizzontale
- m_y = fattore di scala verticale
- α = rotazione in senso antiorario per la direzione orizzontale
- β = rotazione in senso antiorario per la direzione verticale ($\beta = \alpha$ per affine a 5 parametri)

- **proiettiva**, a 8 parametri (a_1, a_2, \dots = parametri):

$$X = \frac{a_1x + a_2y + a_3}{c_1x + c_2y + 1}$$

$$Y = \frac{b_1x + b_2y + b_3}{c_1x + c_2y + 1}$$

- **polinomiale** di ordine n (lineare o non lineare), con numero di parametri in funzione dell'ordine; ad esempio per il primo ordine, coincidente con l'affine (a_0, a_1, \dots = parametri):

$$X = a_0 + a_1x + a_2y$$

$$Y = b_0 + b_1x + b_2y$$

Tutte queste trasformazioni derivano da un sistema di equazioni polinomiali in forma generale, che descrivono il passaggio tra il sistema immagine oxy e quello oggetto OXY , e in cui possono comparire termini lineari e termini non lineari. A seconda che solo i primi, oppure anche i secondi, vengano considerati, si ottengono classi differenti di trasformazione globale: lineari e non lineari, rispettivamente. Il risultato di una trasformazione lineare (di Helmert, affine, proiettiva, polinomiale di ordine $n=1$) è una traslazione, una rotazione globale (in due differenti valori nella trasformazione affine a 6 parametri che considera anche un angolo di scorrimento) ed una variazione di scala (una sola, uniforme, in una trasformazione di Helmert, due uniformi in una trasformazione affine); per una trasformazione proiettiva il risultato è un'immagine prospettica, vale a dire ruotata e scalata non uniformemente. Una trasformazione lineare corregge dunque effetti di scala, offset, rotazione e riflessione; una trasformazione non lineare corregge invece distorsioni non lineari. La più semplice trasformazione non lineare è la polinomiale di 2° ordine, e a seguire quelle di ordine superiore. In questi casi il risultato dipende molto dal numero di punti di controllo e dalla loro distribuzione spaziale sul piano immagine (Guerra F., 2000) (Balletti C., 2006) (Boutoura C., Livieratos E., 2006). Il numero minimo di GCPs per una trasformazione polinomiale dipende dall'ordine n :

$$\frac{(n+1)(n+2)}{2}$$

3.1.1.2. Trasformazioni locali

Dall'altro lato, una trasformazione locale è una trasformazione i cui parametri vengono calcolati per aree specifiche, solitamente piccole, definite da un piccolo numero di punti di controllo o come intorno di ogni punto di controllo; di conseguenza i parametri calcolati sono validi solo per quella specifica area. Come effetto, una trasformazione locale permette:

- la visualizzazione delle deformazioni locali, in base alle aree selezionate dall'utente per mezzo dei GCPs;
- il mantenimento della posizione dei GCPs in termini di coordinate oggetto (quindi, ovviamente, non in termini di posizione reciproca assunta sulla carta storica), forzando gli altri punti dell'immagine ad adattarsi.

Il numero di punti di controllo richiesto dipende dal modello matematico applicato, che usualmente è lo stesso delle trasformazioni globali, ma viene circoscritto ad aree limitate. A differenza delle trasformazioni globali, per quelle locali non è possibile la stima della precisione mediante analisi dei residui sui GCPs, in quanto tutti i punti di controllo vengono mantenuti fissi (quindi a residuo nullo); il controllo della precisione è possibile unicamente mediante inserimento di *check-points*, nello stesso modo in cui può essere fatto in una trasformazione globale.

Le trasformazioni locali possono essere distinte in due grandi classi, in base al principio su cui operano:

- scomposizione del dominio in elementi finiti:
 - triangolazione;
 - *rubber-sheeting* (lineare o non lineare);
- creazione di campi di forze:
 - mediante vettori;
 - *morphing*.

Le trasformazioni per elementi finiti prevedono la scomposizione del dominio in una *mesh*, solitamente triangolare, nella quale ogni nodo (vertice del triangolo, nel caso più comune) è un punto di controllo. I due spazi (immagine ed oggetto) hanno in comune le stesse sottoregioni definite dai punti di controllo, e in fase di trasformazione viene garantito il mantenimento della posizione reciproca delle sottoregioni. La **triangolazione** ed il *rubber-sheeting* si basano sulla triangolazione con criterio di Delaunay, per cui sono necessari almeno 3 punti di controllo. Per ogni area definita dai 3 GCPs, viene applicata una trasformazione affine, forzando i GCPs in modo tale che su di essi vi sia errore nullo, e

adattando i punti interni ai triangoli; i parametri calcolati per ogni area triangolare avranno quindi validità limitata all'area interna ad ogni singolo triangolo, e solo qui potranno essere usati. Un difetto di questo tipo di trasformazione è il fatto che non viene garantita la continuità spaziale dell'immagine ricampionata, con conseguenti possibili problemi di taglio: punti perimetrali di aree adiacenti, caratterizzate da parametri di trasformazione differenti, potrebbero subire spostamenti differenti, in disaccordo tra di loro. Ovviamente, per ottenere risultati migliori in termini di precisione, oltre che qualitativi, occorre adottare triangoli i più piccoli possibile, vale a dire un maggiore numero di punti di controllo (Gillman D.W., 1985), (Shimizu E., Fuse T., 2003) (Boutoura C., Livieratos E., 2006).

Il *rubber-sheeting* (alla lettera, "foglio di gomma") è il processo col quale un'immagine viene distorta per farla combaciare al meglio con una di riferimento, deformando ogni sottoregione in modo differente, proprio come si farebbe con un foglio di gomma per adattarlo agli oggetti. E' una tecnica nata per scopi cartografici, e largamente usata in applicazioni di GIS storici, per adattare a basi attuali carte storiche anche particolarmente deformate. La trasformazione utilizzata localmente può essere lineare (una affine) o non lineare (una polinomiale di ordine superiore al 1°); nell'applicazione di un *rubber-sheeting* di tipo non-lineare potrebbero sorgere problemi di deformazione (in modo simile alle trasformazioni per campi di forze), soprattutto quando è carente il numero di GCPs. Un problema della trasformazione è che in fase di ricampionamento vengono escluse le aree esterne all'involuppo dei GCPs inseriti, per cui la mappa georeferenziata appare mancante della zona perimetrale. Questo fatto rispecchia la principale caratteristica degli algoritmi a valenza locale, quella di calcolare i parametri di trasformazione con validità unicamente all'interno delle singole subaree.

Le trasformazioni per campi di forze si basano invece su un principio differente. Si tratta infatti di trasformazioni elastiche: conservano la locazione dei punti di controllo, trasformando gli altri punti del piano immagine sulla base di un criterio di vicinanza. In tal modo, la continuità spaziale dell'immagine ricampionata viene conservata, anche se a scapito, spesso, di effetti di deformazione elevata e innaturale. Il numero minimo di punti di controllo è ulteriormente inferiore rispetto alle trasformazioni per elementi finiti, riducendosi ad uno solo nel caso della tecnica di *warping*.

Il *morping* è una tecnica mutuata dall'industria cinematografica, dove viene utilizzato come effetto digitale di trasformazione graduale, fluida e senza soluzione di continuità tra due immagini differenti. La tecnica è

nata sulla base della dissolvenza incrociata, utilizzata in cinematografia prima dell'avvento del digitale, e consistente in una semplice sovrapposizione in dissolvenza di un'immagine sull'altra. Il *morphing*, invece, prevede una elaborazione ed una trasformazione delle due immagini, essendo, sostanzialmente, un utilizzo contemporaneo di:

- **warping** (alla lettera, deformazione): ridefinizione delle relazioni spaziali tra i punti di un'immagine mediante introduzione di punti, linee o aree caratteristiche, con l'effetto di deformazione del contenuto geometrico dell'immagine; all'interno del *morphing*, il *warping* consente di mettere in relazione elementi caratteristici di un'immagine coi corrispondenti dell'altra immagine;
- **dissolvenza incrociata**: effetto di miscelazione tra le immagini, ottenuto calcolando, per ogni pixel, un valore intermedio dato dalla media pesata tra il valore assunto dal pixel nell'immagine iniziale e quello assunto in quella finale, e variabile in base a due fattori: il numero totale dei *frame* di passaggio tra un'immagine e l'altra e la posizione del singolo *frame* all'interno della sequenza.

Il *morphing* è dunque una dissolvenza incrociata in cui la deformazione è, per così dire, "pilotata", in modo da far assomigliare il più possibile certe caratteristiche dell'immagine di partenza a quelle dell'immagine di arrivo, attraverso il riconoscimento di punti omologhi sulle due immagini.

Essendo nata in campo cinematografico, è la qualità dell'immagine a governare questo algoritmo, e non il contenuto metrico, che ha invece un ruolo di secondo ordine. Questo si traduce nel fatto che difficilmente esistono programmi che consentono di applicare l'algoritmo a cartografie; di conseguenza, non prendendo in considerazione il contenuto metrico, si basano sul riconoscimento dei punti direttamente sulle immagini, senza la possibilità di specificare le loro coordinate, né tantomeno di poterle salvare in un file di testo, e soprattutto senza la capacità di gestire carte di riferimento georeferenziate. L'implementazione di una procedura di *morphing* è stata messa a punto nel 1999 presso il CIRCE dell'Università IUAV di Venezia, realizzando programmi software (CIRCE IUAV, 1999) che consentono l'applicazione di algoritmi di *warping* anche ad immagini cartografiche: WPP (*Warping Point Pixel*) e WPF (*Warping Feature Pixel*), basati rispettivamente su un *warping* per punti ed un *warping* per linee di forza (Guerra F., 2000).

La creazione di campi di forze attraverso punti presenta dei problemi rispetto al caso di utilizzo di **linee di forza** (vettori, quindi linee orientate). Infatti il primo metodo è molto sensibile alla distribuzione dei punti, ed inevitabilmente comporterà l'introduzione di deformazioni anche su elementi che dovrebbero invece rimanere lineari. Ma il più delle

volte nelle carte antiche, dove spesso è difficile individuare elementi lineari, questo tipo di algoritmo risulta l'unico possibile. Dall'altro lato, gli algoritmi basati su linee di forza talvolta danno origine al fenomeno di *ghostbusting*, la creazione di "forme fantasma", quando una parte dell'immagine ricampionata compare in posizione imprevista, in quanto le deformazioni indotte dai vettori inseriti sono tra loro incompatibili e quindi "spezzano" l'immagine.

3.1.1.3. Analisi dei residui

Come sopra detto, la valutazione della qualità di una trasformazione avviene normalmente attraverso l'analisi dei residui, in uscita dal calcolo di compensazione ai minimi quadrati. Le trasformazioni globali lavorano infatti sul principio di minimizzazione dei residui sui GCPs, in modo da ripartire l'errore globale tra i punti di controllo in modo il più possibile uniforme. Una valutazione più veritiera della qualità di una trasformazione può avvenire mediante *check-points* (CPs), punti le cui coordinate, note ma non utilizzate al fine del calcolo dei parametri della trasformazione geometrica, vengono confrontate con quelle calcolate in uscita dalla fase di compensazione (avvenuta sulla base dei soli GCPs). Questo valore è più veritiero rispetto a quello calcolato per i GCPs, in quanto i CPs non influiscono sul risultato di compensazione ai minimi quadrati; quindi tendenzialmente è anche un valore più alto rispetto a quello calcolato per i GCPs.

I parametri statistici di valutazione della qualità di una trasformazione sono:

- il residuo, nelle due coordinate x e y , per ogni punto (GCP o CP): differenza tra coordinate stimate dal calcolo e coordinate note, assunte come vere:
 - $residual_x = x' - x$
 - $residual_y = y' - y$
- l'errore di posizionamento per il singolo punto (valore sempre positivo): differenza tra la locazione di input (x,y) del punto e quella di output (x',y'), cioè in seguito alla trasformazione (espresso nell'unità di misura di x, y):

$$RMSerror = \sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2}$$

- RMS (*Root Mean Square*, scarto quadratico medio):

o nella componente x: $RMS_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x'_i - x_i)^2}{n}}$

o nella componente y: $RMS_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y'_i - y_i)^2}{n}}$

o totale: $RMS_{total} = \sqrt{(RMS_x)^2 + (RMS_y)^2}$

- *error contribution* = errore normalizzato, che rappresenta l'errore di posizionamento per il singolo punto rapportato all' RMS_{total} .

Bisogna comunque tener presente che i software di georeferenziazione non forniscono sempre i valori per tutti questi parametri (ERDAS, 2008).

Per una stima più affidabile dei residui di trasformazione, è bene disporre di un numero abbastanza elevato di punti, ovviamente compatibilmente con le difficoltà pratiche di individuazione di punti omologhi tra carta storica e base attuale; come detto, inoltre, sarebbe bene utilizzare questi punti come CPs. D'altra parte è anche vero che il disporre di un numero elevato di CPs significa privare il calcolo di compensazione di quei punti di coordinate note, col risultato di indebolire la stima dei parametri di trasformazione. La soluzione andrà dunque cercata in un compromesso tra le queste due esigenze opposte.

3.1.2. Ricampionamento d'immagine

Il calcolo dei parametri della trasformazione T e quelli della sua inversa T^{-1} , avvenuto sulla base di punti di controllo, permette di instaurare una relazione biunivoca tra spazio immagine (sistema oxy, solitamente riga x colonna) e spazio oggetto (sistema OXY, solitamente coincidente con un sistema cartografico), e quindi di estendere la validità dei parametri calcolati a tutti i punti dell'immagine.

La costruzione della nuova immagine, georeferenziata, avviene a partire da una matrice vuota di pixel disposta nel sistema OXY. Il riempimento di tale matrice si basa sull'assegnazione di un valore radiometrico ad ogni suo pixel; per stabilire quale valore assegnare, ciascun pixel viene trasformato applicando i parametri inversi (da sistema oggetto a sistema immagine). Il ricampionamento (*resampling*) è dunque l'assegnazione di uno specifico valore radiometrico (un *Digital Number*, DN) ad ogni pixel della nuova immagine. In generale, però, il pixel trasformato non assume un valore intero di coordinate riga e colonna, vale a dire non cade esattamente al centro di un pixel dell'immagine originale, per cui non è immediato stabilire quale valore di DN assegnargli (fig.

3.1); l'operazione deve dunque avvenire attraverso algoritmi di interpolazione, che sulla base dei pixel adiacenti calcolano il valore di DN da assegnare al punto trasformato. Essi si differenziano in base al numero di pixel nell'intorno che vengono considerati ai fini del calcolo:

- *Nearest Neighbour* (vicino più vicino): il valore assegnato di DN è quello del pixel più vicino;
- *Bilinear Interpolation* (interpolazione bilineare): il calcolo del DN avviene sulla base dei 4 pixel nell'intorno (con una media pesata in funzione della distanza del pixel trasformato dagli altri);
- *Cubic Convolution* (convoluzione cubica): il calcolo avviene come per l'interpolazione bilineare, ma sulla base dei 12 pixel nell'intorno;

e di norma sono a scelta dell'operatore, all'interno del software di georeferenziazione. Il *Nearest Neighbour* è un algoritmo semplice: permette di mantenere inalterati i valori radiometrici, ma col difetto di produrre un'immagine finale in cui risultano leggermente falsate le coordinate degli oggetti. Il *Bilinear Interpolation* introduce invece, nella matrice di uscita, valori radiometrici nuovi non presenti nell'immagine di partenza: questo fatto comporta la creazione di un'immagine in uscita più gradevole dal punto di vista radiometrico ma con un leggero effetto di sfocatura. Il *Cubic Convolution* è un algoritmo di interpolazione con caratteristiche analoghe al precedente, ma in grado di fornire un risultato più dolce in termini di radiometria dell'immagine.

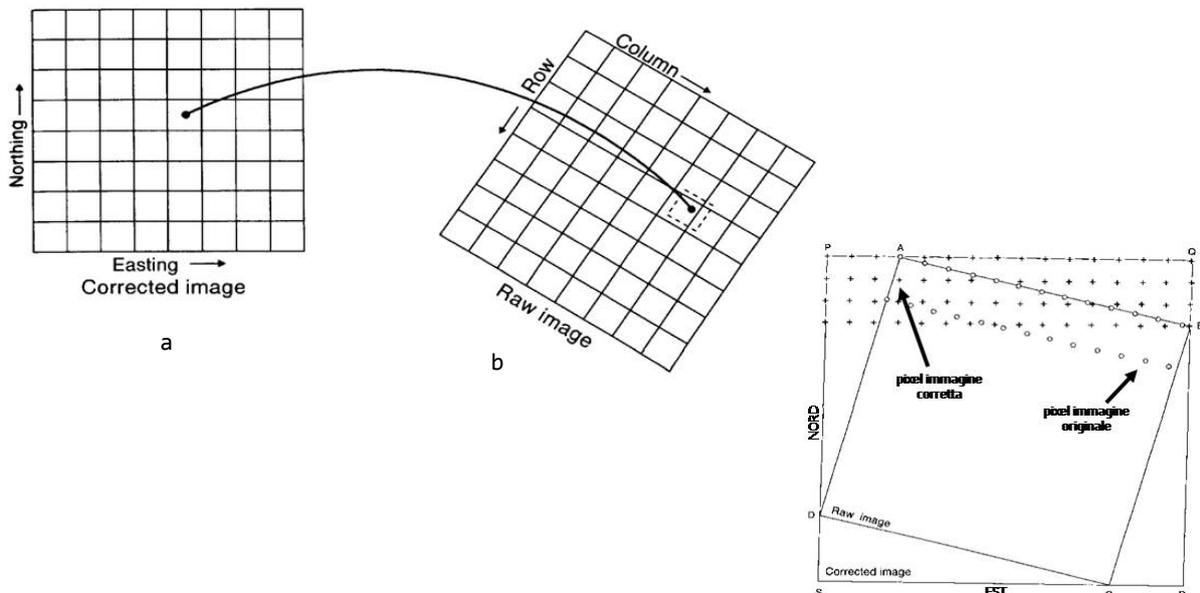


Fig. 3.1 - Schema di come avviene il *resampling* di immagine:

a) matrice vuota, che diventerà l'immagine finale georeferenziata; b) immagine originale.

La nuova immagine georeferenziata normalmente consiste in un file raster con associati i dati di georeferenziazione e possibilmente di geocodifica; esempi molto comuni sono il formato GeoTIFF (TIFF georeferenziato), contenente al suo interno entrambe le informazioni, o per la sola georeferenziazione, un *world file* (con estensione, ad esempio, .tfw o .jgw, a seconda dell'estensione del file immagine) associato all'immagine raster (ad esempio TIFF o JPEG). Il *world file* è un file di testo che riporta 6 valori numerici:

- dimensione del pixel immagine lungo l'asse X;
- 1° termine di rotazione;
- 2° termine di rotazione
- dimensione del pixel immagine lungo l'asse Y;
- coordinata X del vertice in alto a sinistra;
- coordinata Y del vertice in alto a sinistra;

che altro non sono che i parametri della trasformazione affine a 6 parametri. Nel caso di immagine vettoriale, il formato è uno di quelli standard per il vector: .dxf e .dwg, .shp, .tab, ecc. (v. cap. 4.1).

La carta storica, così georeferenziata, è dunque ora, in tutto e per tutto, sovrapponibile ad una carta moderna nel medesimo sistema di riferimento (v. cap. 3.3.).

Un possibile modo di effettuare la georeferenziazione è quello di applicare in successione vari algoritmi di calcolo; in particolare può risultare utile l'applicazione di una trasformazione globale, prima (in modo da eliminare le grosse deformazioni), ed una locale poi (in modo da affinare la georeferenziazione); in questo passaggio, ovviamente, occorre eliminare l'informazione di georeferenziazione assunta dalla carta in seguito all'applicazione della prima trasformazione (nel caso di un file immagine con associato il relativo *world file*, basta eliminare quest'ultimo) (fig. 3.2) (Ceci P., 2007). Esperimenti di questo tipo sono stati eseguiti per le carte storiche del delta del Po; si rimanda al paragrafo 3.1.4.1 per una descrizione più dettagliata.



Fig. 3.2 - Schema dell'applicazione di una trasformazione globale e di una locale in successione.

3.1.3. Mosaicatura

Nel par. 2.1.1.1 si è accennato al problema della mosaicatura nel caso di documenti acquisiti per scansione in più parti; come detto, è possibile eseguire l'operazione:

- sia subito dopo l'acquisizione e prima di successive elaborazioni (Anibaldi Ranco M., Borgogno Mondino E., Garnero G., 2007),
- sia successivamente alla fase di georeferenziazione delle singole parti.

Nel caso di acquisizione del documento mediante tecnica fotogrammetrica, la mosaicatura solitamente viene fatta contemporaneamente alla generazione dell'ortofoto.

Nel primo caso (mosaicatura pre-georeferenziazione) la mosaicatura viene eseguita sulla base del contenuto radiometrico delle varie immagini; applicativi per questa operazione esistono all'interno di vari software di elaborazione delle immagini, che solitamente permettono sia una mosaicatura automatica, sia una manuale. Nel secondo caso (mosaicatura post-georeferenziazione), invece, l'operazione viene fatta unicamente sulla base delle informazioni di georeferenziazione, quindi all'interno di software specifici. Il mosaico in uscita mantiene le informazioni di georeferenziazione e dell'eventuale geocodifica delle immagini in ingresso.

Nell'unione delle scansioni è importante l'omogeneizzazione del colore, per evitare che il mosaico presenti differenze radiometriche; l'operazione può essere fatta sia correggendo preventivamente le differenze di colore sulle singole immagini, mediante appositi sistemi di controllo del colore (analizzati nei capitoli 2.1 e 2.2), sia in fase di mosaicatura, sfruttando algoritmi specifici, come ad esempio quello di *blending*.

Inoltre, l'algoritmo di mosaicatura deve prevedere appositi strumenti per ricavare l'informazione radiometrica nella zona di sovrapposizione (*overlapping area*) tra immagini adiacenti, dove solitamente si evidenzia la differente radiometria delle due immagini. Si possono utilizzare due approcci diversi per affrontare il problema (ERDAS, 2008):

- con linee di taglio (*cutline*): la mosaicatura avviene sulla base delle linee di demarcazione disegnate dall'utente; occorre solo decidere, eventualmente, il valore di *smoothing* e *feathering* nell'area di sovrapposizione;
- senza linee di taglio: la mosaicatura nella zona di sovrapposizione si basa su specifici algoritmi, tra i quali ad esempio:

- *overlay*: viene mantenuta l'immagine che l'utente imposta stare sopra rispetto all'altra;
- *average*: il valore radiometrico del singolo pixel è una media dei valori radiometrici dei pixel corrispondenti sulle due immagini;
- *minimum*: il valore radiometrico del singolo pixel è il minore tra i valori radiometrici dei pixel corrispondenti sulle due immagini;
- *maximum*: il valore radiometrico del singolo pixel è il maggiore tra i valori radiometrici dei pixel corrispondenti sulle due immagini;
- *feather*: il valore radiometrico del singolo pixel deriva da una media pesata dei valori radiometrici dei pixel corrispondenti sulle due immagini, in funzione della distanza del pixel dal bordo dell'area di sovrapposizione.

Ovviamente questi strumenti variano da software a software.

3.1.4. Casi esemplificativi

Le carte storiche esaminate all'interno della presente tesi sono state tutte georeferenziate come primo passo del processo di elaborazione digitale. Date le finalità del lavoro, le carte storiche del delta del Po sono state approfonditamente studiate in primo luogo dal punto di vista di questa fase; a queste si riserverà dunque un'ampia trattazione nel capitolo 3.2, dove si parlerà di analisi delle deformazioni, e nel capitolo 3.3, dove si presenteranno queste come caso di studio per georeferenziazioni "non-standard". Nel paragrafo seguente si mostreranno invece i risultati della georeferenziazione "standard" condotta su di esse.

Come ulteriori casi esemplificativi, nel capitolo si riportano anche le esperienze di georeferenziazione condotte sulle carte di Bologna: l'Icnoscenografia di de' Gnudi e il Catasto Gregoriano.

3.1.4.1. Georeferenziazione standard delle carte del delta del Po

Obiettivo iniziale dello studio della serie di tre carte tardo-cinquecentesche del delta del Po era analizzare le variazioni geomorfologiche dell'area deltizia del fiume, zona soggetta, per sua natura, a forti evoluzioni nel tempo. In particolare il periodo analizzato risulta cruciale per la storia dell'evoluzione del sistema deltizio, in quanto relativo al momento in cui il vecchio sistema lobato moriva e l'attuale nasceva.

La necessità di ricorrere alla georeferenziazione è data anche dal fatto che tra le tre carte esistono molte differenze in termini di dettagli del disegno (tra P e F in particolar modo), nonostante un autore, Fabri, sia comune a tutte e tre i documenti e l'anno di redazione sia lo stesso per le carte P e F, e nonostante le mappe descrivano esattamente gli stessi dettagli morfologici: è dunque necessario conoscere, se possibile, quale sia il documento più veritiero.

Ai fini della georeferenziazione, sono stati utilizzati dei *Linedraw* a ricalco realizzati sulle immagini delle carte originali (fig. 3.3). L'operazione preliminare di riconoscimento di punti caratteristici comuni alle tre carte è risultata di notevole complessità a causa della forte evoluzione del paesaggio nei secoli passati. In questa fase, nascono molti problemi riguardanti il carattere dei punti stessi (vale a dire la precisione planimetrica, la rappresentazione grafica sulle mappe antiche, ecc.); per tale ragione, questi punti sono stati considerati *Landmark* (d'ora in avanti, LMKs) per via della loro minor affidabilità comparata con gli usuali *benchmark* topografici. Dopo un'attenta analisi, è stato riconosciuto sulle mappe un set di circa 80 LMKs comuni, e chiaramente identificabili anche sulla cartografia attuale IGM 1:25.000 (per la carta P e soprattutto per la L, essendo maggiormente limitata l'area rappresentata, il numero di LMKs è risultato inferiore). Ad ogni punto sono state quindi associate coordinate N ed E nel sistema di riferimento UTM-ED50, fuso 33. In aggiunta a questi punti, altri 110 circa sono stati riconosciuti in comune tra le carte storiche, per essere utilizzati come punti ausiliari (*tie-points*, per utilizzare un termine del gergo fotogrammetrico) nella fase di co-registrazione (v. par. 3.3.2.1).

In questo studio sono stati applicati algoritmi sia di tipo globale che di tipo locale, ed in particolare:

- trasformazioni di Helmert e di Helmert robuste;
- trasformazione polinomiale di 1°, 2° e 3° ordine;
- triangolazione;
- *rubber-sheeting*;

- *warping*.

Gli algoritmi di georeferenziazione sono stati utilizzati al fine di effettuare diversi tipi di georeferenziazioni (oltre a quelle standard, anche co-registrazioni e referenziazioni “all’inverso”; v. cap. 3.3), realizzando per ogni mappa differenti prodotti. Di questi prodotti, nel presente paragrafo verranno mostrati i *resampling* delle mappe georeferenziate (secondo differenti algoritmi di calcolo) in modo standard. Nel paragrafo 3.3.1.1 si mostrerà la sovrapposizione di queste mappe georeferenziate sull’IGM attuale.

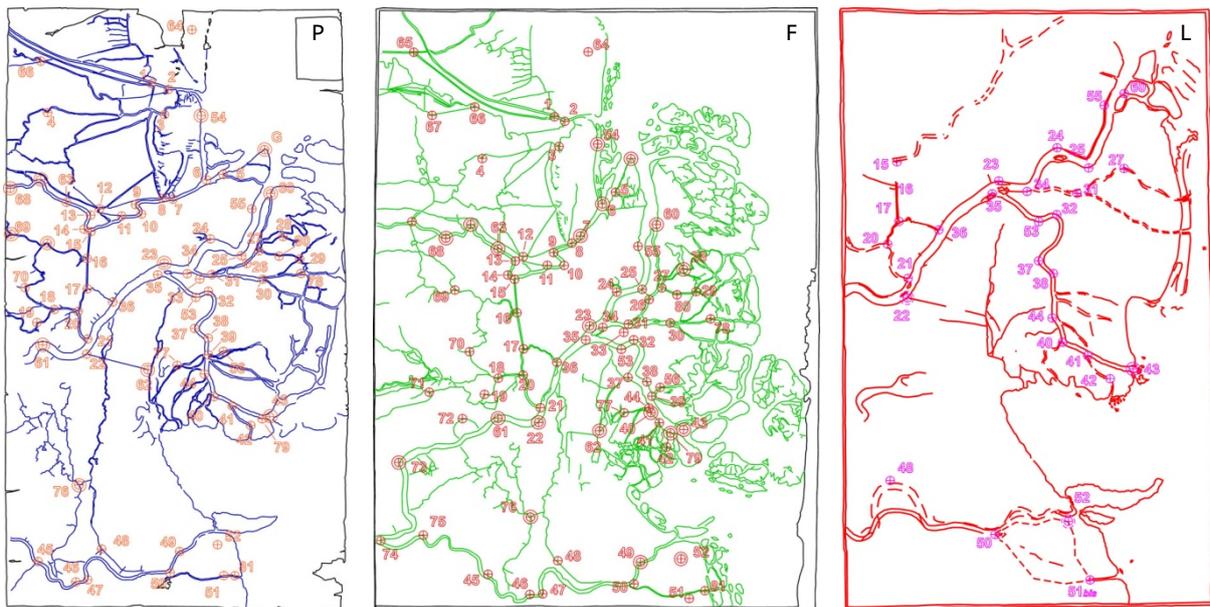


Fig. 3.3 - *Linedraw* essenziale delle carte P (in blu), F (in verde) ed L (in rosso); si evidenziano anche i rispettivi set di LMKs individuati su cartografia attuale.

La trasformazione polinomiale di 3° ordine non è risultata soddisfacente per via di deformazioni esagerate nelle zone perimetrali. La polinomiale di 2° ordine è invece risultata la scelta migliore al fine di restituire i dettagli delle isole deltizie oggi non più esistenti, anche se non si può avere la certezza del loro esatto posizionamento (fig. 3.4). Infatti, come accennato nel par. 3.1.1.1, gli algoritmi delle trasformazioni globali, implementati nei comuni software di georeferenziazione, permettono la trasformazione dei pixel dell’immagine originale in base ai parametri calcolati per un numero ovviamente limitato di LMKs. In questo caso, dunque, non potendo individuare LMKs per le aree costiere oggi non più esistenti, esse non possono contribuire alla determinazione dei parametri della trasformazione, e per lo stesso motivo su di esse non si può avere nemmeno un controllo diretto, a posteriori,

mediante *check-points*. L'errore medio di posizionamento, derivato dall'intero set di LMKs riconosciuti, è risultato circa uguale per le carte P e F (588 m), leggermente inferiore per L (451 m), con variazioni all'interno di un range più limitato per L, e più esteso per P e F (fig. 3.5).

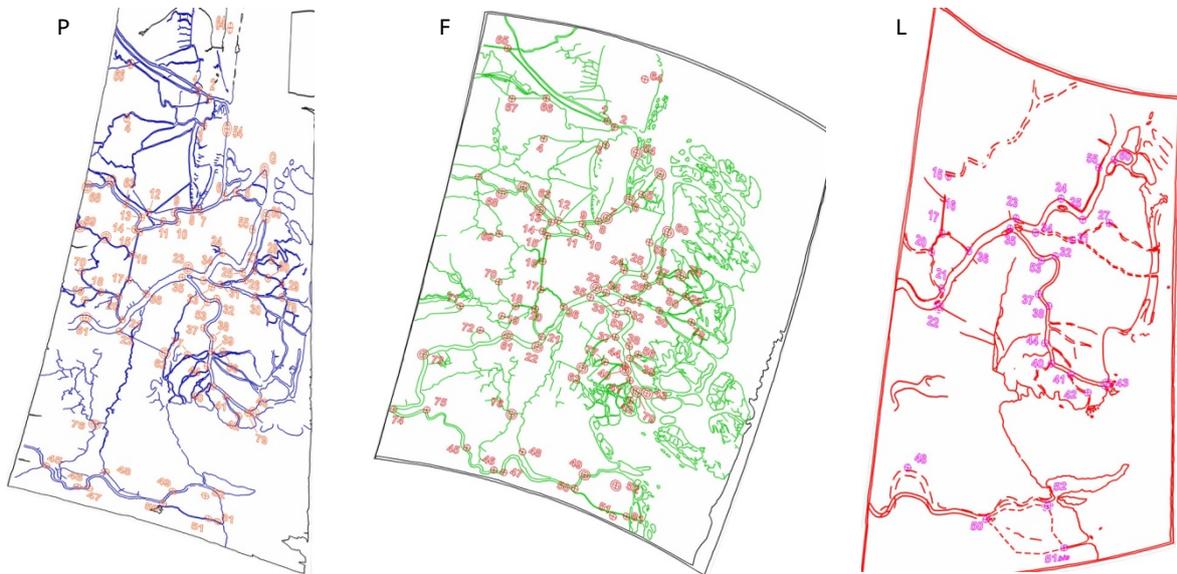


Fig. 3.4 - *Resampling* delle carte P, F e L di fig. 3.3, in seguito a trasformazione polinomiale di 2° ordine.

		CARTA		
		P	F	L
n° punti		72	79	29
residui [m]	range x	7 ÷ 1075	18 ÷ 1251	5 ÷ 808
	range y	46 ÷ 1588	2 ÷ 903	8 ÷ 713
	media x	266	376	273
	media y	373	258	204
RMSerror [m]	range	85 ÷ 1650	18 ÷ 1320	29 ÷ 1068
RMStotal [m]		588	588	451

Fig. 3.5 - Residui e scarto quadratico medio sui GCPs, per una trasformazione polinomiale di 2° ordine (fig. 3.4) applicata alle carte P, F e L.

Visivamente, sulle carte georeferenziate, la linea di costa appare traslata orizzontalmente e ruotata. Per valutare l'effetto di trasformazioni locali (e mantenere fissi i LMKs assegnati), sono stati testati anche algoritmi di triangolazione e *rubber-sheeting* lineare con diversi software. Nello specifico, il primo algoritmo ha fornito una immagine finale di scarsa qualità soprattutto nelle aree periferiche, per via di effetti di taglio. Il secondo algoritmo ha fornito un'immagine visivamente più gradevole, ma col difetto di non rappresentare le aree esterne all'involuppo dei LMKs. La trasformazione di tipo lineare è risultata preferibile rispetto a quella non lineare, che ha comportato deformazioni inaccettabili al centro dell'immagine ricampionata (probabilmente a causa di un numero ancora troppo ridotto di LMKs, per questo tipo di trasformazione). Tuttavia, queste trasformazioni locali non hanno mostrato alcuna informazione aggiuntiva riguardante il processo di redazione della mappa.

Infine, è stata testata una trasformazione di *warping*, che tuttavia non è risultata soddisfacente a causa dell'elevato grado della deformazione indotta dall'algoritmo, nonostante in questo caso ci sia il vantaggio del ricampionamento anche delle aree periferiche (e quindi della loro visibilità sulla carta georeferenziate) (fig. 3.6).

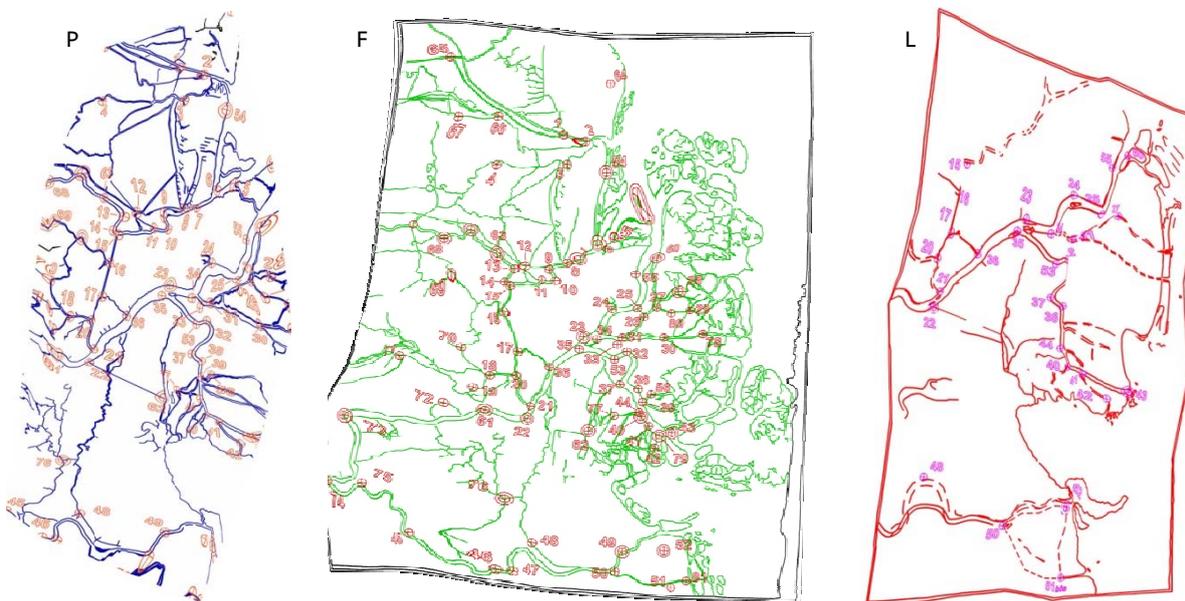


Fig. 3.6 - Esempi di trasformazioni locali applicate alle carte P, F e L; rispettivamente: *rubber-sheeting*, *warping*, triangolazione.

Le stesse trasformazioni locali sono state testate anche sulla immagine ricampionata dopo una trasformazione polinomiale (quindi globale); tuttavia non sono state ricavate informazioni aggiuntive (Bitelli G., Cremonini S., Gatta G., 2009).

3.1.4.2. Georeferenziazione delle carte di Bologna

Come già spiegato nel paragrafo 3.1.1, nella georeferenziazione di cartografia antica un passaggio delicato è l'individuazione dei punti di controllo; una delle ragioni è il fatto che il paesaggio si è evoluto nel tempo, e molti punti sono oggi irriconoscibili, se non addirittura scomparsi. Per questo motivo, la georeferenziazione delle carte di Bologna è stata condotta selezionando i GCPs dopo attenta valutazione di dati provenienti da ricerche storiche sulla città di Bologna, confrontati, fianco a fianco, con gli edifici visibili sulle carte antiche. In particolare il lavoro manuale si è basato su documentazione descrittiva relazionata ai singoli edifici e su mappe prodotte dagli storici relative al periodo di interesse (*Atlante storico delle città italiane*) (Bocchi F., De Angelis C., Dondarini R., Greco G., Morigi Govi C., Ortalli J., Preti A., Passatelli G., Tarozzi F., 1998). Dall'analisi di circa 400 edifici della città, solo una parte di questi è risultata indenne da modifiche sostanziali nel periodo che va dalla redazione della carta fino ad oggi, e di conseguenza è risultata idonea, con un sufficiente livello di certezza, ad essere presa come riferimento in fase di georeferenziazione della carta: è stato dunque preso un punto a rappresentare ognuno di questi edifici. La scelta di quale punto utilizzare (spigoli di case, spigoli di orti e porticati, punti notevoli) deriva in gran parte dalle caratteristiche delle carte: per quanto riguarda la Icnoscenografia, almeno due dei quattro lati di ogni edificio appaiono sempre nascosti a causa della visione scenografica, per quanto riguarda le mappe catastali, in varie parti il supporto risulta lacerato (con conseguente mancanza di una parte del disegno). Questi fattori talvolta hanno anche determinato l'impossibilità di utilizzare certi punti, nonostante risultassero idonei come GCPs. Le coordinate dei GCPs sono state derivate da una base cartografica numerica attuale a scala nominale 1:2.000 (redatta nell'anno 2000 e successivamente aggiornata nel tempo), detta CTC (Carta Tecnica Comunale), realizzata nel sistema cartografico UTM-ED50, fuso 32.

Nel caso della Icnoscenografia, dopo una analisi iniziale, solo 130 punti sono risultati idonei per essere utilizzati come GCPs. Dopo l'esame

dei residui della trasformazione, circa 50 punti sono stati scartati, e di conseguenza 80 è il numero finale di GCPs adottati. Su questi sono state testate diverse trasformazioni (di Helmert, affine, ad elementi finiti, polinomiale); quella polinomiale di 2° ordine, abbinata ad un metodo di ricampionamento bilineare, ha fornito il risultato più soddisfacente (figg. 3.7 e 3.8). Si ricorda che le elaborazioni sulla Icnoscenografia del 1702 sono state eseguite sul rifacimento moderno della mappa originale (ad opera di Lorenzo Confortini), per via della miglior qualità del disegno sulla copia moderna (fattore importante per la successiva fase di elaborazione digitale, v. cap. 4.2), oltre che per i problemi di usura della carta originale.



Fig. 3.7 - Fase di georeferenziazione della Icnoscenografia di Bologna del 1702:
 a) identificazione dei GCPs sulla CTC 1:2.000 di Bologna;
 b) la carta storica georeferenziata secondo trasformazione polinomiale di 2° ordine.

		Icnoscenografia
n° punti		80
residui [m]	range x	0 ÷ 16
	range y	0 ÷ 16
	media x	6
	media y	6
RMSerror [m]	range	1 ÷ 19
RMStotal [m]		10

Fig. 3.8 - Residui della trasformazione polinomiale di 2° ordine applicata alla Icnoscenografia del 1702, sulla base di 80 GCPs selezionati da ricerca storica.

Gli stessi punti inizialmente scelti per georeferenziare la carta del 1702 sono stati usati per le mappe catastali, previo controllo per individuarne eventuali da eliminare o aggiungere, se inerenti edifici modificatisi (scomparsi o sorti) nell'arco temporale 1702-1831; di alcuni punti è stata modificata la posizione, se richiesto dalle caratteristiche del disegno o della carta.

Il Catasto Gregoriano si compone di un set di fogli (ognuno relativo ad un piano) per ogni settore in cui era stata suddivisa la città; esistono inoltre 3 diverse edizioni del Catasto (v. par. 1.2.4.4). La scelta fatta è stata quella di georeferenziare il foglio relativo ad ogni piano terra, e successivamente mosaicare le carte così georeferenziate. Il primo motivo della scelta di effettuare la mosaicatura solo successivamente alla georeferenziazione sta nel fatto che tra fogli adiacenti non vi sono punti in comune.

A titolo di esempio, si riportano nel seguito i risultati ottenuti per due carte relative alla zona più centrale della città (settori VIII e XI), nell'edizione 152bis. Le trasformazioni testate in questo caso sono polinomiali di vario ordine; l'utilizzo di un elevato numero di punti di controllo e i bassi residui sui GCPs e su alcuni CPs, associati al fatto che l'applicazione di tale trasformazione non ha evidenziato fenomeni di distorsione sull'immagine ricampionata (come invece è successo, ad esempio, con le carte del delta del Po), hanno spinto verso l'utilizzo di una polinomiale di 3° ordine. I residui sono risultati più elevati per una trasformazione di 1° ordine, ma comunque abbastanza contenuti in tutti i casi (fig. 3.9). Dei vari punti inizialmente identificati (circa 100 per il foglio VIII, circa 60 per il foglio XI), quelli con residui maggiori sono stati scartati, controllando che fosse mantenuta sempre una distribuzione dei GCPs abbastanza omogenea su tutto il piano della carta: alla fine sono stati selezionati 78 e 55 punti, per il foglio VIII e XI rispettivamente (fig. 3.10). Tra i punti con residui più alti se ne sono evidenziati alcuni critici, in quanto relativi ad edifici per i quali effettivamente è dubbio il fatto che la posizione sia rimasta invariata nel tempo; un esempio è costituito da Madonna della Libertà (fig. 3.10).

E' risultato un residuo medio sui CPs attorno ad 1 m, che si può ritenere un valore accettabile per questa cartografia ottocentesca, considerando che in origine è stata redatta con strumentazione di precisione non paragonabile a quella degli attuali strumenti, che durante la sua vita ha sicuramente subito deformazioni del supporto, e che infine oggi viene georeferenziata in riferimento a basi cartografiche a scala nominale minore, con un proprio errore intrinseco.

foglio (piano terra)		GCPs		CPs	
		VIII	XI	VIII	XI
n° punti		78	55	10	10
residui [m]	range x	0 ÷ 2,4	0 ÷ 1,4	0 ÷ 1,9	0 ÷ 2,0
	range y	0 ÷ 1,9	0 ÷ 1,3	0 ÷ 1,4	0 ÷ 1,8
	media x	0,7	0,6	0,9	1,0
	media y	0,6	0,5	0,5	0,6
RMSerror [m]	range	0,3 ÷ 2,4	0,2 ÷ 1,5	0,4 ÷ 2,4	0,3 ÷ 2,0
RMStotal [m]		1,1	0,9	1,3	1,5

Fig. 3.9 - Residui (su GCPs e su CPs) della trasformazione polinomiale di 3° ordine applicata ai fogli VIII e XI (Catasto Gregoriano, ed. 152bis, piani terra) sulla base di GCPs selezionati da ricerca storica sugli edifici.

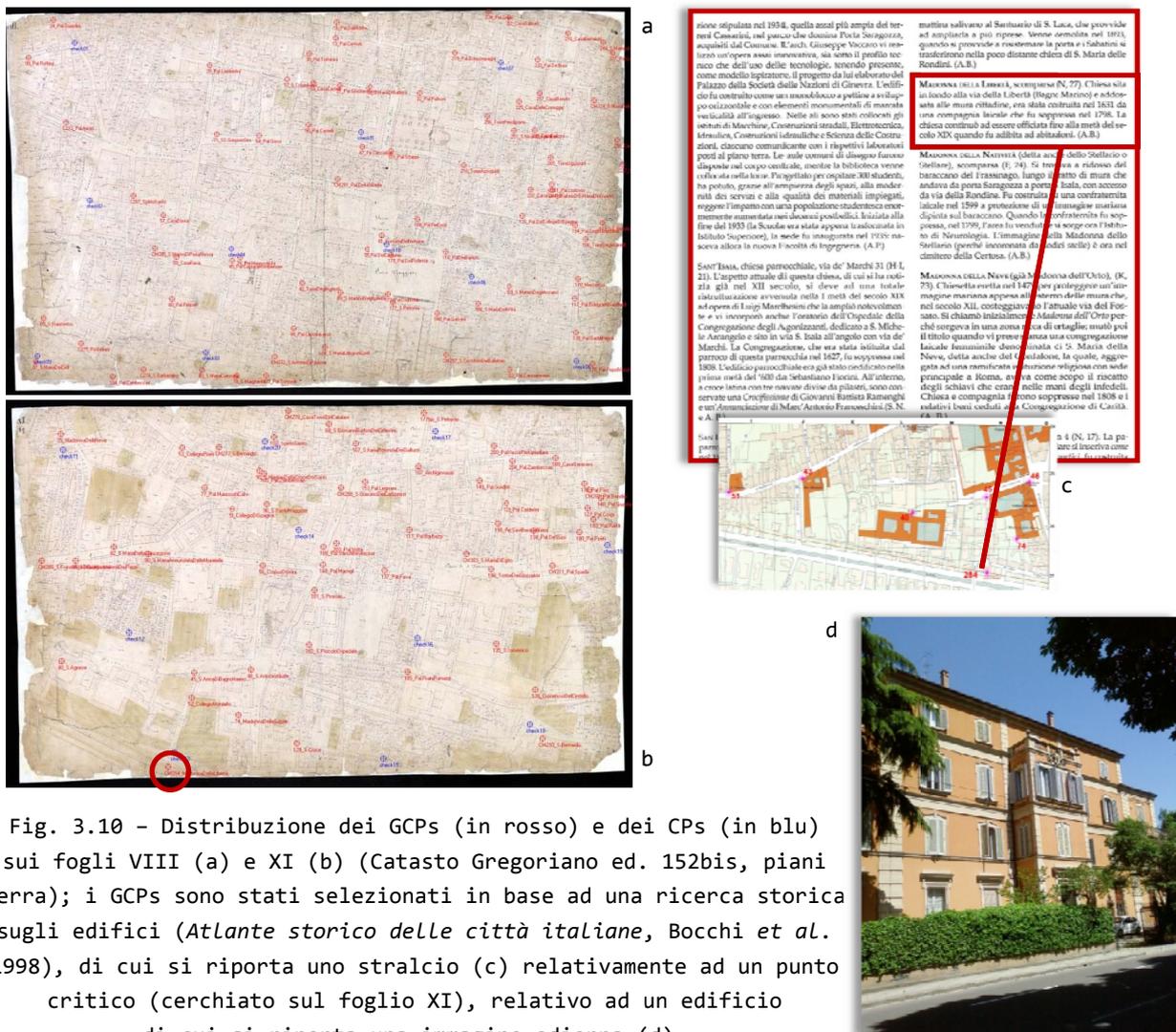


Fig. 3.10 - Distribuzione dei GCPs (in rosso) e dei CPs (in blu) sui fogli VIII (a) e XI (b) (Catasto Gregoriano ed. 152bis, piani terra); i GCPs sono stati selezionati in base ad una ricerca storica sugli edifici (*Atlante storico delle città italiane*, Bocchi et al. 1998), di cui si riporta uno stralcio (c) relativamente ad un punto critico (cerchiato sul foglio XI), relativo ad un edificio di cui si riporta una immagine odierna (d).

E' stata testata anche la georeferenziazione dei vari piani, per la quale si mostra l'esempio relativo al foglio VIII. Questa è avvenuta con polinomiale di 3° ordine (eccetto quando il numero dei punti, al crescere dei piani, è diventato troppo piccolo per effettuare questo tipo di trasformazione), prendendo come base di riferimento il foglio di piano terra corrispondente, già georeferenziato (fig. 3.11). Sono due le ragioni principali che hanno portato a scegliere questa come base di riferimento:

- l'obiettivo era quello di far sovrapporre al meglio i fogli dei vari piani tra loro;
- con l'aumentare del livello di piano, diminuiscono gli edifici presenti, per cui ne risulta più facile il riconoscimento rispetto al corrispondente piano terra piuttosto che rispetto alla cartografia attuale.

