

Mosaicatura e georeferenziazione della carta degli Stati Sardi

Marco ANIBALDI RANCO (*), Enrico BORGOGNO MONDINO (*), Gabriele GARNERO (*)

(*) Università di Torino – Facoltà di Agraria – DEIAFA, Via L. Da Vinci, 44 – 10095 GRUGLIASCO (TO)
(marco.anibaldi, enrico.borgogno, gabriele.garnero) @unito.it

Riassunto

La cartografia è lo strumento deputato alla descrizione del territorio che riferisce di una situazione relativa allo specifico periodo nel quale viene prodotta: carte realizzate in periodi diversi, se omogenee dal punto di vista del sistema di riferimento, possono essere fatte interagire, allo scopo di dare una descrizione multitemporale del territorio, alla ricerca di dinamiche evolutive, con riferimento all'ambito della espansione urbanistica, delle caratterizzazioni idrauliche/idrologiche e delle tematiche inerenti l'evoluzione del paesaggio.

L'omogeneizzazione dei sistemi di riferimento nei quali sono inquadrati le cartografie, che preclude ad una rigorosa coregistrazione di supporti cartografici di periodi e fonti diverse, è operazione fondamentale nel processo di analisi multitemporale. In questo lavoro viene presentata un'esperienza indirizzata alla realizzazione di una cartografia *raster* storica unitaria degli Stati Sardi di Terraferma alla scala 1:50.000 a partire dalle scansioni digitali dei singoli fogli fornite dall'Istituto Geografico Militare.

Abstract

Maps refer about the state of the territory in a certain moment: maps produced in different periods can be used to carry on a multitemporal analysis of the represented area, looking for evolutionary dynamics of the urban, hydrological/hydraulic and landscape contexts. For a successful approach it must be carefully considered the problem of the co-registration of all of the interacting maps and the homogenisation of their reference systems. In this work a research experience is presented dealing with the production of a unique raster map of the historical cartography of the *Stati Sardi* (scale 1:50000). The material supplied by the Italian Military Geographical Institute (IGM) is represented by 112 digital acquisitions corresponding to the original hardcopies.

Premesse e Obiettivi

La "Carta topografica degli Stati di Terra-ferma di S.S.R.M. Carlo Alberto Re di Sardegna fatta dal Corpo dello Stato Maggiore Generale alla scala di 1/50.000" è stata prodotta nel periodo 1816-1830 e si riferisce al territorio degli Stati Sardi di terra (isole escluse) prima della cessione alla Francia di Nizza e della Savoia. Le principali caratteristiche tecniche, reperite da fonti bibliografiche, sono le seguenti:

- rete geodetica generale del Piemonte: punto di emanazione Osservatorio Reale di Torino, ellissoide con schiacciamento 1/308.64;
- centro di sviluppo e origine delle coordinate cartesiane: Osservatorio Reale di Torino;
- rappresentazione di Sanson-Flamsteed modificata (112 fogli, formato 0.42 x 0.60 m circa);
- Planimetria: riduzione da mappe preesistenti e parziali rilievi ex-novo;
- Altimetria: "ad occhio esercitato", con tratteggio a luce obliqua a 45°;
- Alta montagna: rappresentata in modo più sommario delle zone di pianura;
- disegno litografico con colori acquerellati;

- scala graduata, riportata su ciascun foglio, espressa nelle unità di misura lineari dell'epoca (trabucchi e miglia di Piemonte).

L'obiettivo è quello di produrre, a partire da scansioni digitali dei supporti cartacei originali, una cartografia *raster* unitaria georeferita in un sistema di riferimento moderno, nello specifico il sistema UTM/WGS84 utilizzato dalla cartografia tecnica della Regione Piemonte.

Le premesse a tale operazione sono le seguenti:

- a) l'inaffidabilità dal punto di vista metrico modernamente inteso in merito al sistema di riferimento adottato in fase di produzione della carta e l'assenza di informazioni circa la geometria del taglio dei fogli;
- b) la necessità di recuperare la continuità geometrica tra i fogli;
- c) la necessità di operare interpretazioni in fase di lettura di fogli adiacenti prodotti in periodi diversi, sui quali talvolta contenuti e simbologie risultano discordanti.