La sovrapposizione tra i vari piani è risultata buona (v. par. 3.3.1.1).



Fig. 3.11 - Stralci dei *resampling* dei fogli di piano (da -1° al 6°, settore VIII del Catasto Gregoriano ed. 152bis) in seguito a georeferenziazione con polinomiale; in basso l'analogo stralcio, da CTC 1:2000 (zona: Piazza Maggiore).

Come esempio si mostra la mosaicatura eseguita sui due fogli relativi al piano terra: l'obiettivo del progetto è mettere a disposizione in un archivio on-line il mosaico relativo al piano terra, mentre i fogli dei piani superiori e di quello inferiore potrebbero essere inseriti come livello autonomo. La mosaicatura è stata eseguita impostando una linea di taglio in corrispondenza del perimetro del disegno di uno dei due fogli; infatti, ogni foglio presenta un margine esterno al disegno dovuto in parte alla scansione (per il fatto che i documenti originali non hanno lati perfettamente perpendicolari tra loro) e in parte al ricampionamento in seguito alla georeferenziazione (fig. 3.12).

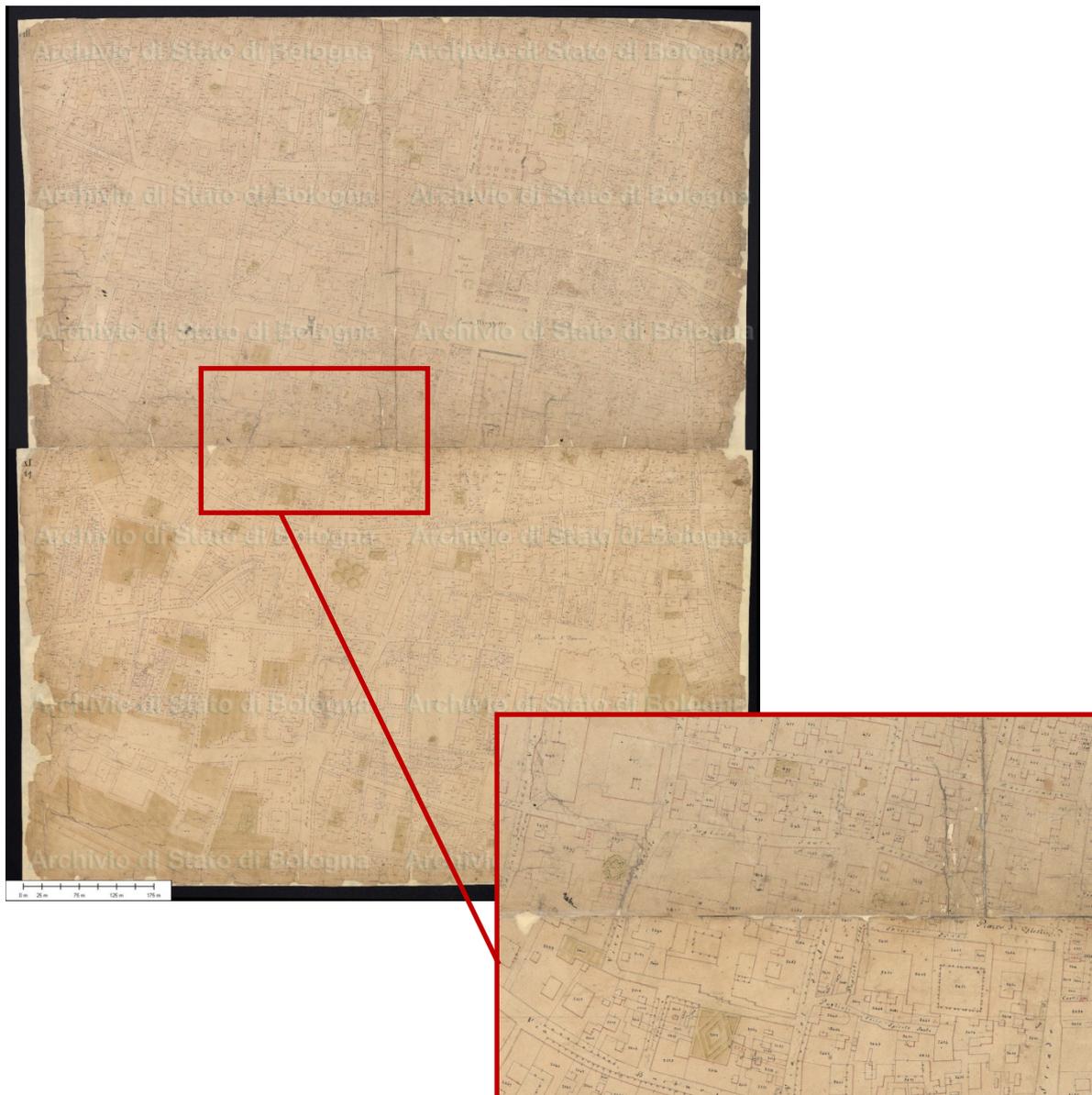


Fig. 3.12 - Mosaico dei fogli VIII e XI (Catasto Gregoriano, ed. 152bis, piani terra), georeferenziati con polinomiale di 3° ordine.

3.2. ANALISI DELLE DEFORMAZIONI

Lo studio completo di una carta storica solitamente prende in esame anche l'**analisi delle deformazioni**. Questa viene condotta al fine di individuare quelle deformazioni presenti in carta e che possono essere dovute a:

- supporto analogico deformato;
- antiche modalità di rilievo topografico;
- tipo di trasformazione cartografica adottata per la redazione della carta.

La deformazione registrata su una carta antica è dunque l'insieme di tutti questi contributi, che non sono immediatamente scindibili; il primo, comunque, deve essere ridotto al minimo per quanto possibile, ponendo attenzione a mantenere il supporto piano durante la fase di acquisizione. Relativamente alla presenza e all'entità degli altri due, si possono fare solo ipotesi, sulla base di documenti e studi storici. Essi risultano quindi i meno controllabili. I metodi di rilievo adottati anticamente sono spesso sconosciuti (in quanto spesso manca una documentazione che attesti quali siano stati gli strumenti adottati e le modalità operative seguite), e analisi di propagazione dell'errore possono essere fatte solo in maniera semplificativa (v. par. 1.1.4). In secondo luogo, la legge di rappresentazione cartografica adottata per le carte antiche (cioè la legge che regola il passaggio da punti sul terreno a punti sul piano della carta) risulta spesso sconosciuta, e soprattutto non è detto che sia tale da comportare errori accettabili secondo le moderne convenzioni (Baiocchi V., Lelo K., 2005). Questo è particolarmente vero per le carte pre-geodetiche, un esempio delle quali è costituito dalle carte del delta del Po esaminate all'interno della presente tesi.

A questo tipo di deformazioni, registrate in carta, se ne possono aggiungere altre, derivanti dall'algoritmo di calcolo della trasformazione di georeferenziazione; di queste si parlerà diffusamente nel paragrafo 3.2.3.

L'analisi delle deformazioni si basa sul confronto diretto con la cartografia numerica moderna, supposta priva di deformazioni (ovviamente cosa non vera, in quanto ogni carta ha in sé un errore intrinseco, che ne caratterizza la precisione, ed è espresso mediante l'errore di graficismo); tale confronto si attua con la fase di georeferenziazione della carta. L'analisi dei residui in uscita dal calcolo di compensazione

per la trasformazione geometrica permette infatti di avere una stima degli errori e delle deformazioni registrati in mappa (v. par. 3.2.2). Esistono anche software specificatamente ideati per lo studio di tali deformazioni; nel paragrafo seguente (3.2.1) se ne mostrerà uno, diffuso nel campo di studio della cartografia storica. Il software è stato ideato per avere un'interfaccia *user-friendly*, e permettere anche agli storici senza un background tecnico particolare di analizzare in modo semplice la geometria delle carte antiche.

3.2.1. L'analisi delle deformazioni con un software dedicato

Ancor prima della fase di georeferenziazione vera e propria, la visualizzazione delle deformazioni presenti in carta può avvenire in modo semplice e immediato mediante un programma software come *MapAnalyst* (MapAnalyst, 2005) (Jenny B., 2006) (Jenny B., Weber A., Hurni L., 2007). Questo consente la sovrapposizione di un reticolo georeferenziato, che di norma appare deformato, sulla carta storica, oltre alla possibilità di evidenziare i vettori o i cerchi d'errore (risultato della fase di calcolo dei parametri di trasformazione) sui singoli GCPs, e le isolinee di scala o di rotazione (linee ad ugual fattore di scala o ad ugual angolo di rotazione, rispettivamente), per mostrare le variazioni locali di scala e rotazione. Questa visualizzazione deriva dal calcolo dei parametri di trasformazione geometrica; le trasformazioni implementate all'interno del software sono: di Helmert, di Helmert robuste, affine a 5 o 6 parametri. Il calcolo dei parametri viene effettuato, come in una normale georeferenziazione, sulla base di punti di controllo che devono essere ritrovati sulla mappa antica (detta *OldMap*) e su una mappa di riferimento (detta *NewMap*); in alternativa le coordinate dei GCPs possono essere importate attraverso un file di testo. A partire dalla versione 1.3 del software, è possibile selezionare i punti di controllo moderni di riferimento direttamente su *OpenStreetMap*, un server che nasce da un progetto di collaborazione per la creazione di una carta liberamente editabile dell'intero globo (per il momento disponibile on-line per gran parte dell'Europa, del Nord America e di molte altre parti del mondo). La carta è stata creata a partire da dati GPS, fotogrammetrici ed altre sorgenti gratuite. Per utilizzare *OpenStreetMap* come *NewMap* all'interno di *MapAnalyst* è necessario un collegamento Internet veloce. La carta di

OpenStreetMap è in proiezione di Mercatore, un tipo di proiezione che induce distorsioni elevate, crescenti verso le zone polari; per compensare queste distorsioni, il software, in automatico, riproietta i GCPs secondo una proiezione cilindrica trasversa equivalente, prima di calcolare il grigliato georeferenziato e le altre visualizzazioni della deformazione. Questa proiezione induce deformazioni inferiori alla prima, ma non è comunque idonea per lo studio di carte antiche che riproducono vaste aree, come i continenti o l'intero globo; in questi casi, infatti, è meglio utilizzare una *NewMap* esterna, con un sistema di riferimento simile a quello della *OldMap*. In tutti gli altri casi, l'utilizzo della *OpenStreetMap* consente di non necessitare più di una carta raster moderna di riferimento, con risultati di sufficiente qualità per molti tipi di analisi (fig. 3.13).

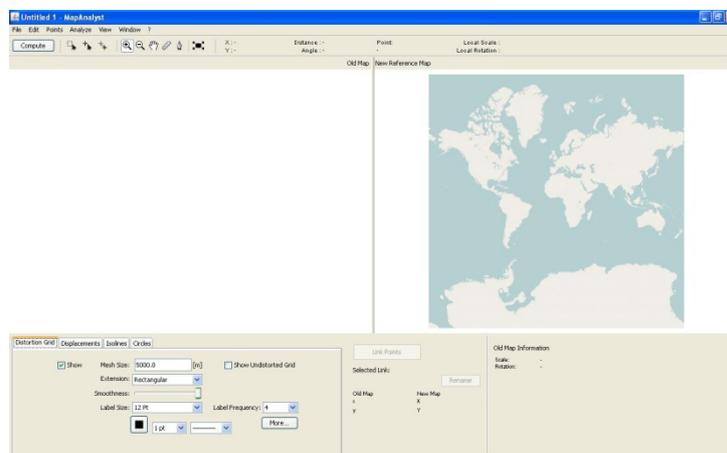


Fig. 3.13 – Schermata di apertura del software *MapAnalyst* (v. 1.3.7); a sinistra la finestra per la visualizzazione della mappa antica, a destra la finestra per la visualizzazione della mappa di riferimento (in questo caso la *OpenStreetMap*).

Nella versione più recente del software (1.3), è possibile la sovrapposizione, assieme al grigliato distorto, di uno analogo non distorto (rototraslato con una trasformazione di Helmert, ma senza l'applicazione delle distorsioni locali). Inoltre è anche possibile applicare un fattore di esagerazione per evidenziare meglio le piccole distorsioni locali (Jenny B., 2010).

Essendo un software ideato per la sola visualizzazione delle deformazioni, *MapAnalyst* non consente l'applicazione dei parametri di trasformazione alla carta antica ed il successivo ricampionamento dell'immagine.

Nei paragrafi seguenti si riportano, a titolo di esempio, le visualizzazioni delle deformazioni sulle carte analizzate all'interno della presente tesi, ottenute mediante il programma software suddetto.

3.2.1.1. Analisi delle deformazioni delle carte del delta del Po

Le carte del delta del Po sono documenti pre-geodetici, probabilmente redatti senza utilizzo di leggi cartografiche alla base; a riprova di ciò non è presente alcun reticolo geografico di meridiani e paralleli, né alcun riferimento, eccezion fatta per la scala e l'indicazione del nord geografico (almeno per quanto riguarda le carte F e L). A ciò si aggiunga la difficoltà che sorge nel tentativo di analizzare gli errori commessi durante il rilievo, accidentalmente o volontariamente, o connessi alla precisione strumentale e ai metodi di rilievo adottati, di cui purtroppo poco conosciamo: le uniche informazioni possono essere dedotte dal manuale di Ottavio Fabri, o di autori contemporanei, e dalle indicazioni presenti sui cartigli delle carte (v. par. 1.2.4.1). Per queste carte risulta quindi più che mai interessante la visualizzazione del pattern di deformazione registrato in carta. Quella più immediata deriva dal software *MapAnalyst*, attraverso la sovrapposizione alle carte antiche del reticolo georeferenziato, assieme alla visualizzazione della variazione di scala sulla carta e alla rotazione angolare rispetto al nord.

Si riportano dunque le tre carte con sovrapposto il reticolo georeferenziato deformato (fig. 3.14). Le isolinee di scala (per le quali i valori di intervallo e di raggio di influenza sono impostabili dall'utente) aiutano molto nel comprendere le zone di maggior deformazione, da imputarsi ad errori di rilievo, disegno in carta o mancanza di leggi cartografiche alla base, supponendo nulla la deformazione del supporto (probabilmente cosa non vera, ma di entità molto inferiore rispetto alla deformazione insita nel disegno della carta, e dunque trascurabile). Il raggio di influenza influisce sull'aspetto delle isolinee: un piccolo raggio è adatto per enfatizzare le piccole variazioni di scala, un raggio elevato genera invece isolinee maggiormente smussate. In accordo con le isolinee si associano i vettori dei residui sui singoli GCPs, che oltre ad indicare l'entità del residuo (proporzionale al modulo del vettore) ne indicano la direzione.

Si può quindi notare che la carta F mostra due zone di forte anomalia, rispettivamente nei lobi nord e sud della zona costiera; effettivamente anche da analisi visiva delle immagini originali si nota che queste zone

sono diversamente rappresentate in carta F rispetto invece a P o L. La carta P mostra un reticolo diversamente deformato nella parte nord rispetto a quella sud, ed in particolare le misure riportate in carta risultano dilatate nella parte nord e compresse in quella a sud; il fatto è evidenziato anche dai valori delle isolinee di scala, in quanto il fattore di scala aumenta (la scala diminuisce) da nord verso sud. Questa caratteristica della carta P è ben visibile anche dall'immagine ricampionata in seguito alla georeferenziazione (v. par. 3.1.4.1, fig. 3.4). Infine, la carta L ha deformazioni generalmente meno marcate (da notare che in figura 3.14 l'intervallo di variazione delle isolinee di scala è inferiore rispetto a P e F).

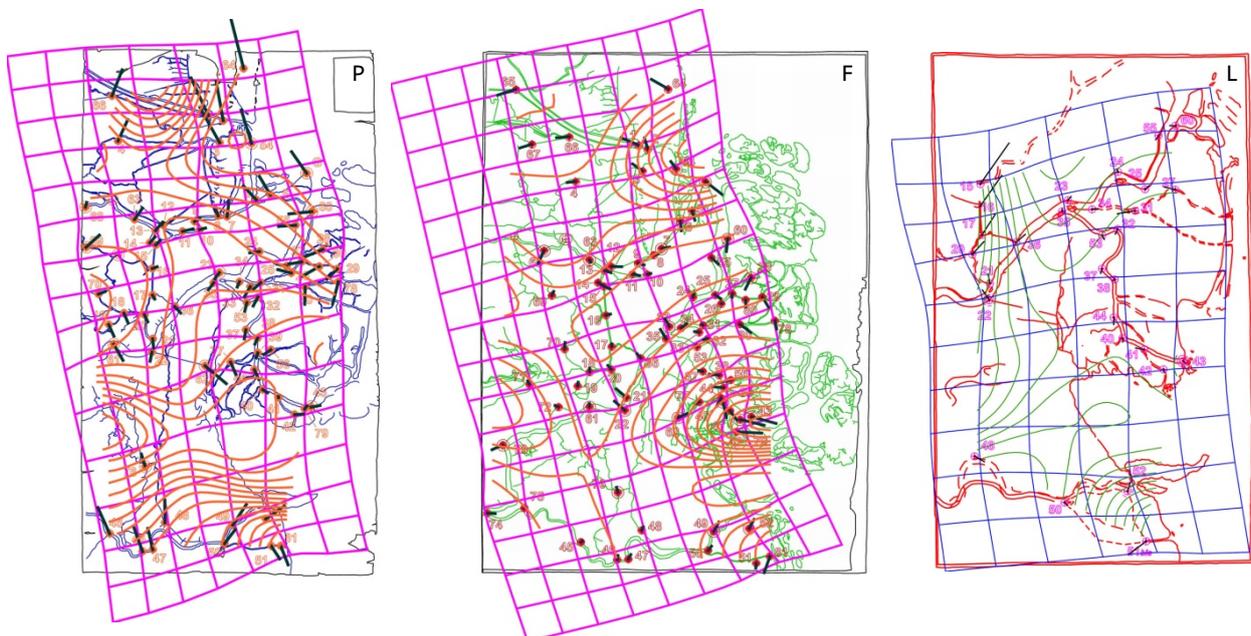


Fig. 3.14 - Carte del delta del Po (P in blu, F in verde, L in rosso) con sovrapposto il reticolo UTM-ED50 deformato (in fucsia su P e F, in blu su L) a *mesh* di 2,5 km; sono evidenziati anche i GCPs utilizzati nella trasformazione (di Helmert, con stimatore di Hampel) con i relativi vettori d'errore (in nero) e le linee ad ugual fattore di scala (in arancione per P e F, in verde per L) con intervallo di variazione pari a 400 per P e F e 250 per L, e raggio di influenza nelle trasformazioni locali pari a 10.000 m (software: *MapAnalyst*).

In tabella (fig. 3.15) vengono riportati i valori di angolo di rotazione e di variazioni (estreme e medie) della scala, calcolati sulla base degli stessi punti utilizzati in fase di georeferenziazione. I valori, ovviamente, cambiano leggermente in base al tipo di algoritmo scelto per il calcolo; in questo caso i valori migliori derivano da una trasformazione di Helmert robusta, con stimatore di Hampel.

		CARTA trasformata con Helmert-Hampel		
		P	F	L
n° punti		72	79	29
fattore di scala	range	16.300 ÷ 10.500	14.300 ÷ 10.300	13.300 ÷ 11.200
	medio	12.000	10.600	11.700
	calcolato sulla base della scala grafica	-	10.500	11.000
angolo di rotazione [°] antiorario		8,9	15,7	3,6
RMSerror [m]	medio	694	419	281

Fig. 3.15 - Valori di fattore di scala ed angolo di rotazione calcolati in *MapAnalyst* (trasformazione di Helmert con stimatore di Hampel) per le carte del delta del Po, sulla base degli stessi punti utilizzati in fase di georeferenziazione; per confronto, si riporta anche il fattore di scala calcolato in base alla scala grafica (se presente) disegnata sulla carta e le dimensioni fisiche del supporto.

In linea generale si può affermare che la carta F mostra una rotazione, rispetto al nord, molto più marcata rispetto invece alla P o la L, che assomigliano maggiormente tra loro. La differenza di angolo di rotazione tra F e P si aggira sui 7°, tra F e L sui 14°. Inoltre, si nota che il fattore di scala varia in modo più omogeneo in L (il range di variazione è più contenuto) rispetto invece a F o a P. Si può anche notare che il fattore di scala medio calcolato dal software rispetta abbastanza bene quello calcolato sulla base della scala grafica (presente in F e L) disegnata sulla carta e le dimensioni fisiche del supporto (note, e che hanno permesso di risalire alla dimensione fisica della scala grafica).

L'errore medio di posizionamento (RMSerror) risulta in linea con i valori in uscita dalla fase di georeferenziazione con polinomiale di 2° ordine (v. par. 3.1.4.1, fig. 3.5), cioè più alto per le carte P e F che non per L; la carta L sembrerebbe quindi più precisa e attendibile, ma bisogna anche tener conto del fatto che l'estensione della zona ivi cartografata è molto inferiore rispetto a quella cartografata nelle altre due, per cui tendenzialmente inferiori saranno gli errori commessi nel rilievo e nell'assemblaggio dei dati di campagna (Bitelli G., Cremonini S., Gatta G., 2009).

Per quanto riguarda la rotazione, che per tutte e tre le carte avviene in senso antiorario (rispetto al moderno nord cartografico, preso a riferimento per la georeferenziazione), è da evidenziare che questa è una caratteristica comune a molte carte dell'epoca. Sulla base dei dati riportati da Leon battista Alberti nei suoi *Ludi matematici* e nella *Descriptio Urbis Romae* (dove descrive il metodo dell'intersezione in avanti (v. par. 1.1.4), facendo stazione agli estremi di una base misurata e collimando un certo numero di punti emergenti della città, come torri, campanili e cupole), uno studio eseguito recentemente da Luigi Vagnetti, di confronto della mappa descritta dall'Alberti con una moderna carta IGM, ha evidenziato una rotazione in senso antiorario della mappa antica rispetto all'attuale. Tale rotazione, compresa tra i 5° e i 12°, è imputabile soprattutto all'imprecisione nella determinazione dei punti cardinali, oltre che all'imprecisione del metodo di intersezione in avanti, per punti che vengono visti dalla base sotto angoli troppo piccoli (in quanto si trovano allineati ad essa). La sola variazione del nord magnetico dal Seicento ad oggi, infatti, non giustifica un tale valore di rotazione rispetto al nord cartografico del sistema di riferimento utilizzato (Gaspar J.A., 2009).

3.2.1.2. Analisi delle deformazioni delle carte di Bologna

Analoga analisi delle deformazioni è stata condotta per le carte di Bologna. Per quanto riguarda la Icnoscenografia del 1702, il passaggio, a rigore, non è del tutto corretto, in quanto la carta esaminata non è il documento originale, bensì un rifacimento moderno (si ribadisce che il fine dello studio di tale carta era la creazione di un modello tridimensionale storico a partire dal disegno); infatti, per quanto il rifacimento sia fedele al documento originale, non compaiono qui quelle imperfezioni dovute all'assemblaggio dei fogli, e che sicuramente comporterebbero l'apparizione di deformazioni localizzate aggiuntive. Tuttavia l'analisi delle deformazioni risulta comunque interessante, per capire se esistono aree cartografate più critiche delle altre (dal punto di vista della qualità metrica), al fine di successive applicazioni.

La figura 3.16 mostra l'effetto dell'applicazione, alla Icnoscenografia, di una trasformazione di Helmert con stimatore di Hampel, mediante sovrapposizione del reticolo georeferenziato (nel sistema cartografico UTM-ED50, come visibile dalle coordinate associate al grigliato) che appare deformato. I punti evidenziati in figura sono gli

stessi GCPs utilizzati in fase di georeferenziazione; come si può notare, il reticolo deformato non copre l'intera mappa, in quanto al di fuori di quello non vi sono GCPs selezionabili dalla documentazione storica utilizzata per l'individuazione degli edifici rimasti invariati dal Settecento ad oggi. Il reticolo georeferenziato è ruotato rispetto alla mappa in accordo con l'orientamento di questa, che è circa da N-NW verso S-SE (Bitelli G., Gatta G., 2008).

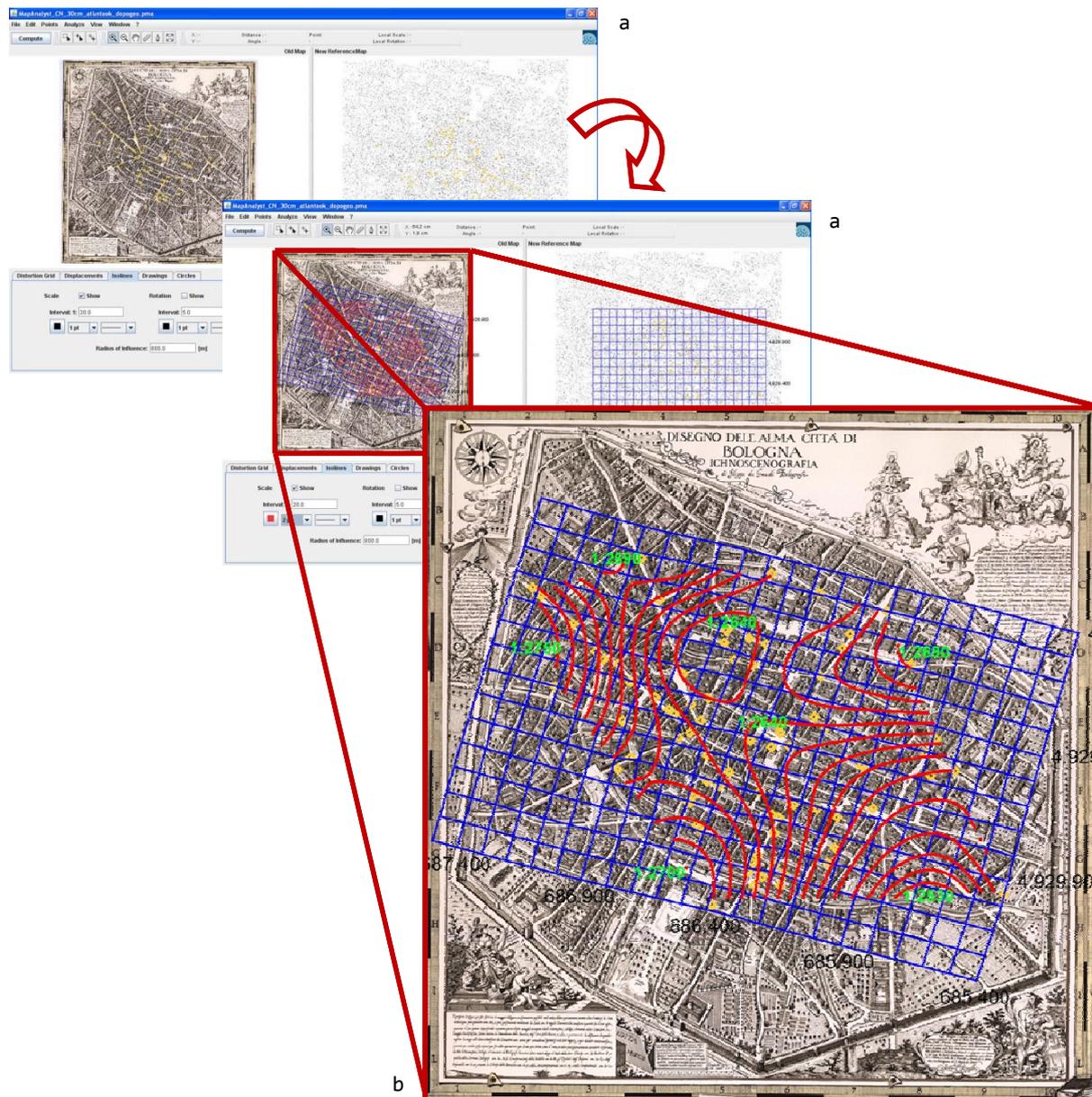


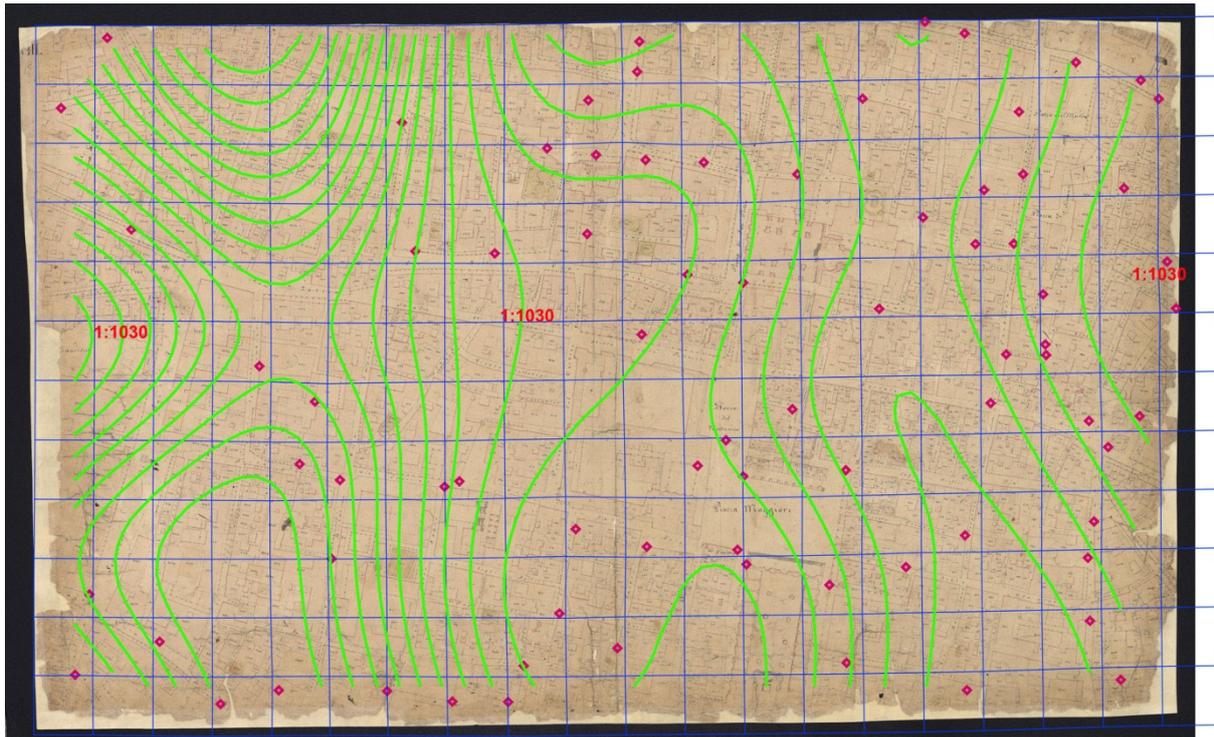
Fig. 3.16 - Analisi delle deformazioni della Ichnoscenografia del 1702 (software *MapAnalyst*): a) due schermate del software (nella finestra di sinistra la *OldMap*, in quella di destra, come *NewMap*, la moderna CTC 1:2.000); b) risultato: la Ichnoscenografia con sovrapposto (in blu) il reticolo UTM-ED50, a *mesh* di 100 m, deformato (sono visibili le coordinate cartografiche), i GCPs utilizzati nella trasformazione (in giallo), le linee di scala con passo di variazione pari a circa 12,5 (in rosso) e alcuni valori della scala (in verde).

In tabella (fig. 3.17) si riportano i valori di fattore di scala ed angolo di rotazione; l'errore medio di posizionamento è leggermente superiore a quello ottenuto in fase di georeferenziazione (v. par. 3.1.4.2, fig. 3.8) per via del differente tipo di trasformazione (in quel caso si trattava di una polinomiale di 1° ordine).

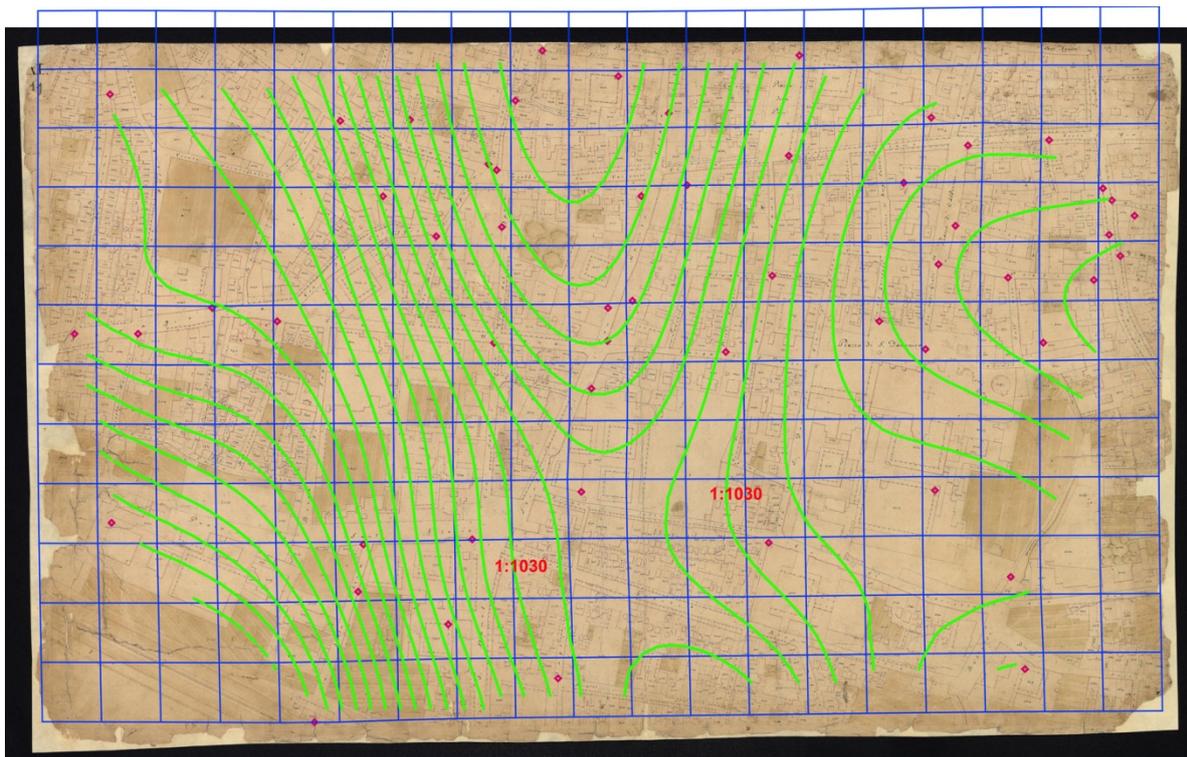
		CARTA trasformata con Helmert-Hampel
		Icnoscenografia
n° punti		80
fattore di scala	range	2.750 ÷ 2.530
	medio calcolato	2.660
	calcolato sulla base della scala grafica	2.500
angolo di rotazione [°] antiorario		164,4
RMSerror [m]	medio	17,2

Fig. 3.17 - Valori di fattore di scala ed angolo di rotazione calcolati in *MapAnalyst* (trasformazione di Helmert con stimatore di Hampel) per l'Icnoscenografia del 1702, sulla base degli stessi punti utilizzati in fase di georeferenziazione; per confronto, si riporta anche il fattore di scala calcolato in base alla scala grafica disegnata sulla carta e le dimensioni fisiche del supporto.

Per quanto riguarda le mappe catastali di Bologna, a titolo di esempio si riportano i risultati dell'analisi effettuata sui fogli VIII e XI dell'edizione 152bis, piani terra, utilizzando una trasformazione di Helmert e, come GCPs, tutti quelli inizialmente selezionati per la georeferenziazione. In figura 3.18 si può notare che il reticolo georeferenziato (sempre rispetto al sistema cartografico UTM-ED50) è praticamente indeformato, e quasi per nulla ruotato (è vero che le mappe sono state redatte con orientamento secondo il nord magnetico, ma è anche vero la georeferenziazione è avvenuta sulla base del nord reticolato, che presenta un certo angolo, variabile nel tempo, rispetto al primo: la valutazione della correttezza dell'orientamento delle carte non è quindi così banale). Lo stesso viene ribadito dalle isolinee di scala, che dimostrano una scala quasi costante su tutto il piano della carta (anche se leggermente inferiore al valore dichiarato, di 1:1.000, cosa che potrebbe essere dovuta ad una contrazione del supporto negli anni); il loro andamento può essere reso più marcato diminuendo il valore del raggio di influenza nelle trasformazioni locali.



VIII



XI

Fig 3.18 - Fogli VIII e XI, piani terra, del Catasto Gregoriano (ed. 152bis) con sovrapposto (in blu) il reticolo UTM-ED50, a *mesh* di 50 m, deformato secondo trasformazione di Helmert; in fucsia i GCPs utilizzati; in verde le isolinee di scala (ad intervallo di variazione pari quasi ad 1, e raggio di influenza nelle trasformazioni locali pari a 400 m) e in rosso il valore medio della scala.

In tabella (fig. 3.19) si riportano i consueti valori di fattore di scala ed angolo di rotazione; l'errore medio di posizionamento è superiore a quello ottenuto in fase di georeferenziazione (v. par. 3.1.4.2, fig. 3.9) per via del differente tipo di trasformazione: in questo caso si è adottata una trasformazione conforme, mentre per la fase di georeferenziazione è stata utilizzata una polinomiale di 3° ordine, che è una trasformazione molto più sofisticata.

		CARTA trasformata con Helmert	
		VIII	XI
n° punti		78	55
fattore di scala	range	1.050 ÷ 1.020	1.050 ÷ 1.010
	medio calcolato	1.030	1.030
	dichiarato	1.000	1.000
angolo di rotazione [°] antiorario		0,50	0,41
RMSerror [m]	medio	2,4	2,1

Fig. 3.19 - Valori di fattore di scala ed angolo di rotazione calcolati in *MapAnalyst* (trasformazione di Helmert) per i fogli VIII e XI del Catasto Gregoriano ed. 152bis, piani terra, sulla base degli stessi punti utilizzati in fase di georeferenziazione; per confronto, si riporta anche il fattore di scala dichiarato.

3.2.2. Visualizzazione dei residui della georeferenziazione

Come detto all'inizio del capitolo, l'analisi dei residui di georeferenziazione condotta sui GCPs, o meglio sui CPs, consente la stima degli errori e l'analisi delle deformazioni registrate in mappa. Come già spiegato nel cap. 3.1, l'analisi dei residui sui GCPs è possibile solo per le trasformazioni globali, utilizzando un numero di punti superiore al necessario, mentre nelle trasformazioni locali i GCPs vengono mantenuti fissi in locazione, non essendo ridondante l'informazione da essi fornita. L'analisi sui CPs è invece possibile sia per trasformazioni globali sia per trasformazioni locali, quando il software permette la gestione di CPs (questo non avviene per gli usuali software di *morphing* e *warping*, d'altra parte non ideati per scopi metrici).

Nel paragrafo 3.1.1.3 si è discusso dei parametri statistici indici della qualità della trasformazione, valutati sulla base dei residui; in questo paragrafo si analizzerà in quali modi sia possibile visualizzare, in maniera intuitiva e di immediata comprensione, tali residui. Per mostrare alcuni possibili tipi di visualizzazione, vengono esaminate le carte del delta del Po: per queste, infatti, il metodo è risultato molto utile, al fine di analizzare gli errori in esse registrati e per effettuare un confronto reciproco e con la realtà attuale. Nel seguito si mostrano:

- grafico dei residui;
- mappa dei residui;
- modello tridimensionale dei residui e mappa a curve di livello.

In particolare le carte esaminate sono P e F, in quanto si tratta di documenti coevi (entrambi riportano come indicazione di redazione l'anno 1592) ma differenti nella rappresentazione del territorio costiero; in questo caso risulta dunque cruciale trovare un metodo per capire quale delle due realtà rappresentate sia la più fedele alla situazione geomorfologica del delta di allora. Un aiuto può derivare dalla visualizzazione dei residui della georeferenziazione, in questo caso quelli forniti dalla trasformazione polinomiale di 2° ordine (par. 3.1.4.1, fig. 3.5).

3.2.2.1. Grafico dei residui

Il tipo più semplice di rappresentazione dei residui è un grafico a barre (fig. 3.20) riportante, per ogni LMKs (individuato da un numero progressivo), il relativo valore di *RMSerror*. Il grafico non dà informazioni sulla locazione dei LMKs (è monodimensionale), ma è utile per avere una panoramica dell'entità dei residui, e individuare in modo veloce possibili *outliers*. Affiancando i due grafici, è inoltre possibile un confronto diretto tra le due mappe in oggetto.

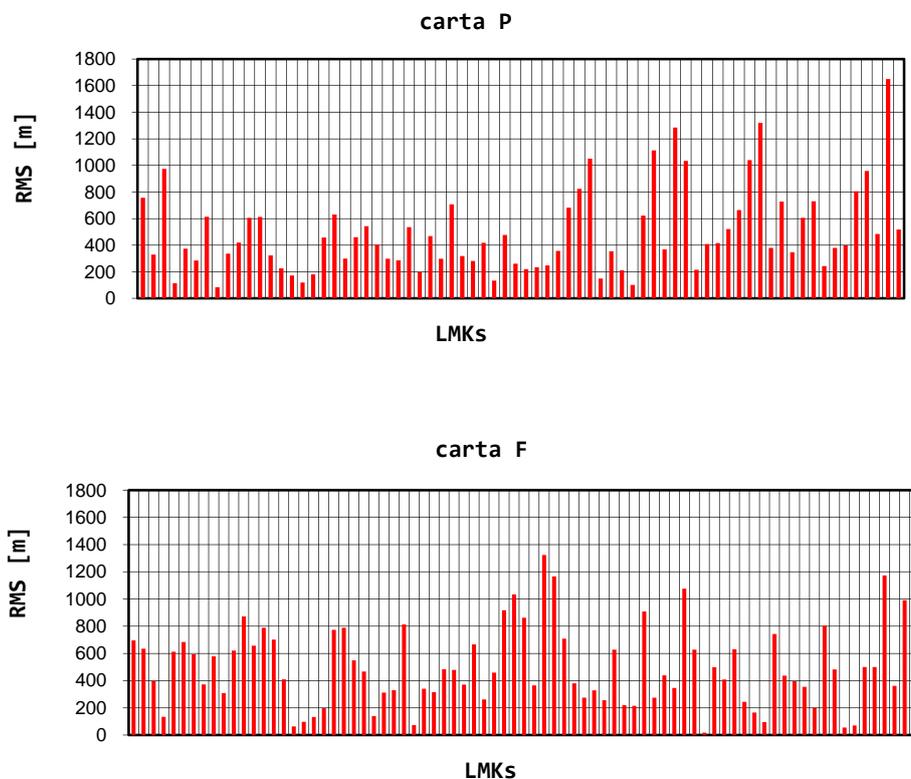


Fig. 3.20 - Grafico a barre per la mappatura dei *RMSerror* sui LMKs, calcolati per una trasformazione polinomiale di 2° ordine sulle carte P e F.

3.2.2.2. Mappa dei residui

Una rappresentazione spaziale bidimensionale dei residui è invece utile per visualizzare la posizione, in carta, dei LMKs caratterizzati da residui più alti degli altri. E' la stessa visualizzazione ottenibile nel software *MapAnalyst* in termini di vettori dei residui sui singoli LMKs. Oltre ai vettori d'errore, si utilizzano spesso cerchi d'errore (anche questa opzione è selezionabile in *MapAnalyst*), o, come in questo caso, colori differenti a seconda dell'entità del residuo (fig. 3.21). Sono state considerate 6 classi di errore, ognuna individuata da un differente colore. Anche questa è una rappresentazione molto intuitiva, soprattutto se sovrapposta alla carta originale.

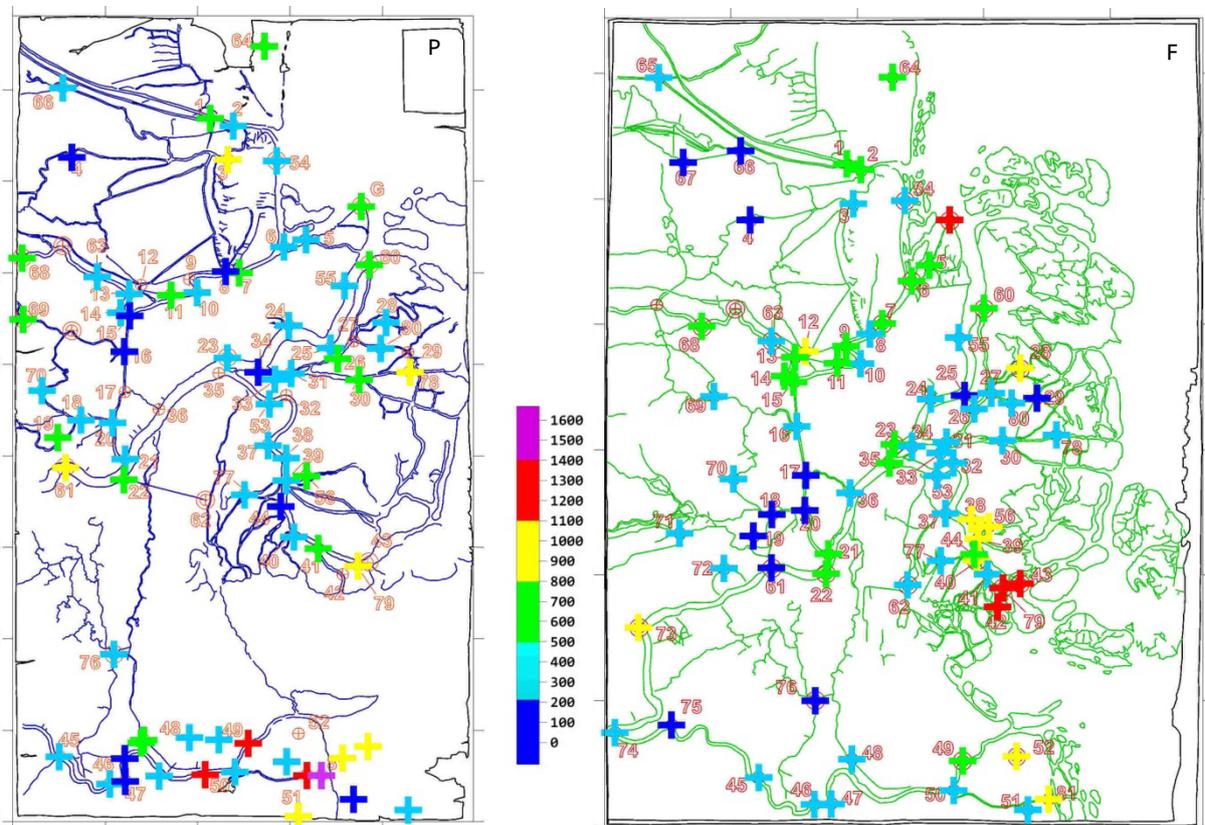


Fig. 3.21 - Mappatura dei RMSerror sui LMKs, calcolati per una trasformazione polinomiale di 2° ordine sulle carte P e F; vengono utilizzati colori differenti per differenti classi di errore.

3.2.2.3. Modello tridimensionale dei residui

La terza rappresentazione utilizzata è di tipo tridimensionale, trattandosi di una sorta di modello digitale della superficie: si può ipotizzare di avere un DSM a maglie triangolari irregolari (modello TIN) dove i nodi sono i LMKs, ognuno individuato dalle proprie coordinate nel sistema di riferimento scelto (quello immagine in questo caso), e i valori di quota sono i *RMSerror* (in metri) per quei punti. All'interno di software specifici di trattamento e visualizzazione di dati 3D, è possibile effettuare un'interpolazione a partire dai dati a disposizione (le quote, che in questo caso sono i valori di *RMSerror*) per definire il DSM e visualizzarlo in varie modalità. Tra queste, sono risultate particolarmente efficaci la *3D surface*, a colori differenti a seconda dell'entità dell'errore, e la mappa a curve di livello, maggiormente efficace se sovrapposta alla carta originale (fig. 3.22). Il grande vantaggio di una simile rappresentazione è il fatto di estendere l'andamento dell'errore su tutto il piano della carta, ed in modo ancor più intuitivo rispetto agli altri tipi di visualizzazione (in quanto fatta attraverso "monti" e "valli" per noi comuni). Ovviamente, trattandosi di un'interpolazione, risultano zone con residui più alti o più bassi (addirittura negativi, pur trattandosi di *RMSerror*) rispetto ai massimi o ai minimi reali. Inoltre il risultato è influenzato dal tipo di algoritmo scelto per ricavare un *grid* dall'interpolazione dei dati; in questo caso produce un risultato visivamente migliore l'algoritmo *Radial Basis Function* del tipo *Multiquadratic*. Si tratta di una funzione specifica per il calcolo del peso da assegnare ai singoli punti, in base alla distanza tra punto e nodo del *grid* e ad un fattore di *smoothing*:

$$B(h) = \sqrt{(h^2 + R^2)}$$

dove h è la distanza tra punto e nodo, ed R^2 è il fattore di *smoothing*, il cui valore è impostato dall'utente.

Sono poi possibili anche visualizzazioni miste, ad esempio associando la mappa dei residui ad una a curve di livello, o texturizzando il *3D surface* con le curve di livello.

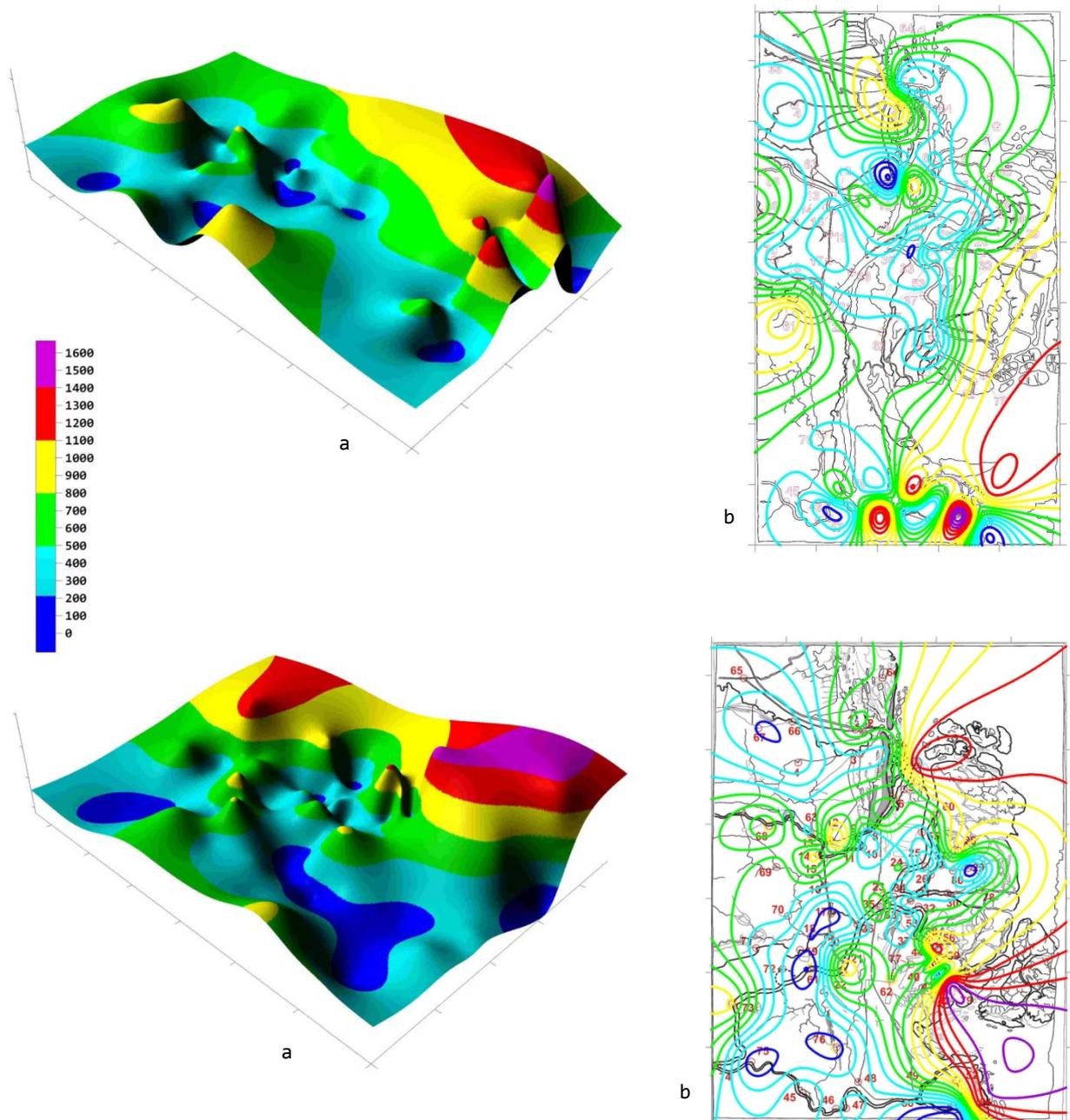


Fig. 3.22 - Visualizzazione del modello tridimensionale (software: *Surfer*) ricavato dai *RMSerror* sui LMKs (calcolati per una trasformazione polinomiale di 2° ordine), mediante: a) 3D *surface*, a colori differenti per differenti classi di errore; b) curve di livello. Sopra la carta P, sotto la carta F.

Dall'analisi delle varie visualizzazioni, e in particolare da quest'ultima, si può notare che i residui sono tendenzialmente minori al centro della carta, e crescono verso le aree periferiche: soprattutto nella carta F si notano due zone di forte anomalia, coincidenti con le

stesse già evidenziate attraverso il software *MapAnalyst* (v. par. 3.2.1.1, fig. 3.14). Il fatto può essere imputato a 3 motivi:

- effetto di bordo della trasformazione polinomiale (che, in quanto trasformazione globale, “interpola” nelle zone in cui manca l’informazione dei GCPs);
- errori strumentali, accidentali, o intenzionali (dovuti ad interessi economici o politici), errori in fase di rilievo (dovuti agli strumenti e alle tecniche di rilievo adottati) e di disegno;
- deformazioni del supporto.

Sfortunatamente, le aree deltizie sono rappresentate soltanto da un numero limitato di LMKs, in rapporto all’intero possibile set che si avrebbe se quelle aree oggi non fossero sommerse dal mare. Quindi, le aree costiere risultano topograficamente meno vincolate, con ripercussioni in fase di applicazione delle tecniche digitali di georeferenziazione.

3.2.3. “Errori veri” vs. “errori di stima”

In merito a quanto affermato alla fine del paragrafo precedente, sorge un dubbio: come distinguere gli errori di campo e di laboratorio (vale a dire quelli commessi in fase di rilievo e poi in fase di redazione della carta, strumentali, accidentali o intenzionali che siano), registrati, per così dire, in mappa (quindi “errori veri”, caratteristici della carta antica), da quelli che si aggiungono in fase di calcolo della trasformazione (supponendo nulla la deformazione del supporto)?

I residui in uscita dalla fase di georeferenziazione, infatti, si portano dietro tutti questi errori, e non è facile distinguerne i contributi. Il fatto che l’algoritmo di calcolo di una trasformazione globale tenda a minimizzare i residui su tutti i GCPs ricalcolandone la posizione planimetrica, significa che introduce una forzatura, una deformazione geometrica, e quindi una sorta di errore (che possiamo chiamare “errore di stima”). Queste distorsioni non sono facilmente riconoscibili, ma la prova della loro esistenza sta nel fatto che applicando algoritmi diversi si ottengono risultati diversi. Una trasformazione locale al posto di una globale permette di fissare la posizione dei GCPs, ma il problema rimane all’interno delle singole sottoregioni, dove il calcolo avviene mediante una trasformazione affine. Gli algoritmi di georeferenziazione implementati nei software comunemente utilizzati lavorano come strumenti a “scatola chiusa”, senza fornire

informazioni esplicite per una analisi riguardante il metodo adottato per la ricostruzione della mappa originale. In tal modo l'errore globale di georeferenziazione in uscita dal processo non rispecchia direttamente l'errore dovuto alla tecnica di rilievo originaria.

Nel caso di studio delle carte del delta del Po, dunque, non siamo in grado di dire se l'applicazione degli algoritmi di georeferenziazione e ricampionamento permetta, o meno, la reale rappresentazione dell'antica locazione delle aree costiere erose e della loro morfologia.

Sarebbe dunque interessante poter disporre di uno strumento capace di capire e riprodurre il metodo di lavoro applicato dal cartografo antico, basato sul riconoscimento delle basi di riferimento topografiche originarie e dei relativi traguardi utilizzati, in modo da creare un modello di "errore vero", che consenta di stimare l'entità degli errori realmente registrati sulla mappa, che sono quelli che interessa quantificare, anche nelle zone in cui non vi sono informazioni topografiche. Un tentativo fatto sulle carte del delta del Po per estrarre gli "errori veri" è stato quello di mettersi nei panni del cartografo, e misurare in carta quegli angoli e quelle distanze forse da lui misurate in campagna; trattandosi di un confronto con la cartografia moderna, si tratterà l'argomento nel paragrafo 3.3.2.4. La risposta al problema, tuttavia, rimane ancora aperta (Bitelli G., Cremonini S., Gatta G., 2009).

3.3. ANALISI COMPARATE TRA CARTOGRAFIE

La principale utilità della georeferenziazione di carte antiche è la possibilità di confrontare queste con altre carte storiche, dello stesso periodo, precedenti o successive, e soprattutto con basi cartografiche moderne. L'obiettivo può essere lo studio delle proprietà geometriche e di proiezione del documento cartografico antico, da una parte, o lo studio delle variazioni avvenute nel paesaggio (naturale o urbano), dall'altro. Da quest'ultimo punto di vista, l'inserimento della carta storica in sistemi GIS e WebGIS, quale base cartografica storica, risulta uno strumento di studio utile nonché interessante; di questa applicazione si tratterà nel capitolo 4.3.

Nel presente capitolo si discuterà invece della comparazione tra carte. In particolare il **confronto** può avvenire:

- **tra realtà storica e realtà attuale**, per valutare:
 - la qualità del calcolo di georeferenziazione;
 - le differenze nella rappresentazione, indice di peculiarità nel disegno o di reale cambiamento del paesaggio;
 - metricamente (quindi in modo oggettivo) i contenuti della carta storica;
- **tra periodi storici differenti**, per effettuare:
 - analisi dei cambiamenti, ai fini di studi ambientali e/o urbanistici;
 - ipotesi di evoluzione dell'ambiente o di sviluppo della città, e progettazione di interventi futuri;
- **all'interno dello stesso periodo storico**, tra diversi autori (o diverse edizioni di uno stesso autore, o copie di una stessa carta), per tentare di rispondere alle seguenti domande:
 - qual è l'antico metodo di rilievo adottato, e quali sono gli strumenti utilizzati?
 - chi dei due autori (nell'ipotesi di autori differenti) ha lavorato "meglio"?
 - qual è la verità storica tra quelle rappresentate in carta?
 - esistono interessi politici, storici, economici, o di tipo manageriale che hanno presieduto alla redazione dei documenti?

Tali confronti normalmente si realizzano mediante sovrapposizioni, condotte all'interno di software di trattamento di dati GIS, con l'ausilio di diversi strumenti ivi implementati, o mediante procedure software

specifiche per il confronto diretto, fianco a fianco, tra carta storica e carta moderna (v. par. 3.3.1). Si possono inoltre sfruttare altre modalità di comparazione, basate su una serie di referenziazioni denominate “non standard” in quanto differenti dalla classica geo-referenziazione, e testate nell’ambito di studio della presente tesi (v. par. 3.3.2).

Tutte queste sono innovative possibilità per il trattamento dei dati digitali offerte dai moderni strumenti della Geomatica, e che consentono di porsi sempre nuovi obiettivi per lo studio della storia della cartografia e per la conservazione del patrimonio cartografico. (Livieratos E., 2006)

3.3.1. Confronti tra cartografie

Il più semplice tipo di confronto tra carte che si possa immaginare è quello visuale, qualitativo. L’occhio permette uno sguardo d’insieme difficilmente sostituibile con altri strumenti; quindi, pur essendo uno mezzo semplice, è sempre il primo ad essere utilizzato, anche perché è nostro proprio.

Quando alla carta storica viene fornito un contenuto metrico, allora il confronto si fa quantitativo. Esso può realizzarsi quando i due termini di paragone siano nello stesso sistema di riferimento: la georeferenziazione permette proprio di trasportare i punti della carta antica in un sistema di riferimento moderno. Applicando i parametri di trasformazione per il ricampionamento dell’immagine, la carta si inserirà all’interno del sistema moderno, ma non senza distorsioni (v. par. 3.3.1.1).

Un modo alternativo di associare ai punti della carta antica coordinate in un sistema moderno è quello di analizzare le due carte fianco a fianco, applicando i parametri di trasformazione di volta in volta, senza ricampionare l’immagine (v. par. 3.3.1.2).

Nei paragrafi seguenti verranno analizzate le due possibilità.

3.3.1.1. Sovrapposizioni

Solitamente, una volta georeferenziata una carta storica, la si sovrappone ad una base cartografica moderna, che sarà quella di riferimento utilizzata nella georeferenziazione, se le coordinate dei GCPs utilizzati durante il processo sono stati dedotti da questa, o altra cartografia, anche nel caso in cui le coordinate derivino da rilievo a terra. La **sovrapposizione** consente innanzitutto di valutare la qualità del calcolo, e quindi scoprire se vi sono zone, in carta, più problematiche di altre in quanto a precisione geometrica o ad insufficienza di GCPs. In secondo luogo, consente di scoprire se vi sono differenze nella rappresentazione antica rispetto a quella moderna, indice di peculiarità nel disegno o di evoluzione del paesaggio; consente quindi di valutare i contenuti della carta in modo oggettivo (Osaci-Costache G., 2008) (Proto M., 2008).

Disponendo delle carte (due o anche più) georeferenziate, la sovrapposizione avviene in automatico all'interno di software di *image processing* o ambienti GIS, per livelli (**overlay**). Per facilitare il confronto, possono essere implementati diversi algoritmi, tra i quali:

- *flicker*: accensione e spegnimento in modo alternato, automaticamente o manualmente, dell'immagine di livello superiore: si tratta di uno *switch* tra le immagini;
- *swipe*: graduale sostituzione di un'immagine con l'altra, secondo una *swipe line* che scorre in direzione orizzontale o verticale;
- *transparency*: applicazione di totale trasparenza per un colore dell'immagine di livello superiore;
- *blending*: impostazione del livello di trasparenza di un'immagine (quanto si può vedere attraverso l'immagine?), assieme a cui è possibile applicare alcuni algoritmi per esaltare nella trasparenza alcune caratteristiche radiometriche piuttosto che altre (Livieratos E., 2006) (Daniil M., 2006).

Questi risultano strumenti molto utili per comparare il contenuto non solo geometrico ma anche tematico di due mappe simili, e quindi valutarne il reale grado di similarità.

Tutte le carte trattate in questa tesi sono state comparate con la relativa cartografia di riferimento, per testare la qualità della trasformazione e le deformazioni risultanti.

Per quanto riguarda le carte del delta del Po, la sovrapposizione è risultata di qualità variabile da zona a zona, in accordo con i risultati dei residui. Dal confronto tra P (o F) rispetto all'IGM, si può notare in quale zona, oggi, risultano mappate le aree costiere scomparse, e

disegnate in maniera differente nelle due carte (nonostante siano coeve) (fig. 3.23). La sovrapposizione della carta L alla cartografia moderna risulta buona, e in accordo con questo si riscontrano bassi scostamenti tra carte trasformate utilizzando algoritmi di differente tipo (globale o locale) (fig. 3.24).

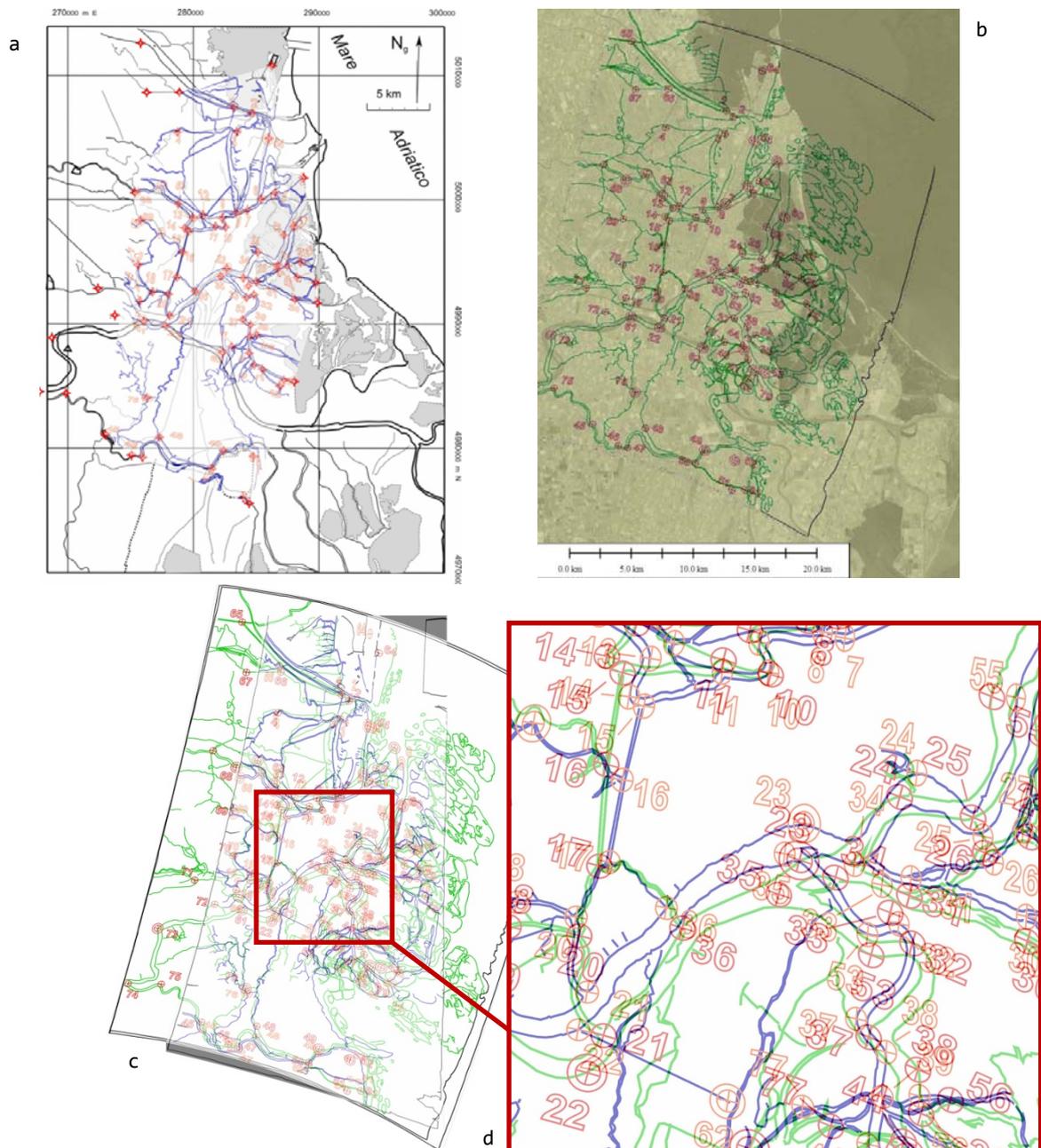


Fig. 3.23 - Esempi di sovrapposizione delle carte P e F su cartografia moderna:
 a) P trasformata con *rubber sheeting* lineare,
 sovrapposta alla restituzione vettoriale della carta IGM 1:25.000;
 b) F trasformata con polinomiale di 2° ordine,
 sovrapposta ad immagine satellitare Landsat ETM+ (banda pancromatica) di giugno 2000;
 c) sovrapposizione reciproca di P e F, entrambe trasformate con polinomiale di 2° ordine;
 d) particolare della sovrapposizione c nel cuore delle carte.

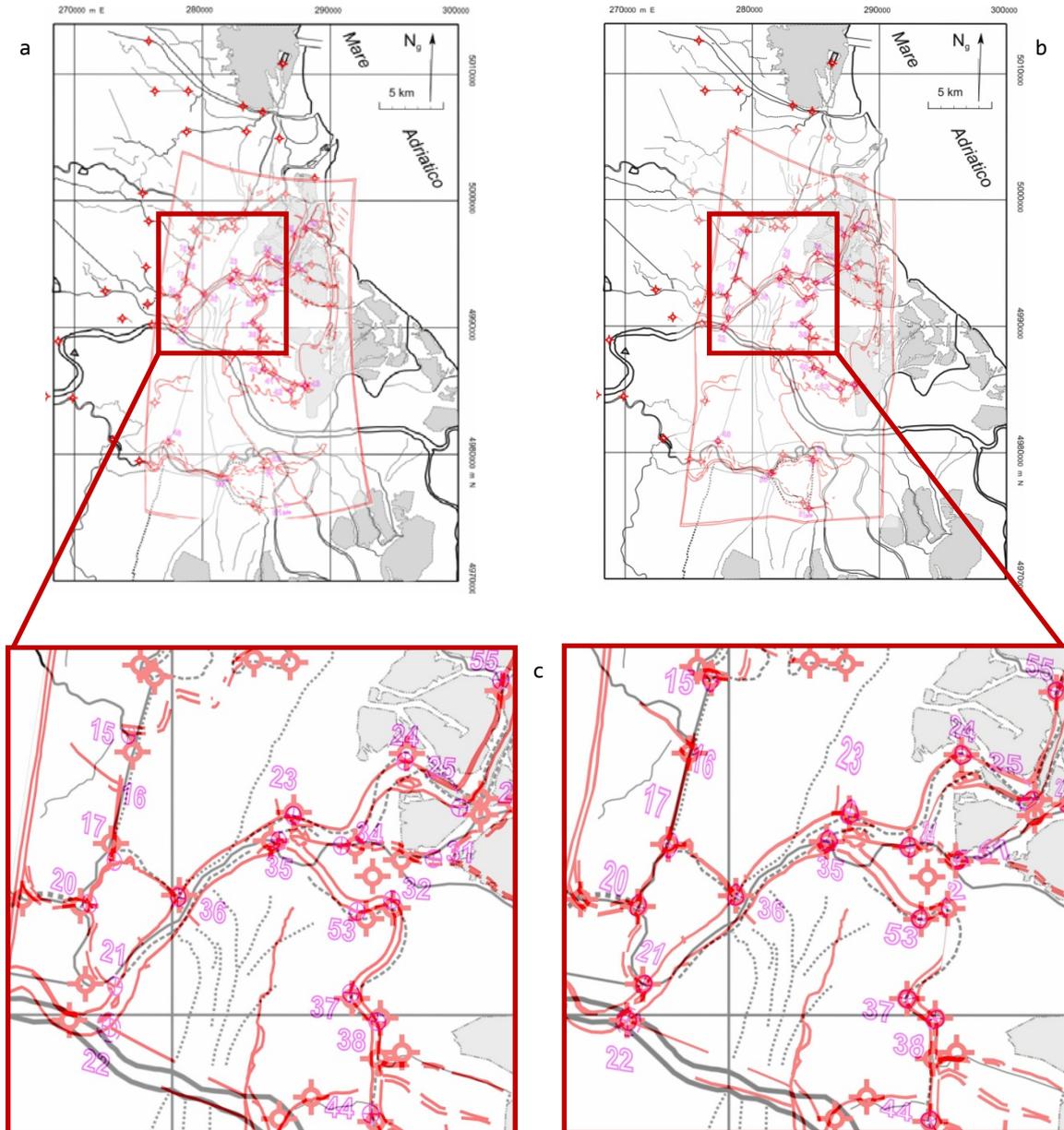


Fig. 3.24 - Esempi di sovrapposizione della carta L su cartografia moderna (restituzione vettoriale della carta IGM 1:25.000):
 a) L trasformata con polinomiale di 2° ordine;
 b) L trasformata con triangolazione;
 c) stesso particolare delle due sovrapposizioni (a e b) a confronto.

Per quanto riguarda le carte di Bologna, la sovrapposizione è risultata abbastanza buona, soprattutto nel caso delle mappe catastali (figg. 3.25 e 3.26); in entrambi i casi, le discrepanze misurate sono risultate compatibili con i residui sui GCPs ottenuti in fase di georeferenziazione. Nel caso della Icnoscenografia di de' Gnudi, è stato

effettuato, in aggiunta, un altro tipo di sovrapposizione interessante, su immagini satellitari recenti disponibili in un comune *Earth Viewer* su Web (per la trattazione di tali sistemi, si rimanda al capitolo 4.3) (fig. 3.25). A tale scopo esistono applicativi *ad hoc*, che prevedono la scomposizione dell'immagine georeferenziata in *tile* (sotto-immagini) e la creazione di un file di progetto per l'*overlay* diretto alla cartografia gestita dal *Viewer* (ad esempio per *Google Earth* il file di progetto è in formato *.kml*, per *Google Maps* o *OpenLayers* è *.html*). All'interno del visualizzatore, la sovrapposizione avviene grazie alla mosaicatura, in automatico, dei vari *tile* (Moravian Library, 2008) (Pridal, 2010).

Inoltre, le carte georeferenziate sono state comparate tra loro, all'interno delle rispettive aree tematiche: le tre carte del delta del Po tra loro (fig. 3.23), e le carte di Bologna (l'Icnoscenografia e il Catasto) tra loro (fig. 3.27).



Fig. 3.25 - Sovrapposizione dell'Icnoscenografia georeferenziata a cartografia moderna:

- a) alla CTC vettoriale 1:2.000 del 2000;
- b) alle immagini satellitari disponibili in un sistema *Earth Viewer* (*GoogleMaps*), mediante utilizzo di apposito applicativo (software *MapTiler*).



Fig. 3.26 - Sovrapposizione del mosaico, georeferenziato, di fig. 3.12 (costituito dai fogli di piano terra VIII e XI) alla moderna CTC vettoriale 1:2.000, con zoom sulla zona di giunzione dei fogli, in corrispondenza della basilica di S. Petronio.



Fig. 3.27 - Sovrapposizione del mosaico catastale di fig. 3.12 (costituito dai fogli di piano terra VIII e XI) sulla Icnoscenografia georeferenziata, con funzione di *blending*.

Per quanto riguarda il Catasto Gregoriano, si è provveduto anche alla sovrapposizione dei fogli dei vari piani (del settore VIII) tra loro, come illustrato nel paragrafo 3.1.4.2 (fig. 3.11). In questo caso, per apprezzare visivamente la qualità della sovrapposizione tra i vari fogli di piano, è risultata utile la creazione di un video, ordinando in sequenza le immagini, ed impostando il passaggio dall'una all'altra mediante dissolvenza: la sovrapposizione tra i vari piani è risultata buona, e si può notare come diminuisce il numero di edifici al crescere del livello di piano.

Per quanto riguarda l'Icnoscenografia di Bologna riportata ad un sistema di riferimento moderno, come primo controllo della qualità metrica della carta (oltre che della qualità della georeferenziazione), è stata misurata la scala grafica presente (80 pertiche bolognesi, pari a 304 m essendo uguale a 3,8 m una pertica bolognese) mediante uno strumento GIS: essa è risultata pari a 289,2 m (fig. 3.28). Sono stati inoltre effettuati altri test di misura, basati sulla cartografia numerica CTC di riferimento per la georeferenziazione, e sulla documentazione descrittiva relativa ai singoli edifici, utilizzata in fase di ricerca dei GCPs per la georeferenziazione. In base a tali test si è constatato che sulla carta storica la larghezza di molti edifici è abbastanza fedele al vero, mentre esiste un generale allargamento delle strade, una esagerazione verticale di alcuni edifici (come ad esempio le due Torri), ed un accorciamento di altri (fig. 3.28). La ragione della rappresentazione non sempre realistica è probabilmente da ricercare nel tentativo di fornire una maggior visibilità per le facciate degli edifici (allargamento delle strade, accorciamento di certi edifici), da una parte, e per esaltare alcuni edifici simbolici di Bologna, e le torri tipiche della città, dall'altra. Ovviamente queste considerazioni valgono per il rifacimento moderno della carta antica, qui esaminato, ma che si suppone sia metricamente fedele al documento originale.

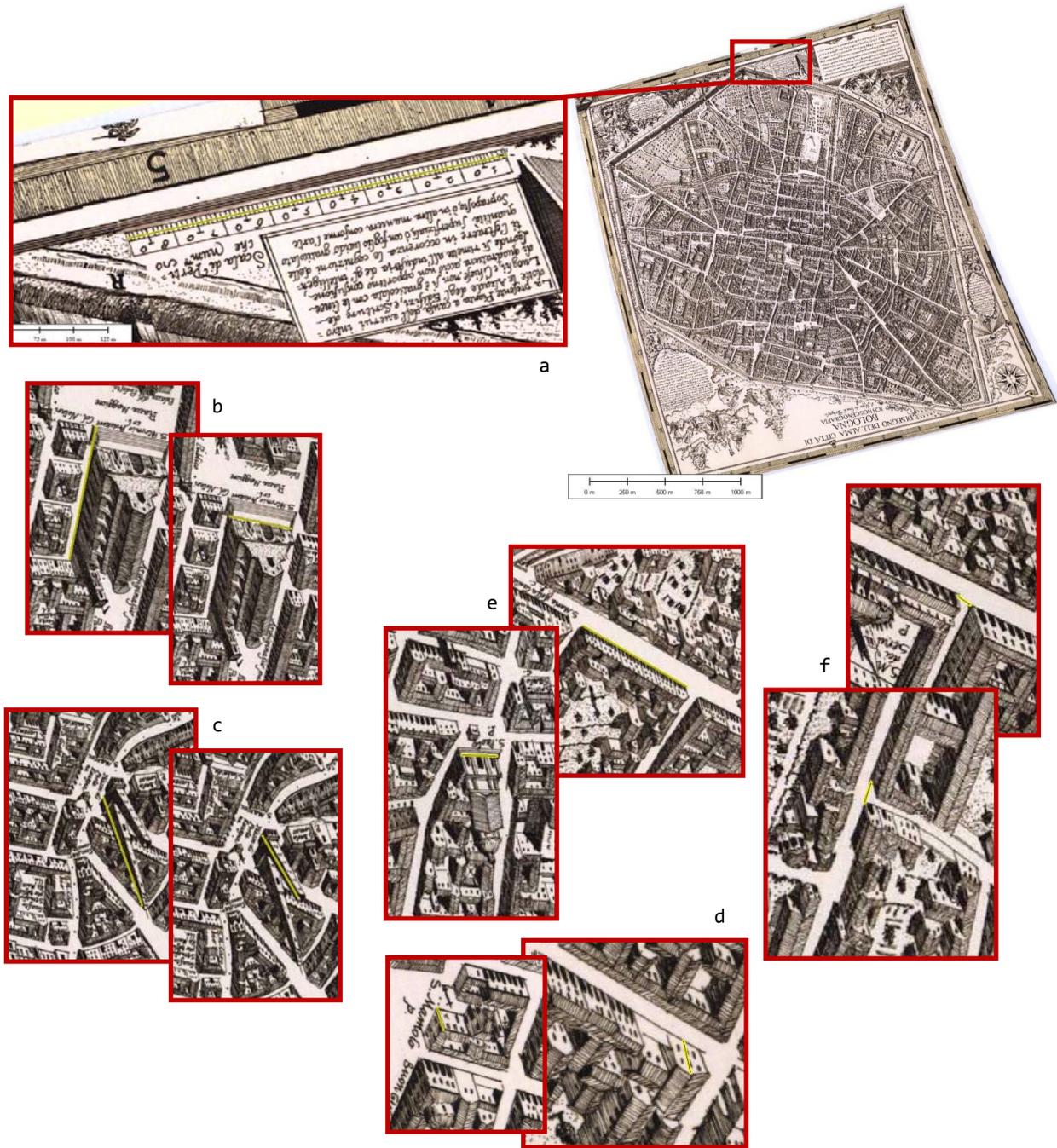


Fig. 3.28 - Esempi di misure (in giallo), mediante strumento GIS, di particolari della Icnoscenografia georeferenziata:

- a) la scala grafica: 289,2 m anziché 304;
- b) dimensioni di S. Petronio: lunghezza 130 m anziché 132 - larghezza 68,5 m anziché 66;
- c) altezza delle due Torri: Asinelli 119 m anziché 97 - Garisenda 67,5 m anziché 48;
- d) altezza di altri edifici: S. Mamolo 13,5 m anziché 15,6 - casa 14,8 m uguale a CTC;
- e) larghezza di edifici: case 110 m anziché 127 - S. Paolo Maggiore 25 m uguale a CTC;
- f) larghezza di alcune strade: 10 m anziché 5 - 16 m anziché 11.

3.3.1.2. Sistemi per consultazione interattiva di carte

Come accennato, esistono modi alternativi alla sovrapposizione per confrontare le carte antiche con una base cartografica moderna. Questi nascono dal desiderio di non vedere la carta, trasformata tramite georeferenziazione, radicalmente deformata, al punto tale da non riconoscerne più l'aspetto originale (il problema è sentito soprattutto per le carte storiche in proiezione scenografica), ma al contempo dalla volontà di assegnare comunque un contenuto metrico alla carta antica, cosa fondamentale per il suo studio e per la possibilità di estrarne informazioni di tipo quantitativo. Una soluzione può derivare dall'applicare i parametri di trasformazione di volta in volta, "on-flight", senza però ricampionare l'immagine, in modo da evitare le deformazioni tipiche del processo di georeferenziazione.

Un tale sistema, denominato **2WIN** (acronimo di "2 *WIND*ows") è stato sviluppato all'interno del CIRCE (Centro di Rilievo, Cartografia ed Elaborazione, Università IUAV di Venezia). Mantenendo le due carte affiancate l'una all'altra (quella antica a destra, e quella moderna di riferimento a sinistra), dall'identificazione di un punto su una mappa, il software calcola la posizione dello stesso sull'altra carta, centrando le 2 finestre sullo stesso punto (il centro delle due finestre è sempre su un punto omologo). Il calcolo avviene mediante algoritmi di trasformazione locale, mutuati dalle tecniche di *warping* (per punti o per linee di forza) della *computer graphic*, e adattati a scopi fotogrammetrici, utilizzando le *feature* per il calcolo al volo dei punti omologhi. In tal modo le tecniche di *warping* vengono utilizzate non per trasformare le mappe (procedura di *referencing-transformation*), bensì per creare **corrispondenze** tra di esse (procedura di *referencing-correspondence*) (Guerra F., 2000).

Siccome gli algoritmi di *warping* sono molto pesanti dal punto di vista del calcolo, occorre una strategia di ottimizzazione per ottenere una risposta in tempi ragionevoli: il calcolo della trasformazione locale avviene non usando l'intero set di *feature*, ma solo quelle più vicine al punto da calcolare, mediante l'applicazione di un peso inversamente proporzionale ad una potenza della distanza. Una soluzione alternativa al problema della ricerca tra le *feature* vicine e il calcolo del punto omologo è stata introdotta col software **Bi-visual** (sempre ideato all'interno di CIRCE): la ricerca è stata migliorata mediante l'implementazione di una struttura quadratica per la memorizzazione delle *feature* stesse (Guerra F., Miniutti D., Monti C., 2001). Esistono anche software di georeferenziazione on-line che operano in base allo stesso principio (Tsioukas V., 2009).

I software si adattano ad essere usati non solo per relazionare differenti documenti cartografici storici dello stesso luogo, ma anche per cercare corrispondenze in tipi di rappresentazione differenti.

3.3.2. Referenziazioni “non standard”

Sfruttando gli algoritmi della georeferenziazione, è possibile inventare nuove modalità di comparazione tra carte antiche e moderne, qui generalmente denominate **referenziazioni “non standard”**, in quanto differenti dalla classica “geo”-referenziazione.

Queste referenziazioni sono state testate nell’ambito della presente tesi a riguardo delle carte del delta del Po, in particolare per le carte P e F, siccome esse mostrano dettagli morfologici differenti, pur essendo state redatte nello stesso anno e per mano dello stesso autore. Le referenziazioni sono state condotte al fine di effettuare:

- **geo-referenziazioni** delle carte antiche rispetto all’IGM moderna: il classico processo di georeferenziazione, che fornisce un nuovo aspetto alla carta antica, quantificando le deformazioni (indotte dalle caratteristiche del documento cartografico, ma anche dall’algoritmo applicato) mediante l’errore residuo associato ad ogni punto;
- **co-registrazioni** tra le sole carte storiche: referenziazione di una carta rispetto all’altra, utile per comparare i disegni e riconoscere gli stessi dettagli del paesaggio (Daniil M., 2006);
- **referenziazioni “all’inverso”**: referenziazione dell’IGM sulle carte antiche (quindi all’opposto rispetto alla georeferenziazione tradizionale), per evidenziare in modo semplice ed intuitivo in quale modo i caratteri topografici odierni si dovrebbero deformare per adattarsi ai corrispondenti mappati sulla carta antica; questo risulta uno strumento potente per una visualizzazione del pattern della deformazione originale dovuta al lavoro del rilevatore antico (Balletti C., 2006);
- **georeferenziazione a zone**: georeferenziazione di sub-aree della carta (scelte dall’operatore) e ricomposizione del mosaico delle sub-aree ricampionate;
- **misure α D**: misura di angoli e distanze sulla carta antica, e trasposizione dei valori su una base cartografica moderna.

I prodotti ottenibili sono gli stessi del classico processo di georeferenziazione; in particolare i metodi utilizzati per l’analisi delle

carte del delta del Po (alcuni dei quali già mostrati nei capitoli precedenti) sono:

- sovrapposizione alla mappa originale del grigliato deformato;
- visualizzazione della variazione di scala (mediante isolinee) sopra alla mappa originale;
- visualizzazione dell'angolo di rotazione della mappa rispetto al nord e della differenza angolare tra le mappe;
- *resampling* della mappa georeferenziata (secondo differenti algoritmi di calcolo);
- distribuzione spaziale degli errori residui del processo di georeferenziazione (sia come distribuzione spaziale dei vettori, sia come modello tridimensionale);
- sovrapposizione della mappa georeferenziata su quella di riferimento.

Nei paragrafi seguenti si spiegheranno nel dettaglio le tecniche di co-registrazione e referenziazione all'inverso, essendo la georeferenziazione stata già ampiamente trattata in questo e nei capitoli precedenti (Bitelli G., Cremonini S., Gatta G., 2009). Infine si presenterà un'analisi delle carte basata su una georeferenziazione condotta per sub-aree, ed una basata sulla misura di angoli e distanze.

3.3.2.1. Co-registrazione

La co-registrazione tra due carte antiche (diverse edizioni di uno stesso autore, copie diverse di una stessa carta, o carte coeve di autori differenti, come nel caso delle mappe del delta Po in esame) permette il confronto diretto tra i due esemplari, ciò che nell'introduzione al capitolo 3.3 è stato definito "confronto all'interno dello stesso periodo, tra diversi autori". La co-registrazione permette dunque di rispondere alle domande specificate nell'introduzione (qual è il metodo di rilievo adottato? chi dei due autori ha lavorato "meglio"? qual è la verità storica? esistono interessi politici, storici, economici, gestionali che hanno contribuito ad una certa rappresentazione del territorio?), attraverso:

- il **confronto** delle caratteristiche del rilievo e del disegno;
- l'analisi di **come una carta si deforma per adattarsi all'altra, e viceversa**;
- l'evidenziazione delle **differenze**, in segno ed entità.

La co-registrazione avviene mediante il riconoscimento di un set di punti omologhi tra le due carte, col vantaggio, rispetto al classico

processo di geo-referenziazione, che non importa se essi sono punti oggi ancora esistenti o meno. Gli algoritmi di calcolo utilizzabili rimangono gli stessi, di tipo globale o di tipo locale. I LMKs potranno essere utilizzati come GCPs o come *check-points*, a seconda dello scopo. Nel caso delle carte del delta del Po, oltre ai circa 80 LMKs già riconosciuti da IGM per la fase di georeferenziazione, sono stati utilizzati altri circa 110 *tie-points*.

L'applicazione di una tecnica di *rubber-sheeting* lineare (solo con gli 80 LMKs iniziali, senza i punti *tie* aggiuntivi) permette di visualizzare una corrispondenza molto buona tra le due carte, ma con una forte differenza nella larghezza degli alvei (maggiori in F che in P). Applicando lo stesso algoritmo, ma con l'aggiunta dei *tie-points* come punti fissi, il grado di corrispondenza cresce ulteriormente, ma la grandezza del gruppo di isole a S diviene differente nelle due carte, e il gruppo di isole a N nella carta F appare notevolmente traslato verso N (fig. 3.29).

Per effettuare un controllo sulla trasformazione e quantificare le differenze tra le due carte antiche, è stata applicata la stessa tecnica con l'intero set di punti, ma tenendo gli 80 LMKs come *check-points*, e i 110 *tie-points* come GCPs (fissi durante il processo, in quanto la trasformazione è di tipo locale) (fig. 3.30). La distribuzione degli errori residui (visualizzata in modalità DSM) mostra una piccola differenza tra le due referenziazioni, in accordo con i risultati del processo di georeferenziazione condotto mediante trasformazione polinomiale: si può ribadire che le due carte sono tra loro differenti, probabilmente perché diverse sono le modalità di rilievo e della loro rappresentazione.

Dunque, i risultati della co-registrazione permettono di affermare che in generale le carte registrano gli stessi dettagli topografici. Nonostante ciò, esse mostrano differenze morfologiche e differenti pattern di errori residui; e purtroppo fino ad ora è risultato impossibile riconoscere quale mappa sia la più simile al territorio fisico coevo. L'approccio è reso ancor più difficile dal fatto che Fabri, autore della mappa F, probabilmente indusse un errore intenzionale nella rappresentazione della parte più a N del lobo NE del delta (Cremonini S., Samonati E., 2009): la differenza tra F e P in questa zona è infatti molto rilevante, e i residui ottenuti in fase di georeferenziazione sono qui di entità molto elevata. Non sempre è possibile imputare queste differenze alle tecniche di rilievo adottate; probabilmente dovrebbero essere indagati anche altri aspetti (ad esempio di tipo economico, politico, manageriale).

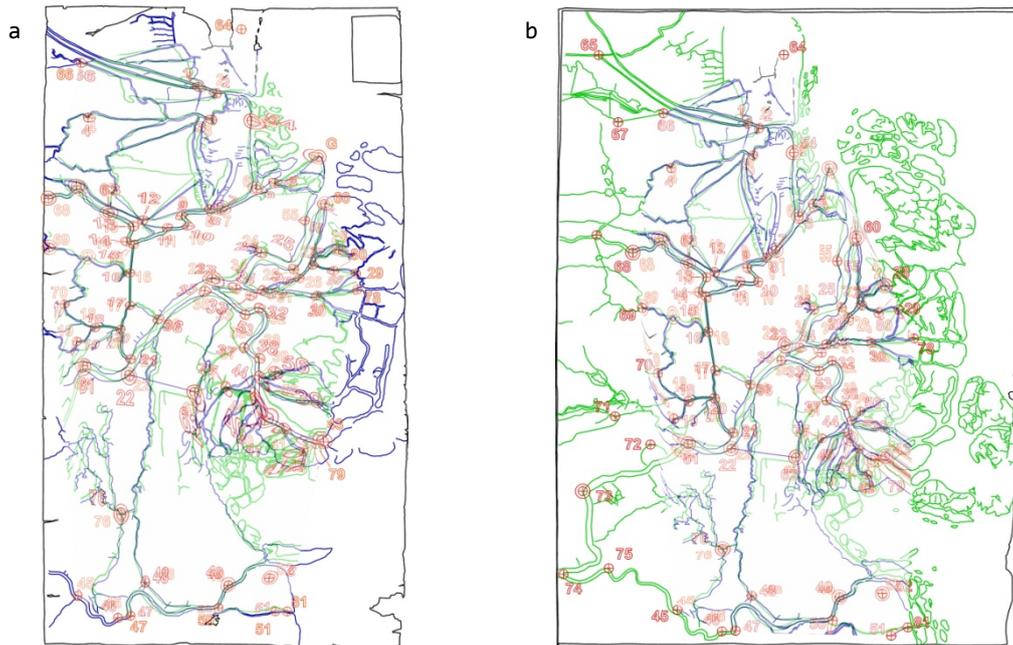


Fig. 3.29 - Risultati della co-registrazione tra P (in blu) e F (in verde), mediante *rubber-sheeting* lineare (utilizzando circa 80 LMKs + 110 *tie-points*):
 a) la carta F referenziata, sovrapposta alla carta P di riferimento;
 b) la carta P referenziata, sovrapposta alla carta F di riferimento.

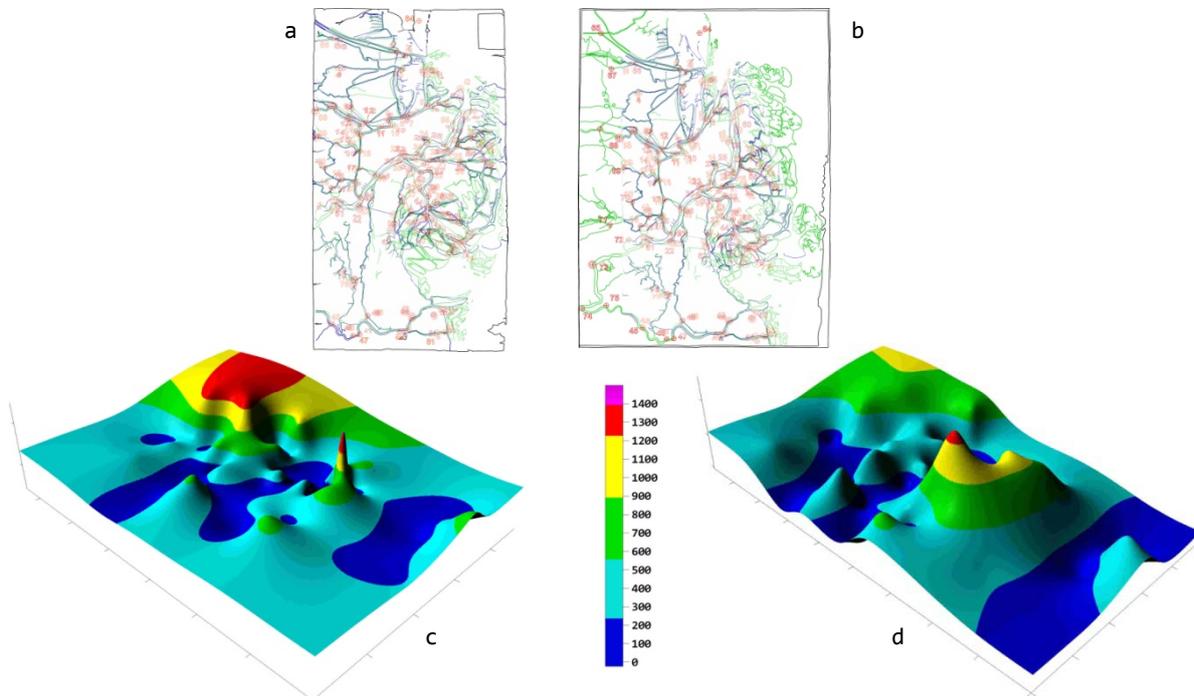


Fig. 3.30 - Risultati della co-registrazione tra P (in blu) e F (in verde), mediante *rubber-sheeting* lineare (utilizzando gli stessi punti di fig. 3.29, ma sfruttando i LMKs come *check-points*):
 a) la carta F referenziata, sovrapposta alla carta P di riferimento;
 b) la carta P referenziata, sovrapposta alla carta F di riferimento;
 c, d) rispettive visualizzazioni dei residui sui LMKs in modalità DSM.

Sono stati effettuati anche alcuni test per valutare l'entità di somiglianza della carta L (anno 1599) rispetto alle due precedenti P e F (anno 1592). Come esempio si riporta l'applicazione di una trasformazione polinomiale di 2° ordine di carta L rispetto a P e F rispettivamente; per evidenziare più efficacemente le deformazioni, e paragonare meglio i risultati, un grigliato a passo costante è stato preventivamente sovrapposto alle tre carte. (fig. 3.31). In base a queste visualizzazioni si può affermare che, per la parte coperta dal disegno, la carta L sembra assomigliare maggiormente alla carta P piuttosto che alla F.

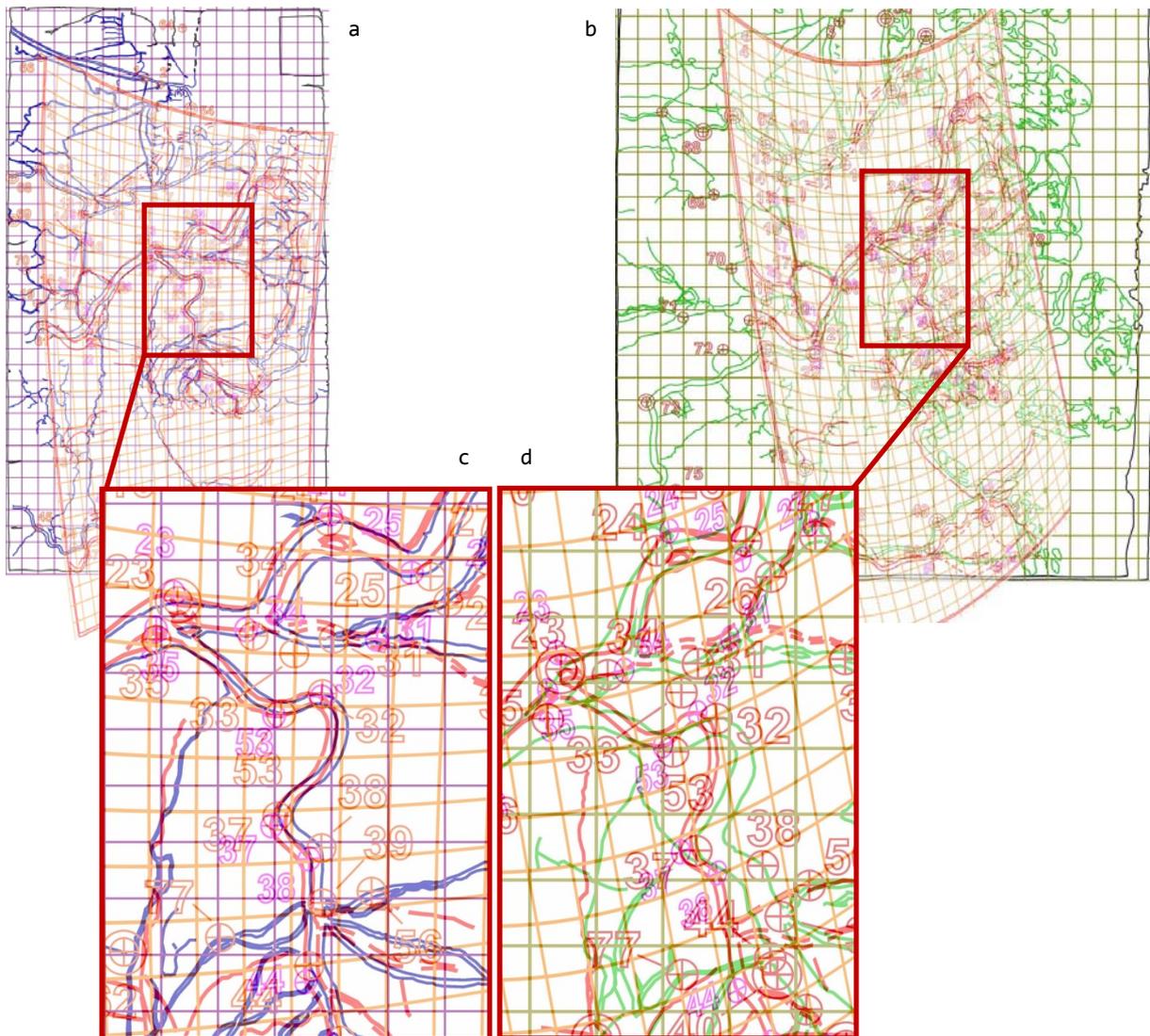


Fig. 3.31 - Risultati della co-registrazione tra L (in rosso) e, rispettivamente, P (in blu) e F (in verde), attraverso polinomiale di 2° ordine (condotta mediante LMKs + tie-points), sovrapponendo preventivamente un *grid* a maglia costante:
 a) la carta L referenziata, sovrapposta alla carta P di riferimento (in c uno zoom sull'area centrale);
 b) la carta L referenziata, sovrapposta alla carta F di riferimento (in d lo zoom sulla stessa area di c).