Dati a disposizione

Sono stati forniti dall'Istituto Geografico Militare le 112 scansioni digitali dei corrispondenti fogli cartacei conservati presso l'archivio dell'Ente: la cartografia a cui i fogli si riferiscono risulta prodotta in un periodo piuttosto lungo (1816-1830) e, da un'attenta analisi, dimostra di non possedere rigorosa unitarietà di simbologia e talvolta anche di contenuti.

A corredo di ciascun foglio è riportata come parametratura una scala graduata espressa in unità lineari dell'epoca: il trabucco piemontese misura 3.0864 m ed il miglio di Piemonte corrisponde a 800 trabucchi, dunque a 2469 m. In realtà, proprio nel periodo di redazione della carta, il trabucco ha subito un aggiornamento, passando dal valore di 3.0825 m prima del 1818 a quello di 3.0864; tale incertezza nelle conversioni non è stata risolta nel corso della ricerca.

A corredo dei fogli è stata fornita la scansione di un quadro d'unione (Figura 1a) privo di qualunque informazione metrica utile alla ricostruzione rigorosa dello stesso. L'identificazione dei fogli avviene secondo una classica codifica a scacchiera così come osservabile da Figura 1b: tale codifica alfanumerica mista (lettere + numeri), nel corso delle elaborazioni è stata sostituita da una codifica numerica pura (colonne, righe), più idonea ad essere trattata all'interno delle procedure software sviluppate.

Le scansioni sono state realizzate con una risoluzione di 300 *dpi*, tale da ottenere una dimensione fisica del pixel pari a 84.6 micron; tale valore, riportato alla scala nominale della carta (1:50.000), definisce una dimensione a terra del pixel pari a 4.23 m.

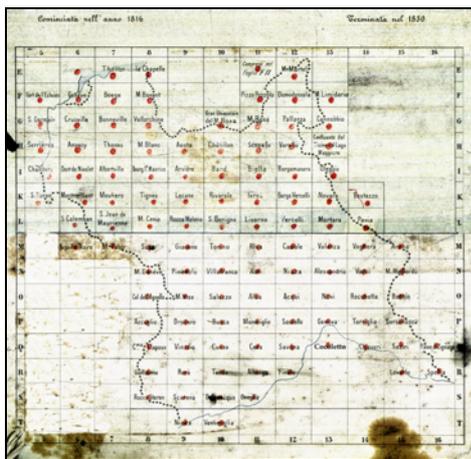
Tale dimensione risulta certamente idonea per la produzione di un dato cartografico *raster* alla scala nominale 1:50.000, poiché risulta sensibilmente inferiore alla precisione attendibile (10 m).

Metodologia operativa

La produzione di una cartografia *raster* a partire da scansioni di singoli fogli cartacei di cui non è affidabile né il sistema di riferimento né la tipologia di taglio, necessita di alcune ipotesi di lavoro da dedurre sulla base di alcune valutazioni preliminari.

Gli effetti di tali valutazioni hanno portato a considerare come prioritari:

- il recupero della continuità spaziale dei fogli con la realizzazione di un mosaico intrinsecamente congruente;
- il contenimento delle deformazioni geometriche che necessariamente verranno introdotte nel tentativo di mosaicatura: esse saranno tanto maggiori quanto più distante risulta l'ipotesi di taglio dei fogli dalla realtà.



(a)

	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
0													E
1													F
2													G
3													H
4													I
5													K
6													M
7													N
8													O
9													P
10													Q
11													R
12													S
13													T
14													
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	

(b)



(c)

Figura 1 – (a) Quadro d'unione dei fogli; (b) codifica adottata per le elaborazioni (grigio) e codifica originale dei fogli; (c) Foglio della cartografia recante alcune informazioni relative alla cartografia degli Stati Sardi di Terraferma. Da notare il periodo di produzione e la scala graduata (così come riportata su ogni foglio) espressa in unità di misura lineare dell'epoca (trabucchi e miglia di Piemonte).

Le operazioni che hanno condotto al risultato finale sono le seguenti:

- (A) analisi dimensionale dei fogli, intesa a recuperare le informazioni in merito alle possibili dimensioni del grigliato di taglio adottato;
- (B) definizione e realizzazione del grigliato ritenuto idoneo a contenere i singoli fogli limitandone le deformazioni;
- (C) aggancio dei fogli alle celle del grigliato mediante un'operazione di georeferenziazione basata su un modello omografico di trasformazione;
- (D) verifica della continuità spaziale tra fogli adiacenti ed eventuali ipotesi di soluzione in caso di

risponso negativo;

- (E) recupero della continuità spaziale mediante approccio di mosaicatura “a scacchiera”;
- (F) georeferenziazione del mosaico rispetto al sistema UTM/WGS84 attraverso trasformazioni *piecewise* in grado di operare localmente tra i punti di appoggio collimati e recuperare le deformazioni differenziate presenti sul mosaico finale.