3.3.2.2. Referenziazione “all’inverso”

La referenziazione qui definita “all’inverso” viene effettuata tra una carta attuale ed una antica, ma non nella classica direzione della “geo”-referenziazione (la carta antica sulla moderna), bensì nel verso opposto. Questo tipo di referenziazione non-standard si inserisce all’interno di quelli denominati “confronti tra realtà storica e realtà attuale” nell’introduzione al capitolo 3.3. A differenza della geo-referenziazione, quella all’inverso è utile non tanto per un confronto visivo tra realtà storica e realtà moderna, quanto, piuttosto, per:

- visualizzare in modo più immediato ed intuitivo il pattern di deformazione dovuto alle **antiche operazioni di rilievo** (in quale modo i caratteri topografici odierni si devono deformare per adattarsi ai corrispondenti mappati sulla carta antica?), e capire, mediante una visualizzazione semplice ed intuitiva, qual è l’effettiva realtà cartografata;
- aumentare in modo considerevole il numero di **punti omologhi** tra carta attuale ricampionata (fedelmente a quella antica) e carta attuale indeformata, per eventuali geo-referenziazioni successive.

Questo è accompagnato dal grande vantaggio di far conservare alla mappa antica tutte le sue caratteristiche native.

Nel caso delle carte F e P, il confronto è stato attuato trasformando la cartografia IGM attuale (nello specifico una restituzione vettoriale della IGM 1:25.000) sulle carte antiche, utilizzando una tecnica *rubber-sheeting*. Questa ha permesso la generazione di un nuovo tipo di prodotto, piuttosto differente da tutti i precedenti, e forse il più veritiero nel visualizzare il pattern di deformazione di queste carte antiche (fig. 3.32). Inoltre, applicando la tecnica di referenziazione all’inverso, la ricostruzione delle aree costiere avviene in modo migliore rispetto al classico processo di geo-referenziazione, anche se al momento attuale non è ancora possibile stabilire quale delle due situazioni, quella mappata in carta P o quella mappata in carta F, sia la più fedele al vero.

Queste visualizzazioni permettono una nuova prospettiva di interpretazione delle carte, ma è bene sottolineare che le informazioni estraibili da referenziazioni “all’inverso” sono di tipo qualitativo (in quanto il contenuto metrico della carta moderna viene perso durante il processo); per estrarre un nuovo contenuto informativo di tipo quantitativo i prodotti ottenuti dovrebbero essere ulteriormente processati.

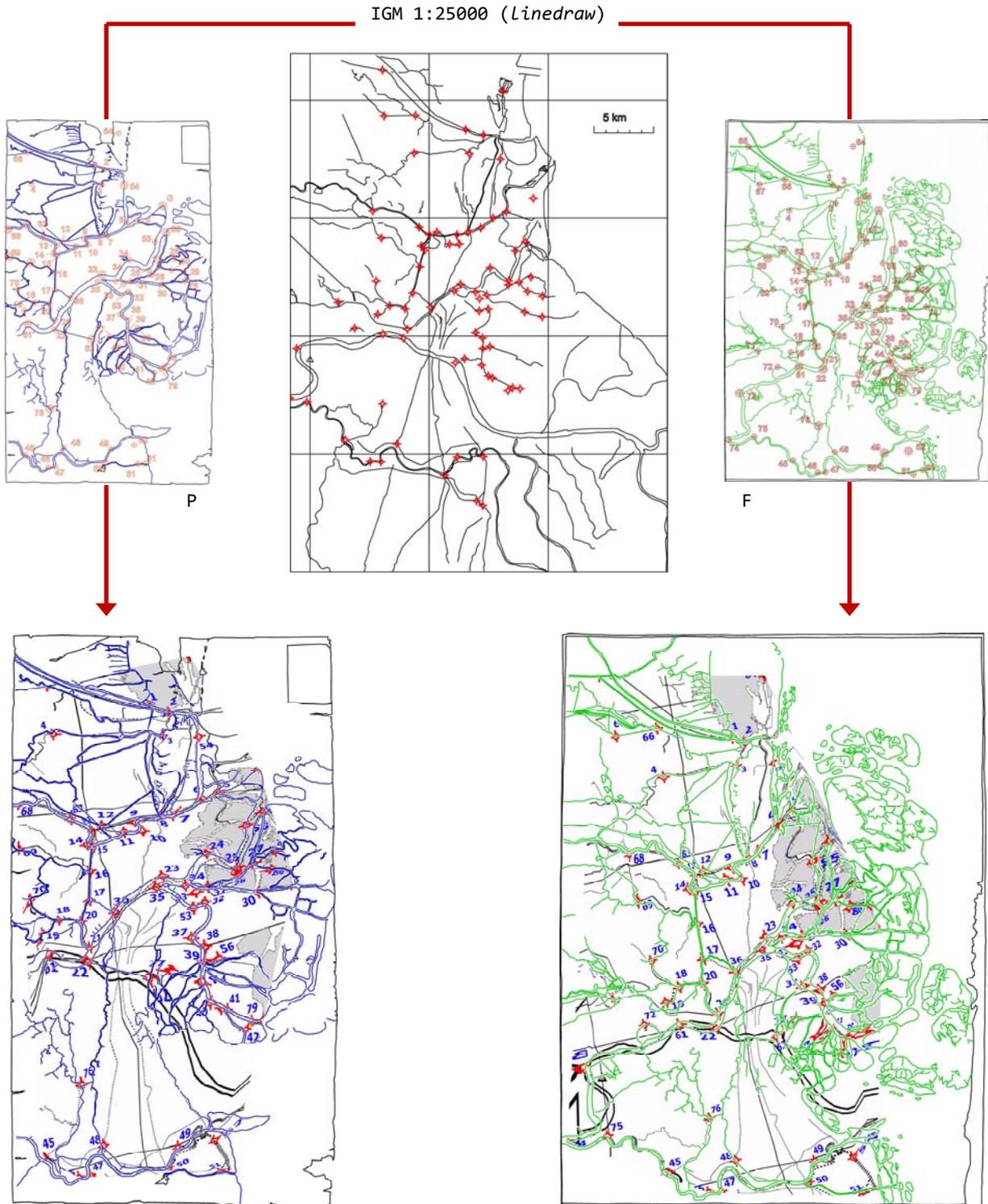


Fig. 3.32 - Confronto della cartografia moderna (*Linedraw* di carta IGM 1:25.000)

con le carte antiche P e F:

a sinistra, la carta IGM referenziata mediante *rubber-sheeting* lineare sulla base della carta P, e sovrapposta ad essa;

a destra, la carta IGM referenziata mediante *rubber-sheeting* lineare sulla base della carta F, e sovrapposta ad essa.

3.3.2.3. Georeferenziazione a zone

Anche se l'analisi degli errori residui non dipinge un quadro totalmente veritiero degli errori di rilievo originari (per il fatto che non è possibile scindere il contributo dell'algoritmo di calcolo, v. par. 3.2.3), essa permette di affermare che le carte studiate sono documenti generati indipendentemente l'uno dall'altro, vale a dire che essi non sono copia l'uno dell'altro. Di conseguenza, le differenze reciproche caratterizzanti le carte potrebbero essere relazionate a differenti metodi di rilievo in campo o all'uso di differenti strumenti topografici (siamo a conoscenza dell'uso della squadra mobile da parte di Fabri, dell'uso della bussola, di traguardi, e di altri metodi non specificati da parte di Lorini, e nulla sappiamo per quanto concerne la carta di Pontara). Probabilmente per la carta F fu utilizzato il metodo di intersezione in avanti, a partire da due punti a distanza nota; paragonando un disegno sul manuale di Fabri con la sua carta, e tenendo conto del fatto che nel cuore della zona rilevata si trova, ben visibile, il paese di Loreo (la cui scritta, a differenza di altre, è decorata), da cui parte il canale rettilineo (*Rettinella*), percorribile a piedi (e quindi misurabile in lunghezza), fino al paese di Tornova, si può ipotizzare che proprio questo canale sia stato utilizzato come base di partenza per il rilievo, almeno nell'intorno di un'area raggiungibile con traguardo visivo. Nei paesi di Loreo e Tornova erano presenti, e lo sono ancora oggi, due campanili, alti circa 20 m e 9 m rispettivamente (da misure da noi eseguite in campagna), da cui potrebbero essere stati traguardati altri punti ben distinguibili, poi riportati in mappa, secondo la tecnica spiegata in dettaglio da Fabri nel suo manuale (v. par 1.1.4) (Fabri O., 1673). Per le altre carte non possiamo però sapere se fu utilizzata la stessa strategia di rilievo e di conseguenza la stessa base di partenza: probabilmente così non fu per la carta L, in quanto qui la *Rettinella* è solo accennata a matita, e poco simile (secondo la scala grafica della carta) alla misura reale; è però possibile che lo stesso metodo di rilievo, con la stessa base di partenza, sia stato utilizzato in carta P, siccome anche qui la *Rettinella* assume una posizione centrale e, in base alla scala media calcolata per la carta, è abbastanza corretta in dimensioni (fig. 3.33).

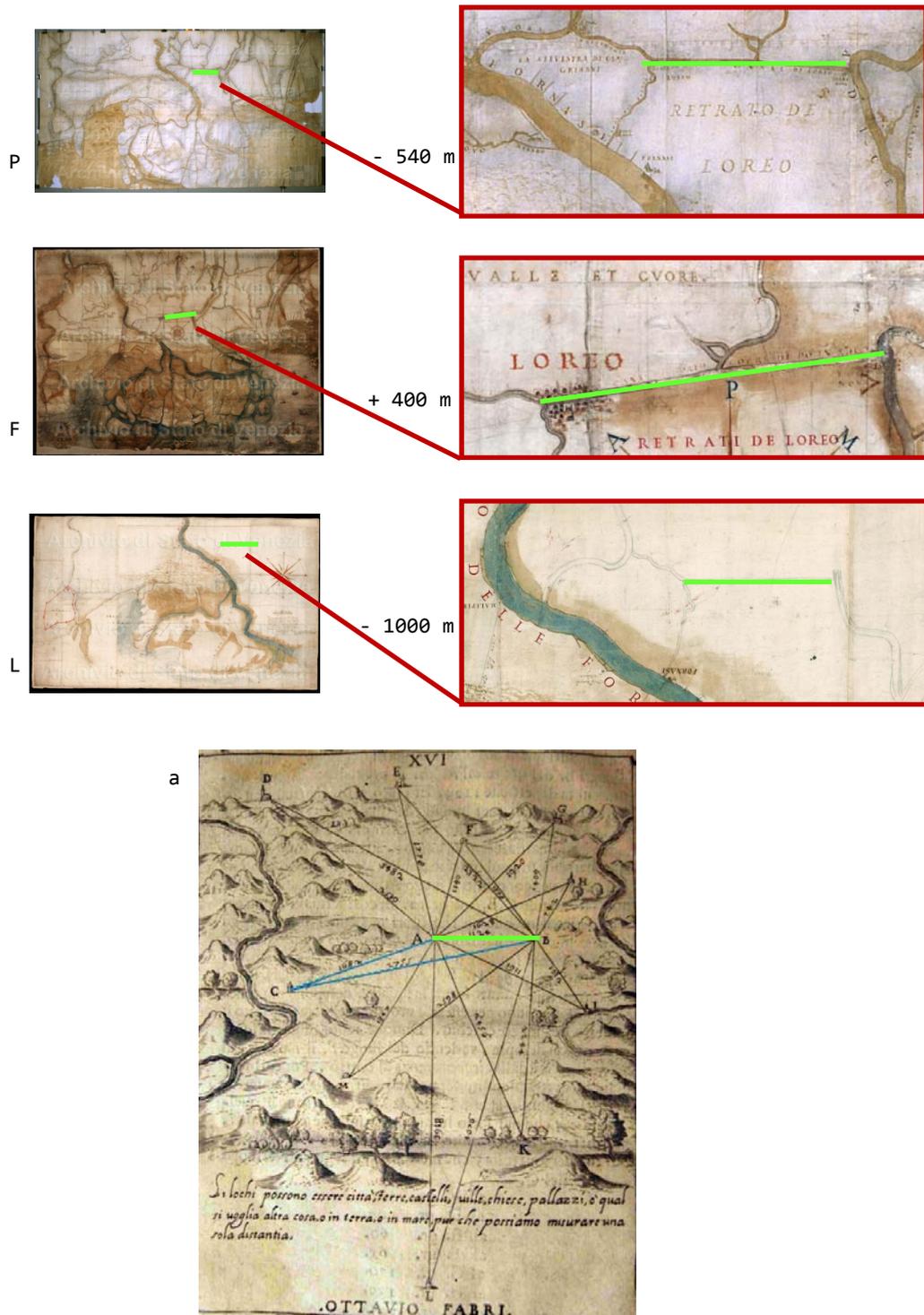


Fig. 3.33 - Confronto del disegno e della locazione all'interno della carta del canale rettilineo Rettinella (in verde), sulle 3 carte P, F e L; accanto ad ogni zoom, vengono riportate le differenze di lunghezza rispetto al valore reale (valore in carta storica meno valore reale). Per confronto si riporta il disegno illustrativo della tecnica di intersezione in avanti (O. Fabri, *L'uso della squadra mobile*, 1673; presso Biblioteca Dore, Facoltà di Ingegneria, Università di Bologna): la Rettinella potrebbe coincidere con la base AB (a).

Data la grande estensione dell'area rilevata, nasce un'altra questione, a riguardo della necessità di adottare più di una base di riferimento e di relativi *benchmark*. Questo implica, sopra a tutto, la conoscenza della massima lunghezza operativa di traguardo adottata dagli antichi rilevatori. Una lunghezza massima di 8-9 km potrebbe essere ragionevolmente accettabile, come si nota dalle tracce dei traguardi ancora visibili sulla carta L e in accenno sulla P (Cremonini S., 2007) (Bitelli G., Cremonini S., Gatta G., 2010); questa può inoltre essere supportata da considerazioni concernenti l'intervisibilità dei *benchmark* in base all'altezza minima dei campanili, alla curvatura terrestre, e alla copertura vegetale (fig. 3.34). Infatti, supposta un'altezza minima di 20 m (come è per il campanile della chiesa di Loreo), la relativa distanza di traguardo minima teorica sarebbe di circa 16 km. Questo valore dovrebbe essere ulteriormente ridotto fino ad almeno 11 km per assicurare una visibilità minima realistica. Bisogna inoltre tener conto del fatto che in una coppia di campanili di differente altezza, utilizzati come punti di riferimento per il rilievo, quello più basso (Tornova, in questo caso) è il vincolante, in quanto riduce la lunghezza del campo di vista.

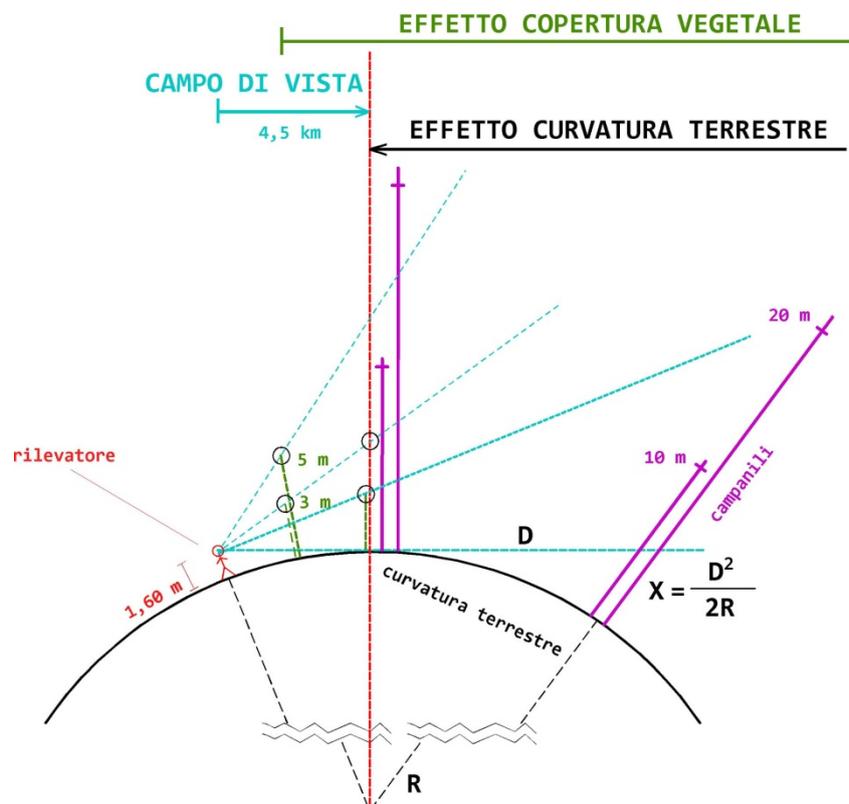


Fig. 3.34 - Valutazioni in merito alla massima lunghezza operativa di traguardo, in funzione di alcuni fattori: altezza minima dei campanili, curvatura terrestre e copertura vegetale. (Disegno: S. Cremonini)

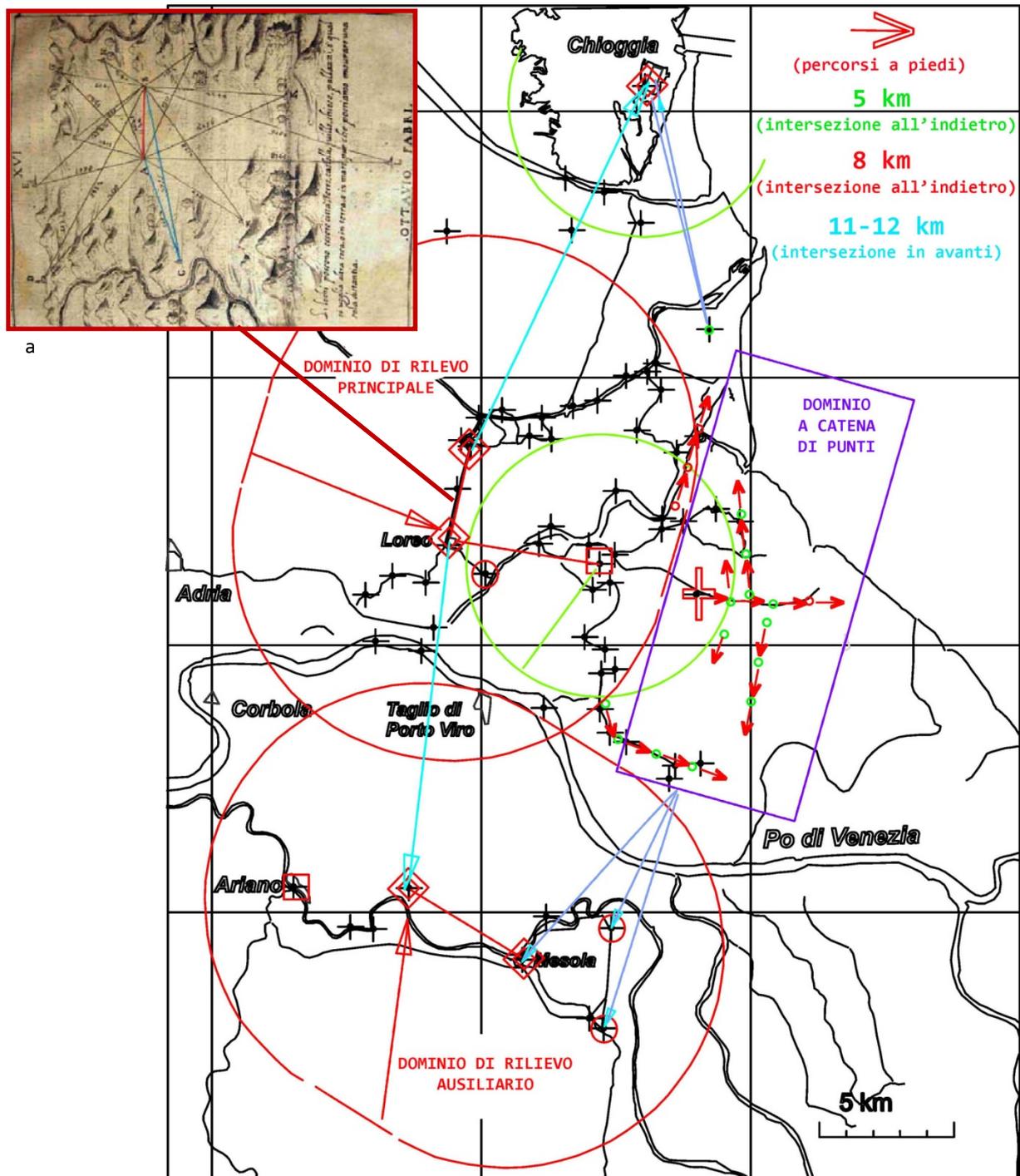


Fig. 3.35 - Ipotetici domini operativi per le carte P e F, dedotti da calcoli che tengono conto della massima lunghezza operativa di traguardo (fig. 3.34) e della tipologia di area rilevata, differenti per la tecnica di rilievo adottata; nel dominio principale, probabilmente fu adottata un'unica base di partenza per il rilievo di intersezione in avanti, come suggerito da Fabri nel suo manuale (Fabri O., 1673) (a).

(Disegno: S. Cremonini)

L'esistenza di un valore di soglia di 8-9 km può essere ulteriormente supportato dal confronto con la cartografia IGM attuale: i risultati di georeferenziazione indicano un cambiamento nella deformazione della carta antica ricampionata coincidente con un punto evidenziato in carta F da una croce (punto 30: *La Crose*), localizzato circa 9 km ad est della presunta base di riferimento, non distorta, 15-17.

Se questo è vero, almeno per quanto riguarda le carte P e F è possibile che, per mappare l'intero territorio, come minimo si siano rese necessarie 4 aree operative, caratterizzate da differenti approcci di rilievo (fig. 3.35). E' ragionevole assumere che sia stata applicata la tecnica di intersezione in avanti nel cuore del territorio rappresentato, mentre che il collegamento tra le 4 sub-aree sia stato assicurato da traguardi reciproci dai principali *benchmark* verso altri punti, ben visibili, delle altre sub-aree. In tutte le aree costiere, giacenti all'interno della soglia operativa di 8-9 km, probabilmente fu utilizzata una tecnica di rilievo più semplice, basata su percorsi a piedi lungo vie selezionate, probabilmente coincidenti con le rive dei canali (come indicano le linee rosse di carta L). Questa tecnica potrebbe in parte giustificare gli alti valori di errore registrati nelle aree costiere (Carrion D., Cenarle F., Somaini F., Sona G., 2008) (Benavides J., Koster E., 2006).

Un test che è possibile effettuare, per avvalorare l'ipotesi, è una georeferenziazione a zone, tenendo separati tra loro i domini operativi ipotizzati. Si tratta di eseguire, in questo caso, 4 differenti georeferenziazioni, prendendo, come GCPs per ognuno dei 4 set, quelli che ricadono in ognuna delle **sub-aree operative** ipotizzate. In questo caso si è preferito applicare trasformazioni semplici (come la conforme o l'affine), in modo da deformare il meno possibile la carta, e vedere quanto bene questa si adatta alla base cartografica moderna per ogni determinata sub-area. L'unione delle 4 sub-aree ricampionate permette poi di analizzare quanto ed in che modo ogni sub-area rototrasla rispetto alle altre, ed evidenziare se ne esiste una che si differenzia maggiormente dalle altre.

Per evidenziare meglio l'effetto della trasformazione e le differenze reciproche tra le 4 sub-aree ricampionate, sulle carte è stato preventivamente sovrainposto un reticolo a maglia quadrata, e le 4 sub-aree (che si riducono a 3 nel caso della carta P) sono state identificate da un punto cardinale e da un colore uguale in tutti per tutte e tre le carte. I risultati di una trasformazione affine a 6 parametri evidenziano andamenti leggermente differenti per le sub-aree dell'entroterra (N, W e S), e abbastanza differente per la sub-area E, coincidente con la zona

deltizia più esterna (fig. 3.36). In carta L si evidenziano notevoli differenze nell'andamento delle sub-aree (qui solo 3), probabilmente per via del fatto che non era elevato il numero di GCPs del set iniziale, e a maggior ragione non lo era il numero dei GCPs per ciascuna sub-area.

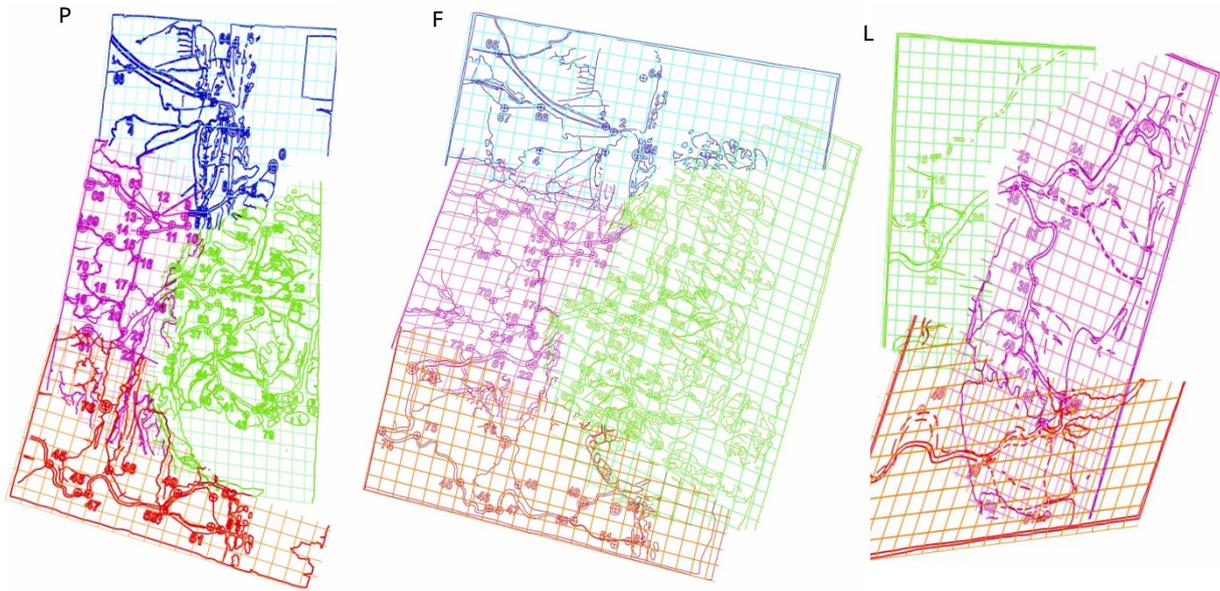


Fig. 3.36 - Esempio di georeferenziazione a zone (trasformazione affine a 6 parametri) condotta sulle carte P, F e L, rispettivamente; le sub-aree georeferenziate singolarmente sono visualizzate con colori differenti (N = blu, W = viola, S = rosso, E = verde).

Per visualizzare i vettori di errore associati ai GCPs, è risultato d'ausilio il software *MapAnalyst*: adottando una trasformazione di Helmert, è stato generato il reticolo trasformato relativo ad ogni singola sub-area (utilizzando di volta in volta l'opportuno set di GCPs), assieme alle isolinee di scala e ai vettori di errore. Una volta esportati, i reticoli delle sub-aree sono stati mosaicati nel rispetto della carta originale, per poterli quindi sovrapporre nella giusta posizione su questa (fig. 3.37). Sono stati anche compiuti confronti tra le varie sub-aree in termini di fattore di scala ed angolo di rotazione (fig. 3.38), valori che possono essere paragonati a quelli in uscita dal processo di georeferenziazione sull'intera carta (riportati in fig. 3.15, par. 3.2.1.1).

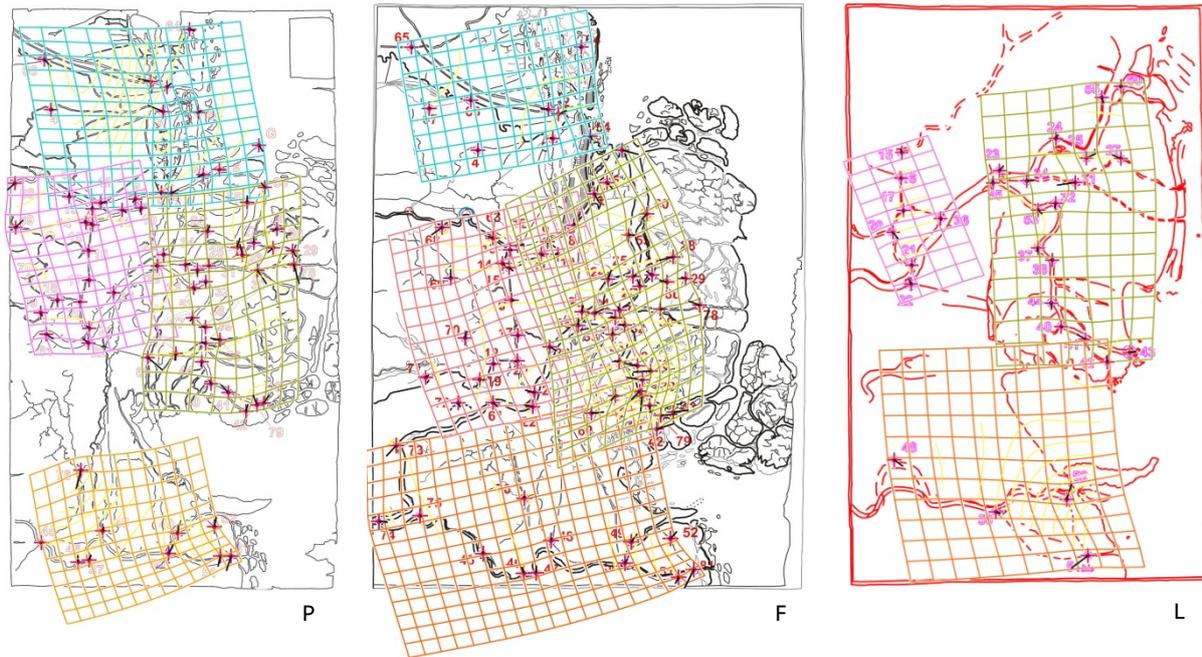


Fig. 3.37 - Visualizzazione dei reticoli deformati delle 4 sub-aree (N, W, S, E), assieme ai vettori di errore sui GCPs (in nero) e alle isolinee di scala (in giallo), sovrapposti alle carte P, F e L, rispettivamente (software *MapAnalyst*, trasformazione di Helmert).

Bisogna comunque tener presente che la scelta a priori di quali GCPs considerare a delineare differenti aree incide sul risultato finale. Tuttavia il procedimento è in grado di evidenziare un effetto contrario a quello normalmente atteso, cioè se l'andamento delle deformazioni insite in carta presenta un andamento analogo su tutte le sub-aree prescelte. Inoltre, la georeferenziazione di aree più ristrette rispetto all'intera zona cartografata permette di evitare la ripartizione degli errori su tutti i punti di controllo (vero per una trasformazione globale), con un peggioramento generale del processo; l'analisi dei residui delle singole georeferenziazioni permette infine di valutare la qualità della rappresentazione nelle specifiche sub-aree, e comprendere quali di queste siano peggiori delle altre (fig. 3.38).

		CARTA trasformata con Helmert			
		N	W	S	E
P	n° punti	12	19	10	30
	fattore di scala medio	12.700	13.400	14.100	11.700
	angolo di rotazione [°] antiorario	9,0	9,9	17,0	2,9
	RMSerror medio [m]	1088	442	815	540
F	n° punti	9	23	13	34
	fattore di scala medio	10.900	10.400	10.700	10.700
	angolo di rotazione [°] antiorario	9,8	18,3	15,5	16,3
	RMSerror medio [m]	298	445	612	570
L	n° punti	-	7	5	18
	fattore di scala medio	-	14.800	11.400	11.800
	angolo di rotazione [°] antiorario	-	18,1	5,3	3,1
	RMSerror medio [m]	-	393	744	360

Fig. 3.38 - Valori di fattore di scala ed angolo di rotazione calcolati in *MapAnalyst* (trasformazione di Helmert) per le sub-aree di fig. 3.37 nelle carte P, F e L; per confronto, si consulti la fig. 3.15 di par. 3.2.1.1.

3.3.2.4. Misure αD

Un miglioramento della ricerca ed un possibile modo per superare l'ostacolo può derivare dal trovare uno strumento capace di riprodurre il metodo di lavoro applicato dal cartografo antico, basato sul riconoscimento delle basi di riferimento topografiche originarie e dei relativi traguardi utilizzati. Il confronto tra questi parametri originari della mappa ed i corrispondenti dedotti dalla cartografia attuale potrebbe aiutare nel definire gli errori "veri" conservati nella mappa antica (vale a dire non indotti dal processo digitale, v. par. 3.2.3). Inoltre, i **sistemi di riferimento interni** ed i parametri esistenti nelle carte originali sono elementi basilari per lo studio dei reali errori antichi.

Un tentativo fatto in questo senso è stato quello di mettersi nei panni del cartografo, e misurare in carta quegli angoli e quelle distanze forse da lui misurati in campagna. In questo modo si è cercato di ricreare quei sistemi di riferimento interni che si suppone siano stati utilizzati dal cartografo antico, per poi trasportarli fisicamente sulla cartografia moderna. Nello specifico, per le carte P e F sono state scelte 2 basi, una di probabile reale utilizzo, e che coincide con la Rettinella (base 15-17), l'altra (base 33-78) fisicamente non utilizzabile, data l'assenza di edifici alti agli estremi, ma comunque presa in considerazione nell'esperimento in quanto permette di ricreare un sistema di riferimento anche per la zona più prossima alla costa (ad est della Rettinella) e in cui la base sia disposta circa perpendicolarmente alla prima (per riflettere la situazione del rilievo di quei punti che essendo visti dalla prima base sotto un angolo troppo stretto, in quanto posizionati lungo la direzione della base, devono essere traguardati da altri vertici, che formino una base il più possibile perpendicolare alla prima). Dai 2 vertici di ogni base, dunque, sono state eseguite misure in carta (dopo aver riportato ogni carta alle sue dimensioni fisiche reali, mediante trasformazione conforme applicata all'interno di un sistema GIS, sulla base della collimazione dei 4 vertici della carta) verso tutti gli altri LMKs (gli stessi usati nella fase di georeferenziazione); nello specifico le misure eseguite in carta sono state:

- angolo rispetto al N della carta;
- distanza tra vertice e LMK.

Ad ogni punto sono quindi state associate le "misure αD ": due misure di distanza (verso i vertici della base) secondo la scala della carta (quella dichiarata per la carta F, quella media calcolata con *MapAnalyst* per la carta P, siccome qui non è presente una scala grafica), più una misura angolare (valore che esprime sotto quale angolo il punto vede la base), ricavata dalle misure di angolo rispetto al N. Le stesse grandezze sono state misurate anche su carta IGM 1:25.000, in modo da poterle confrontare direttamente con le misure lette sulle carte P e F. In particolare sono state eseguite le differenze tra i valori letti sulle carte antiche e quelli letti in IGM (fig. 3.39); tali differenze sono state visualizzate mediante la mappa dei residui e la modalità DSM, già descritte nel paragrafo 3.2.2 (figg. 3.40 e 3.41), distinguendo in classi le differenze che possono essere ritenute significative (in quanto superiori all'incertezza di misura ipotizzabile per gli strumenti di allora, ad esempio 1° per le misure angolari, corrispondente alla graduazione del cerchio della squadra mobile di Fabri) da quelle non significative. Si può osservare che le differenze calcolate hanno

andamenti diversi tra le due carte P e F, segno che le tecniche di rilievo adottate, o almeno i riferimenti topografici utilizzati, sono stati differenti. Dall'analisi del modello tridimensionale dei residui, si può osservare che l'andamento delle differenze angolari è a doppia cuspide (differenze in valore assoluto elevate) nelle vicinanze della base, e stranamente più basso e piatto (differenze in valore assoluto costanti e non elevate) nelle aree più distanti da essa. Ancora, si può osservare che le differenze nelle distanze verso due estremi (D15 e D33, verso i punti 15 e 33) di due basi differenti hanno andamento molto simile all'interno di una stessa carta.

		MEDIE di P/F meno IGM	
		P	F
BASE 15-17	$\alpha(15-17)$ [°]	3,58	3,02
	D15 [m]	680	460
	D17 [m]	770	350
BASE 33-78	$\alpha(33-78)$ [°]	7,15	3,43
	D33 [m]	780	420
	D78 [m]	1250	450

Fig. 3.39 - Medie delle differenze di angoli e distanze, tra i valori letti in carta P o F e quelli letti in carta IGM, per le ipotetiche basi di riferimento 15-17 e 33-78.

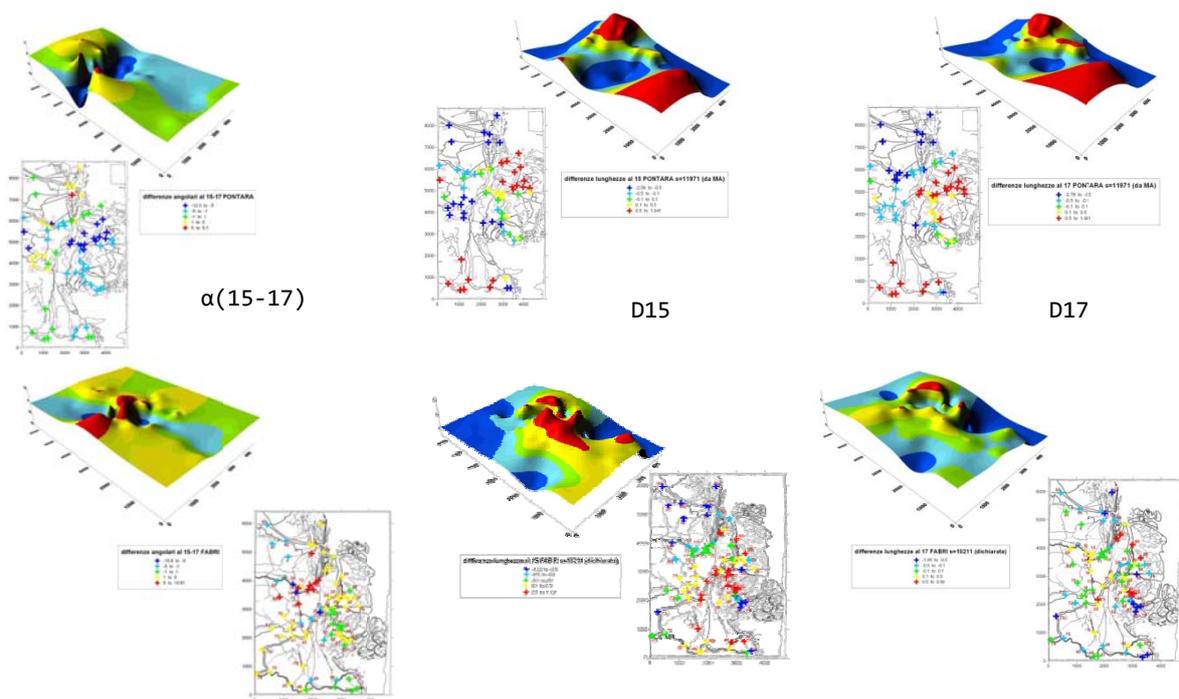


Fig. 3.40 - Visualizzazione, mediante mappatura e DSM dei residui, delle differenze di angolo ($\alpha(15-17)$) e distanze (D15 e D17), tra i valori letti in carta P o F e quelli letti in carta IGM, per l'ipotetica base di riferimento 15-17; sopra P, sotto F.

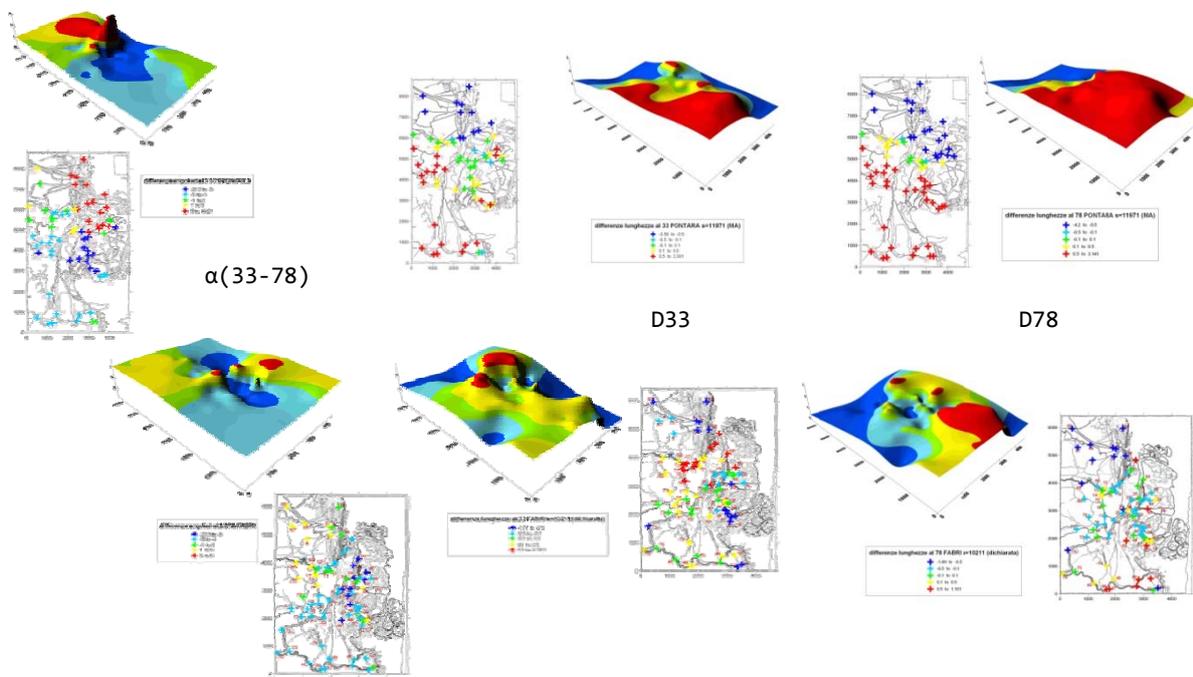


Fig. 3.41 - Visualizzazione, mediante mappatura e superficie 3D dei residui, delle differenze di angolo ($\alpha(33-78)$) e distanze (D33 e D78), tra i valori letti in carta P o F e quelli letti in carta IGM, per l'ipotetica base di riferimento 33-78; sopra P, sotto F.

In secondo luogo, sempre lavorando all'interno di un software GIS, le misure lette sulle carte antiche sono state riportate sulla carta IGM, sia in riferimento ad una base, sia all'altra. Per fare questa operazione si è preventivamente ruotato l'intero sistema, per eliminare la differenza angolare dovuta alla rotazione del nord registrato in carta rispetto al moderno. Quindi sono state calcolate matematicamente le coordinate E e N dei LMKs, come se si trattasse di una intersezione in avanti, fissando 3 vincoli (coordinate E e N di un vertice, 17 o 33, e direzione, 17-15 o 33-78, rispettivamente) e sfruttando i valori di angolo e distanza letti in carta. Associando ad ogni LMK le coordinate E e N così calcolate, è stato possibile mapparli su IGM. Per una visualizzazione più immediata è possibile "texturizzare", per così dire, il risultato della mappatura, tramite trasformazione locale (per mantenere inalterate le coordinate dei LMKs) della carta antica sulla base delle coordinate calcolate (fig. 3.42).

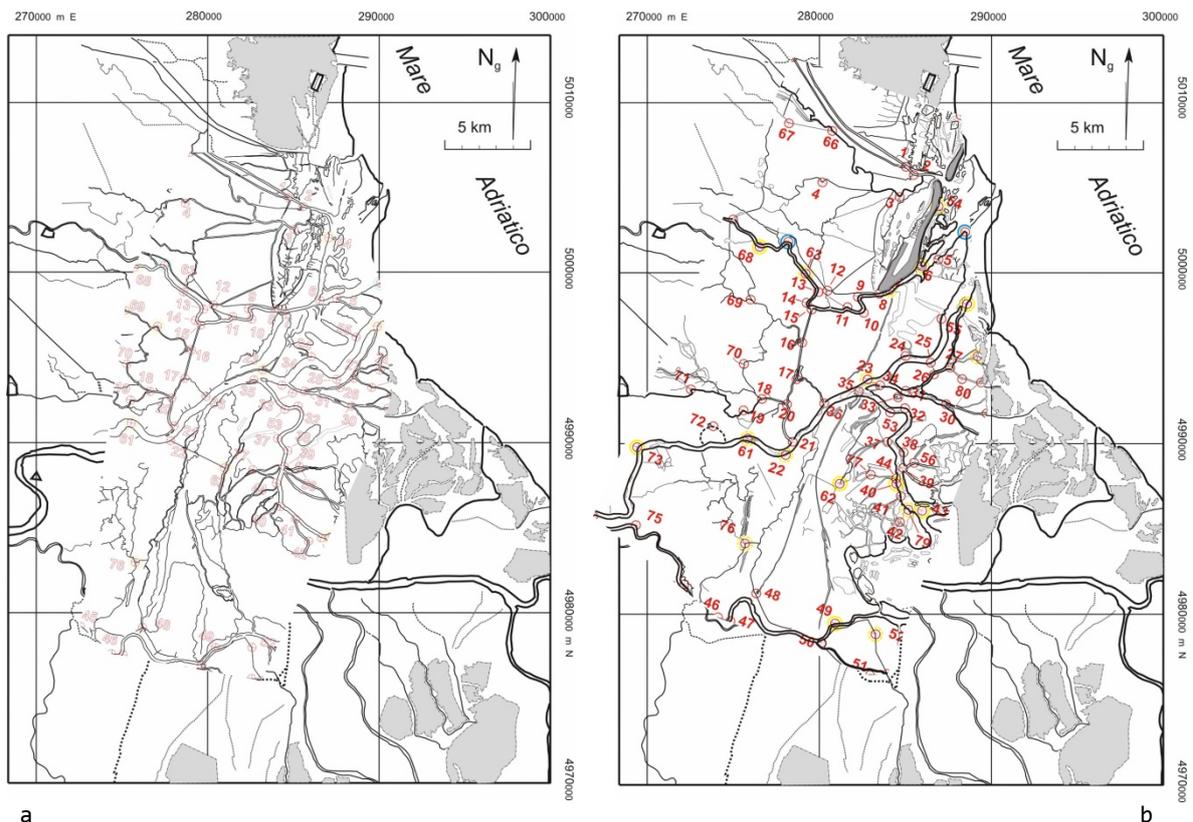


Fig. 3.42 - Mappatura, su cartografia attuale, della carta P (a) o F (b), sulla base delle coordinate dei LMKs calcolate a partire dalle misure α D effettuate in carta (in riferimento alla base 15-17, fissato il punto 17 e la direzione 17-15).

Il risultato equivale ad applicare una rototraslazione con fattore di scala (una trasformazione conforme) attorno ad un punto fissato (17 o 33) e secondo l'angolo impostato (tale da realizzare la coincidenza della base di riferimento in carta antica con quella in carta moderna). Il procedimento è comunque interessante perché permette il confronto diretto, con la cartografia moderna, di grandezze significative ai fini del rilevamento, secondo le tecniche probabilmente utilizzate allora.

Il metodo mostrato rappresenta solo una tra le potenziali strade che è possibile intraprendere per estrapolare informazioni utili anche per le aree periferiche delle mappe antiche, dove fenomeni di erosione naturale non permettono più l'individuazione di LMKs, in quanto scomparsi. Finora, questo tipo di problemi appare irrisolto, rendendo arduo il confronto incrociato tra carte, antiche e moderne, al fine di indagare le differenti configurazioni geomorfologiche assunte dal territorio nel tempo; allo stesso modo, rimane difficoltosa la valutazione dei tassi di cambiamento del paesaggio, in aree, come quella del delta del Po, di fondamentale importanza per lo studio dei delicati equilibri ambientali.

4. ELABORAZIONE E GESTIONE DEL DATO IN AMBIENTE DIGITALE

Everything happens somewhere.

da un articolo su *Computer World News*
Tosta N., vicepresidente di *Ross & Associates*

Sotto il titolo “elaborazione e gestione del dato in ambiente digitale” rientra tutta una classe di **elaborazioni** che è possibile fare disponendo del dato cartografico in ambiente digitale, e differenti tra loro a seconda dello scopo del lavoro. Anche la stessa georeferenziazione può essere intesa come un processo di elaborazione del dato, ma essendo un passaggio normalmente eseguito su tutte le carte, in quanto permette di fornire alla carta un contenuto metrico inserendola in un opportuno sistema di riferimento, e analizzarla dal punto di vista quantitativo, si è preferita trattarla in un capitolo a parte.

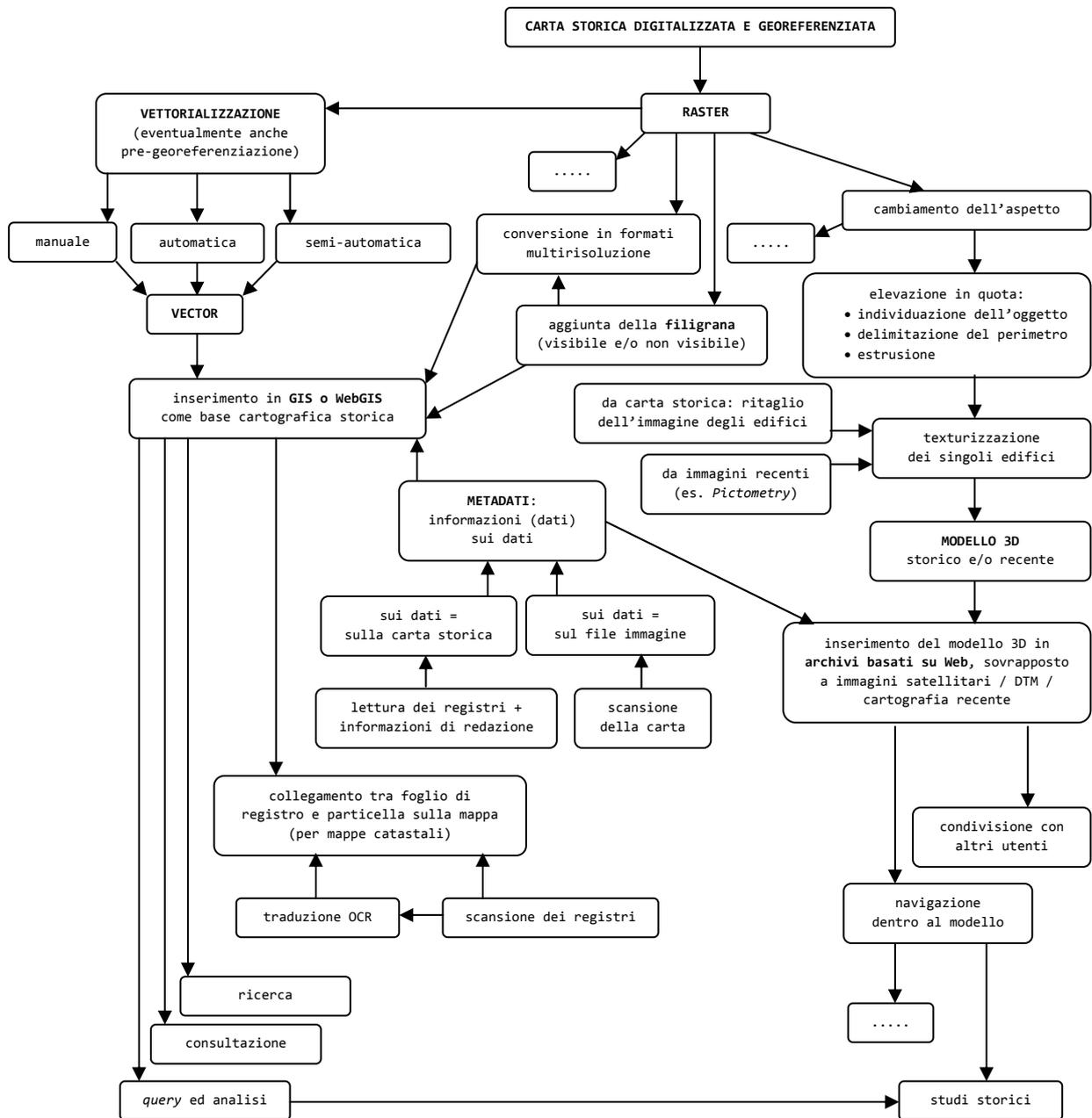
Tutte le elaborazioni di cui si discuterà in questo capitolo rientrano nella fase finale del processo di recupero di cartografia storica, in quanto permettono di consegnare all’utente un prodotto digitale finale differente dall’originale, poiché ha raggiunto un più alto livello di espressione: si può dire che queste elaborazioni forniscano al prodotto cartografico originale un **valore aggiunto**. Si tratta comunque di elaborazioni opzionali, la scelta delle quali dipende unicamente dallo scopo del lavoro. Di conseguenza, i tipi di trattamento di dati illustrati in questo capitolo non vogliono esaurire tutti i possibili, ma solo mostrare i più comuni:

- vettorializzazione della carta (cap. 4.1);
- modellazione tridimensionale (cap. 4.2);
- inserimento della carta in sistemi GIS o WebGIS, previo allestimento dei metadati e collegamento agli eventuali registri catastali (cap. 4.3).

Le elaborazioni saranno illustrate dai consueti casi pratici. In particolare, in questo capitolo verranno esaminate: la Icnoscenografia di de’ Gnudi, per quanto riguarda la modellazione tridimensionale, e alcune

mappe del Catasto Gregoriano, per quanto riguarda la vettorializzazione e l'inserimento in sistemi WebGIS.

Di seguito si riporta il diagramma di flusso relativo ai processi trattati nel capitolo.



4.1. VETTORIALIZZAZIONE

La carta storica digitalizzata mediante i processi illustrati nel capitolo 2 consiste in un file **raster**. Questo è il formato di rappresentazione più noto per un'immagine digitale; esso consiste in una matrice di pixel (o 3, nel caso di immagine RGB), ognuno dei quali contiene, sottoforma di numero binario, l'informazione radiometrica della porzione di immagine che rappresenta. Ogni pixel è identificato mediante 2 coordinate intere (riga, colonna), in un sistema di riferimento intrinseco alla matrice.

Un'immagine digitale può presentarsi anche sotto un altro formato, il **vector**. In questo caso l'informazione viene organizzata e gestita mediante le primitive grafiche della geometria cartesiana, cioè punti, linee ed aree, espresse mediante equazioni matematiche (secondo variabili spaziali che assumono valori reali, in un determinato sistema di riferimento). Una caratteristica delle immagini vettoriali è quella di essere organizzate per livelli (*layer*), ognuno dei quali raccoglie una specifica classe di elementi, topologicamente affini tra loro. I più comuni formati di file per le immagini vettoriali sono quelli caratteristici dei principali software del settore, ad esempio: *.dxf* e *.dwg* (software *Autodesk*), *.shp* (software *Esri*), *.tab* e *.mif* (software *MapInfo*), *.dgn* (software *MicroStation*).

Dunque, le rappresentazioni raster e vector non hanno nulla in comune tra loro, se non il fatto che entrambe descrivono immagini numeriche. Se il primo tipo privilegia l'informazione visiva, qualitativa, dell'immagine (anche a scapito di uno spazio di memorizzazione più elevato), e quindi è più adatto alla rappresentazione dettagliata e radiometricamente corretta di un oggetto, il secondo tipo privilegia il fattore di maneggevolezza, snellezza e velocità nella gestione e nel trasferimento dell'informazione, quindi è più adatto alla rappresentazione sintetica, ma precisa, di un oggetto. Infatti larga parte delle applicazioni legate alla cartografia numerica e ai Sistemi Informativi Territoriali è basata su dati in formato vettoriale, in quanto questi risultano particolarmente adatti a supportare collegamenti con archivi e database alfanumerici esterni.

Qualora si abbia a disposizione un'immagine in formato digitale raster, è tuttavia possibile il passaggio ad un formato vector mediante un processo di conversione, detto **vettorializzazione**. I risultati che si intendono perseguire con tale processo sono:

- trasferire la topologia dei dati (connessioni, intersezioni, adiacenze, inclusioni, ecc.);
- individuare univocamente gli oggetti, al fine di realizzare applicazioni GIS in cui effettuare la connessione di tali oggetti con database esterni e utilizzare le tecniche più comuni di consultazione metrica dei dati.

Nel caso di immagini da georeferenziare (come risulta trattando di cartografia storica), è possibile attuare il passaggio da raster a vector sia a monte del processo di georeferenziazione, per poi georeferenziare la carta direttamente in vettoriale, sia a valle, cioè sul raster già georeferenziato. Solitamente, al processo fa seguito l'inserimento della carta vector in ambiente GIS o WebGIS, come *layer* cartografico storico; di questa fase ci si occuperà nel capitolo 4.3.

Anche se con modalità differenti, nel caso di cartografia la vettorializzazione può essere eseguita direttamente sul dato analogico, in fase di acquisizione. In questo caso si tratta di utilizzare **piani di digitalizzazione** (o *digitizer*), coi quali il lavoro viene svolto totalmente in modalità manuale, con conseguenti lunghi tempi e possibilità di errori accidentali nella digitalizzazione. A ciò si aggiunga che la tecnica generalmente non è adatta alla vettorializzazione di cartografia storica, in particolare perché il documento originale è delicato, e di solito in condizioni di conservazione non idonee al processo.

Dunque, per la vettorializzazione di cartografia storica normalmente si ricorre a metodi di **conversione a video**, condotti mediante appositi strumenti software, a partire dal dato in forma digitale analogica. In particolare, esistono tre modalità differenti per realizzare il passaggio da raster a vector:

- manuale;
- automatica;
- semi-automatica;

a seconda di quanta parte assume il software, e quanta l'utente, nel riconoscimento delle forme caratteristiche degli oggetti (punti, linee, aree) sull'immagine raster. Nel paragrafo seguente si spiegheranno più in dettaglio le procedure, valutando quali sono le problematiche inerenti, mediante casi applicativi riguardanti il Catasto Gregoriano.

Come considerazione generale, è da evidenziare che la vettorializzazione di cartografia antica comporta dei problemi specifici, dovuti ad alcuni caratteri che distinguono questa dai prodotti cartografici moderni: redazione manuale, particolare rappresentazione grafica del testo, valore artistico del disegno (in particolar modo la cartografia dei secoli precedenti l'Ottocento è caratterizzata da un

disegno con una forte componente decorativa, difficilmente convertibile in forma vettoriale), uso estetico del colore, oltre che pieghe, macchie e lacerazioni del supporto analogico. Il processo di vettorializzazione si dimostra dunque non banale, soprattutto quando condotto con metodi di conversione a video semi-automatici e in particolare automatici, per via della difficoltà nel riconoscimento in automatico delle scritte, delle linee, e dei perimetri e delle aree degli oggetti.

4.1.1. Vettorializzazione manuale

La procedura di vettorializzazione manuale è ancora largamente utilizzata, in quanto unisce due vantaggi: da una parte fornire all'operatore un approccio semplice di vettorializzazione senza richiedere software particolarmente specializzati, dall'altra poter garantire una notevole precisione, se la procedura viene eseguita in modo accurato. Questo implica la capacità, da parte dell'operatore, di riconoscere punti critici sull'immagine, come intersezioni tra oggetti, punti di tangenza di entità separate, ecc. (proprio quei punti che creano ambiguità nelle procedure automatiche di vettorializzazione), e quindi saperli interpretare e risolvere direttamente. Lo svantaggio è ovviamente in termini di tempo, di solito molto lungo dato il tipo di operazione e il livello di attenzione costantemente richiesto.

La vettorializzazione manuale è consentita anche in un comune ambiente CAD, in cui il software permette di riconoscere visivamente le entità e ricostruirle (mediante definizione di punti, linee ed aree) direttamente sull'immagine, in modo analogo a quanto avviene con il tavolo digitalizzatore. L'operazione di vettorializzazione manuale consiste dunque nel seguire punto a punto il disegno raster, definendo così le polilinee che descrivono le entità. Specifici comandi consentono la creazione e la gestione dei *layer*, a cui vengono assegnati i dati acquisiti. Alcuni software più specialistici permettono anche il riconoscimento di forme geometriche predefinite secondo modelli vettoriali precostituiti, presenti in librerie di simboli interne al software o costruite dall'utente.

Siccome l'attenzione dell'operatore nel tempo tende a calare, con conseguenti distrazioni e quindi inevitabili errori, deve essere prevista una fase successiva a quella di riconoscimento delle entità (fase di *post-processing*), dedicata al controllo finale del file vettoriale creato; sarebbe buona norma che questa fase fosse eseguita da altro operatore.

4.1.1.1. Esempio di applicazione ad una mappa catastale

Per valutare l'applicabilità di una procedura di vettorializzazione manuale ad una carta storica di tipo catastale, è stato eseguito un test su una porzione di foglio del Catasto Gregoriano ed. 152bis (foglio VIII piano terra), non georeferenziato. Allo scopo si è fatto uso di un software specifico per la digitalizzazione (consentita sia in modalità manuale sia automatica), oltre che per la georeferenziazione e la conversione di coordinate.

Nella vettorializzazione manuale risulta utile la creazione di *layer* differenti a seconda degli oggetti identificati; nel caso di una mappa catastale, ad esempio, si possono distinguere (fig. 4.1):

- **edifici** (particelle), mediante poligoni chiusi, a cui è eventualmente associabile un riempimento;
- **identificativi di particella** (numeri o lettere), mediante caselle di testo a formato predefinito; l'utilizzo di questo espediente è in funzione di un successivo collegamento, in ambiente GIS, tra mappa e brogliardo, in base al numero di particella;
- **strade**, mediante ricalco dei nomi con lo strumento *spline polyline*, in modo da conservare il più possibile lo stile grafico della carta; in alternativa è possibile inserire i nomi delle vie mediante caselle di testo, se il fine è la caratterizzazione del livello come testo (ad esempio per una catalogazione delle strade);
- **arredo urbano**, mediante polilinee o poligoni chiusi.

L'utilità di suddividere gli oggetti per classi è data dal poter applicare caratteri comuni (in termini di colore, spessore, ecc.) a tutte le entità del *layer*, per una distinzione visiva più immediata, oltre che dal visualizzare solo la tipologia di oggetti di interesse, ed esportarla separatamente dalle altre (Orciani M., Frazzica V., Colosi L., Galletti F., 2006).

Una difficoltà riscontrata nella vettorializzazione dei singoli oggetti chiusi (le particelle) è data dalla modalità di gestione delle adiacenze tra tali poligoni, avendo questi uno o più lati in comune. Infatti, l'oggetto "particella" come entità chiusa viene definito mediante ricalco del perimetro (individuando i vertici del poligono con lo strumento *polygon*), e in modo analogo per le tutte le particelle adiacenti: se il sistema non prevede una gestione topologica delle entità geometriche, i lati in comune devono essere digitalizzati due volte, con *snap* sugli stessi vertici oppure con effettiva doppia ricollimazione delle linee e conseguenti possibili cattive sovrapposizioni quando i punti digitalizzati non sono esattamente gli stessi. All'interno dei software

sono a volte previsti specifici strumenti per la gestione di tali problemi con procedure di *cleaning*.

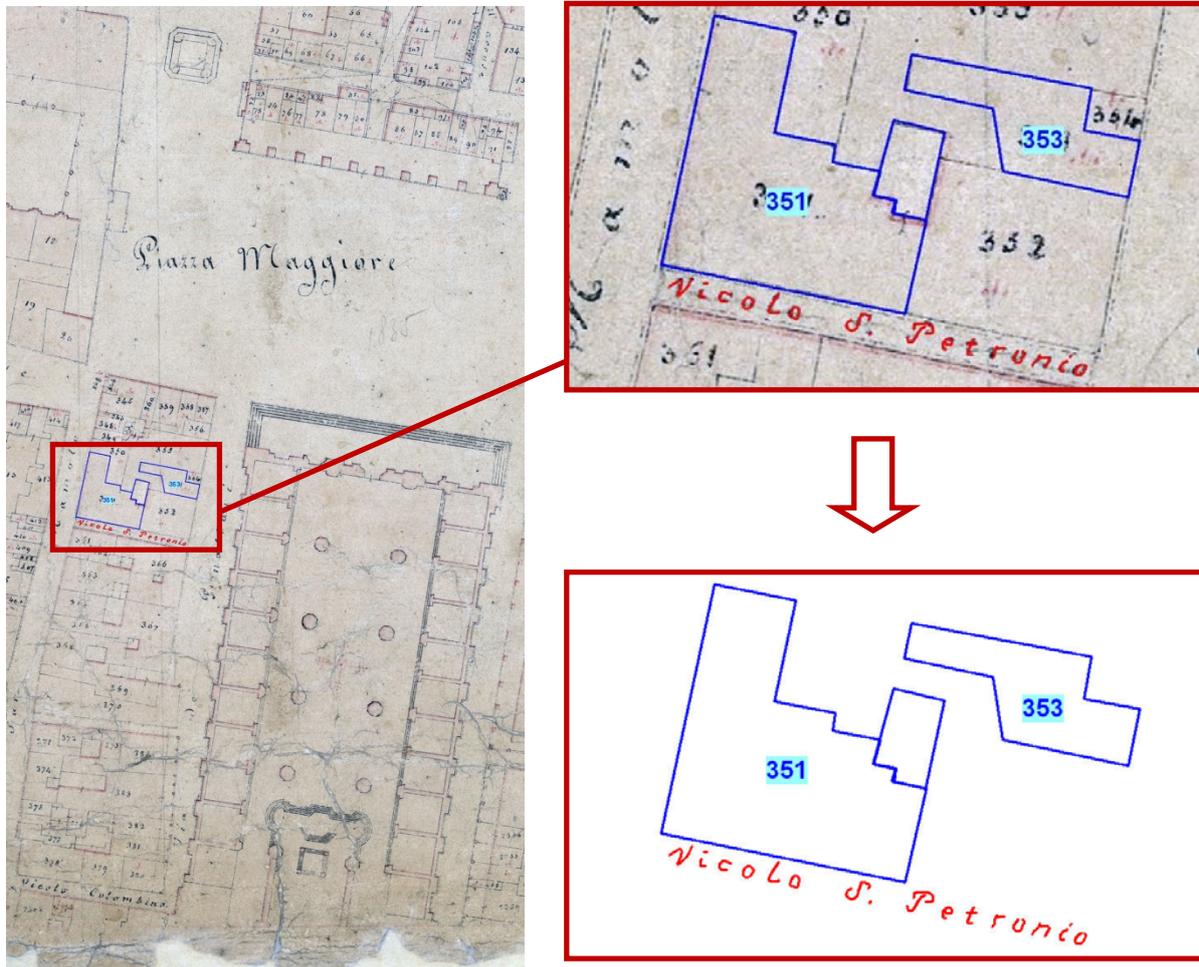


Fig. 4.1 - Esempio di vettorializzazione manuale su una porzione del foglio di mappa catastale VIII, piano terra (Catasto Gregoriano ed. 152bis); gli oggetti sono stati suddivisi per *layer*, a seconda della tipologia: edifici, numeri di particella, vie.

4.1.2. Vettorializzazione automatica

La vettorializzazione automatica prevede invece l'utilizzo di software specialistici, in grado di riconoscere e convertire le entità del disegno dell'immagine raster, mediante l'applicazione di opportuni algoritmi, quindi senza richiedere l'intervento dell'operatore. La procedura di riconoscimento dei dati è molto complessa, e suddivisibile in due fasi:

- raggruppamento in blocchi dei pixel adiacenti aventi valori radiometrici uguali o simili;
- definizione delle linee di contorno lungo il confine delle aree omogenee individuate, utilizzando, come punto di partenza, l'angolo di collegamento di tre o quattro pixel con valori differenti.

L'approccio normalmente utilizzato per la restituire vettoriale di una linea è quello di costruire il profilo lungo la mezzeria dello spessore e non sul contorno dei pixel, in quanto un oggetto sull'immagine raster può avere spessore variabile.

Per adattarsi alle esigenze del caso specifico, i software consentono di definire il valore di alcuni parametri caratteristici degli algoritmi utilizzati, tra i quali:

- dimensioni minime e massime per il filtraggio degli elementi grafici;
- minima lunghezza di un segmento: distanza minima che deve intercorrere tra due nodi successivi per definire come segmento quell'entità;
- minimo numero di pixel necessario per la generazione di un punto;
- valore di soglia, in pixel, per definire come area e non più come linea una certa entità;
- le caratteristiche di riempimento dei poligoni: tinta unita, o inclinazione e tipo di linea del tratteggio (per rappresentazioni cartografiche con identificazione dei poligoni mediante retini tratteggiati);
- valore di parametri caratteristici degli algoritmi di pulitura e di generalizzazione cartografica (semplificazioni, lisciamenti, spostamenti relativi, fusioni).

Alla fase di vettorializzazione automatica vera e propria è bene anteporre una di *pre-processing*, per correggere i difetti più evidenti dell'immagine raster, ed una di *post-processing*, analoga a quella in uscita da una procedura manuale di vettorializzazione, per il controllo del risultato della procedura automatica. In una procedura di vettorializzazione in automatico, la fase di *pre-processing* risulta particolarmente importante: infatti, risultati accettabili sono generalmente raggiungibili utilizzando immagini monotematiche e particolarmente pulite, prive cioè di quel

“rumore di fondo”, di quei difetti radiometrici dovuti al processo di acquisizione (riscontrabili ad esempio nel caso in cui il supporto del documento originale sia deformato o usurato). L'operazione può essere condotta all'interno dello stesso software di vettorializzazione, o all'interno di comuni software di elaborazione di immagine, mediante l'applicazione di specifici filtri nel dominio spaziale, che in genere operano in base ad una maschera di dimensioni predefinite: al pixel centrale viene sostituito il risultato di un'operazione (ad esempio la media o la mediana) che coinvolge i valori radiometrici delle celle contenute all'interno della maschera.

4.1.2.1. Esempio di applicazione ad una mappa catastale

Per valutare l'applicabilità di una procedura di vettorializzazione automatica ad una carta storica di tipo catastale, è stato eseguito un test sulla stessa porzione di foglio del Catasto Gregoriano utilizzata per il test di vettorializzazione manuale, e ricorrendo al medesimo software.

In questo caso, per valutare l'influenza della qualità dell'immagine raster sul risultato della vettorializzazione, il test è stato eseguito con 3 diverse elaborazioni di *pre-processing*:

- A: nessuna correzione radiometrica dell'immagine scandita;
- B: correzione automatica del colore e aumento automatico del contrasto;
- C: conversione dell'immagine B in toni di grigio.

La vettorializzazione è stata eseguita in automatico sull'intera porzione di foglio, per ognuno dei 3 casi, lasciando inalterate le impostazioni di default (fig. 4.2).

Il risultato è all'apparenza abbastanza buono, ma nell'ingrandimento dell'immagine si notano diversi particolari digitalizzati in maniera errata (fig. 4.3). Si tratta soprattutto di:

- nodi, che risultano in posizione errata (cioè non sul vertice corrispondente dell'immagine raster);
- poligoni, normalmente non riconosciuti come entità chiuse (anzi, spesso la linea di delimitazione appare discontinua); è stata anche testata la funzione automatica per il riconoscimento dei poligoni in fase di vettorializzazione, ma non ha garantito validi risultati, rendendosi necessario il successivo riconoscimento manuale delle linee che compongono il poligono;

- numeri di particella riconosciuti solo in parte, e, date le caratteristiche del disegno, riconosciuti come entità “linea curva” e non come “numero”;
- uso speciale del colore (sulla carta originale, certi particolari vengono evidenziati con una doppia linea e un colore di riempimento), che mette in difficoltà l’algoritmo nel riconoscimento degli oggetti; i risultati migliori in questo senso sono stati raggiunti sull’immagine C;
- usura del supporto analogico, che ha fornito disturbi nella restituzione vettoriale, soprattutto nell’immagine A (non processata preliminarmente).

In generale è possibile affermare che i risultati migliori sono stati ottenuti con l’immagine pre-processata denominata B (correzione del colore e aumento del contrasto), in quanto, anche se peggiore rispetto all’immagine C per quanto riguarda il riconoscimento dell’uso speciale del colore, rimane migliore per quanto riguarda la restituzione di un maggior numero di linee perimetrali continue. Restano comunque vari difetti, che richiedono quindi l’intervento di un operatore per la correzione manuale in *post-processing*.

Il test effettuato dimostra che, per grandi progetti di vettorializzazione, occorre valutare se, in termini di tempo, sia più conveniente una vettorializzazione manuale dell’immagine o una automatica, con successiva correzione. Anche tentativi di vettorializzazione automatica condotti da altri su mappe catastali del Gregoriano (Paselli E., 2009), hanno portato a risultati simili a questi, facendo optare per una vettorializzazione in modalità manuale.

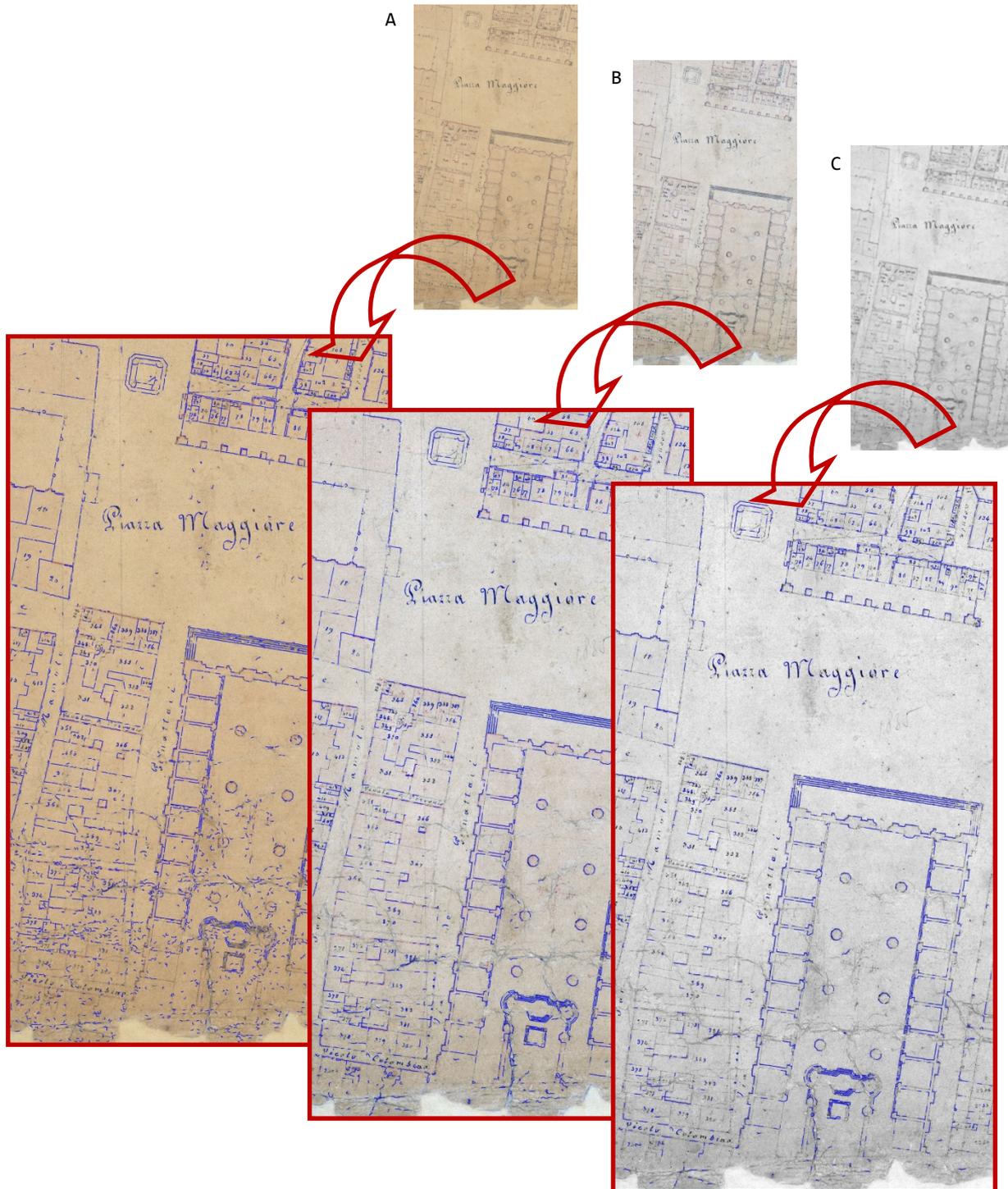


Fig. 4.2 - Esempio di vettorializzazione automatica sulla stessa porzione di foglio di fig. 4.1, a partire da: A) nessuna correzione radiometrica dell'immagine scandita; B) correzione automatica del colore e aumento automatico del contrasto; C) conversione dell'immagine B in toni di grigio.

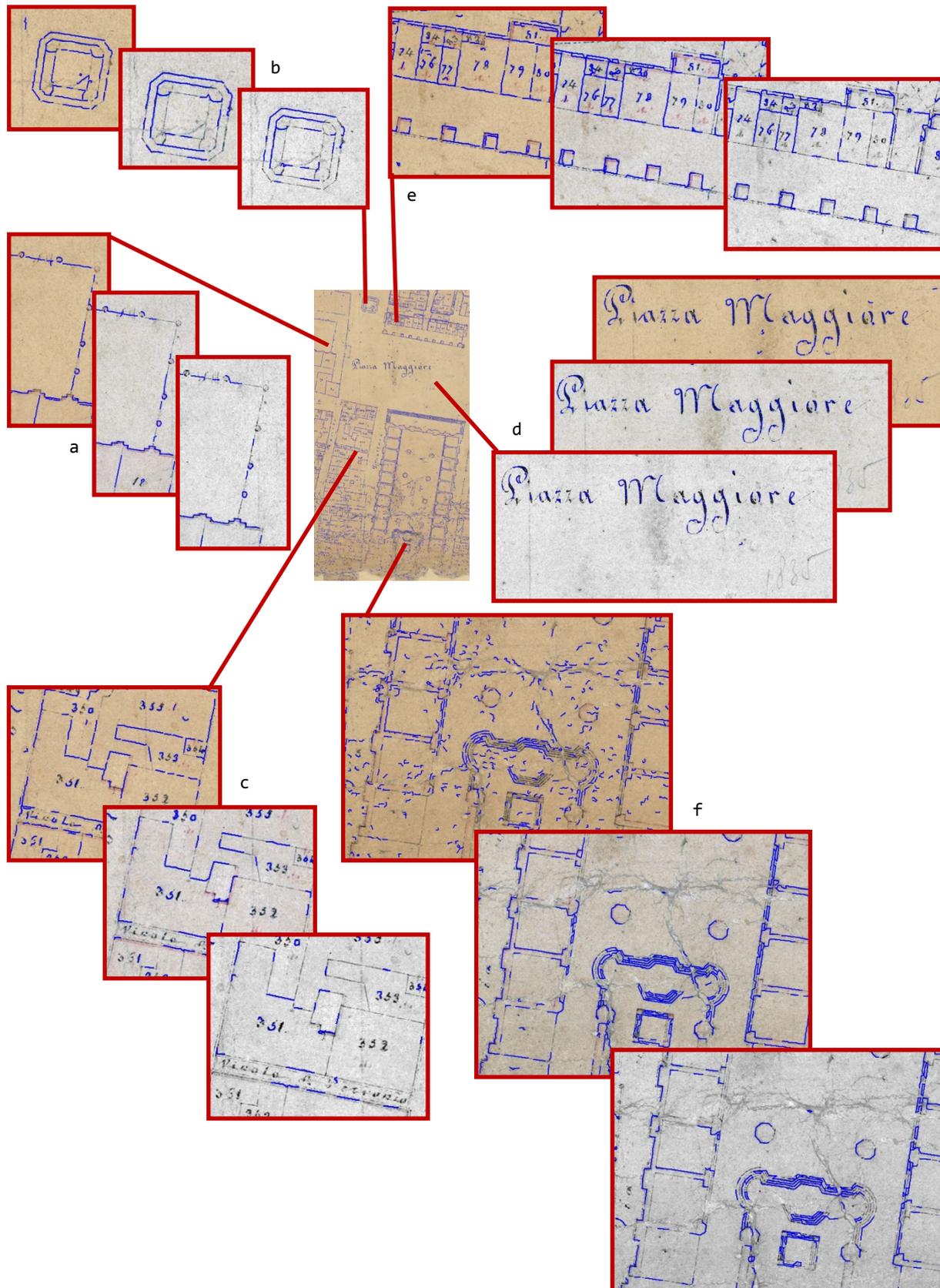


Fig. 4.3 - Particolari delle vettorializzazioni di fig. 4.2 (sempre, dall'alto al basso: A, B e C), per evidenziare alcuni problemi di digitalizzazione automatica: a) nodi; b) poligoni; c) numeri di particella (stesso particolare di fig. 4.1 sulla vettorializzazione manuale); d) scritte; e) uso speciale del colore; f) usura del supporto analogico.

4.1.3. Vettorializzazione semiautomatica

La vettorializzazione semi-automatica è una tecnica che si pone in mezzo tra le due precedenti, nel tentativo di raggiungere un compromesso in termini di qualità del risultato e di contenimento dei tempi. Uno degli algoritmi più utilizzati in questo caso è il *line-following* (inseguimento di linea): in automatico avviene il riconoscimento della linea di cui in modo manuale si è individuato il punto di origine; il riconoscimento si interrompe ogniqualvolta lungo la linea venga incontrato un punto ambiguo, per dar modo all'operatore di interpretare in modo corretto l'ambiguità.

In questa modalità di vettorializzazione la fase di *post-processing*, di controllo di eventuali errori, risulta marginale, in quanto già eseguita interattivamente durante il processo stesso di vettorializzazione. Consiste eventualmente nel chiudere le linee (tramite apposito comando) per definire poligoni e garantire la corretta strutturazione topologica, ed eliminare eventuali nodi che generano ripiegamenti della linea su se stessa o percorsi a ritroso lungo il suo stesso sviluppo (caso non infrequente).

4.2. MODELLAZIONE TRIDIMENSIONALE

Una serie di possibili elaborazioni sulla carta storica in formato Raster riguarda il cambiamento dell'aspetto della carta, a diversi scopi: migliorarne la comprensione, valorizzare il contenuto espressivo, modificare l'aspetto secondo le convenzioni moderne, fornire alla carta una veste più attraente, e così via.

Tra queste, particolarmente attraente risulta l'associazione di una vista tridimensionale alle caratteristiche della carta storica, mediante creazione di un **modello virtuale 3D** a partire dalla planimetria della carta. Nonostante la creazione del modello e la sua gestione vengano condotte attraverso moderni strumenti della Geomatica, il tipo di rappresentazione, tridimensionale (che quindi prende in considerazione al contempo l'aspetto planimetrico e quello altimetrico), è di invenzione per nulla moderna: le carte scenografiche delle città, molto di moda in età rinascimentale, ne sono chiara testimonianza, e la Icnoscenografia di de' Gnudi ne è un esempio illuminante. Dopotutto, al fine della realizzazione di un modello tridimensionale, ben si adattano carte storiche scenografiche, in quanto contengono al loro interno la rappresentazione degli alzati oltre che del tessuto urbano. La tecnica trova un'applicazione ottimale con le rappresentazioni scenografiche di città, che è il caso preso in considerazione nella presente tesi; tuttavia non è riservata solo a questo settore, applicandosi anche a rappresentazioni del paesaggio (de Boer A., 2010).

Un modello tridimensionale digitale attraverso cui rappresentare la carta storica facilita la lettura del documento cartografico, facendo avvicinare ad esso anche utenti non esperti:

- alla carta vengono forniti un più alto livello espressivo ed una **visualizzazione più attraente**;
- ne risulta una maggior **semplicità di lettura** della carta, anche da parte di un pubblico non esperto (perché la vista tridimensionale, a tutti familiare, fornisce bene l'idea di come doveva apparire la città o il territorio al tempo di redazione della carta);
- infine si garantisce, per gli studiosi della carta, una maggior **flessibilità di utilizzo** del documento in molteplici applicazioni, e una modalità alternativa di studio e confronto con altri documenti (ad esempio attraverso l'esplorazione del modello in modo interattivo).

D'altronde questi sono alcuni dei vantaggi principali di una cartografia 3D, assieme alle potenzialità di analisi su questo tipo di dati che appropriati moduli GIS possono consentire.

In questo capitolo si illustreranno le fasi di creazione di un modello tridimensionale, prendendo come riferimento la Icnoscenografia di Bologna di de' Gnudi, che, data la rappresentazione "a volo di uccello", ben si adatta allo scopo. Si precisa che l'obiettivo del lavoro non è ottenere un vero e proprio *3D City Model*, ma un prodotto semplificato che unicamente mantenga tutti gli aspetti descrittivi e le informazioni della carta storica, associandovi inoltre una visione tridimensionale; tuttavia, anche in questo modo il prodotto riesce a riportare i principali vantaggi di una cartografia 3D (Bitelli G., Gatta G., 2007).

4.2.1. Creazione del modello 3D

Per dare una nuova veste, tridimensionale, alla Icnoscenografia, si è dunque sfruttato il tipo di rappresentazione della carta stessa. Allo scopo si è utilizzato un software di modellazione che permette di creare, visualizzare e modificare disegni e forme in maniera tridimensionale; anche se ideato per la progettazione di scene ed architetture, si presta bene ad applicazioni di carattere ambientale-territoriale. La creazione di modelli 3D avviene tracciando poligoni e linee sul piano, che estrusi danno origine a facce, a cui si possono applicare texture e ombre.

La generazione del dato tridimensionale sulla base della carta storica è avvenuta a partire dagli aspetti topografici deducibili dalla cartografia stessa: l'informazione planimetrica, data dal perimetro degli edifici, e l'informazione altimetrica, deducibile dalla rappresentazione scenografica della città, che mette in mostra le facciate degli edifici. L'operazione è stata attuata in alcuni passaggi fondamentali, descritti in dettaglio nei paragrafi seguenti:

- **elevazione in quota** dei singoli edifici;
- **rendering** delle facciate, eseguito applicando come texture, su ogni edificio estruso, l'immagine della facciata corrispondente, dopo averla tagliata e corretta dalle distorsioni dovute all'assonometria;
- **generazione del modello completo.**

La sperimentazione e le illustrazioni che seguono si riferiscono ad una parte del centro storico della città.

4.2.1.1. Elevazione in quota

E' possibile suddividere in tre passaggi fondamentali l'operazione di elevazione in quota di ogni singolo edificio (fig. 4.4), a partire dalla carta digitalizzata, che è stata sfruttata come piano su cui eseguire la modellazione:

- individuazione dell'elemento da elevare sull'immagine digitalizzata della carta storica (come elementi dell'arredo urbano sono stati considerati edifici e statue);
- delimitazione della planimetria dell'oggetto (operazione non facile, sia per la visione prospettica che impedisce di vedere la parte retrostante ciascun edificio, sia per la complessità di alcuni fabbricati);
- **estrusione**, a partire dalla planimetria, nel rispetto dell'informazione altimetrica deducibile dall'immagine originale.

Il risultato di questa serie di operazioni è la rappresentazione dell'edificio selezionato attraverso un elemento solido 3D.

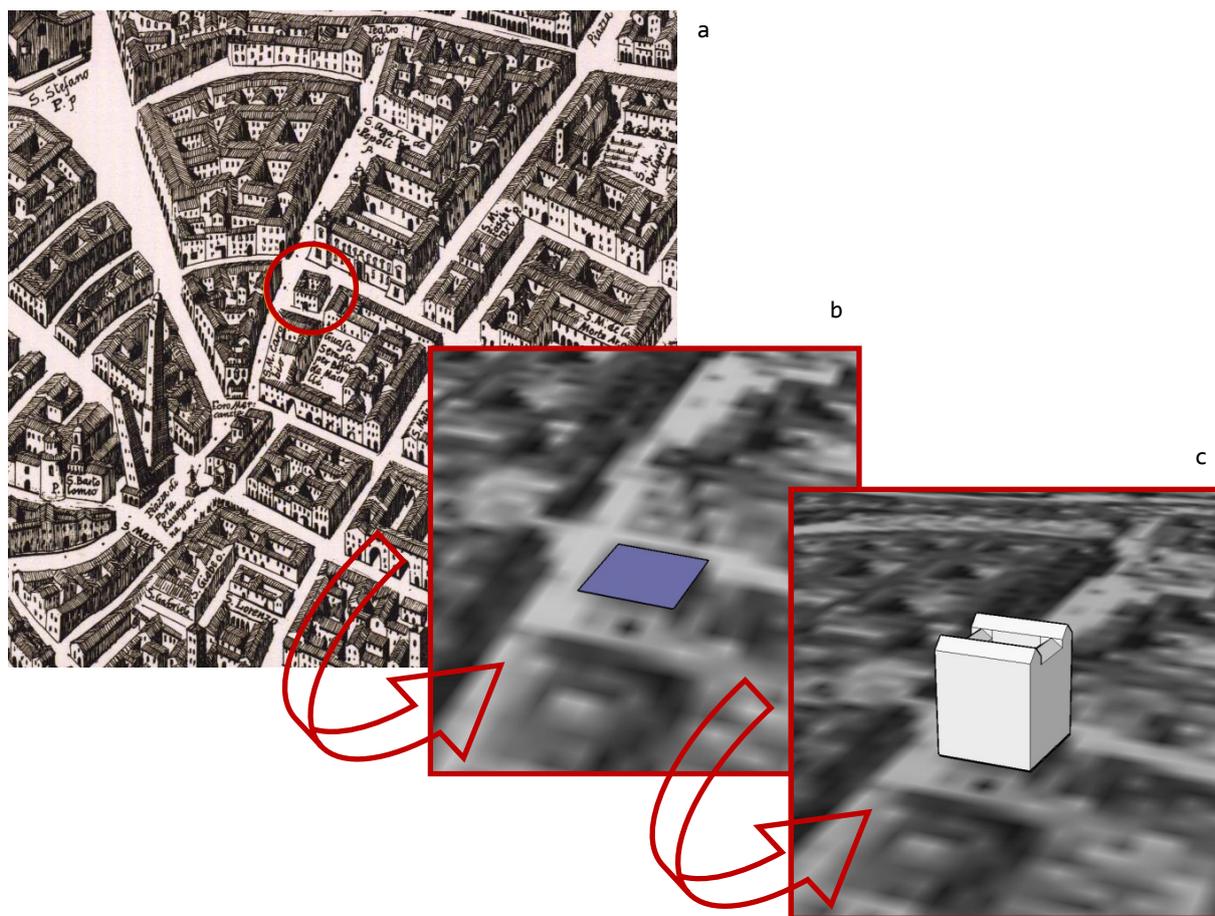


Fig. 4.4 - Elevazione in quota di un edificio:

a) individuazione dell'elemento; b) delimitazione della planimetria; c) estrusione.

4.2.1.2. Texturizzazione

Per rendere più attraente la rappresentazione, è possibile colorare le facciate dell'elemento solido. Nel caso, come questo, di cartografia storica in vista prospettica, il passaggio è anzi quasi obbligato, dato che l'obiettivo è la creazione di un modello il più possibile fedele alla carta storica di partenza, e il più possibile attraente. Sfruttando dunque l'informazione del disegno della carta storica, in cui la visione prospettica permette di cogliere l'immagine di tutta una parte dell'edificato (così come appariva al tempo di redazione del documento), è stata applicata una *texture* ad ogni singolo elemento solido 3D.

L'operazione di "texturizzazione" consiste nel ritaglio delle porzioni di interesse dall'immagine digitale della carta storica, nella loro correzione dalle distorsioni dovute all'assonometria, quindi nell'applicazione di queste porzioni sulle corrispondenti facciate dell'elemento solido 3D (fig. 4.5). Dato che la visione prospettica non permette di vedere la parte nascosta delle facciate degli edifici, ogni elemento solido presenterà texturizzate al più due facciate su quattro.

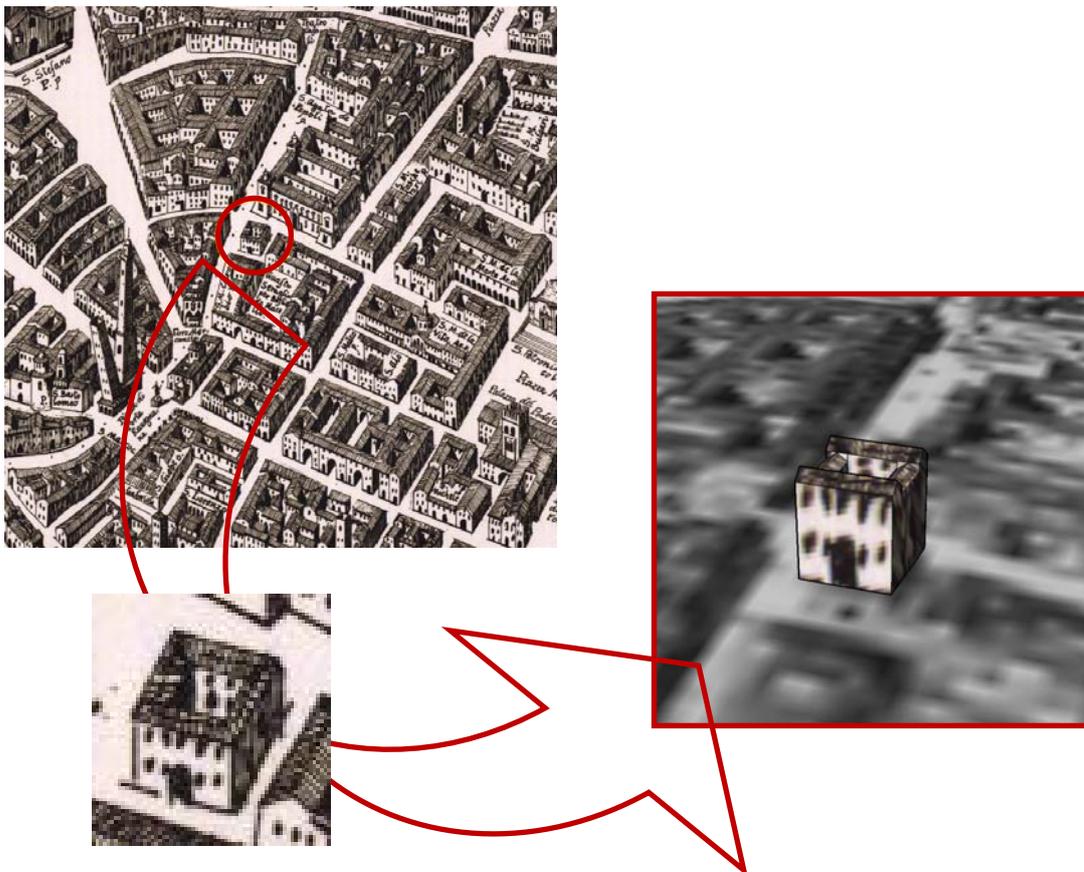


Fig. 4.5 - Texturizzazione dell'edificio di fig. 4.4, con l'immagine estratta dalla carta storica.

4.2.1.3. Generazione del modello completo

Quello che finora è stato descritto per un singolo edificio, può essere applicato a tutti gli altri edifici di interesse. Dall'unione dei singoli elementi solidi (tutti costruiti a partire dal piano della carta digitalizzata), nasce il modello tridimensionale completo (fig. 4.6). All'interno dello stesso software di modellazione e di altri ambienti 3D, il modello è completamente esplorabile, mediante classici strumenti di navigazione, come *zoom*, *pan* e rotazione.

In tal modo, sono molteplici le opportunità di analisi che si aprono, e che non sarebbero state possibili con la sola immagine digitalizzata della carta; solo per citarne alcune:

- creazione di **voli virtuali** all'interno del modello, anche in parallelo con gli stessi effettuati su dati moderni, ad esempio per evidenziare la variazione della *skyline* nel seguire gli stessi percorsi;
- **visione più immediata** dell'edificato, anche sotto prospettive differenti da quella propria della carta originale;
- **studi storici** sulla rappresentazione dei singoli edifici e sull'evoluzione dell'edificato.

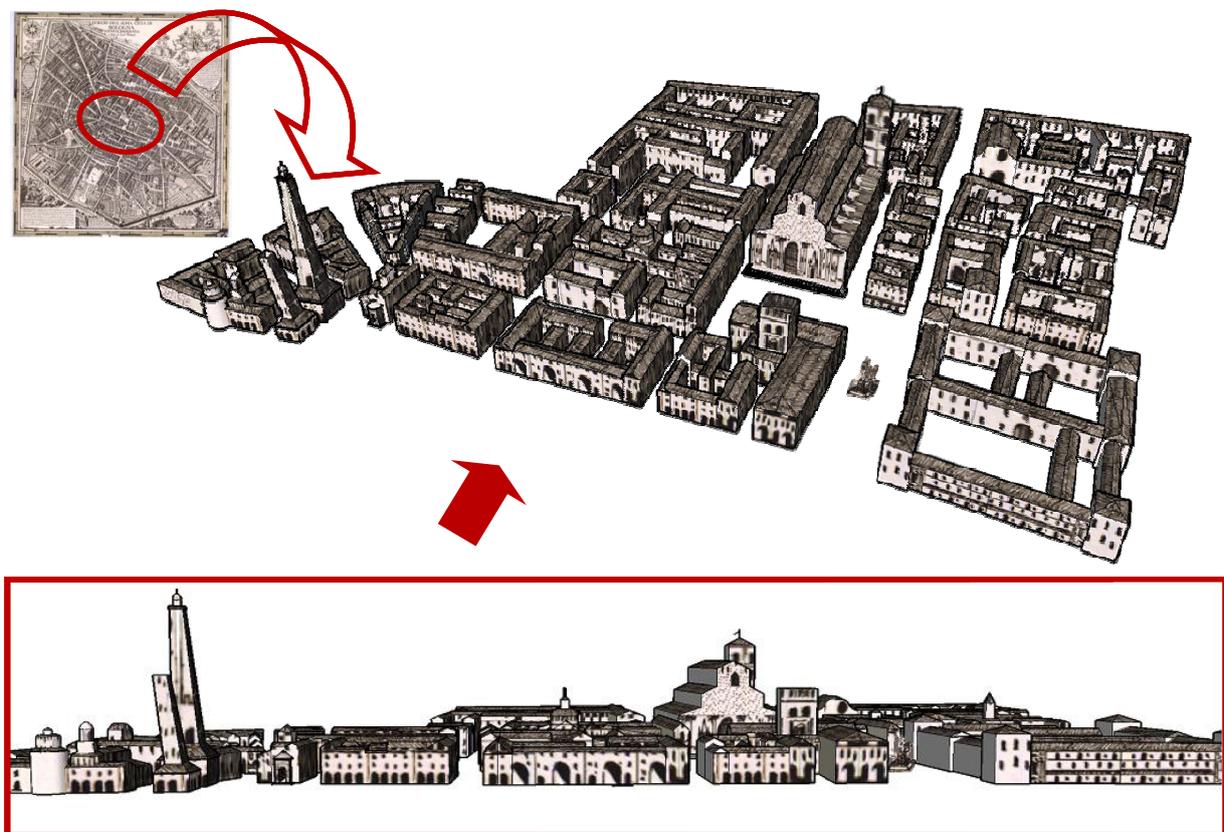


Fig. 4.6 - Modello storico di una parte del centro di Bologna (cerchiata sulla carta storica), visto da due diverse prospettive (la freccia in basso indica la visuale da cui è stata presa l'immagine nel riquadro). (Elaborazione: G. Mazza)

4.2.2. Integrazione con dati recenti

Un processo in ambiente digitale è in grado di offrire nuovi e interessanti sviluppi per l'uso del dato storico, permettendo l'integrazione delle informazioni storiche racchiuse nella carta con **dati provenienti da fonti differenti**, non solo storiche ma anche recenti.

Per limitarsi al solo aspetto della rappresentazione, si può osservare che nel caso in esame, data la visione scenografica della carta, l'informazione contenuta nella visualizzazione della città è relativa ad una specifica prospettiva di presa, che non consente di esaminare i particolari e i dettagli degli edifici che si trovano dietro agli edifici stessi; di conseguenza negli elementi solidi del modello 3D storico risulta mancante la *texture* di due facciate su quattro. E' allora possibile sfruttare il "paradigma moderno" della cartografia storica "a volo d'uccello", fornito da tecnologie tra le quali *Pictometry*[®] (implementata nell'ambiente *Bing Maps 3D* di *Microsoft*), in grado di fornire per la stessa porzione di città immagini aeree oblique (fig. 4.7) prese da differenti punti di vista; tali viste potranno essere mappate sul modello 3D storico.



Fig. 4.7 - Alcune immagini riprese "a volo d'uccello" (con tecnologia *Pictometry*[®]) sulla basilica di S. Petronio, estratte dall'ambiente *Bing Maps 3D*.

Ovviamente, la tecnica è applicabile solo ad edifici per i quali la ricerca storica documenti che non ci siano state variazioni significative nel tempo. Nel caso specifico si mostra l'applicazione della tecnica alla basilica di S. Petronio: l'elemento solido costruito è stato texturizzato con immagini aeree oblique esplorabili in ambiente *Bing Maps 3D*, quindi catturate e adattate allo scopo (fig. 4.8). L'elemento così texturizzato è quindi stato inserito all'interno del modello 3D storico precedentemente creato (fig. 4.9).

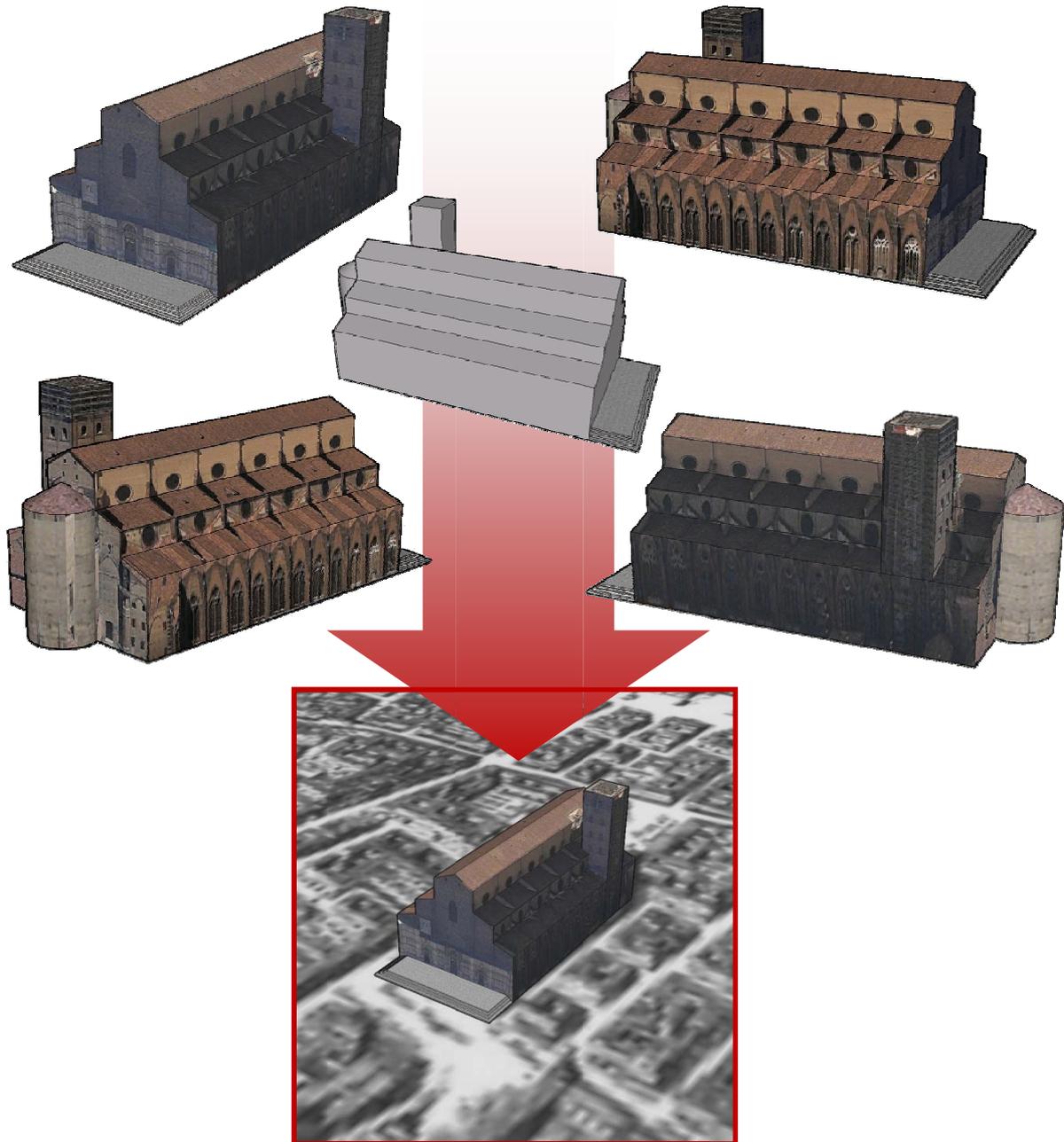


Fig. 4.8 - Texturizzazione della basilica di S. Petronio con immagini fotografiche recenti acquisite con tecnologia *Pictometry*[®] (alcune mostrate in fig. 4.7), e sovrapposizione dell'elemento solido sulla carta storica.

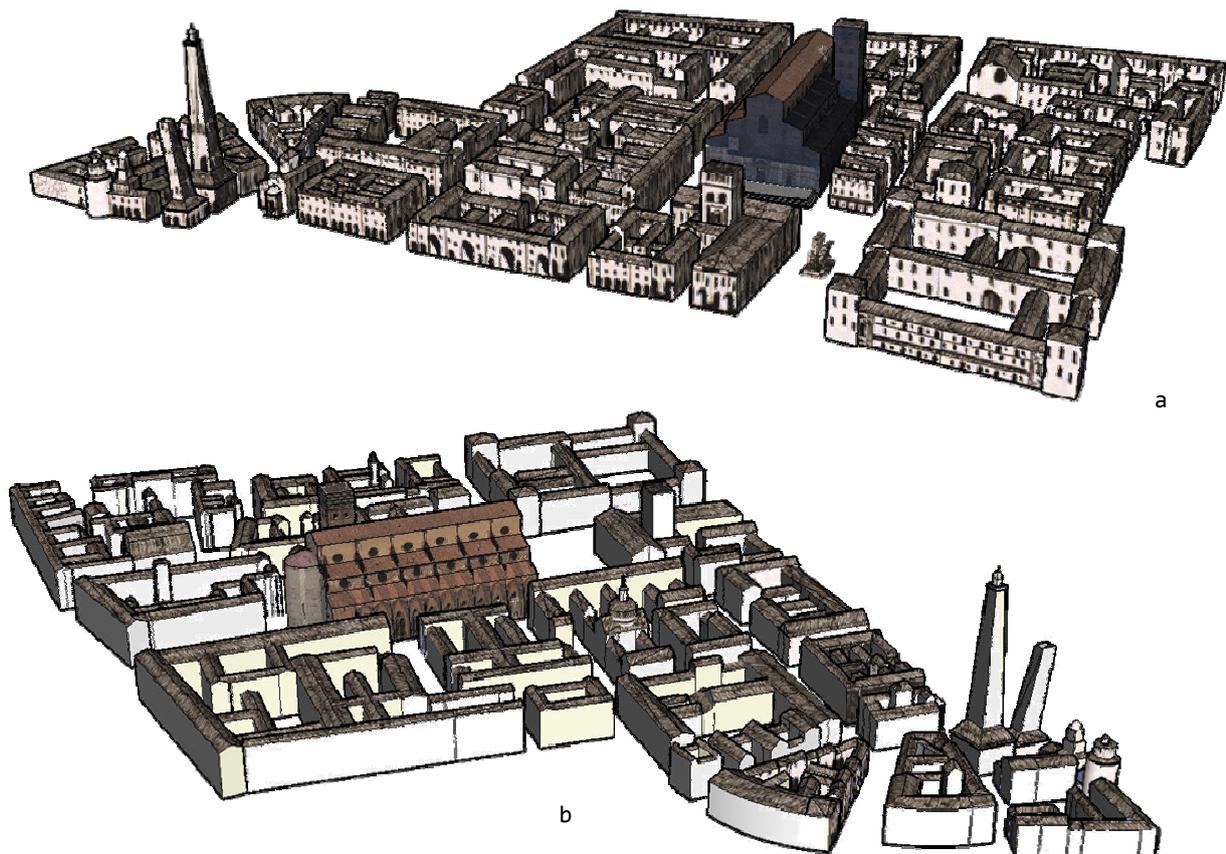


Fig. 4.9 - Inserimento dell'elemento solido relativo alla basilica di S. Petronio (texturizzato con immagini moderne, v. fig. 4.8) nel modello 3D storico:
 a) ricreazione del punto di vista di acquisizione della carta storica scenografica;
 b) vista retro, dove si nota la mancanza della *texture* su due facciate degli edifici.

E' evidente il pregio di un simile processo digitale: non solo aggiungere al modello 3D storico quell'informazione mancante nella carta antica, a causa della visione prospettica, ma anche creare un nuovo e suggestivo prodotto tridimensionale, in grado di integrare informazioni storiche e recenti allo stesso tempo, e apprezzarle con un solo colpo d'occhio (fig. 4.9) (Bitelli G., Gatta G., 2008). E' possibile integrare informazioni non solo di tipo grafico, ma anche di tipo alfanumerico e descrittivo (ad esempio documentazione storica), conservate in archivi esterni e collegate mediante link col singolo edificio all'interno del modello.

Elementi solidi relativi ad edifici di interesse storico-culturale, texturizzati con immagini recenti, sono oggi liberamente disponibili in visualizzatori territoriali come *Google Earth*, da cui possono essere estratti, per essere georiferiti all'interno di un qualunque altro

modello. A titolo di esempio, in figura 4.10 si mostra l'inserimento di alcuni di questi elementi all'interno del modello storico creato. Sempre a titolo di esempio, si mostra la possibilità di texturizzazione di questi elementi in parte con immagini recenti e in parte con immagini tratte dalla carta storica (fig. 4.10a).

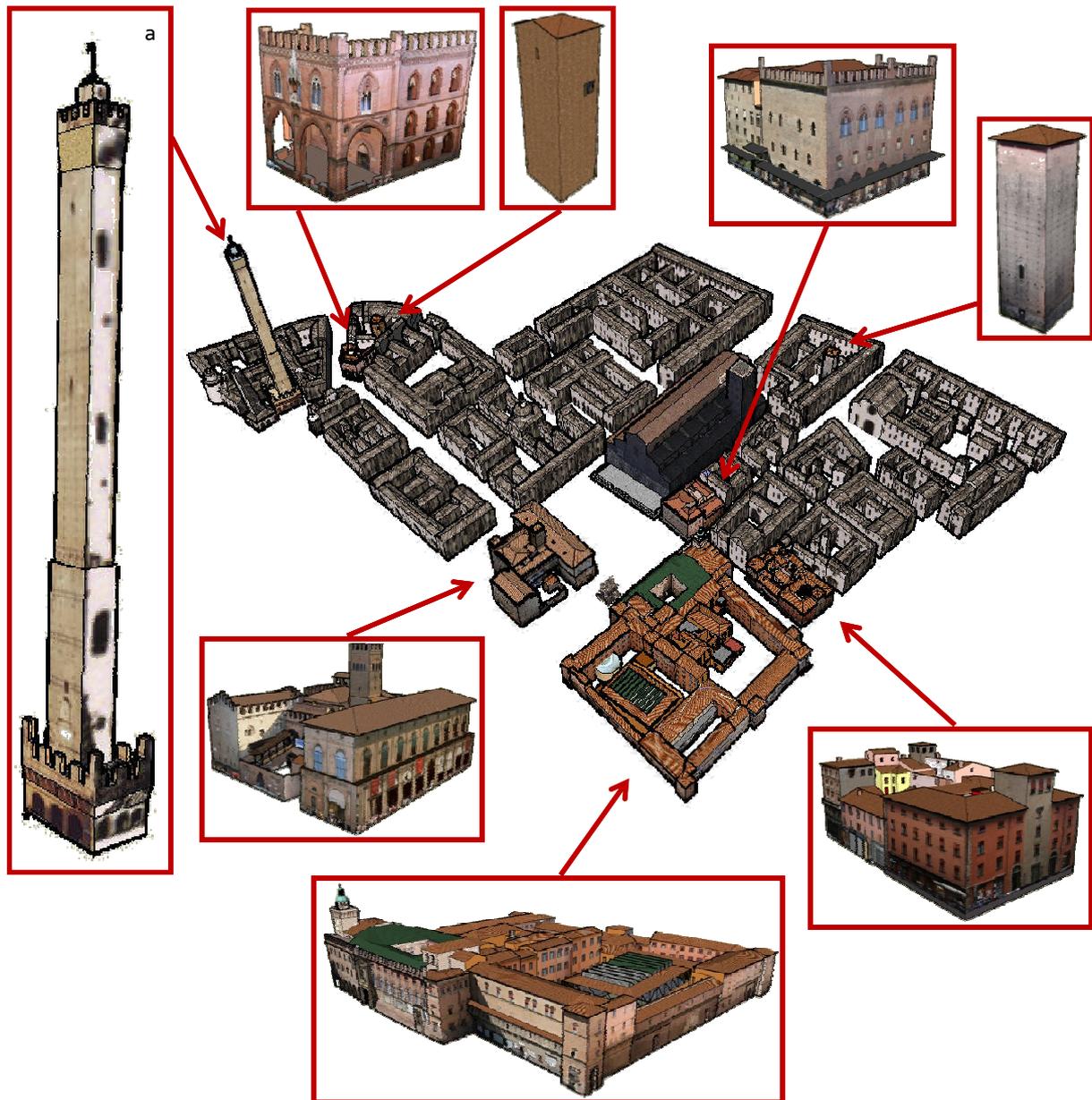


Fig. 4.10 - Inserimento, all'interno del modello 3D di fig. 4.9, di elementi texturizzati (estratti dall'ambiente *Google Earth*), relativi ad edifici di interesse storico-culturale; la torre Asinelli (a) è stata texturizzata per metà con l'immagine tratta dalla carta storica e per l'altra metà con un'immagine moderna.

4.2.3. Inserimento in archivi basati su Web

Come ultimo passaggio, può essere interessante sovrapporre la carta storica, elevata in quota, ad una base cartografica recente, che può consistere in carte numeriche, ortofoto, immagini satellitari, DTM. Opportunità recente è l'inserimento in sistemi *Earth Viewer* basati su Web. Tali sistemi, il più noto dei quali è *Google Earth*, gestiscono immagini satellitari ad alta risoluzione, assieme a modelli digitali del terreno; per questo motivo possono essere considerati esempi particolari di archivi 3D.

Esistono applicativi *ad hoc* per l'inserimento del modello tridimensionale negli archivi basati su Web. Nel caso specifico del modello storico creato a partire dalla Icnoscenografia, risulta semplificata l'interfaccia con *Google Earth*, anche per il fatto che il software di modellazione utilizzato è un applicativo di *Google*. Il modello creato, primariamente georeferenziato nel sistema UTM-WGS84, viene posizionato sulle immagini satellitari recenti (immagini Quickbird ad alta risoluzione, sovrapposte al DTM globale derivato dal progetto SRTM). Il risultato è una suggestiva visione del modello tridimensionale, storico ed eventualmente recente, sovrapposto ad una base cartografica moderna; inoltre, l'implementazione, all'interno dei visualizzatori territoriali, del modello digitale del terreno, permette la visione del modello in un contesto tridimensionale. E' inoltre possibile ricreare una visione storica analoga a quella assunta dal cartografo antico, rimettendosi virtualmente nello stesso punto di vista da cui è stata rappresentata la città storica. Nel caso in esame, il punto di vista è ideale, in quanto posto a nord-ovest, tra porta Galliera e porta delle Lame, e leggermente elevato in quota, con vista dalla pianura verso le colline: un posizione di presa non raggiungibile se non da aereo. All'interno del visualizzatore territoriale 3D, la ricreazione dello stesso punto di vista consente la visione, sullo sfondo, delle colline (date dal DTM texturizzato con le immagini satellitari) (fig. 4.11). Ancora, sono possibili voli virtuali all'interno del modello, che consentono di esplorarlo in ogni sua parte.

Essendo basati su Web, i sistemi *Earth Viewer* consentono la **condivisione** del modello creato con altri utenti. Questo è un grande vantaggio, e dimostra come l'ambiente virtuale possa oggi, e in futuro potrà ancor maggiormente, giocare un ruolo importante nella comunicazione e nella divulgazione dell'informazione cartografica sia verso gli addetti ai lavori, sia verso i non specialisti. I visualizzatori territoriali si avvicinano all'idea di un sistema WebGIS, che integra alle funzionalità di

un vero GIS i vantaggi della comunicazione via Web. Di questi si tratterà nel capitolo 4.3.

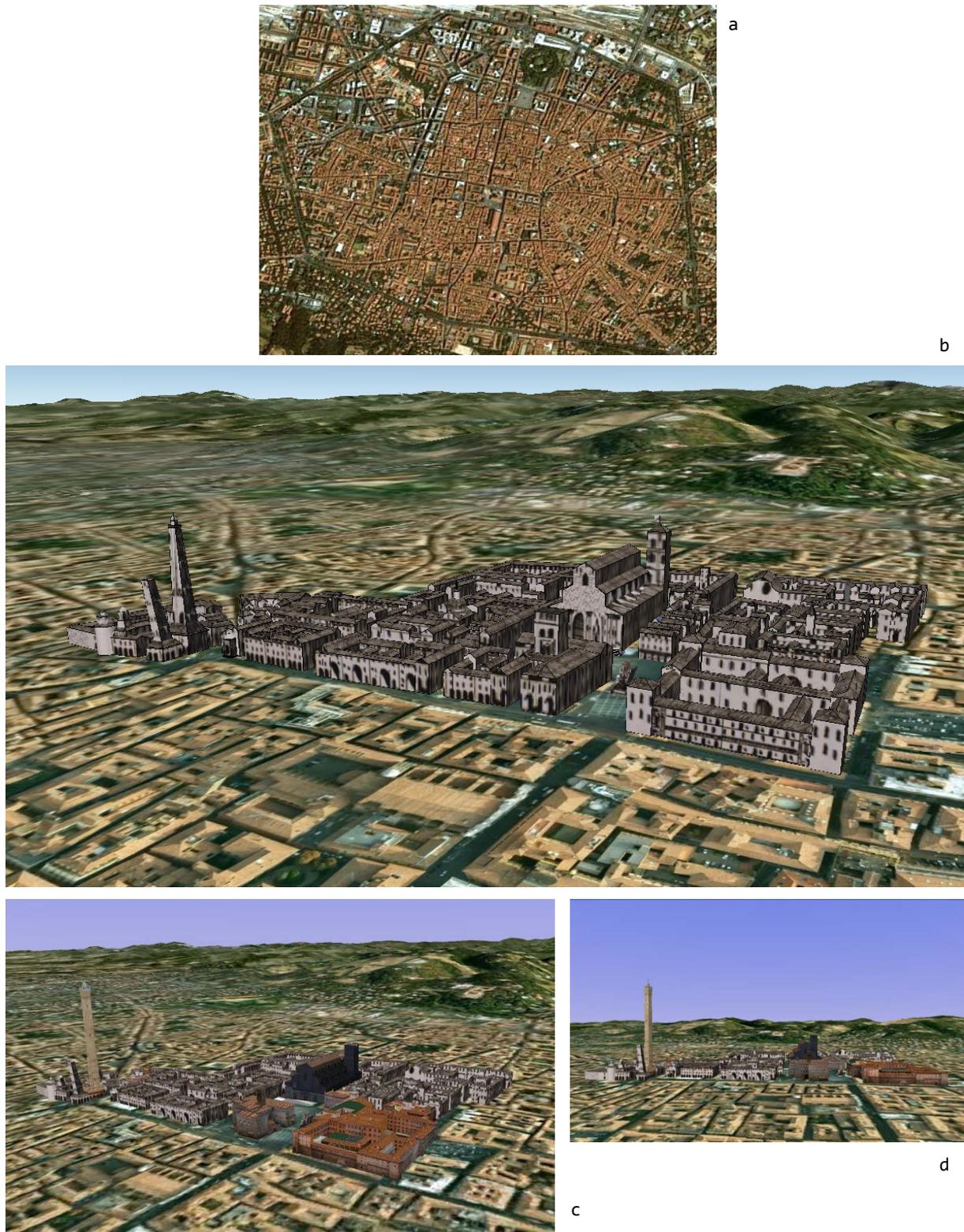


Fig. 4.11 - Inserimento del modello 3D su immagini satellitari recenti di Bologna (a): b) modello storico di fig. 4.6 all'interno dell'ambiente *Earth Viewer*; c) ricreazione del punto di vista della carta storica scenografica all'interno dell'*Earth Viewer* per il modello di fig. 4.10; d) altra prospettiva di presa per il modello di fig. 4.10.

Inoltre, negli ultimi anni sono andati sviluppandosi anche veri e propri sistemi GIS di tipo tridimensionale, che consentono il trattamento e l'esplorazione degli oggetti nella loro tridimensionalità con *tool* di analisi specifici dell'ambiente. Sono già stati condotti esperimenti di creazione di modelli tridimensionali storici basati sul Catasto Gregoriano di Bologna (Paselli E., 2009) e di ricostruzioni 3D del paesaggio sulla base del Catasto Gregoriano di Macerata (Orciani M., Frazzica V., Colosi L., Galletti F., 2006).

4.3. INSERIMENTO DELLA CARTA IN AMBIENTE GIS

Obiettivo del processo di recupero di una carta storica è, molto spesso, il suo inserimento in archivi GIS, eventualmente anche basati su Web. Un **Sistema Informativo Geografico** (GIS, acronimo di *Geographic Information System*) è un insieme di strumenti software per l'acquisizione, l'archiviazione e la gestione di **dati spazialmente distribuiti**. Le informazioni che gestisce sono sia di tipo grafico sia di tipo alfanumerico, e sempre relazionate ad una porzione di territorio in un sistema di riferimento oggetto (generalmente cartografico). Data la loro capacità di gestire dati di differente natura, i sistemi GIS risultano strumenti di supporto alle decisioni in svariati campi di applicazione, e sono di frequente concepiti per rivolgersi ad un ampio spettro di utenti.

La crescente diffusione di Internet quale mezzo per lo scambio di informazioni, con la pubblicazione sempre più frequente di dati territoriali su Web, ha comportato un proliferare di sistemi GIS pubblicati su Web, e per questo detti **WebGIS**, anche di tipo *open-source* (tra i quali *UMN MapServer* è uno dei più conosciuti, scritto in linguaggio C). I sistemi WebGIS sono definibili come sottoprodotti dei GIS. Da un lato, infatti, anch'essi integrano *tool* specifici dell'ambiente GIS, come raccolta di informazioni di vario tipo e loro richiamo all'occorrenza, gestione di dati raster e vettoriali, operazioni di analisi spaziali quali l'*overlay* dei dati georeferenziati, ricerca, *query*, visualizzazioni particolari e zoom sui *layer*, stampa. Dall'altro lato, essendo sistemi basati su Web, consentono la rappresentazione e la gestione dei dati territoriali attraverso la Rete, con specifiche finalità di comunicazione, di diffusione dei dati e di condivisione delle informazioni con altri utenti. Anche nell'ambito della cartografia storica sono sorte alcune esperienze interessanti, segnale della volontà di diffondere le conoscenze via Web ad un pubblico sempre più ampio; si può citare per esempio il caso di *OldMapsOnline.org* (della *Moravian Library*, Repubblica Ceca) (*Moravian Library*, 2008).

Quando si parla di *Web Mapping* si fa invece riferimento ai visualizzatori territoriali (*Earth Viewer*), che attraverso un Web server distribuiscono informazioni spaziali. Gli esempi più noti sono *Google Earth* e *Google Maps* (il primo applicazione *client-server* specializzata nella vista 3D, il secondo applicazione Web che funge da piattaforma per altri servizi). Essi consentono di integrare dati esterni provenienti da

ambiente GIS, una volta convertiti tali dati in un opportuno tipo di file (tramite software specifici); inoltre l'utente può eseguire semplici operazioni di consultazione e interrogazione, ma solitamente la loro architettura è meno complessa rispetto ai sistemi WebGIS e rispetto a questi ultimi viene data meno enfasi all'analisi (Paselli E., 2009). Altri esempi di *Earth Viewers* sono *Live Search Map* di Microsoft, *Yahoo Maps*, *OpenStreetMaps*, *NASA World Wind*, *Pagine Gialle Visual*, *Portale Cartografico Nazionale* del Ministero dell'Ambiente Italiano (teso a coordinare attività regionali e servizi on-line in materia di cartografia) (Ministero dell'Ambiente Italiano, 2000).

Accanto ai tanti progetti di WebGIS avviati in questi anni per mettere a disposizione dell'utente, a fini di consultazione, il patrimonio cartografico proprietà di enti pubblici o privati (v. par. 4.3.4), è nato il progetto *Creare e divulgare cultura attraverso gli archivi storici*, dal sottotitolo *Ritratti di città in un interno. Consolidare la memoria collettiva della città attraverso l'informatizzazione e la divulgazione della cartografia storica*, finanziato dalla Fondazione Cariplo, e a cui partecipano le città di Bologna, Roma e Milano (con le rispettive Università e i rispettivi Archivi di Stato). L'obiettivo del progetto è quello di acquisire una serie di carte storiche rappresentative delle tre città (e conservate presso i relativi Archivi di Stato), e divulgarle su Web attraverso un Sistema Informativo Geografico che verrà appositamente studiato e messo a punto. I singoli progetti sono attualmente portati avanti in modo indipendente nelle tre città. Per quanto riguarda Bologna, il progetto interessa, come già visto (v. par. 1.2.4.3) l'acquisizione e l'elaborazione delle carte del Catasto Gregoriano e della carta Monari-Laghi; per quanto riguarda Roma, è previsto un ampliamento del WebGIS creato all'interno del progetto ImagoII, con l'inserimento di mappe catastali più recenti.

Nei paragrafi che seguono si analizzeranno in dettaglio le problematiche relative all'inserimento di dati cartografici storici in sistemi GIS, prendendo a riferimento l'esperienza che va maturandosi relativamente alle mappe del Catasto Gregoriano di Bologna all'interno del progetto *Creare e divulgare cultura attraverso gli archivi storici*.

4.3.1. Metadati e standard di catalogazione

Le esigenze archivistiche degli istituti proprietari dei documenti storici hanno da sempre comportato la necessità di creare metodi di catalogazione. Questi ultimi si ripropongono oggi in chiave moderna, cioè quali strumenti per la descrizione non solo del dato analogico ma anche di quello digitale inerente i documenti storici. La tendenza crescente a trattare con immagini ed oggetti digitali e ad elaborarli e diffonderli via Internet, ha posto un'attenzione sempre maggiore su alcune necessità:

- **identificare** e descrivere il dato digitale, e mantenere traccia di quello analogico;
- **fruire** delle informazioni e scambiarle tra i vari sistemi, a livello non solo nazionale, ma anche globale;
- **conservare** la risorsa elettronica nel tempo.

Per facilitare le operazioni di base di un Sistema Informativo (identificazione, fruizione e conservazione delle risorse elettroniche), è maturata, a livello globale, la necessità di definire degli standard per la creazione di "metadati". Con questo termine si intende tutta una serie di informazioni ("dati") sui "dati" che si stanno trattando (Sgambati G., Benassati G., Biancini L., Buonora P., Sinisi D., Cantile A., Delfino L., Di Angelo Antonio M., Falchetta P., Mancinelli M.L., Sanguineti M.T., Serratrice G., Truci I., Valerio V., 2006). Nel caso di cartografia storica, i dati che si trattano sono:

- da una parte, la carta storica originale;
- dall'altra il file immagine che da essa deriva.

Le informazioni su questi dati dovranno essere dunque dedotte:

- da una parte, dalla lettura delle informazioni di redazione (prime tra tutte il cartiglio della carta) e dalla consultazione di documenti storici e di eventuali registri catastali (come nel caso in esame, in cui esistono brogliardi a corredo del Catasto);
- dall'altra, dalle modalità di acquisizione della carta.

«I metadati rivestono un'importanza crescente, tanto da venire considerati parte costituente della definizione stessa di oggetto digitale: una risorsa digitale è inseparabilmente composta dal contenuto informativo (una sequenza di bit) e da una serie di informazioni (metadati) tali da rendere quella sequenza di bit significativa, individuabile, e accessibile per la fruizione, l'archiviazione, la conservazione, la disseminazione e le altre operazioni gestionali» (Comitato MAG, 2006). Questo risulta tanto più vero quando è in una libreria digitale che bisogna orientarsi, un "luogo" normalmente molto vasto, in cui l'utente connesso via Rete ha

bisogno di cercare in modo efficace il documento di interesse, e averne subito una descrizione dettagliata (Buonora P., 2004).

Secondo la classificazione proposta da Wendler (Wendler R., 1999), i metadati possono essere di tre differenti tipi:

- **descrittivi** (per l'identificazione e il recupero degli oggetti digitali): descrizioni normalizzate dei documenti fonte, secondo gli elementi del *Dublin Core Metadata Element Set* (DCMES);
- **amministrativi e gestionali** (per le attività di archiviazione e conservazione degli oggetti digitali): varie informazioni riguardanti le caratteristiche tecniche dei file che compongono l'oggetto, la struttura interna, le condizioni e i diritti di accesso, ecc.;
- **strutturali** (ad indicare la relazione gerarchica tra gli oggetti digitali): informazioni che, in particolare per i materiali cartografici, si possono distinguere in:
 - **oggetto semplice**: unità cartografica corrispondente ad un foglio catastale, ad una carta geografica sciolta, ad una veduta o una mappa o una sezione, alla pagina di un atlante considerata singolarmente;
 - **insieme o set**: unità cartografica costituita da un insieme di oggetti semplici disposti in successione, per esempio le pagine di un atlante o i fogli di un album;
 - **insieme complesso**: vari set e oggetti semplici articolati su più livelli gerarchici, come ad esempio una serie archivistica cartografica costituita da mappe catastali in più fogli, e comprendente i set relativi agli inserti cartografici, quelli riservati alla documentazione di corredo, quelli corrispondenti agli allegati, ecc.

In particolare, i Metadati Amministrativi e Gestionali (MAG) rivestono la funzione più importante all'interno delle biblioteche digitali, in quanto documentano la fonte e le modalità di digitalizzazione, archiviazione e manutenzione dell'oggetto digitale nonché la sua identificazione. I MAG rendono quindi più sicura e affidabile l'informazione digitale, altrimenti molto labile.

Secondo le direttive dell'ICCU (Istituto Centrale per il Catalogo Unico delle biblioteche italiane e per le informazioni bibliografiche), i metadati gestionali e descrittivi associati alle immagini (unità cartografiche digitalizzate e relativi registri, nel caso di digitalizzazione di cartografie) devono essere realizzati in conformità allo standard MAG 2.0.1 (la versione attuale). Con lo schema MAG si definisce uno standard per la raccolta, il trasferimento e la disseminazione dei metadati, di tipo amministrativo e gestionale, negli

archivi. Il gruppo di lavoro sugli standard MAG (Comitato MAG) ha preso avvio nel 2003, sulle orme del Gruppo di studio, costituito dall'ICCU nel 2000, sugli standard e le applicazioni dei metadati nei progetti di digitalizzazione nei vari ambiti dei beni culturali a livello nazionale. Compito del Gruppo di studio era quello di coordinare a livello nazionale le iniziative di implementazione dei metadati nei vari progetti di digitalizzazione, e di raccordarle con quelle europee e internazionali. Tale compito è stato assunto dal Comitato MAG, con particolare riferimento per i metadati di tipo amministrativo e gestionale.

Il codice MAG interagisce dunque, a livello europeo e internazionale, con diversi standard di codifica di metadati, in alcuni casi (codici *Dublin Core* e NISO) adottandoli, e in altri casi (codici METS e MPEG-21) consentendo la conversione in quelli, al fine di garantire l'interscambio e la condivisione dei dati. In particolare, il *Dublin Core*, sviluppato dal DCMI (*Dublin Core Metadata Initiative*), è uno degli standard di metadati più diffusi a livello internazionale, da un lato per la sua facilità d'uso, dall'altro per la sua notevole flessibilità. I MAG si presentano come uno standard documentato e liberamente disponibile; difatti, al fine di favorirne un impiego il più possibile generalizzato, risultano del tutto indipendenti da specifiche piattaforme hardware e software.

Gli oggetti digitali di cui il set di metadati MAG descrive le caratteristiche possono essere frutto di digitalizzazione di documenti analogici o essere documenti digitali nativi. Inoltre tali oggetti possono essere di diverso tipo, quindi non solo immagini o documenti di testo, ma anche file audio o video. I MAG vengono suddivisi in base alle varie tipologie di oggetto digitale più che alle particolari tipologie di oggetti fonte, per cui lo schema MAG si compone di diverse sezioni, a seconda del tipo di dato digitale:

- **GEN:** informazioni generali sul progetto e sul tipo di digitalizzazione;
- **BIB:** metadati descrittivi dell'oggetto analogico;
- **STRU:** metadati strutturali dell'oggetto digitale;
- **IMG:** metadati specifici per immagini fisse;
- **OCR:** metadati specifici per documenti prodotti con riconoscimento ottico del testo;
- **DOC:** metadati specifici per oggetti digitali in formato testo;
- **AUDIO:** metadati specifici per file audio;
- **VIDEO:** metadati specifici per file video;
- **DIS:** metadati specifici per le modalità di distribuzione degli oggetti digitali.

Caratteristica dei MAG è quella di essere espressi nella sintassi XML (*eXtensible Markup Language*): si tratta di un linguaggio di *markup* (sequenza organizzata di elementi, che possono essere stringhe di testo per descrivere la natura di un determinato dato, circondate da marcatori, detti *tag*) sviluppato nel 1999 dal W3C (*World Wide Web Consortium*) allo scopo di standardizzare la creazione di applicazioni per il Web e per l'interscambio dei dati (Comitato MAG, 2006) (Comitato MAG, 2009).

Nello specifico, per quanto riguarda l'archiviazione di immagini derivanti da acquisizione di documenti cartografici storici, le sezioni di interesse sono quelle relative ai file immagine, più i file di testo di traduzione dei registri, nel caso di mappe catastali. Nei paragrafi seguenti si prendono dunque in esame singolarmente le sezioni d'interesse (tutte, tranne le sezioni AUDIO e VIDEO), che si rende necessario trattare nella gestione delle mappe del Catasto Gregoriano di Bologna, oltre che di documenti cartografici singoli come la già ricordata carta Monari-Laghi.

4.3.1.1. Sezione GEN

La sezione GEN contiene informazioni relative all'istituzione responsabile del progetto di digitalizzazione, nonché al progetto stesso; inoltre contiene informazioni in merito all'accessibilità dell'oggetto analogico e alla completezza o meno della digitalizzazione di tale oggetto. Per oggetti analogici che danno origine a più file digitali, è possibile l'inserimento delle informazioni comuni una volta sola, con il richiamo ad esse ad ogni descrizione di un nuovo file digitale.

Nel caso preso qui in esame, la sezione GEN dovrà dunque contenere nome e riferimenti del progetto di ricerca.

4.3.1.2. Sezione BIB

La sezione BIB descrive la risorsa originaria, analogica, o digitale nel caso di oggetti *born digital*. Gli elementi descrittivi sono:

- una bibliografia (titolo, autore, anno di pubblicazione, ecc. di un'opera, di un libro o di una rivista);
- una spiegazione del contenuto della risorsa;
- il tipo di risorsa (ad esempio "Cartografia a stampa" o "Cartografia manoscritta" nel caso di acquisizione di carte);

- la sua manifestazione fisica della risorsa (il tipo di supporto o le dimensioni);
- la lingua del contenuto;
- il riferimento ad eventuali risorse correlate;
- informazioni sui diritti esercitati su tale risorsa;
- altre informazioni specialistiche (come le coordinate geografiche, per una carta).

Altri elementi descrivono invece la localizzazione della risorsa (istituzione proprietaria, inventario, collocazione all'interno del catalogo dell'istituzione).

Nel caso in esame, la sezione BIB dovrà contenere tutte le informazioni di descrizione degli esemplari cartografici analizzati (Catasto Gregoriano e carta Monari-Laghi), parte delle quali sono state fornite nei paragrafi 1.2.4.3 e 1.2.4.4 come presentazione dei documenti.

4.3.1.3. Sezione STRU

La sezione STRU contiene informazioni relative alla struttura logica del documento digitalizzato (come la suddivisione in capitoli di un libro, o gli articoli di una rivista). Nel caso del Catasto Gregoriano, sarà questa la sezione in cui specificare l'articolazione del Catasto: suddivisione della città in settori, fogli di piano all'interno di ogni settore, fogli di aggiornamento, quadro di unione.

4.3.1.4. Sezione IMG

La sezione IMG contiene informazioni relative alle immagini statiche. Alcuni di questi dati possono essere raccolti all'interno della sezione GEN nel caso di oggetti analogici che danno origine a più file. La sezione è costituita da una serie di elementi, uno per ogni immagine, di cui si descrivono:

- **<sequence_number>**: numero di sequenza identificativo;
- **<nomenclature>**: denominazione;
- **<usage>** (opzionale): ambito d'uso, in relazione agli standard di progetto, ed eventuale presenza di più formati per una stessa immagine (“*master*”, “alta risoluzione”, “bassa risoluzione”, “*preview*”) per finalità differenti;

- **<side>** (opzionale): numero di pagine di un libro contenute all'interno della stessa immagine ("*left*", "*right*", "*double*", "*part*");
- **<scale>** (opzionale): presenza di una eventuale scala millimetrica in fase di digitalizzazione;
- **<file>**: localizzazione del file contenente l'immagine;
- **<md5>**: impronta del file;
- **<filesize>** (opzionale): dimensione del file immagine, in byte;
- **<image_dimensions>**: dimensioni:
 - **<niso:imagelength>**: dimensione verticale espressa in pixel;
 - **<niso:imagewidth>**: dimensione orizzontale espressa in pixel;
 - **<niso:source_xdimension>** (opzionale): dimensione orizzontale dell'oggetto analogico digitalizzato, espressa in pollici;
 - **<niso:source_ydimension>** (opzionale): dimensione verticale dell'oggetto analogico digitalizzato, espressa in pollici;
- **<image_metrics>** (opzionale, se non altrove specificato): le principali caratteristiche tecniche dell'immagine secondo lo standard NISO:
 - **<niso:samplingfrequencyunit>**: unità di misura usata per il contenuto degli elementi **<niso:xsamplingfrequency>** (nessuna, pollice, centimetro);
 - **<niso:samplingfrequencyplane>**: piano focale del campionamento (*camera/scanner focal plane*, quando non sono definite le dimensioni dell'oggetto che si sta digitalizzando, *object plane*, quando l'oggetto e la riproduzione hanno la stessa dimensione, *source object plane*, quando la dimensione della riproduzione è maggiore dell'oggetto originale);
 - **<niso:xsamplingfrequency>** (opzionale) frequenza di campionamento nella direzione orizzontale, presente in alternativa a **<ppi>** e **<dpi>**;
 - **<niso:ysamplingfrequency>** (opzionale): frequenza di campionamento nella direzione verticale, presente in alternativa a **<ppi>** e **<dpi>**;
 - **<niso:photometricinterpretation>**: l'interpretazione fotometrica dei bit del campione ("*WhiteIsZero*", "*BlackIsZero*", "*RGB*", "*Palette color*", "*Transparency Mask*", "*CMYK*", "*YcbCr*", "*CIELab*");
 - **<niso:bitpersample>**: numero di bit per ciascun campione, esplicitando il rapporto profondità/colore (bianco e nero, scala di grigi a 4 bit, scala di grigi o gamma di 256 colori a 8 bit, colori RGB a 3x8 = 24 bit, immagini TIFF o HDR a 3x16 = 48 bit, CMYK a 32 bit)
- **<ppi>** (opzionale): risoluzione espressa in ppi (*points per inch*);
- **<dpi>** (opzionale): risoluzione espressa in dpi (*dots per inch*);

- **<format>** (opzionale, se non altrove specificato): formato dell'immagine secondo lo standard NISO:
 - **<niso:name>**: formato dell'immagine (“jpg”, “gif”, “tif”, “pdf” ecc.);
 - **<niso:mime>**: tipo MIME dell'immagine (“image/jpeg”, “image/tiff”, “image/gif”, “image/png”, “image/vnd.djvu”, “application/pdf”);
 - **<niso:compression>**: tipo di compressione applicata (“Uncompressed”, “CCITT 1D”, “CCITT Group 3”, “CCITT Group 4”, “LZW”, “JPG”, “PNG”, “DJVU”);
- **<scanning>** (opzionale, se non altrove specificato): modalità di scansione:
 - **<niso:sourcetype>**: caratteristiche fisiche del supporto analogico di partenza (“negativo”, “positivo”, “diapositiva”, “unicum”, “fotografia virtuale”, “vario”);
 - **<niso:scanningagency>**: nome della persona, società o ente produttore dell'immagine digitale (se assente, si assume che la scansione sia stata effettuata all'interno dell'istituzione responsabile del progetto di digitalizzazione);
 - **<niso:devicesource>**: tipologia dell'apparecchiatura di scansione (scanner, fotocamera digitale, videocamera, ecc.);
 - **<niso:scanningsystem>**: dispositivo usato per la scansione (<niso:scanner_manufacturer> per il nome del produttore del dispositivo, <niso:scanner_model> per la marca e il modello dell'apparecchiatura di acquisizione, <niso:capture_software> per il nome del software usato per l'acquisizione);
- **<datetimecreated>** (opzionale): data e ora di creazione dell'immagine;
- **<target>** (opzionale): eventuale presenza di un target di colore durante la scansione, secondo lo standard NISO:
 - **<niso:targetType>**: ad indicare se il target è interno o esterno;
 - **<niso:targetID>**: nome del target, produttore o organizzazione, il numero della versione o il media;
 - **<niso:imageData>**: *path* dell'immagine digitale che funge da target esterno;
 - **<niso:performanceData>**: *path* del file che contiene i dati dell'immagine performance relativa al target;
 - **<niso:profiles>**: *path* del file che contiene il profilo dei colori ICC o un altro profilo di gestione;
- **<altimg>** (opzionale): descrizione di un eventuale altro formato della medesima immagine, con una struttura simile a quella di ma semplificata;

- **<note>** (opzionale): eventuali annotazioni, in particolare all'interno di due attributi:
 - **imggroupID**: riferimento all'attributo ID, per collegare il file immagine con le caratteristiche tecniche definite globalmente da un gruppo;
 - **holdingsID**: per definire a quale istituzione appartiene l'oggetto analogico digitalizzato.

Nel caso specifico del Catasto Gregoriano, queste caratteristiche derivano dai valori dei parametri discussi nel paragrafo 2.1.2, scelti in fase di progettazione dell'acquisizione delle carte; è possibile estrarre tali valori dai metadati dei file immagine. Come descritto nel capitolo 2.1, l'acquisizione è avvenuta mediante scanner specialistico, le cui specifiche vengono fornite dalla ditta esecutrice.

4.3.1.5. Sezione OCR

La sezione OCR contiene informazioni relative ai documenti ottenuti mediante procedure di riconoscimento ottico automatico del testo, senza alcun intervento correttivo manuale (è in questo che tale sezione si differenzia dalla seguente sezione DOC).

Nel caso specifico del Catasto Gregoriano di Bologna, si è deciso di non ricorrere alla traduzione OCR del testo dei brogliardi, in quanto l'obiettivo è quello di mostrare i brogliardi nella loro stesura originale, collegati, mediante apposito link, alle singole particelle catastali rappresentate in mappa. Una traduzione del testo automatica sarebbe utile, per accelerare i tempi, se l'obiettivo fosse, ad esempio, la redazione di un catalogo editabile per la riproduzione del contenuto dei brogliardi. Va d'altra parte rilevato che l'applicazione di tecniche automatiche OCR di tipo *general-purpose* su testi storici è di notevole difficoltà a causa delle caratteristiche della scrittura calligrafica del tempo e richiede un intervento manuale molto consistente.

4.3.1.6. Sezione DOC

La sezione DOC contiene informazioni relative ai documenti di testo digitali nativi, o documenti di testo frutto di OCR con successiva correzione manuale.

4.3.1.7. Sezione DIS

La sezione DIS contiene informazioni relativamente alla fruibilità dell'oggetto digitale; la sezione viene utilizzata solo quando vi sono particolari condizioni di distribuzione all'esterno dell'istituzione (non viene quindi utilizzata quando gli oggetti sono di libero uso).

Nel caso delle mappe catastali di Bologna e della carta Monari-Laghi, si provvederà all'inserimento di tali specifiche, secondo quanto previsto dal Bando e dalle condizioni d'uso in vigore presso l'Archivio di Stato di Bologna, proprietario dei documenti originali.

4.3.1.8. Produzione di MAG

Esistono software per la produzione semiautomatica di MAG (quindi assistita dall'utente solo in parte). I dati MAG vengono creati a partire da:

- file di *template* con le informazioni in comune tra le varie immagini (ad esempio il tipo di scanner utilizzato per l'acquisizione);
- *naming convention* per le immagini, per permettere la rilevazione in automatico delle informazioni relative agli originali di cui sono copia; costituita da tre campi:
 - *signature* (<dc:identifier>): identificatore delle singole unità archivistiche, per ognuna delle quali viene creato un MAG;
 - *sequence*: individuazione dell'ordine fisico delle immagini afferenti ad una singola unità archivistica;
 - *nomenclature*: nome specifico dell'immagine (ad es. il numero di pagina);

separati da un carattere speciale, e in ordine costante per ogni file.

I campi calcolati in automatico da parte del software normalmente sono quelli e <altimg>, cioè quelli deducibili dai metadati del file immagine. La strutturazione avviene per gerarchia: Progetti - Progetto - Scheda MAG - Scheda immagine - Scheda immagine alternativa (l'immagine alternativa è un'immagine con formato file differente dall'immagine *master*, ma con lo stesso nome di quest'ultima). In seguito ad un'interfaccia utente per l'eventuale correzione puntuale dei MAG, avviene l'esportazione, in formato XML-MAG, di un file per ogni MAG (Hyperborea, 2009).

In alternativa all'utilizzo di software specifico, la creazione di MAG può avvenire mediante comuni database o fogli elettronici di lavoro e

successiva conversione nel formato. Questa è l'opzione scelta per la creazione dei MAG relativi alle mappe catastali di Bologna, oltre che alla carta Monari-Laghi.

4.3.2. Formati di archiviazione del dato

Per quanto riguarda la cartografia storica, il dato da trattare per l'inserimento in sistemi di archiviazione, anche on-line, o in visualizzatori su Web, può essere in formato vector o, come più frequentemente accade, raster. Se il sistema è un ambiente GIS, allora la carta deve essere georeferenziata (in un formato immagine opportuno, di cui si è discusso nel par. 3.1.2).

Nel caso di raster, un file immagine a piena risoluzione può rallentare e rendere difficoltosa la consultazione dell'immagine stessa; una opzione per risolvere il problema è la **compressione** dell'immagine (o in alternativa, ma con risultati di minore qualità grafica a parità di dimensioni, la diminuzione della sua risoluzione): in tal modo il file *master* (solitamente in formato TIFF) resta ad uso interno dell'istituzione, mentre il file *access* (solitamente in formato JPEG) viene inserito in un sistema visualizzatore.

In tal modo, però, non è sempre garantita la qualità dell'immagine, in quanto la compressione non è quasi mai *lossless* (cioè senza perdite), tanto più se la riduzione del peso del file immagine avviene mediante diminuzione della risoluzione. Al fine di permettere un'accurata lettura di tutti i particolari rappresentati in carta e agevolare così lo studio o semplicemente migliorare l'apprezzamento per il prodotto cartografico, ma senza rallentare il processo di visualizzazione per via del caricamento di immagini a piena risoluzione, oggi si utilizzano i cosiddetti **formati multirisoluzione**, come JPEG2000 del *Joint Photographic Experts Group*, ECW di *Er Mapper*, XL di *Italian Centrica*, MrSID (*Multi-resolution Seamless Image Database*) di *Lizartech* (il formato adottato inizialmente dalla *Library of Congress*). Si tratta di file al cui interno è contenuta la stessa immagine a differenti risoluzioni, da quella alta, a quella media per la visualizzazione su Internet, a quella bassa per la catalogazione su Web; i software che gestiscono formati multirisoluzione sono in grado di scegliere sempre la risoluzione richiesta in fase di visualizzazione dell'immagine.

In questi ultimi anni il nuovo formato **JPEG2000** (estensione .jg2) è stato adottato sempre maggiormente per la creazione di librerie digitali,

guardando ad esso non più come ad un JPEG di qualità medio-alta, ma come ad un sostituto del *master file*, tradizionalmente in TIFF. Caso esemplare di migrazione di tutti i propri dati verso il nuovo formato JPEG2000 è quello della HUL (*Harvard University Library*). L'esempio è stato seguito da altri enti, e non è difficile credere che questo formato multirisoluzione verrà adottato da un numero sempre maggiore di istituzioni, ai fini della gestione e della conservazione delle informazioni nelle ormai diffusissime librerie digitali (Buonora P., Liberati F., 2008).

La ragione di questo sta nel fatto che il maggior requisito del formato JPEG2000 è quello di essere un formato *Lossless* al pari del TIFF, ma di necessitare di circa metà dello spazio in memoria rispetto a quello (fig. 4.12). Il nuovo formato dimostra che la compressione non sempre significa perdita di informazione. Questo è possibile se si sfruttano i modi in cui avviene la percezione umana della realtà, eliminando cioè quelle informazioni che per l'occhio umano sono ridondanti: ad esempio, siccome l'occhio umano è meno sensibile ai colori di quanto non lo sia rispetto alla luce, si può comprimere maggiormente il segnale cromatico rispetto invece a quello luminoso, senza alcuna perdita in termini di percezione visiva. L'algoritmo utilizzato dalla compressione JPEG2000 è del tipo *wavelet*: la DWT (*Discrete Wavelet Transform*) sostituisce la DCT (*Discrete Cosine Transform*) del JPEG standard, quindi non produce più il classico "effetto pixel" della trasformazione in JPEG (Russ J.C., 2007).

Altre caratteristiche vantaggiose del formato JPEG2000 sono:

- poter specificare un'area di interesse per avere solo in quella parte la massima risoluzione e lasciare il resto dell'immagine ad una risoluzione inferiore;
- salvare l'informazione di colore fino a 48 bit (cosa possibile col formato TIFF ma non col classico JPEG);
- la possibilità di contenere al suo interno metadati, come ad esempio informazioni di geocodifica e georeferenziazione;
- possibilità di applicare un *watermark "on-flight"* alla finestra di visualizzazione del file immagine ad alta risoluzione;
- la presenza di un meccanismo di controllo degli errori.

Nel JPEG2000 i colori sono separati in tre componenti, nello spazio YCbCr (Y è la luminosità, Cb è la componente blu del colore, Cr è la componente rossa); in ogni componente l'immagine è divisa in più parti, una dentro all'altra (dal grande al piccolo: *tile*, quindi *precinct*, e *code-block*), ognuna delle quali ha un *tile header* di riferimento. E' quindi una struttura gerarchica, che può venir meno se si corrompe l'immagine *header*, contenente informazioni varie in codice binario sulle

caratteristiche dell'immagine; un modo per aumentare la robustezza di un file JPEG2000 è dunque quello di duplicare l'*header* (in formato XML), conservandolo dentro o fuori l'immagine. Esistono *tool* per eseguire queste azioni, come *FixIt!*, messo a punto dal Laboratorio Digitale del Centro di Fotoriproduzione, Legatoria e Restauro degli Archivi di Stato Italiani, e gratuitamente scaricabile dal sito (<http://www.cflr.beniculturali.it/Progetti/JPEG2000.php>) (CFLR).

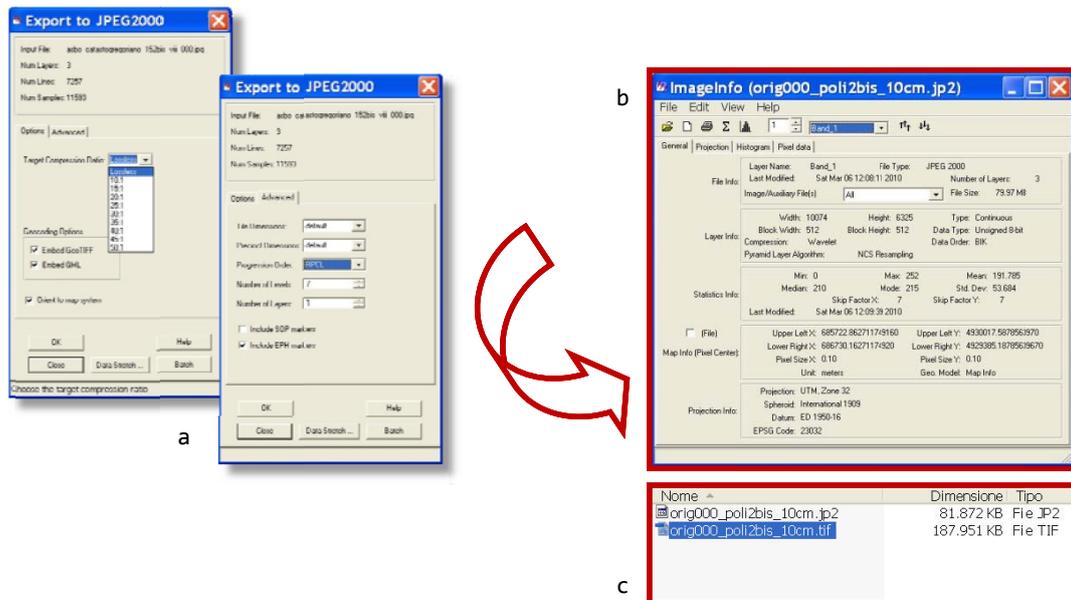


Fig. 4.12 - Fasi della conversione in JPEG2000 (a) dell'immagine TIFF di un foglio del Catasto Gregoriano (foglio VIII ed. 152 bis, piano terra); il risultato è mostrato in: b) metadati dell'immagine JPEG2000; c) confronto tra le dimensioni del file TIFF originale rispetto al JPEG2000 *Lossless*.

Una soluzione alternativa ai formati multirisoluzione, utilizzata soprattutto nei visualizzatori territoriali su Web, è costituita dalle immagini composite: l'immagine originale viene suddivisa in tante sub-immagini che vengono trasferite indipendentemente, nel momento in cui l'utente naviga nel viewer (con gli strumenti di *zoom* e *pan*), e vengono ricomposte dando l'illusione di un'immagine senza linee di taglio (v. par. 3.3.1.1). Esistono software specificatamente progettati per la creazione di tali immagini e la successiva consultazione; un esempio è il software free *Zoomify*, sviluppato dalla *Moravian Library* (Repubblica Ceca) nel 2008, ai fini della pubblicazione su Web di immagini ad alta risoluzione. Del software esiste anche un applicativo che funziona su classici software di gestione delle immagini (Moravian Library, 2008).

Nel caso delle carte acquisite all'interno del progetto *Creare e divulgare cultura attraverso gli archivi storici*, la scelta fatta, in merito al formato di archiviazione dei dati, è stata quella di creare inizialmente un file *master* TIFF più un file *access* JPEG alla stessa risoluzione e in massima qualità, e in un secondo momento creare i file JPEG2000 a partire dai TIFF georeferenziati (fig. 4.12). Ai fini dell'inserimento delle immagini nel catalogo digitale dell'Archivio di Stato di Bologna, verranno probabilmente utilizzate immagini JPEG a risoluzione ridotta, mentre ai fini della creazione del sistema WebGIS per la consultazione delle carte acquisite e georeferenziate, verranno utilizzate le immagini JPEG2000.

4.3.3. Filigrana

Negli ultimi 20 anni, da strumento accademico poco conosciuto, Internet si è evoluto nel *World Wide Web (www)*, un'autostrada per lo scambio dei dati. Nel moderno mondo digitale, sempre più informazioni, file ed immagini circolano attraverso Internet, ad un ritmo sfrenato e spesso senza regole. Questo vantaggio può non risultare più tale quando viene perso il controllo, da parte degli autori, dei propri prodotti, *in primis* le immagini: dove esse appaiano, da chi vengano scaricate e come vengano utilizzate, elaborate, eventualmente ricaricate, con o spesso senza il consenso del proprietario. La Rete ha posto nuovi problemi, inerenti i diritti di autore sulle immagini che in essa circolano, problemi che la normativa vigente non ha ancora risolto in modo esaustivo.

Per garantire una corretta distribuzione degli oggetti digitali, è possibile, da parte degli enti proprietari, utilizzare alcune strategie, come porre dei vincoli per il download delle immagini (su parte o sull'intera copia digitale) dal server Web, o rendere obbligatoria la registrazione dell'utente (Sgambati G., Benassati G., Biancini L., Buonora P., Sinisi D., Cantile A., Delfino L., Di Angelo Antonio M., Falchetta P., Mancinelli M.L., Sanguineti M.T., Serratrice G., Truci I., Valerio V., 2006). Ma il modo più efficace per proteggere e garantire i diritti dell'autore delle immagini si basa sulla capacità di comunicare la proprietà di queste immagini e rimane dunque quello di associare all'immagine informazioni inerenti:

- il proprietario del documento digitale ed eventualmente di quello analogico da cui il primo deriva;

- il contesto nel quale ha avuto origine l'immagine (ad esempio un progetto di ricerca);
- le condizioni d'uso dell'immagine.

E' necessario che queste informazioni rimangano a marciare l'immagine anche in seguito ad eventuali elaborazioni da parte dell'utente.

In comuni software di elaborazione delle immagini è solitamente possibile, per la maggior parte dei formati di file, associare all'immagine dei metadati (anche detti "Info file"), sottoforma di commenti testuali: l'autore, la data di creazione, le caratteristiche del dispositivo (camera o scanner) utilizzato per la generazione del file, URL del proprio sito, ecc. Tra questi è solitamente possibile selezionare il marchio di *copyright*, per far sì che all'immagine venga associato il simbolo ©, che comparirà così accanto al nome del file (fig. 4.13). L'azione di marchiatura può essere automatizzata, per eseguirla in *batch* su un insieme, anche elevato, di immagini.

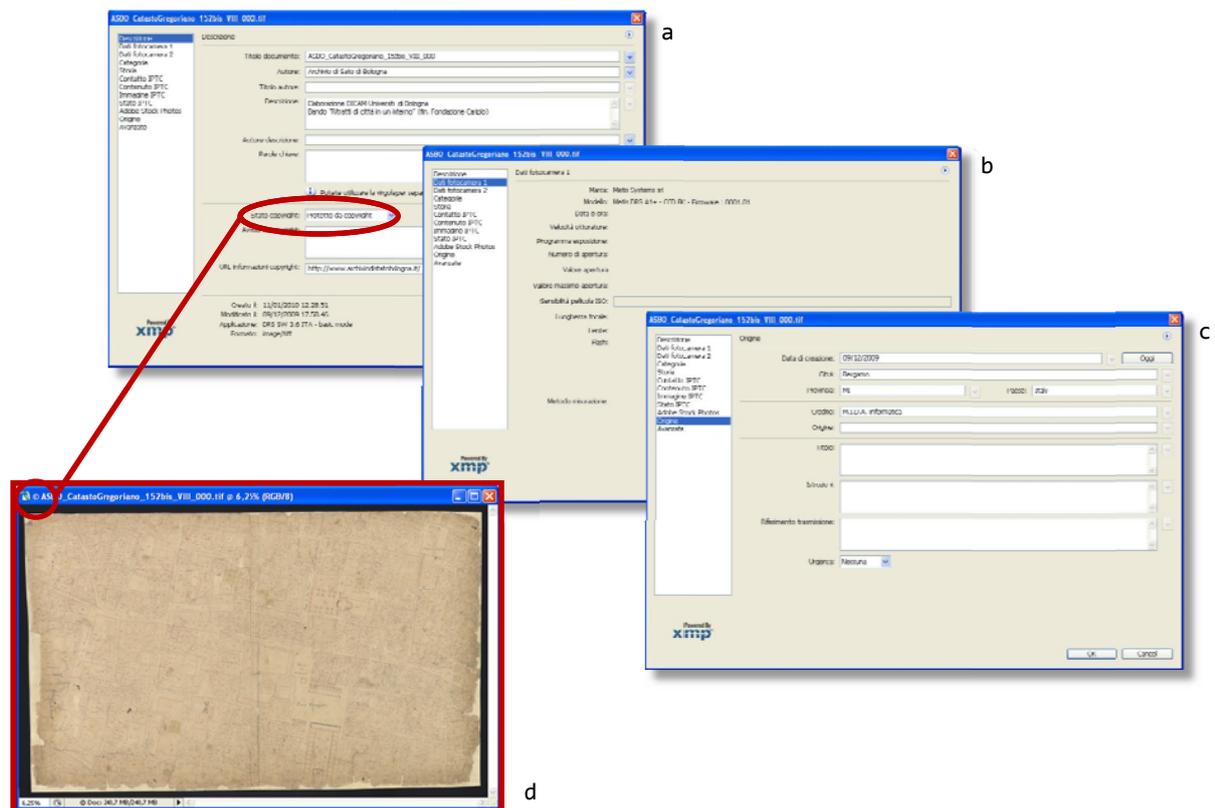


Fig. 4.13 - Inserimento di alcuni metadati nell'immagine del foglio di mappa VIII, piano terra, del Catasto Gregoriano ed. 152bis: a) "Descrizione" (informazioni sul proprietario e *copyright*); b) "Dati fotocamera 1" (caratteristiche del dispositivo utilizzato per la creazione del file); c) "Origine" (data di creazione e autore). Il simbolo © di *copyright* compare sulla barra superiore del quadro dell'immagine, accanto al nome del file (d).

Purtroppo le informazioni di *ownership* (proprietà) incluse nell'immagine come metadati sono facilmente modificabili. Le informazioni inserite mediante un sistema di **filigrana** (*watermark*), invece, solitamente sopravvivono trasformazioni di vario tipo, permettendo di risalire in qualunque momento all'autore dell'immagine. Esistono due tipi di filigrana che è possibile inserire nell'immagine digitale:

- filigrana visibile (***visual watermark***): uno o più livelli, normalmente di testo, che vengono sovrapposti all'immagine di background, e si fondono con essa nell'operazione di salvataggio, rimanendo visibili sull'immagine (quindi in qualche modo ne degradano l'aspetto);
- filigrana non visibile (***digital watermark***): insieme di informazioni che vengono inserite nelle "trame" del file immagine, in modo tale per cui, pur non alterando l'aspetto dell'immagine (risultano invisibili all'occhio), rimangono sempre associate ad essa; tali informazioni sono leggibili da appositi *reader*.

Siccome i due tipi di filigrana operano in modo differente sull'immagine, essi sono compatibili tra loro, cioè è possibile inserire entrambi sul file immagine (di tipo raster).

4.3.3.1. *Visual watermarking*

Esistono vari software o plug-in che consentono l'inserimento di una filigrana visibile sulle immagini; molti sono free, ma senza l'acquisto normalmente viene inserito anche un simbolo identificativo del produttore. Un modo semplice per inserire una filigrana visibile è quello di creare dei livelli di testo all'interno di comuni software di elaborazione di immagini. Questa è stata la procedura adottata per la creazione di una filigrana visibile sull'intera area delle immagini dei fogli di mappa del Catasto Gregoriano (fig. 4.14). Per poter applicare la stessa filigrana su una serie di immagini si può effettuare una procedura *batch*, una volta creata l'azione di inserimento per la prima immagine:

- creazione di un nuovo livello;
- inserimento di una casella di testo in una posizione a piacere dell'immagine;
- scrittura delle informazioni desiderate all'interno della casella di testo (in questo caso è stato riportato il nome del proprietario delle immagini: "Archivio di Stato di Bologna");

- regolazione delle caratteristiche del testo (stile, grandezza, colore), compresa l'opacità e il riempimento, da impostare su valori percentuali bassi (30-40%);
- regolazione di smusso ed effetto rilievo, per creare un effetto qualitativamente migliore, e tipico di una filigrana;
- rotazione a piacimento della casella di testo;
- ripetizione della dicitura, su più righe e più volte su una stessa riga, per coprire l'intera area dell'immagine; aggiustamento della posizione della casella di testo.

Oltre a questa, è stata creata una filigrana, sempre visibile, costituita da una sola dicitura in un angolo dell'immagine, per riportare informazioni inerenti il progetto e l'esecutore delle elaborazioni digitali (fig. 4.14).

Va sottolineato che il livello di trasparenza della filigrana risulta tale da non ostacolare la lettura dell'immagine quando visionata a schermo intero, ma da essere chiaramente leggibile ad elevati livelli di zoom.

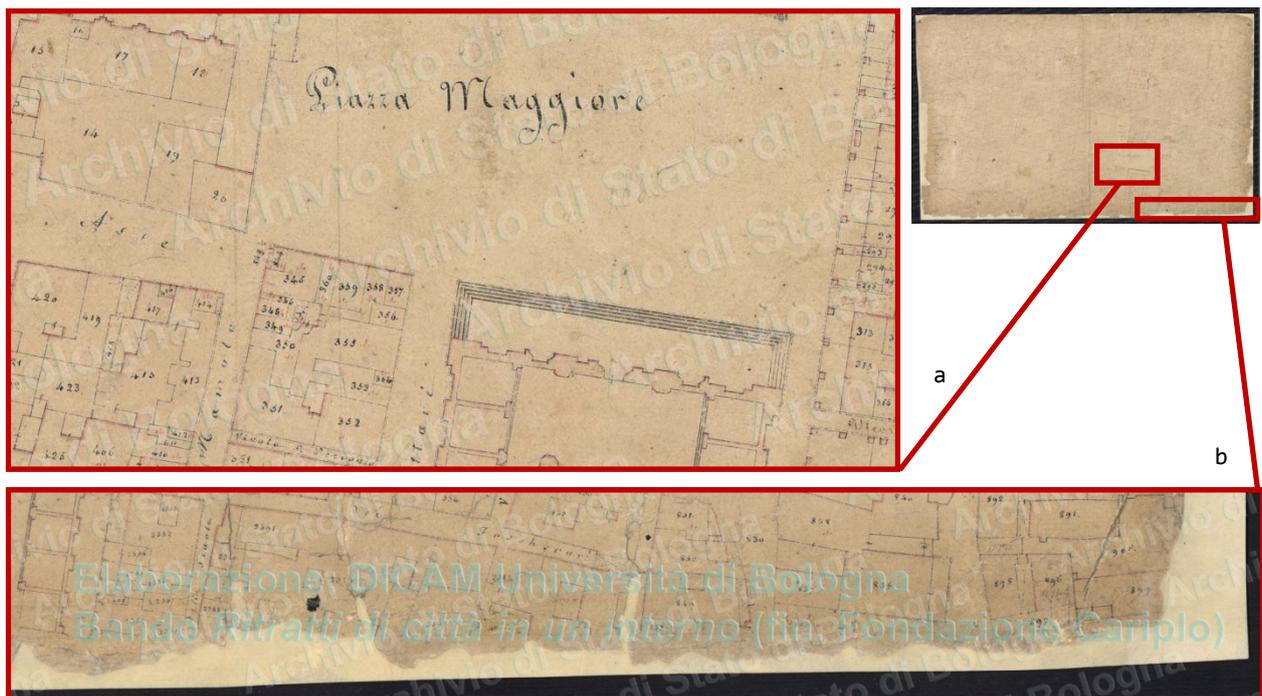


Fig. 4.14 - Applicazione di una filigrana visibile all'immagine del foglio di mappa VIII, piano terra, del Catasto Gregoriano ed. 152bis:

- informazioni sul proprietario del documento originale;
- informazioni inerenti il progetto e l'esecutore delle elaborazioni digitale.

4.3.3.2. *Digital watermarking*

La **steganografia** (dal greco *στεγανός*, *steganos*, nascosto, e *γράφειν*, *graphein*, scrittura) è l'arte e la scienza di scrivere messaggi nascosti in modo tale che nessuno, a parte lo scrittore e destinatari scelti, sospetti dell'esistenza del messaggio: è una sorta di sicurezza attraverso l'oscurità. Il vantaggio della tecnica sta proprio nel poter inviare un messaggio nascosto senza attirare l'attenzione sul fatto, quindi mantenere nascosta l'esistenza di dati a chi non conosce la chiave di lettura; a differenza di questa, la crittografia consiste nel non rendere accessibili dati (che si sa che sono nascosti) a chi non ha la chiave. Gli esempi più antichi di utilizzo dell'arte steganografia risalgono all'antica Grecia, secoli prima di Cristo; la teorizzazione della tecnica fu fatta molto più recentemente, da parte dell'abate Johannes Trithemius, con la sua *Stenographia* (1499).

A partire dagli anni '90 del secolo scorso, la steganografia ha trovato un supporto ideale nei file, per via delle loro grandi dimensioni: ad esempio, in un'immagine digitale è possibile operare un cambiamento impercettibile, modificando il valore di un pixel ogni cento, per ottenere un messaggio nascosto a tutti eccetto a chi è a conoscenza della sua esistenza e ne ha la chiave di lettura. La tipologia di steganografia digitale più diffusa è la LSB (*Least Significant Bit*), quella del bit meno significante: essa sfrutta il fatto che il cambiamento del bit meno significativo di ogni pixel di un'immagine (con l'effetto di un cambiamento del colore in modo impercettibile) non fa cambiare di contenuto l'immagine stessa (in quanto il singolo colore di ogni pixel, descritto da 8 bit, risulterà praticamente invariato, e soprattutto non visibile all'occhio umano). Questo può essere fatto mediante appositi algoritmi, sulla base di un'immagine di copertura, un dato da nascondere ed una chiave (necessaria anche in fase di lettura del messaggio nascosto). In modo analogo la steganografia si applica anche ad altri dati multimediali, come audio e video.

La tecnica può essere usata nel *digital watermarking* (anche se qui l'invisibilità non è un requisito così stringente come nella steganografia), per nascondere un messaggio in un'immagine digitale (o in un qualunque altro file multimediale). Nel *digital watermarking* solitamente il messaggio nascosto è piccolo ed inteso a proteggere il *media*, nelle trame del quale si nasconde. Gli algoritmi di *digital watermarking* lavorano proprio così, cioè introducendo nel tessuto dell'immagine un'informazione numerica univoca, per l'identificazione certa dell'autore dell'immagine, più altre eventuali informazioni. E' una

tecnica molto utilizzata tra i fotografi, sia professionisti che amatoriali, che intendano condividere le proprio foto tramite la Rete.

Il software oggi forse più diffuso per la creazione di filigrane invisibili è stato sviluppato da *Digimarc* (Digimarc, 1995). L'algoritmo implementato nella prima versione sfrutta le caratteristiche di luminanza di un'immagine (che è una componente del contrasto in un'immagine a colori, e la componente di luminosità in un'immagine a scala di grigi) per creare il messaggio nascosto. Il nuovo *Chroma watermarking* sfrutta invece la componente cromatica dello spazio colore di un'immagine. Poiché l'occhio umano è meno sensibile alle differenze di colore che non a quelle di luminosità, con questo tipo di *watermarking* è possibile alterare più pesantemente l'immagine (cioè applicare un *watermark* più robusto, in grado di assicurare una maggior durabilità nel tempo).

Dal sito del produttore è scaricabile un *plug-in* per software di elaborazioni di immagini, che permette di includere nei file una filigrana nascosta (fig. 4.15). Con l'acquisto del software si viene inseriti nel database centrale di *Digimarc*, per avere una posizione in Rete identificata da un ID (le cui proprietà possono essere cambiate dall'utente in ogni momento, senza modificare il *watermark* associato a tutte le immagini con quell'ID); il servizio include anche la possibilità di effettuare scansioni della Rete in cerca di immagini con uno specifico *watermark*, con l'invio all'autore di una mail di report per indicargli l'URL del sito su cui risulta pubblicata l'immagine.

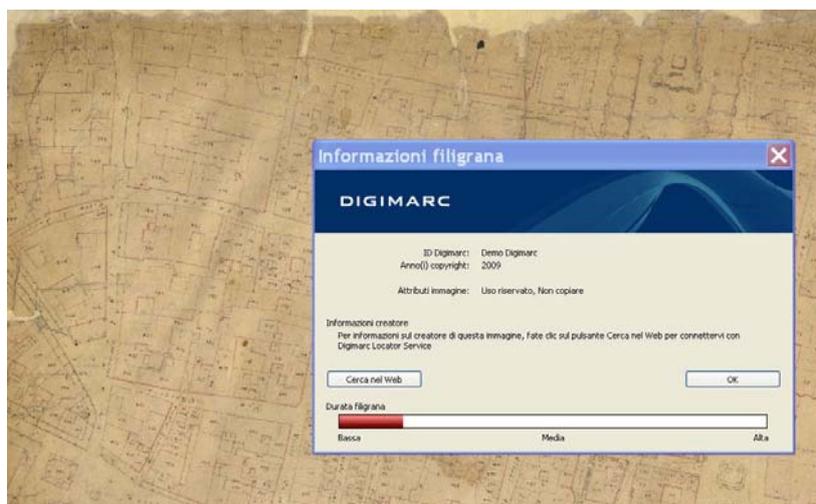


Fig. 4.15 - Applicazione di un *digital watermark* al foglio VIII, piano terra, del Catasto Gregoriano ed. 152bis, in un software di elaborazione di immagini (*plug-in* Digimarc).

Per rilevare tale messaggio nascosto occorrono comuni software di fotoritocco o *reader* appositi (scaricabili dal sito del produttore).

A differenza del DRM (*Digital Rights Management*), che parte dalla premessa che solo se dichiaratamente espresso esiste una licenza d'uso del file, il *digital watermarking* non impone una restrizione a priori per l'uso di un file. Questo è vantaggioso, perché implica un differente impatto sull'utente: non un divieto, ma un uso consapevole dell'oggetto digitale (Samtani R., 2009). Anche se il *watermarking* in sé non viola diritti di privacy, essendo una tecnologia che comporta il trattamento di dati protetti da diritti d'autore, deve essere disciplinato in materia; questo è stato fatto nel maggio 2008 dal *Center for Democracy & Technology* di Washington con il white paper *Privacy Principles for Digital Watermarking* (Center for Democracy & Technology, 2008).

4.3.4. La consultazione e l'accesso al dato mediante sistemi GIS

A partire dagli anni '90, i sistemi GIS hanno trovato applicazione anche nel campo dei beni culturali storici, con la creazione di quelli che sono stati definiti *Historical GIS* (HGIS). Nel caso di cartografia storica, la costruzione di un HGIS presuppone tutta una serie di operazioni sui dati, esaminate nei capitoli precedenti: l'acquisizione del documento originale, la sua georeferenziazione, la raccolta dei dati storici inerenti il documento (libretti di campagna, manuali pratici, registri catastali, ecc.), l'eventuale vettorializzazione, altre eventuali elaborazioni. A queste fa seguito il vero e proprio inserimento della carta in ambiente GIS quale base cartografica storica. Diverse sono le esperienze che stanno nascendo in questo campo (Brusa M., Solmi M., Vianello G., Vittori Antisari L., 2010) (Guarducci A., Rombai L., Piccardi M., 2010) (Mihai B., I. Savulescu I, Demeter T., 2010) (Moscicka A., Marzec M., 2010) (Oreni D., Brumana R., Scaioni M., Prandi F., 2010) (Solmi M., Brusa M., Gherardi M., Vianello G., 2010).

Il primo progetto per la creazione di un accesso virtuale a documenti storici prese avvio nel 1986, presso l'*Archivo General de Indias* in Siviglia, dove fu installato nel 1992: obiettivo era sostituire la consultazione diretta dei documenti originali con quella virtuale dei documenti digitalizzati, in una apposita sala di studio virtuale. A quello scopo, furono acquisite con scanner piani intere serie di archivio, con la

produzione di centinaia di migliaia di immagini (Gonzàles García P., 1999) (Buonora P., 2006).

A partire da quel momento è stato un proliferare di progetti, nati presso istituti pubblici e privati (come Archivi di Stato, Biblioteche, Musei, Soprintendenze, e così via), per l'archiviazione e la gestione dell'immenso patrimonio documentaristico e cartografico, e di straordinario valore storico, artistico e documentario, di cui essi dispongono (solo come esempio, 35 sono i chilometri lineari di documenti di cui dispone l'Archivio di Stato di Genova, 25 quello di Bologna). Un modo per raccogliere tali informazioni è la creazione di Sistemi Informativi Territoriali ad uso interno dell'Istituto, per la catalogazione e l'inventariazione dei documenti; inoltre, per permettere la consultazione da parte di esterni, tali GIS solitamente prevedono spazi dedicati aperti verso utenti connessi via Internet. Si possono citare alcuni progetti italiani tra i più noti, nati in questi ultimi anni (fig. 4.16):

- **Archivio digitalizzato dell'Archivio di Stato di Firenze:** la prima adozione, in Italia, di una tecnologia *image server* (anno 2000) per la consultazione on-line di documenti digitalizzati; l'inserimento on-line del patrimonio dell'Archivio continua tuttora, con la pubblicazione progressiva dei risultati sul sito (Archivio di Stato di Firenze, 2000) (Buonora P., 2009);
- **Imago (Regione Emilia-Romagna):** catalogo regionale on-line di opere grafiche e cartografiche (che vanno dal XV secolo ai giorni nostri, realizzate da autori italiani e stranieri) afferenti a Biblioteche, Archivi, Musei, Fondazioni ed altre istituzioni culturali della Regione, censite e catalogate dalla Soprintendenza a partire dal 1986 e che attualmente constano di circa 1 milione di informazioni bibliografiche e 10.000 immagini; è un applicativo italiano (software *Sebina*) del sistema di classificazione internazionale ICONCLASS, tramite cui è possibile effettuare vari tipi di ricerca, tra cui anche una richiesta contemporanea di quelle banche dati contenenti documenti analoghi a quello cercato (IBC, 2000);
- **Imago II (Archivi di Stato di Cagliari, Milano, Perugia, Roma, Torino, Venezia):** progetto, nato nel 1997, per l'acquisizione in formato digitale di originali cartografici presenti nei rispettivi Archivi (in particolare incentrato sul passaggio dalle tecniche fotografiche tradizionali a quelle di digitalizzazione più recenti) e la loro pubblicazione su Web (avvenuta negli anni 2001-2002), tramite software di *image server* per una consultazione virtuale a piena risoluzione (Archivio di Stato di Milano, 2002) (Archivio di Stato di Roma, 2002)

(Furlanetto P., 2004) (Archivio di Stato di Cagliari, 2008) (Buonora P., 2009) (Contò F., Fanello G., Pillon M., 2009) (Furlanetto P., Bondesan A., Levorato C., Rosselli R., Bertani B., 2009);

- **Divenire** (Archivio di Stato di Venezia): Sistema Informativo (nato nel 2006) per la creazione, la gestione e la consultazione on-line (mediante ricerca libera o guidata, e navigazione) di immagini ad alta risoluzione derivate dai fondi documentaristici dell'Archivio, assieme alle descrizioni analitiche e a quelle archivistiche (queste ultime possibili grazie al collegamento al sistema SIASVe, Sistema Informativo dell'Archivio di Stato di Venezia); è stato realizzato dalla società *Hyperborea* s.c. di Pisa in collaborazione con GAP s.r.l. di Roma (Archivio di Stato di Venezia, 2008) (Hyperborea, 2009) (Salvadori S., Poggetti C., 2009);
- **WebGIS Catasto Gregoriano** (Dipartimento di Studi Urbani dell'Università di Roma Tre, in collaborazione con l'Archivio di Stato di Roma, la Soprintendenza ai Beni Culturali del Comune di Roma e la Fondazione Cariplo): WebGIS per la consultazione online del Catasto Gregoriano di Roma (conservato presso l'Archivio di Stato di Roma) e della carta di G.B. Nolli del 1748, oltre che di documenti iconografici sull'architettura della città storica; il sistema deriva dall'ampliamento del precedente Sistema Informativo Geografico attraverso il collegamento a nuove serie cartografiche (Lelo K., Tavaglini C.M., 2005) (LabSU, 2007);
- altri progetti GIS basati sul Catasto Gregoriano (province di Pesaro, Ancona, Ascoli Piceno, Macerata) (Buonora P., 2009).

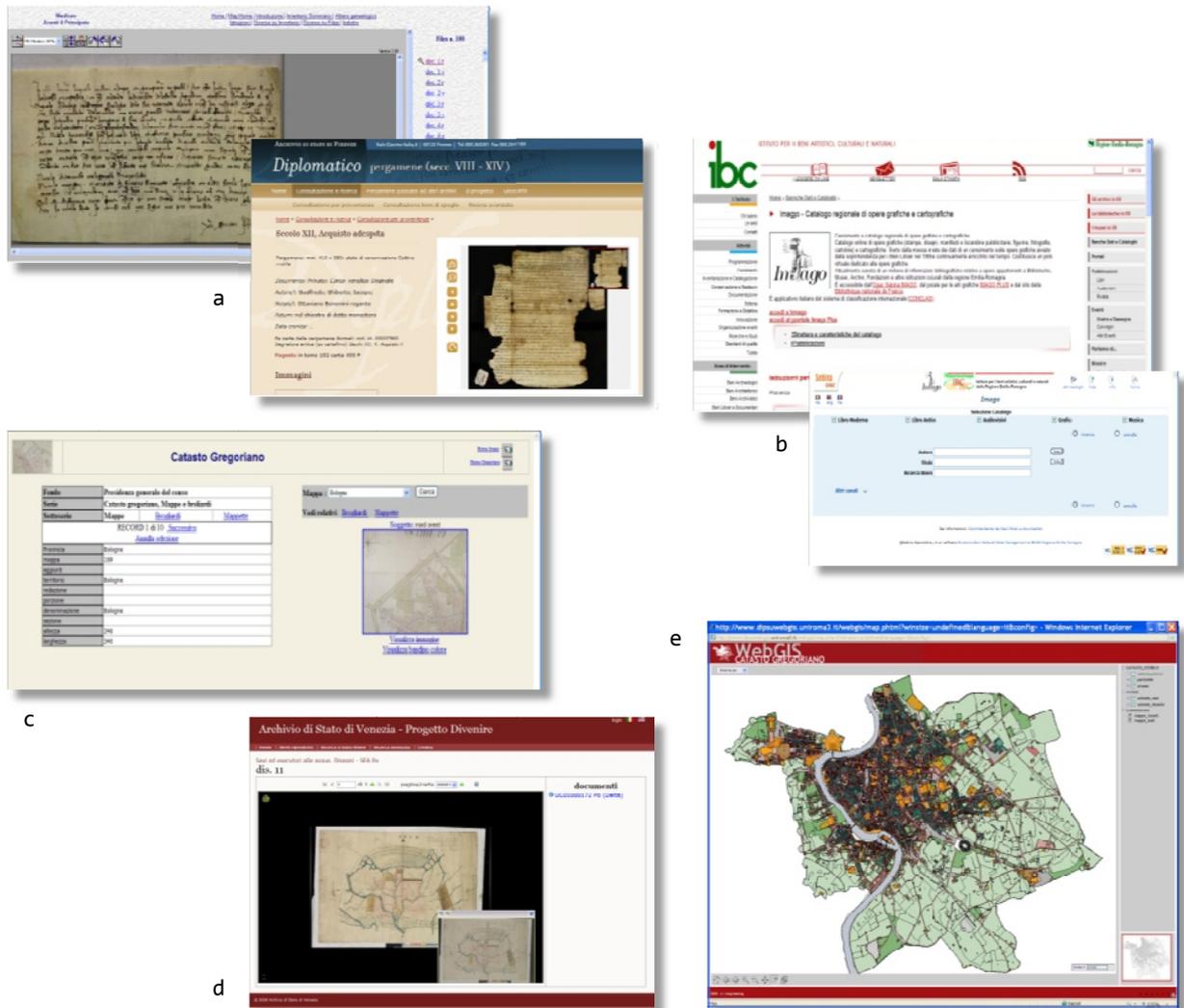


Fig. 4.16 - Alcuni esempi di progetti italiani di archivi digitalizzati o di archivi WebGIS per la ricerca e la consultazione in Rete di documenti storici e cartografici:
 a) Archivio di Stato di Firenze; b) Imago; c) Imago II;
 d) Divenire; e) WebGIS Gregoriano.

4.3.4.1. Collegamento ai registri

Nella storia della cartografia, si è assistito alla graduale separazione, avvenuta in modo deciso nel XIX secolo con l'introduzione dei Catasti, della parte disegnata dalla parte scritta (descrittiva) di una mappa. In particolare la parte descrittiva dei Catasti riguarda la registrazione delle particelle e dei proprietari. Nella consultazione di mappe catastali, dunque, è indispensabile prendere in considerazione anche i registri, in quanto nati in stretta relazione con le mappe: «il registro senza mappa è cieco, la mappa senza registro è muta» (Buonora P., 2004).

Nei moderni sistemi di catalogazione e consultazione on-line che includono catasti storici, è quindi essenziale prevedere l'archiviazione, accanto alle mappe, anche dei registri (Orciani M., Frazzica V., Colosi L., Galletti F., 2006) (Balk L., 2009). Questo si rende possibile attraverso due diversi approcci:

- a fianco della catalogazione delle mappe, prevedere una catalogazione dei registri, per volume, e per fogli all'interno di ogni volume;
- creare un link tra mappa e registri corrispondenti, di solito in funzione del numero di particella catastale.

Il primo approccio è ad esempio stato adottato dal progetto Imago II per il Catasto Gregoriano: mappe, mappette e registri sono catalogati, consultabili ed esplorabili, in archivi separati (fig. 4.17). Un esempio del secondo approccio è invece costituito dal WebGIS del Catasto Gregoriano di Roma, messo a punto dal Laboratorio di Studi Urbani dell'Università di Roma Tre. Al suo interno è possibile l'individuazione automatica, a partire da una scheda documentaria, dell'ubicazione dell'edificio descritto nel documento stesso, e viceversa, l'individuazione delle schede documentarie che descrivono un certo edificio, dalla selezione in carta dell'edificio stesso (fig. 4.18). All'interno della banca dati, l'utente può ricercare documenti cartografici e documentaristici in modo singolo o per gruppi di appartenenza (in base ad un parametro comune come l'autore, l'anno, l'ubicazione, la proprietà) (LabSU, 2007).

Ai fini del progetto *Creare e divulgare cultura attraverso gli archivi storici* si rende dunque necessario inserire nell'archivio on-line anche i registri catastali, affinché possa aversi una descrizione completa del Catasto Gregoriano di Bologna, ed un quadro il più possibile realistico della situazione della Bologna del XIX secolo. E' a tale scopo, infatti, che le singole pagine dei brogliardi sono state scandite ad alta risoluzione (v. par. 2.1.3.1).

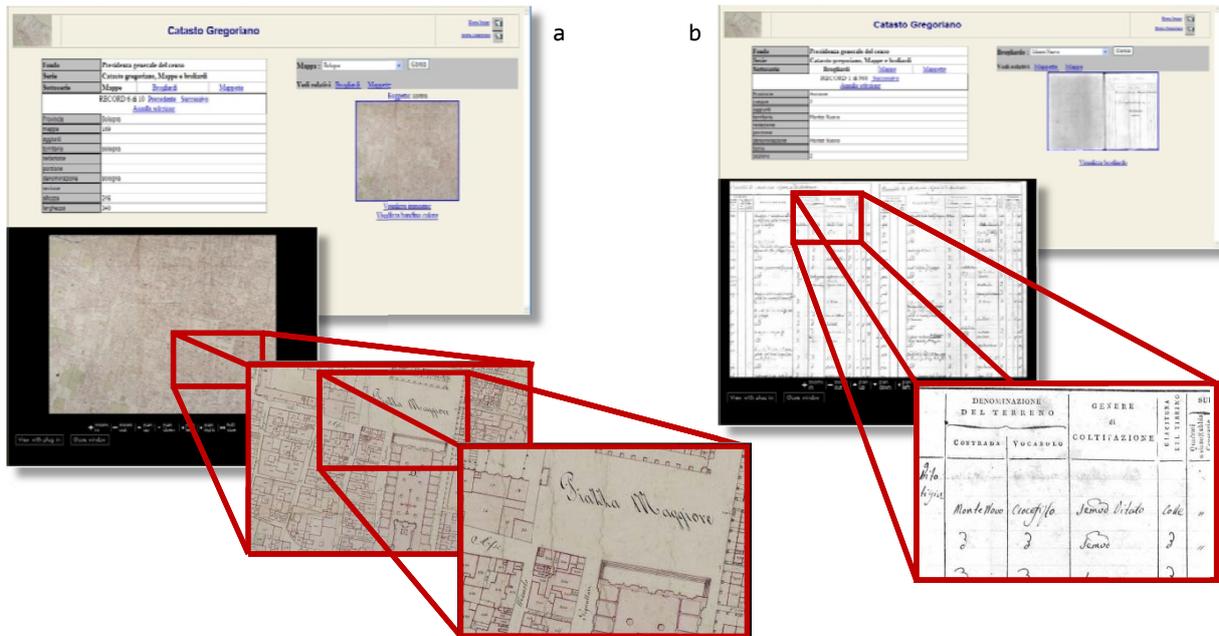


Fig. 4.17 - La consultazione delle mappe catastali e dei relativi registri nel progetto Imago II: a) foglio di mappa di un edizione del Catasto Gregoriano di Bologna; b) foglio di registro catastale (i brogliardi non sono presenti per la zona di Bologna).

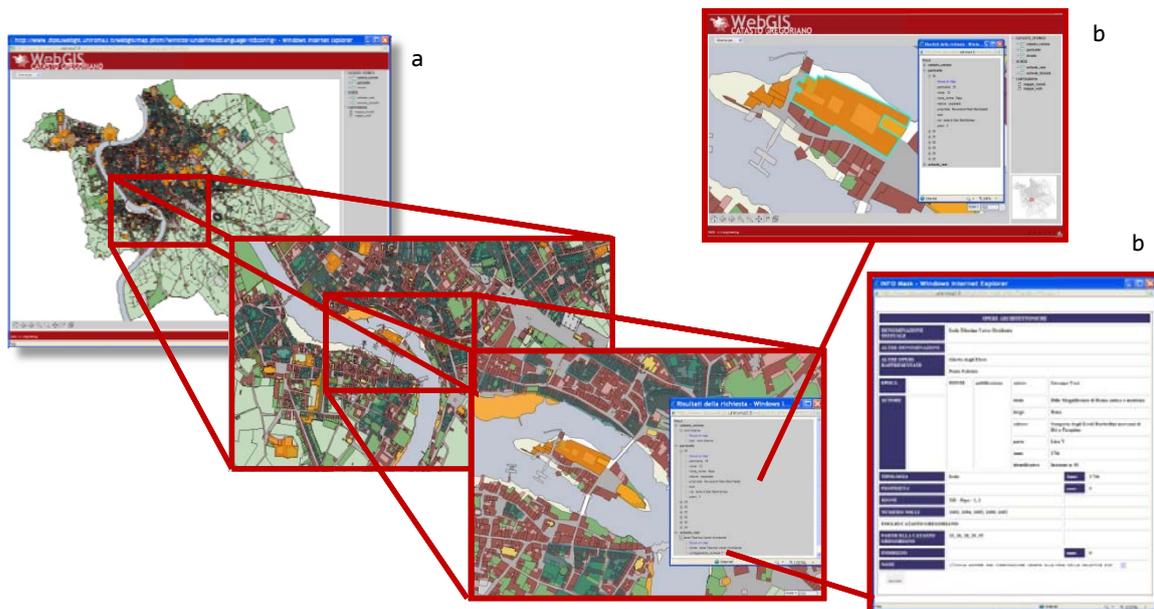


Fig. 4.18 - La consultazione delle mappe (a) del WebGIS del Catasto Gregoriano di Roma, e l'apertura delle schede documentarie (b) a partire da una particella.

Un miglioramento della consultazione di mappa e registro può derivare dalla creazione di un collegamento a doppio senso tra mappa e pagina di registro e tra pagina di registro e mappa, in modo da raggiungere la descrizione di una particella catastale, a partire dalla mappa, e

viceversa, raggiungere la particella, a partire dalla sua descrizione nel registro (fig. 4.19). Questo è un obiettivo che si potrà raggiungere con la messa in rete del Catasto Gregoriano di Bologna; il processo risulta però non banale, essendo diversi i fattori da prendere in considerazione:

- ad una mappa corrispondono più pagine di brogliardo, differenti per numero (o lettera) di particella: il collegamento deve essere creato tra la singola particella e la pagina corrispondente;
- sovrapposizione di un livello vettoriale per effettuare il collegamento mappa-brogliardo; nel caso del Catasto Gregoriano di Bologna, si è scelto di creare, come livello vettoriale, un elemento riportante l'identificativo della particella stessa (v. par. 4.1.1.1);
- una particella può essere descritta in due fogli di registro adiacenti, o in pagine differenti di uno stesso registro (per il Catasto di Bologna, questo succede per gli edifici religiosi o di proprietà demaniale, identificati da lettere): occorre prevedere il link tra la mappa e i vari fogli d'interesse;
- presenza di differenti registri, che riportano informazioni differenti o raggruppate in modo differente per le varie particelle (per il Catasto di Bologna, le serie di registro I e II): il caso ricade nel precedente;
- esistenza di registri di aggiornamento: in tal caso si può prevedere un doppio link a due registri differenti, o un link tra la mappa e il primo registro, ed un link da questo al registro di aggiornamento;
- particella disegnata in due fogli di mappa adiacenti: il link mappa-registro viene creato solo a partire dalla mappa in cui appare l'identificativo di particella;
- differenti fogli per i vari piani di mappa: può essere previsto un collegamento anche tra questi e i registri (ma potrebbe non esserci sempre corrispondenza tra numeri di piani disegnati in mappa e numero di piani riportati sul registro);
- eventuale traduzione OCR delle pagine di registro: utile ai fini di creazione di cataloghi editabili; per quanto riguarda il Catasto Gregoriano di Bologna, almeno per il momento la traduzione OCR non verrà eseguita, in quanto sarebbe difficoltosa se non addirittura impossibile in automatico (trattandosi di registri scritti a mano) (v. par. 4.3.1.5);
- esistenza di altre pagine di registro non legate a specifici numeri di particella (pagine di apertura o chiusura, istruzioni ai geometri di allora, note varie): dovrà essere garantita anche una consultazione del registro a sé stante, che comprenda tutti i fogli del volume, ad esempio mediante speciali visualizzatori (v. par. 4.3.4.3).



Fig. 4.19 - Schema di link tra mappa catastale (a: foglio VIII piano terra, Catasto Gregoriano ed. 152bis) e brogliardi, per le particelle 357 (descritta sulle due pagine di brogliardo 36r e 36v) e 358 (descritta sulla pagina 36v), individuate da box vettoriale (b).

4.3.4.2. Query ed analisi

Le fasi di digitalizzazione e georeferenziazione di cartografia antica rendono possibile l'inserimento dei dati storici all'interno di un GIS; esso è in grado di garantire le operazioni di base di un Sistema Informativo (identificazione, fruizione e conservazione delle risorse elettroniche), ma col vantaggio di un ambiente georiferito (da qui

l'aggettivo "Territoriale"). Attraverso i *tool* di cui dispone e per la sua funzionalità di essere elemento integratore tra l'apparato descrittivo-cartografico e la componente descrittiva, l'ambiente GIS, HGIS in questo caso, risulta il più adatto per supportare analisi e studi a carattere storico.

In particolare le operazioni consentite sui dati sono quelle di:

- ricerca;
- consultazione;
- analisi:
 - ricerca (*search*) di elementi;
 - interrogazioni anche complesse (*query*);
 - confronto, mediante *overLay*.

Classici *tool* di analisi di un HGIS sono ad esempio le operazioni di **ricerca** all'interno di una specifica area, o in base ad un attributo, o in base a funzioni spaziali (come distanza, appartenenza, intersezione). Ancora, la possibilità di effettuare delle *query* permette di analizzare i dati sotto molteplici punti di vista e, grazie all'ambiente georiferito, in maniera quantitativa. Nel caso di modello tridimensionale di una città, ricavato dalle informazioni metriche di una carta storica (è il caso della modellazione 3D della carta di de' Gnudi, descritta nel capitolo 4.2), ad esempio, i dati storici inseriti in ambiente GIS 3D potrebbero permettere di rispondere a *query* sui singoli edifici, oltre che di conoscere le caratteristiche e l'evoluzione nel tempo di ogni singolo edificio, mediante associazione ad esso di informazioni alfanumeriche ricavate da documentazione storica (fig. 4.20). Altro *tool* molto utilizzato è la funzione di **overLay**, cioè la sovrapposizione di più livelli (*Layer*) in "strati geografici", con la creazione di uno strato geografico nuovo. Nel caso più semplice, si tratta della sovrapposizione della carta antica con una base cartografica moderna. Il confronto risulta uno strumento molto utile, in quanto, oltre a permettere il controllo della qualità del dato e della fase di georeferenziazione della carta storica (v. par. 3.3.1), fornisce informazioni aggiuntive per l'interpretazione della realtà storica rispetto a quella moderna, permettendo di raggiungere un più alto livello di analisi ed un più alto livello di espressione all'interno dell'ambiente digitale (Surano N., Raimondo F.M., Mazzola P., 2008).

Con gli strumenti di cui dispone, l'ambiente GIS risulta quindi un valido supporto nell'effettuazione di studi storici. L'associazione di un ulteriore "strumento", quale un servizio Web, permette all'ambiente Web-GIS di fungere da motore di sviluppo di questi studi storici, in quanto, mettendo i dati a disposizione di un pubblico vastissimo e mondialmente diffuso, si fa disseminatore delle conoscenze.

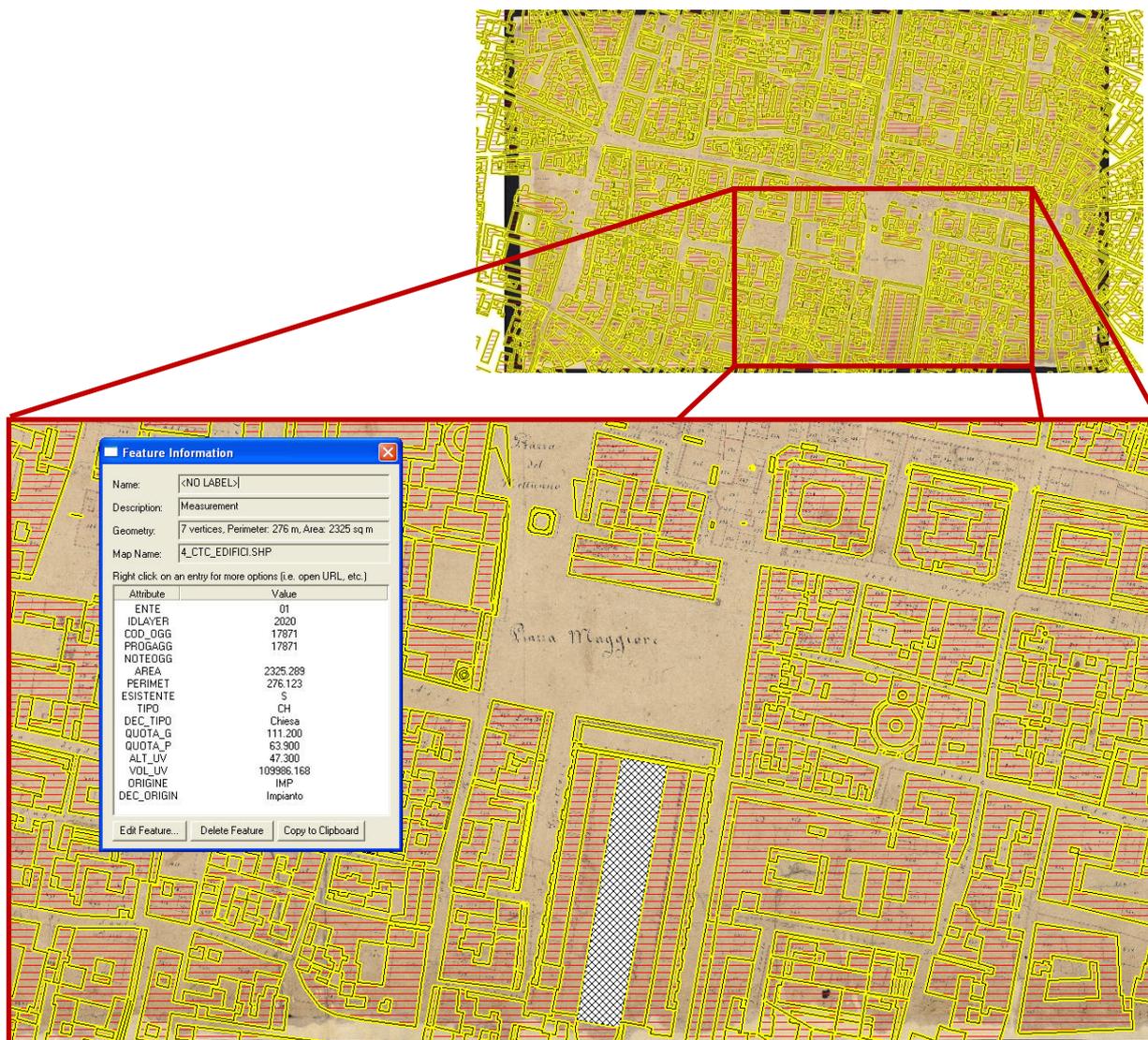


Fig. 4.20 - Inserimento di una carta storica (foglio VIII piano terra, Catasto Gregoriano ed. 152bis) in ambiente GIS, con *overlay* di moderna cartografia vettoriale (CTC 1:2000): si evidenzia la possibilità di effettuare *query* su un edificio (evidenziato con retino quadrettato), nell'esempio la basilica di S. Petronio.

4.3.4.3. Visualizzatori

Trasformare in digitale i documenti antichi significa anche proteggerli, per quanto possibile, dall'usura dovuta al tempo e alla consultazione diretta, permettendone l'esplorazione visiva attraverso immagini digitali ad alta risoluzione. Esistono diverse tecnologie atte ad agevolare, nonché a rendere più attraente, la consultazione su Web di riproduzioni digitali, sia che si tratti di collezioni virtuali, sia di raccolte digitali di tipo archivistico, sia di veri e propri sistemi

WebGIS. Queste soluzioni software facilitano la visualizzazione delle riproduzioni digitali ad alta risoluzione, e permettono la navigazione mediante strumenti di *zoom* e *pan* in porzioni a piacere dell'immagine, il tutto mediante modalità semplici ed intuitive, e secondo uno stile attraente (la parte grafica viene di norma particolarmente curata). Viene offerta un'interfaccia per la ricerca delle immagini, secondo criteri predefiniti oppure in modo libero, e la possibilità di associare alle immagini i propri metadati, mediante collegamento a specifici database. Viene garantita la tutela dell'immagine prevenendone download non autorizzati, e al contempo è possibile, in certi casi, l'implementazione di sistemi di *e-commerce* per l'acquisto del materiale digitale.

Per quanto riguarda la pubblicazione, la consultazione e la vendita di documenti in semplici **collezioni virtuali**, esistono *Web application* in grado di garantire la velocizzazione delle pagine Web ed un miglioramento dell'interattività, pur gestendo immagini ad altissima risoluzione: questo viene reso possibile per esempio dall'utilizzo, come piattaforma digitale, del sistema di visualizzazione *open-source IIPImage*, e come formato immagine, del TIFF piramidale (fig. 4.21). Un software di questo tipo è *e-gallery*, basato sulla piattaforma Java, e disponibile anche in versione *e-maps*, specificatamente ideata per la visualizzazione e la navigazione di materiale cartografico antico (mappe, atlanti, libri); una particolare funzione rende più veloce la consultazione dei fogli di cui può essere costituita una carta. Il software è concepito per il tipico collezionista, e garantisce una visualizzazione di carte ed atlanti all'interno di una collezione virtuale. Implementazioni del software sono state fatte per l'Accademia Carrara di Bergamo, per il Museo di arte moderna e contemporanea di Trento e Rovereto, per la Collezione di materiale cartografico di V. Valerio (*e-gallery*, 2009).

Il software è stato messo a punto da *Hyperborea s.r.l.*, società che dal 1995 opera nel settore dei beni culturali e nel settore ambientale, dedicandosi all'applicazione, consultazione e fruizione su Web delle tecnologie informatiche ICT (*Information and Communication Technology*, l'insieme delle tecnologie per l'elaborazione e la diffusione dell'informazione attraverso mezzi digitali). Si è dedicata in particolare al marketing nel settore archivistico, museale e cartografico storico, per la commercializzazione di software specifici: oltre ad *e-maps*, *AriannaWeb* e il progetto *Divenire* creato *ad hoc* per l'Archivio di Stato di Venezia (*Hyperborea*, 2009).

Il sistema *AriannaWeb*, attualmente implementato in alcuni Archivi di Stato, è un esempio di **raccolta digitale di tipo archivistico**. Tali raccolte sono piattaforme virtuali concepite appositamente per essere

sfruttate in contesti archivistici, per la consultazione dei documenti archiviati e per supportare gli Archivi nella promozione del proprio patrimonio culturale: si potrebbe dire che tali sistemi adottano un “approccio archivistico alla cartografia” (fig. 4.22).

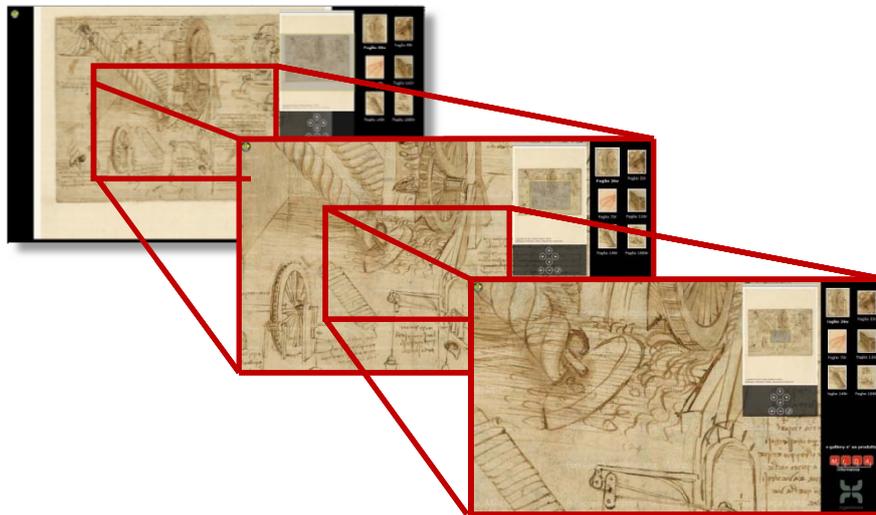


Fig. 4.21 – Alcune schermate di un possibile software (e-gallery) per la consultazione di immagini ad alta risoluzione in collezioni virtuali (nell’esempio, il Codice Atlantico di Leonardo da Vinci) (fonte: <http://www.midainformatica.it>).



Fig. 4.22 – Alcune schermate dell’implementazione, per l’Archivio di Stato di Trieste, di un sistema per la creazione di raccolte digitali di tipo archivistico (AriannaWeb).

Divenire rappresenta invece un approccio intermedio, tra *AriannaWeb* ed *e-maps*, per la fruizione della cartografia storica, in quanto unisce una struttura archivistica virtuale (in fondi, serie ed unità archivistiche) con la visualizzazione e la consultazione dei documenti come in una di collezione virtuale (d'interesse per un collezionista). Questo approccio viene garantito da particolari funzionalità: l'utente può aprire la collezione, consultare ed esplorare un documento cartografico e richiamare la collocazione archivistica all'interno del fondo dell'Istituzione nel quale è conservato (in questo caso, l'Archivio di Stato di Venezia) (fig. 4.23). Tutti e tre i progetti sfruttano come piattaforma digitale il sistema di visualizzazione *IPIImage* (Salvadori S., Poggetti C., 2009).

Infine, a corredo e miglioramento della **consultazione di documenti librari** (compresi i registri catastali), è possibile adottare vari sistemi, tra i quali particolarmente attraente risulta quello che fornisce l'illusione dello sfoglio delle pagine di un libro (fig. 4.24). Anche in questo caso sono implementati i classici strumenti di *zoom* e *pan*, per una navigazione di dettaglio sull'intero documento (M.I.D.A.).

Tutti gli esempi a cui si è accennato mostrano quanto sia crescente, oggi, l'attenzione rivolta verso i problemi, esistenti presso varie Istituzioni, di archiviazione in forma digitale del proprio patrimonio documentario e cartografico; ma l'obiettivo iniziale, dettato da esigenze archivistiche, è costituito spesso dall'opportunità di divulgare le conoscenze, mettendo a disposizione di utenti anche non specializzati tale patrimonio, attraverso sistemi basati su Web, dalle funzionalità avanzate e al contempo dallo stile accattivante. Il patrimonio cartografico storico inizia così a diventare realmente un Bene Culturale a disposizione di tutti.

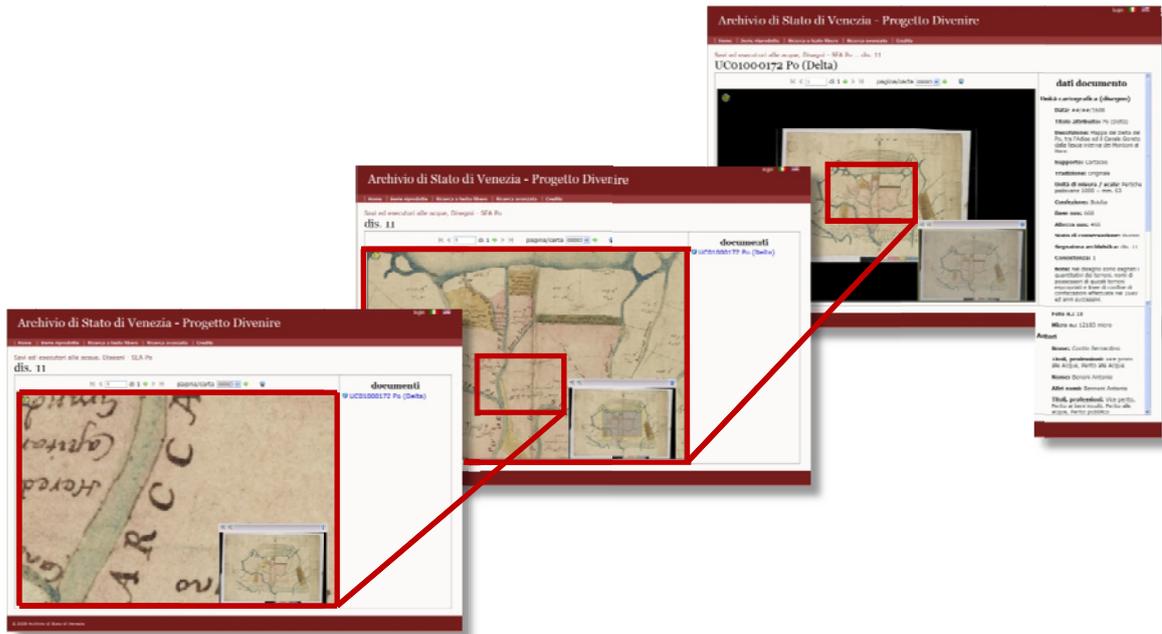


Fig. 4.23 - Alcune schermate del progetto *Divenire*, sistema per la consultazione di parte del materiale cartografico conservato presso l'Archivio di Stato di Venezia; a sinistra della finestra di visualizzazione, vengono riportati i dati relativi al documento (nell'esempio, carta serie S.E.A. Po, dis. 11).



Fig. 4.24 - Una possibile tecnica (*Midabook*) per la consultazione dei registri: effetto di sfoglio delle pagine di un libro (nell'esempio, il Codice Atlantico di Leonardo da Vinci) (fonte: <http://www.midainformatica.it>).

CONCLUSIONI

La ricerca illustrata nella presente tesi era mirata a fornire una panoramica dell'intero processo di recupero della cartografia storica mediante le moderne tecniche geomatiche (acquisizione, georeferenziazione ed elaborazione numerica), mostrando quanto si riveli preziosa l'opportunità di disporre di una carta storica in ambiente digitale, per la salvaguardia, lo studio e la diffusione di questo patrimonio storico-culturale.

Si è voluto dimostrare come gli strumenti della Geomatica si rivelino utili per la trattazione di un bene culturale quale è la cartografia storica, in quanto, oltre a garantirne il recupero a fini di conservazione, permettono nuovi modi di accedere, comprendere e sfruttare i dati cartografici storici: una volta convertite le mappe antiche in ambiente digitale, e attribuito loro un contenuto metrico con attenti processi di georeferenziazione e geocodifica, è possibile indagare sulle loro caratteristiche, geometriche e di altra natura, effettuare nuove applicazioni a carattere multidisciplinare legate allo studio dell'evoluzione storica della città e del territorio, nonché sperimentare nuove elaborazioni digitali e rendere l'informazione cartografica più facilmente accessibile.

Alcuni casi pratici affrontati all'interno di questa tesi hanno esemplificato le varie fasi del processo di recupero di cartografia storica, agevolando la trattazione dell'argomento. Tuttavia, l'interesse era rivolto non tanto all'indagine delle specificità dei singoli documenti (comunque condotta per completezza di analisi), quanto allo studio, attraverso di essi, delle problematiche generali inerenti le varie fasi del processo di recupero. Queste possono così riassumersi:

- **acquisizione:** fase delicata, in quanto deve assicurare da un lato la minimizzazione delle deformazioni del supporto, dall'altro il non danneggiamento dell'originale; deve essere condotta con strumenti e tecnologie idonee, che soddisfino criteri di elevata accuratezza e precisione, per fornire un prodotto digitale di qualità elevata dal punto di vista metrico, in quanto su di esso verranno poi effettuate tutte le successive elaborazioni;
- **georeferenziazione:** tecnica utile per:
 - ridare alla carta quel contenuto metrico inizialmente posseduto dal documento originale, o per aumentarne la qualità metrica;

- studiare le deformazioni insite in carta, e dovute a differenti fattori, come deformazione del supporto analogico, antichi strumenti e tecniche di rilievo, trasformazione cartografica adottata;
- confrontare l'assetto territoriale antico con quello moderno, avvalendosi anche degli strumenti forniti dai moderni sistemi per la gestione di database geografici;
- effettuare confronti reciproci tra carte storiche, al fine di analizzare le differenze nella rappresentazione anche per elementi del territorio oggi non più conservati;
- tentare di derivare considerazioni pratiche sui metodi di rilievo adottati e sulla qualità della rappresentazione, comunque supportando lo studio con una analisi filologica del documento cartografico;
- **elaborazione e gestione del dato in ambiente digitale:** insieme di elaborazioni atte ad aumentare la qualità e la fruibilità del dato originale; sono state analizzate alcune possibilità:
 - vettorializzazione: se condotta con tecniche automatiche, può portare a problemi di errata interpretazione e rappresentazione del dato, se condotta con tecniche manuali permette un incremento considerevole della qualità, ma a scapito di un aumento dei tempi di elaborazione;
 - modellazione tridimensionale: sfruttando il tipo di rappresentazione di certi tipi di carte, è possibile fornire al documento storico una nuova veste sottoforma di scena tridimensionale, permettendo così modalità di visualizzazione nuove ed accattivanti, e studi innovativi supportati da un utilizzo metrico del dato;
 - inserimento in archivi GIS: fase finale di un processo di recupero della cartografia storica, permette il confronto diretto con situazioni temporalmente differenti, oltre ad operazioni di ricerca e ad analisi di vario tipo (mediante le procedure di analisi spaziale disponibili all'interno dell'ambiente); inoltre, la pubblicazione su Web dei dati di un GIS permette di rendere disponibili, ad un pubblico vastissimo e globalmente diffuso, le informazioni storiche, e metriche, registrate sulle carte antiche, in una forma generalmente semplice ed intuitiva.

Certamente, avviare lo studio di una carta antica a partire dalla consultazione del preziosissimo documento in originale è sempre un momento auspicabile, nonché ricco di emozione ed intensità; si è voluto con questa ricerca illustrare le potenzialità delle moderne tecniche e tecnologie

CONCLUSIONI

digitali nell'ampliare le possibilità di indagine nel campo della cartografia storica, un ambito che è di grandissimo interesse non solo per l'informazione del passato che ci può tramandare ma per la natura multidisciplinare, assolutamente moderna, che questi studi possono assumere.

BIBLIOGRAFIA

- Adami A., Fregonese L., Guerra F., Livieratos E., Tsioukas V. (2007). Digital representations and analysis of deformations induced in map supporting materials. *XXI International CIPA Symposium*. Atene.
- Adcock E.P., Varlamoff M.T., Kremp V. (2004). *Principi dell'IFLA per la cura e il trattamento dei materiali di biblioteca*. Bari: IFLA.
- Anibaldi Ranco M., Borgogno Mondino E., Garnero G. (2007). Mosaicatura e georeferenziazione della carta degli Stati Sardi. *Atti 11a Conferenza Nazionale ASITA* (p. 1-6). Torino, ISBN 978-88-903132-0-2, 415-420.
- Antico Gallina M. (1994). *Dall'immagine cartografica alla ricostruzione storica*. Milano: Casa Editrice Ambrosiana.
- Arborio Mella F. (1976). *Sulla strada della fotografia*. Milano: Feltrinelli.
- Assunteria d'Ornato. (1711). *Ordini e decreti dei SS.ri Assunti dell'Ornato, 10 gennaio 1711*.
- Baiocchi V., Lelo K. (2005). Georeferencing the historical maps of Rome between the Seventeenth and Eighteenth centuries. *CIPA 2005 XX International Symposium*. Torino.
- Balk L. (2009). The National Archives of the Netherlands: Manuscript maps and digital access. *e-Perimetron, Vol. 4, n° 4, ISSN 1790-3769*, 203-211.
- Balletti C. (2006). Georeference in the analysis of the geometric content of early maps. *e-Perimetron, Vol.1, n° 1, ISSN 1790-3769*, 32-42.
- Bartoli C. (1564). *Del modo di misurare le distantie, Le superfici, i corpi, Le piante, Le province, Le prospettive, et tutte le altre cose terrene, che possono occorrere a gli huomini, secondo le vere regole d'Euclide, et de gl'altri più lodati scrittori*. Venezia: Franceschini.
- Benavides J., Koster E. (2006). Identifying surviving landmarks on historical maps. *1° International Workshop on Digital Approaches in Cartographic Heritage*. Salonico: ICA.
- Bitelli G., Cremonini S., Gatta G. (2009). Ancient maps comparison and georeferencing techniques: a case study. *4° international workshop on Digital Approaches in Cartographic Heritage*. Venezia.

- Bitelli G., Cremonini S., Gatta G. (2009). Ancient maps comparisons and georeferencing techniques: a case study from the Po river delta (Italy). *e-Perimetron*, vol. 4, n° 4, ISSN 1790-3769, 221-233.
- Bitelli G., Cremonini S., Gatta G. (2010). Late Renaissance survey techniques revealed by three maps of the old Po river delta. *5° international workshop on Digital Approaches in Cartographic Heritage* (p. 49-52). Vienna: Livieratos E., Gartner G.
- Bitelli G., Gatta G. (2008). Cartografia storica: valorizzazione e fruizione in ambiente digitale. *Geomedia*, anno 12, 4-08, 42-44.
- Bitelli G., Gatta G. (2007). Esperienze di georeferenziazione ed elaborazione digitale di una carta di Bologna del '700. *Atti 11a Conferenza Nazionale ASITA*. Torino, ISBN 978-88-903132-0-2, 415-420.
- Bitelli G., Gatta G. (2008). Experiences on georeferencing and digital processing of an 18th century map of Bologna. *3° International Workshop Digital Approaches in Cartographic Heritage*. Barcellona: ICA.
- Bocchi F., De Angelis C., Dondarini R., Greco G., Morigi Govi C., Ortalli J., Preti A., Passatelli G., Tarozzi F. (1998). *Atlante storico delle città italiane, Emilia-Romagna, Bologna*. Bologna: Grafis.
- Boemi M.F. (1999). *Introduzione all'uso delle fotografie aeree*. Roma: ICCD (Istituto Centrale per il Catalogo e la Documentazione).
- Bondesan A., Meneghel M. (2004). *Geomorfologia della provincia di Venezia*. Padova: Esedra editrice.
- Borchini E., Macii R. (s.d.). Un gabinetto di topografia tra ottocento e novecento. Pesaro: ITG G GENGA (Istituto Tecnico per Geometri "Girolamo Genga").
- Borri R. (1999). *L'Italia nell'antica cartografia, 1477-1799*. Scarmagno (TO): Priuli & Verlucca editori.
- Boutoura C., Livieratos E. (2006). Some fundamentals for the study of the geometry of early maps by comparative methods. *e-Perimetron*, Vol.1, n° 1, ISSN 1790-3769, 60-70.
- Bramoullé P. (2008). *Reproduction d'originaux de grand format*. Bibliothèque nationale de France, Département de la reproduction.
- Brusa M., Solmi M., Vianello G., Vittori Antisari L. (2010). GIS-based Paleo-hydrographical study for territorial development planning of the Reno basin using XVIII century Andrea Chiesa historical maps (Bologna, Italy). *5° International Workshop on Digital Approaches in Cartographic Heritage* (p. 104-115). Vienna: Livieratos E., Gartner G.
- Buonora P. (2004). *Digitalizzazione e accesso online per la cartografia storica*.

- Buonora P. (2009). Digitization, online utilization and preservation of cadastral very large format cartography. *e-Perimtron*, Vol. 4, n° 3, ISSN 1790-3769, 192-198.
- Buonora P. (2006). La digitalizzazione negli archivi - Lo stato dell'arte. *Biblioteche digitali in Italia - Scenari, Utenti, Staff e Sistemi Informativi*.
- Buonora P., Anderson H., Withington K. (2004). Les tendances en matiere d'imagerie numerique. *15° International Congress on Archives*, (p. 1-8). Vienna.
- Buonora P., Liberati F. (2008). A format for Digital Preservation of Images - A study on JPEG2000 file robustness. *D-Lib Magazine*, vol. 14, n° 7/8, ISSN 1082-9873.
- Cantile A. (2003). Il tempo nelle carte, il tempo delle carte. *7a Conferenza Nazionale ASITA*. Verona.
- Cantile A. (2007). *La cartografia in Italia: nuovi metodi e nuovi strumenti dal Settecento ad oggi*. Firenze: Istituto Geografico Militare.
- Capoferro Cencetti A.M. (1981). Le mappe catastali di Bologna come strumento ausiliario per lo studio della città antica. In Gambi L., Carozzi C., *Città e proprietà immobiliare in Italia negli ultimi due secoli* (p. 328-344). Milano: Franco Angeli.
- Carrion D., Cenarle F., Somaini F., Sona G. (2008). Un approccio alla georeferenziazione di una carta antica. *12a Conferenza Nazionale ASITA* (p. 655-660). L'Aquila.
- Casamorata C. (1947). Quattro mappe di Bologna del XVII e XVIII secolo esistenti nella cartoteca dell'Istituto Geografico Militare. *L'universo*, 203-211.
- Ceci P. (2007). Tesi di laurea in Fotogrammetria e Cartografia, corso di Laurea in Ingegneria Edile. *Sperimentazione di tecniche per la georeferenziazione di elaborati cartografici storici*. Bologna: DISTART, Università di Bologna.
- Center for Democracy & Tecnology. (2008). *Privacy Principles for Digital Watermarking - v. 1.0*. Washington: Center for Democracy & Tecnology.
- Comelli G.B. (1914). *Piante e vedute della città di Bologna*. Bologna: Berti.
- Comitato MAG. (2006). *Metadati Amministrativi e Gestionali versione 2.0.1 - Manuale Utente*. ICCU (Istituto Centrale per il Catalogo Unico delle biblioteche italiane e per le informazioni bibliografiche), a cura di Pierazzo E.

- Comitato MAG. (2009). *Reference Schema MAG 2.0.1*. ICCU (Istituto Centrale per il Catalogo Unico delle biblioteche italiane e per le informazioni bibliografiche), a cura di Feliciati P.
- Contò F., Fanello G., Pillon M. (2009). An information system for historical Cadastre of Venice. *e-Perimetron, Vol. 4, n° 4, ISSN 1790-3769*, 235-241.
- Corsmeier T. (1998). The microreproduction and digitization of maps: a comparative analysis. *WAML Information Bulletin, Vol. 30, n° 1*, 10-34.
- Costa A. (1983). *Il catasto italiano. Procedure di accatastamento, aggiornamento, conservazione*. Roma: NIS.
- Cremonini S. (2007). Questioni di geomorfologia costiera del delta del Po anteriormente al 1604. Evidenze dalla cartografia storica. *Annali di Ricerche e Studi di Geografia*, 63, 3/4, 53-67.
- Cremonini S., Samonati E. (2009). Value of ancient cartography for geoenvironmental purposes. A case study from the Po river delta coast (Italy). *Geografia, Fisica e dinamica del Quaternario, n° 32, IT ISSN 0391-9838*, 135-144.
- Dall'Aglio P.L., Di Cocco I., Marchetti G. (2002). La cartografia storica per la ricostruzione del paesaggio antico: alcuni casi dell'Italia Padana. *6a Conferenza Nazionale ASITA* (p. 55-60). Varese.
- Daniil M. (2006). Comparing by digital transparency the differences between two almost identical 17th century maps of North Aegean Sea. *e-Perimetron, Vol. 1, n° 3, ISSN 1790-3769*, 194-208.
- Daniil M., Tsioukas V., Papadopoulos K., Livieratos E. (2003). Scanning options and choices in digitizing historic maps. *New perspectives to save cultural heritage, CIPA, WG 4 Digital image processing, XIX International Symposium*. Antalya.
- de Boer A. (2010). Processing old maps and drawings to create virtual historic landscapes. *5° International Workshop on Digital Approaches in Cartographic Heritage* (p. 66-74). Vienna: Livieratos E., Gartner G.
- Docci M., Maestri D. (1993). *Storia del rilevamento architettonico e urbano*. Roma: Laterza.
- ERDAS. (2008). *ERDAS Field Guide*. Norcross, USA.
- Fabri O. (1673). *L'uso della squadra mobile. Con la quale per teoria et per pratica si misura geometricamente ogni distanza, altezza, e profondità. S'impara à perticare, liuellare, et pigliare in disegno Le Città, Paesi, et Provincie. [...]*. Padova: Gattella.
- Fanello G.L. (2001). Tesi di laurea, corso di laurea in Architettura. *La geometria pratica: strumenti e metodi di rilievo nel Rinascimento*. Venezia: IUAV.

- Federzoni L. (2008). The digital restoration of ancient maps in Italy. Experiences and reflections. *e-Perimetron*, Vol. 3, n° 1, ISSN 1790-3769, 1-9.
- Federzoni L. (2000). Viabilità medioevale e fonti cartografiche. In G. R., *Un'area di strada: L'Emilia occidentale nel Medioevo. Ricerche storiche e riflessioni metodologiche* (p. 19-47). Bologna.
- Folloni G. (1978). *Principi di Topografia*. Bologna: Pàtron.
- Furlanetto P. (2004). Un'applicazione della cartografia storica alla geomorfologia: il progetto IMAGO. In Meneghel M., Bondesan A., *Geomorfologia della provincia di Venezia* (p. 73-76). Padova: Esedra editrice.
- Furlanetto P., Bondesan A., Levorato C., Rosselli R., Bertani B. (2009). Il progetto Imago: la ricostruzione della laguna e dell'entroterra veneziano attraverso l'impiego della cartografia storica. *13a Conferenza Nazionale ASITA* (p. 1083-1088). Bari.
- Galetto R. (2004). Camere digitali per riprese aeree e terrestri. In *Bollettino SIFET*, n° 4 (p. 45-84). Pavia: Dipartimento di Ingegneria edile e del territorio, Università di Pavia.
- Gaspar J.A. (2009). Dead reckoning and magnetic declination: unveiling the mystery of portolan charts. *4° International Workshop Digital Approaches in Cartographic Heritage*. Venezia: ICA.
- Gillman D.W. (1985). Triangulations for rubber-sheeting. *Autocarto 7* (p. 191-199).
- Gonzàles García P. (1999). Long term projects and changing methods: the case of the Archivo General de Indias. Da: <http://www.cs.uu.nl/events/dech1999/gonzalez/gonzalez-full.htm>.
- Guarducci A., Rombai L., Piccardi M. (2010). Mare Oraque Tusciae. *5° International Workshop on Digital Approaches in Cartographic Heritage* (p. 214-219). Vienna: Livieratos E., Gartner G.
- Guerra F. (2000). 2W: new technologies for the georeferenced visualization of historic cartography. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. XXXIII, Part B5, Amsterdam*.
- Guerra F. (2000). Tesi di Dottorato in Scienze Geodetiche e Topografiche, XII ciclo. *Trasformazioni geometriche Locali: trasformazione versus corrispondenza*. Politecnico di Milano.
- Guerra F., Miniutti D., Monti C. (2001). Bi-visual image coupling of cartographic and photographic images. *Mapping the 21st Century, 20° International Cartographic Conference*. Beijing.
- Hyperborea. (2009). Historical cartography in archival contexts: new technological perspectives. *4° International Workshop on Digital Approaches in Cartographic Heritage*. Venezia: ICA.

- Hyperborea. (s.d.). *MagMaker 1.1 - Manuale utente*. Hyperborea, <http://www.hyperborea.com>.
- Institut Cartogràfic de Catalunya, Departament de Geografia de la Universitat Autònoma de Barcelona. (1992). *La cartografia italiana*. Barcellona: Institut Cartogràfic de Catalunya.
- Jenny B. (2006). MapAnalyst - A digital tool for the analysis of the planimetric accuracy of historical maps. *e-Perimetron, Vol. 1, n° 3, ISSN 1790-3769*, 239-245.
- Jenny B. (2010). New features in MapAnalyst. *5° International Workshop on Digital Approaches in Cartographic Heritage, 22-24 February 2010* (p. 240-245). Vienna: Livieratos E., Gartner G.
- Jenny B., Weber A., Hurni L. (2007). Visualizing the Planimetric Accuracy of Historical Maps with MapAnalyst. *Cartographica, Vol. 42, n° 1*.
- Kraus K. (1997). *Photogrammetry. Advanced Methods and Applications, Vol. 2*. Bonn, Germany: Dümmler Verlag.
- Lelo K., Tavaglioni C.M. (2005). The GIS-based historical Atlas of Rome. *CIPA, XX International Symposium*. Torino.
- Livieratos E. (2006). On the Study of the Geometric Properties of Historical Cartographic Representations. *Cartographica, Vol. 41, issue 2, ISSN 0317-7173 (print), 1911-9925 (online)*, 165-175.
- Livieratos E. (2006). The use of animation in visualizing deformations of a portolan-type map. *e-Perimetron, Vol. 1, n° 1, ISSN 1790-3769*, 71-76.
- McGrath P., Firth S. (2006). *Heritage map digitisation: an adventure in applying aspects of Digital Preservation Policy*.
- Mihai B., I. Savulescu I, Demeter T. (2010). Historical Maps (starting since the 18th century) integration in digital environment for land cover change analysis. A case study for Campulung Depression (Northern Wallachia, Romania). *5° International Workshop on Digital Approaches in Cartographic Heritage* (p. 375-391). Vienna: Livieratos E., Gartner G.
- Moscicka A., Marzec M. (2010). Old maps as a part of movable heritage accessible from the online map. *5° International Workshop on Digital Approaches in Cartographic Heritage* (p. 402-413). Vienna: Livieratos E., Gartner G.
- Northeast Document Conservation Center. (2000). *Handbook for digital projects: a management tool for preservation and access*. Andover, Massachusetts: Maxine K. Sitts.
- Nuikka M., Díaz-Kommonen L., Haggrén H. (2004). Photogrammetric reproduction of the map of Mexico 1550. *International Archives of*

Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information, Vol. 35 part 5, 419-423.

- Orciani M., Frazzica V., Colosi L., Galletti F. (2006). Gregoriano Cadastre: transformation of old maps into Geographical Information System and their contribution in terms of acquisition, processing and communication of historical data. *1° International workshop on Digital Approaches in Cartographic Heritage*. Salonicco: ICA.
- Oreni D., Brumana R., Scaioni M., Prandi F. (2010). Navigating on the past, as a bird flight, at the territorial scale of historical topographic maps. WMS on the "Corografie delle Province del Regno Lombardo-Veneto", for accessing cadastral map catalogue. *5° International Workshop on Digital Approaches in Cartographic Heritage* (p. 426-441). Vienna: Livieratos E., Gartner G.
- Osaci-Costache G. (2008). La storia del territorio sulla base delle carte storiche. Studio caso: i Subcarpazi ubicati tra i fiumi Arges e Valsan (Romania). *12a Conferenza Nazionale ASITA* (p. 1549-1554). L'Aquila.
- Pascale D. (2006). RGB coordinates of the Macbeth ColorChecker.
- Paselli E. (2009). Tesi di Dottorato in Storia e Informatica (ING-INF/05), ciclo XXI. *La città di Bologna e La sua storia: diffusione e condivisione delle conoscenze attraverso WebGIS Open Source e Web Mapping*. Bologna.
- Pridal P. (2010). OldMapsOnline.org: IPIImage, JPEG2000 and Georeferencer.org. *5° International Workshop on Digital Approaches in Cartographic Heritage* (p. 480-482). Vienna: Livieratos E., Gartner G.
- Proto M. (2008). Il paesaggio dei tecnici. Attualità della cartografia storica per il governo delle acque. Bologna-Cremona, 3-4 aprile 2008. *Storia e Futuro. Rivista di storia e storiografia. n° 17, 1-4.*
- Raisz E. (1937). Time charts of historical cartography. *Imago Mundi Vol. 2, ISBN 90 6072 5190, 9-16.*
- Ricci G. (1985). *Le città nella storia d'Italia*. Bari: Laterza.
- Roset R., Ramos N. (2008). Present and future of the Map Library of Catalonia. *3° International workshop on Digital Approaches in Cartographic Heritage*. Barcellona: ICA.
- Russ J.C. (2007). *The image processing handbook. Fifth edition*. USA: CRC press, Taylor & Francis group.
- Salvadori S., Poggetti C. (2009). Historical cartography in archival contexts: new technological perspectives. *e-Perimtron, Vol. 4, n° 4, ISSN 1790-3769, 262-266.*
- Samtani R. (2009). Ongoing Innovation in Digital Watermarking. *Web Technologies - IEEE Computer Society, 111-113.*

- Sestini A. (1981). *Cartografia generale*. Bologna: Pàtron.
- Sgambati G., Benassati G., Biancini L., Buonora P., Sinisi D., Cantile A., Delfino L., Di Angelo Antonio M., Falchetta P., Mancinelli M.L., Sanguineti M.T., Serratrice G., Truci I., Valerio V. (2006). *Linee guida per la digitalizzazione del materiale cartografico*. ICCU (Istituto centrale per il Catalogo Unico delle biblioteche italiane e per le informazioni bibliografiche).
- Sgrenzaroli M., Vassena G.P.M. (2007). *Tecniche di rilevamento tridimensionale, Vol. 1*. Brescia: Starrylink Editrice.
- Shimizu E., Fuse T. (2003). Rubber-sheeting of historical maps in GIS and its application to landscape visualization of old-time cities: focusing on Tokio of the past. *8° International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management, 11A-3, CD-ROM*.
- Solmi M., Brusa M., Gherardi M., Vianello G. (2010). Cabrei historical maps and remote sensing technologies to understand landscape evolution and preserve rural invariants and typicalities (Bologna province, Italy). *5° International Workshop on Digital Approaches in Cartographic Heritage* (p. 541-548). Vienna: Livieratos E., Gartner G.
- Surano N., Raimondo F.M., Mazzola P. (2008). Cartografia storica per l'analisi dei percorsi evolutivi di contesti urbani: il caso dell'intorno dell'orto botanico di Palermo. *12a Conferenza Nazionale ASITA*, (p. 1851-1856). L'Aquila.
- Tchaprassian M. (2004). Il taglio di Porto Viro: i personaggi, biografie e ruoli. In *Il taglio di Porto Viro 1604-2004. La storia, La cartografia*. Padova: Bottega delle Arti.
- Tobler W.R. (1994). Bidimensional Regression. *Geographical Analysis, Vol. 26, n° 3 - Ohio State University Press*.
- Tsioukas V. (2009). Web Georeference of Historical Maps. *4° International Workshop Digital Approaches in Cartographic Heritage*. Venezia: ICA.
- Tsioukas V., Daniil M. (2009). 3D digitization of Historical Maps. *e-Perimetron, Vol. 4, n° 1, ISSN 1790-3769, 45-52*.
- Tsioukas V., Daniil M., Livieratos E. (2006). Possibilities and problems in close range non-contact 1:1 digitization. *e-Perimetron, Vol. 1, n° 3, ISSN 1790-3769, 230-238*.
- Vagnetti L. (1970). *Quaderni dell'Istituto di Elementi di Architettura e Rilievo dei Monumenti di Genova, Vol.4*.
- Wendler R. (1999). LDI Update: Metadata in the Library. *Library Notes, n° 1286, 4-5*.

BIBLIOGRAFIA

- Woodward D. (2007). *The history of cartography - Cartography in the European Reinassance, Vol. 3.1*. Chicago: The University of Chicago press.
- Zentai L. (2006). Preservation of modern cartographic products. *e-Perimetron, Vol. 1, n° 4, ISSN 1790-3769, 308-313*.

BIBLIOGRAFIA

SITOGRAFIA

- Archivio di Stato di Bologna. (2007). *Archivio di Stato di Bologna*. Tratto il giorno 9/1/2009 da <http://www.archiviodistatobologna.it/>
- Archivio di Stato di Cagliari. (2008). *Imago II*. Tratto il giorno 1/3/2010 da Archivio di Stato di Cagliari: <http://www.archivioistatocagliari.it/imago2/>
- Archivio di Stato di Firenze. (2000). *Archivi digitalizzati*. Tratto il giorno 1/3/2010 da Archivio di Stato di Firenze: <http://www.archiviodistato.firenze.it/nuovosito/>
- Archivio di Stato di Genova. (2008). *Adotta un documento*. Tratto il giorno 1/3/2010 da Archivio di Stato di Genova: <http://www.archivi.beniculturali.it/ASGE/adotta.htm>
- Archivio di Stato di Milano. (2002). *Risorse digitalizzate*. Tratto il giorno 1/3/2010 da Archivio di Stato di Milano: <http://archiviodistatomilano.it/patrimonio/risorse-digitalizzate/>
- Archivio di Stato di Roma. (2002). *Progetto Imago II*. Tratto il giorno 1/6/2009 da Archivio di Stato di Roma: <http://archiviodistatodiroma.beniculturali.it/>
- Archivio di Stato di Venezia. (2008). *Progetto Divenire*. Tratto il giorno 29/12/2009 da Archivio di Stato di Venezia: <http://www.archiviodistatovenezia.it/divenire/home.htm>
- CIRCE IUAV. (1999). *WPP e WPF, Guerra F*. Tratto il giorno 10/2/2009 da CIRCE IUAV: <http://circe.iuav.it/>
- Confortini L. (s.d.). *Loreno Confortini Disegni*. Tratto il giorno 25/2/2010 da Loreno Confortini: <http://www.lorenoconfortini.it/>
- deAgostini. (s.d.). *Enciclopedia sapere.it*. Tratto il giorno 23/8/2009 da tuttoscienza: <http://www.sapere.it/tca/minisite/scienza/tuttoscienza/id786.html>
- Digimarc. (1995). *About digital watermarking*. Tratto il giorno 1/12/2009 da Digimarc: <https://www.digimarc.com/>
- e-gallery. (2009). *e-gallery*. Tratto il giorno 4/3/2010 da <http://www.e-gallery.it/>
- Emilia Romagna / Veneto. (s.d.). *IL Delta fra memoria e futuro*. Tratto il giorno 25/12/2009 da I Parchi del Delta del Po: <http://www.parchideltapo.it/taglio.del.po>
- Hyperborea. (2009). Tratto il giorno 2/3/2010 da Hyperborea: <http://www.hyperborea.com/2009/>

- IBC. (2000). *Progetto Imago*. Tratto il giorno 1/3/2010 da IBC, Regione Emilia-Romagna: <http://www.ibc.regione.emilia-romagna.it/wcm/ibc/menu/dx/04bd/db/imago.htm>
- Istituto e Museo di Storia della Scienza. (1994). *Museo*. Tratto il giorno 23/8/2009 da Istituto e Museo di Storia della Scienza - Firenze: <http://www.imss.fi.it/museo/indice.html>
- LabSU. (2007). *LabSU WebGIS*. Tratto il giorno 7/12/2009 da Laboratorio di Studi Urbani, Università di Roma Tre: <http://www.dipsuwebgis.uniroma3.it/gregoriano/>
- libero.it. (s.d.). *Cartografia*. Tratto il giorno 20/8/2009 da diogenes99: <http://digilander.libero.it/diogenes99/Cartografia/>
- M.I.D.A. (s.d.). *M.I.D.A. informatica, Bergamo*. Tratto il giorno 1/12/2009 da <http://www.midainformatica.it/>
- MapAnalyst. (2005). *MapAnalyst - What's New*. Tratto il giorno 6/11/2009 da MapAnalyst: <http://mapanalyst.cartography.ch/whatsnew/>
- METIS group. (s.d.). Tratto il giorno 1/6/2009 da METIS Group: <http://www.metis-group.com/>
- Moravian Library. (2008). *Open source & online tools for old maps*. Tratto il giorno 22/2/2010 da OldMapsOnline.org: <http://help.oldmapsonline.org/>
- MSN. (s.d.). *Enciclopedia Encarta*. Tratto il giorno 20/8/2009 da Cartografia: http://it.encarta.msn.com/encyclopedia_761563924/Cartografia.html
- Nu.M.E. (2000). *Nu.M.E., Università di Bologna*. Tratto il giorno 9/3/2010 da [storiaeinformatica.it](http://www.storiaeinformatica.it): <http://www.storiaeinformatica.it/nume/italiano/nicon1.html>
- Tosta N. (s.d.). *Computer World news*.
- Wikipedia. (s.d.). *Wikimedia*. Tratto il giorno 6/11/2009 da Wikipedia: <http://commons.wikimedia.org/>

RINGRAZIAMENTI

*Bastava un niente, un campo verde,
una corsa e poi, a pescar sul fiume.
Bastava un niente per sorridere,
una bugia per esser grande.*

Crescerai (Nomadi, 1974)

Nessun traguardo si raggiunge da soli.
E' dunque un piacere, ancor prima che un dovere,
ringraziare chi mi ha accompagnato nel cammino,
insegnandomi la strada per arrivare fin qua.

In primis, grazie al prof. **Gabriele Bitelli**, senza il quale niente di tutto ciò sarebbe stato possibile, e senza la cui immane disponibilità il percorso non sarebbe stato altrettanto bello.

Un grazie va all'**Archivio di Stato di Bologna**, in particolare alla dott.ssa **Elisabetta Ariotti** e alla dott.ssa **Diana Tura**, con le quali ho piacevolmente collaborato. Grazie anche all'**Archivio di Stato di Venezia**, per l'emozionante consultazione di una preziosa carta storica (O. Fabri, 1592), e in particolare alla signora **Maria Luisa Gallina**, per la grande disponibilità. Un cordiale grazie alla **biblioteca Dore** di Ingegneria, per avermi dato la possibilità di sfogliare un raro manuale antico (O. Fabri, *L'uso della squadra mobile*, 1673). Grazie alla **biblioteca dell'Archiginnasio** di Bologna, in particolare allo staff del **Gabinetto Disegni e Stampe**, per la disponibilità in fase di consultazione di una bellissima mappa antica (F. de' Gnudi, *Ichnoscenografia*, 1702), per il cui accuratissimo rifacimento ringrazio **Loreno Confortini**. Ringrazio il **Comune di Bologna** per la concessione all'utilizzo della cartografia numerica comunale (secondo l'Accordo Quadro con l'Università di Bologna).

Ebbene, è un piacere porgere un caloroso grazie alla grande famiglia di Topografia, perché mi ha accompagnato in questo mio lavoro... e difficilmente facendomelo considerare tale...

...Grazie a “quelli del piano terra”, in ordine di semplice vicinanza: **Vale** (la prima, e non solo per vicinanza), **Pino** (per i tanti indispensabili lavoretti), **Chiara** (per essere immancabile riferimento del laboratorio), **Fabrizio** (per tutto quello che potrà fare ora che è tornato...), **Maria Alessandra** (per apprezzare le mie - seppur laboriose! - pesche dolci). Grazie a **Maretta**, per tutte le volte che mi ha pensato... ed una bustina mi ha portato. Grazie a “**quelli del terzo piano**”, quelli passati, quelli presenti e forse i futuri: nessun elenco, perché non avrei un ordine se non un mero alfabetico. Mi si conceda un grazie a **Zano**, per la simpatia, immancabile anche nell'appiopparmi qualcosa da fare.

Grazie ai tanti **laureandi**, quelli che son rimasti, quelli che sono andati, e quelli che son tornati. In particolare ringrazio **Giovanni Mazza**, per il modellino di una Bologna settecentesca, il mio *là* allo studio della cartografia storica, e **Belinda Roffarè**, per le chiacchiere che ricordo con piacere. Grazie anche ad **Elisa Paselli**, per tutti i momenti di incontro.

Un grazie speciale a **Stefano Cremonini**, per avermi fatto scoprire un modo bello di lavorare insieme ...oltre che per il suo contagiosissimo entusiasmo, costante sprono a guardare le cose da insoliti punti di vista.

Grazie a **mamma** e **babbo**, inutile dire per cosa se non... per TUTTO. Grazie a **Marco**, per i sempre buoni consigli (neanche sarei qua, altrimenti...), e a **Patrizia**, per la fatica di aver fatto Luca. E grazie a **Luca**, che saprà insegnarmi ad essere zia.

Grazie ai **nonni**, che mi han voluto bene. Grazie ad **Alan** ...per tutte le rime che dal suo cellulare, ancora mi vorrà inviare.

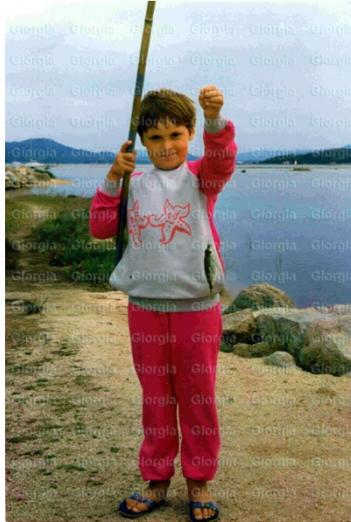
Grazie agli amici, per le pause di relax: **Leo**, **Annalisa**, **Sara**, **Chiara**, **Tommy**, **Ele**, **Jacopo**, **Laura**, **Daniele**, **Alessandro**. E grazie agli amici d'infanzia, per gli indimenticabili giochi: **Giorgia**, **Mirko**, **Daniela**, **Silvia**, **Ivan**, **Stefania**.

Un grazie **grande grande grande** va all'uomo della mia vita, perché ora non saprei più immaginarla senza... senza chi, dopo ogni giorno che passa, trova la forza di sopportarmi anche il successivo.

Infine grazie alla mia **miciotta**, per essere sempre stata qui con me, regalandomi un'amicizia che non necessita di parole... e per esserci ancora, nel cuore.

Dovendo necessariamente crescere,
ringrazio tutti voi per avermelo fatto fare nel più piacevole dei modi...

...ma permettetemi di restare, almeno un po', ancora bambina...



La lepre e la tartaruga

C'era una volta una lepre
che, vantandosi di correre più veloce di chiunque altro,
prendeva continuamente in giro una tartaruga per la sua lentezza,
finché questa esasperata propose una gara di corsa.

La lepre si mise a ridere:

«Non c'è nessuno che possa battermi, tanto sono veloce: accetto la sfida!»

Al via partirono insieme, ma vista la lentezza dell'avversario

la lepre si fermò a schiacciare un pisolino:

«Vai pure avanti tranquilla, in pochi salti ti raggiungerò!»

La tartaruga non perse tempo e corse senza mai fermarsi.

Così facendo sorpassò la lepre che dormiva,
e tagliò il traguardo prima che quella si svegliasse:

«Chi va piano va sano e va lontano!»
disse sorridendo alla lepre sconfitta.

Favole, Esopo (ca. 620 a.C. - ca. 560 a.C.)