(A) Analisi dimensionale

In questa fase alcune procedure software sono state realizzate in linguaggio IDL (*Interactive Data Language*) per facilitare l'operatore nella collimazione dei seguenti elementi:

- a) vertici della cornice di ogni singolo foglio, necessari all'indagine dimensionale;
- b) vertici della scala graduata, necessari all'analisi di scala ed alla conversione delle dimensioni immagine in dimensioni carta.

In Figura 2 sono evidenziati i vertici collimati per ognuno dei 112 fogli: le coordinate immagine dei 4 vertici della cornice sono stati poi utilizzati per eseguire le successive omografie.

L'analisi dimensionale è stata condotta investigando le dimensioni orizzontali e verticali dei fogli: i risultati ottenuti sono riportati nelle Figure 3, 4 e 5: esse evidenziano una contenuta disomogeneità dimensionale soprattutto per quanto riguarda la dimensione orizzontale dei fogli. Non è evidente alcun sistematismo da cui si possa evincere un taglio di tipo geografico per i singoli fogli, anche se la sola colonna 5 (codifica originaria) evidenzia un andamento con rastremazione dimensionale verso l'alto presente tra i fogli e all'interno del singolo foglio che ricorda il taglio geografico adottato per la cartografia moderna (Figure 4 e 5).



Figura 2 – Foglio campione (K.6) sul quale sono evidenziati i 6 punti collimati per le valutazioni dimensionali e la denominazione adottata per la misura dei lati.

Esistono poi alcune anomalie dimensionali soprattutto legate a fogli di bordo, in cui la porzione di territorio rappresentata è minima. Benché si consideri un risultato positivo l'aver messo in luce tali dinamiche dimensionali ai fini della successiva mosaicatura, si è proposto per la realizzazione di un grigliato di taglio di tipo rettangolare espresso in trabucchi, con maglie di dimensioni orizzontali e verticali pari alle medie (9739 x 6827) delle misurazioni effettuate, ripulite dagli outliers.

Le statistiche di riferimento sono riportate in Figura 6: tale strategia semplificata ha comportato, in fase di correzione geometrica dei fogli mediante omografia, per quei fogli con dimensioni

maggiormente diverse rispetto al valor medio adottato, delle contrazioni o espansioni (variazioni di scala) non trascurabili, come risulta da Figura 5 (destra).

Il fattore di contrazione F considerato per ciascun foglio è quello che risulta dividendo la dimensione scelta per la singola maglia del grigliato (verticale, $DV_{\text{grigliato}}$ o orizzontale, $DH_{\text{grigliato}}$) per la dimensione del lato del foglio per la quale risulta massima la differenza in valore assoluto ($DH/V_{\text{grigliato}} - D_{[\text{sup/inf}]/[\text{sx/dx}]}$): $F = \frac{D_{\text{grigliato}}}{D_{\text{foglio}}}$. Tali variazioni di scala indotte su alcuni dei fogli sono

state poi parzialmente recuperate con l'approccio *piecewise* di georeferenziazione del mosaico.

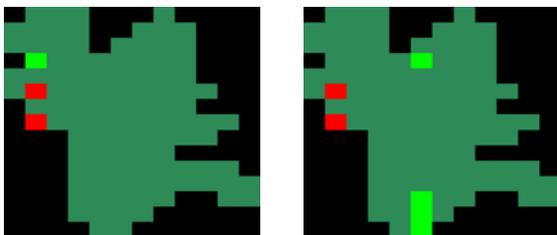


Figura 3 – Rappresentazione simbolica che mostra quali fogli risultano particolarmente anomali dal punto di vista dimensionale.

Sx: anomalie dimensionali verticali

Dx: anomalie dimensionali orizzontali.

■ = valori interni all'intervallo $H/V_{\text{medio}} \pm 1\sigma$

■ = valori interni all'intervallo $H/V_{\text{medio}} \pm 2\sigma$

■ = valori esterni all'intervallo $H/V_{\text{medio}} \pm 2\sigma$

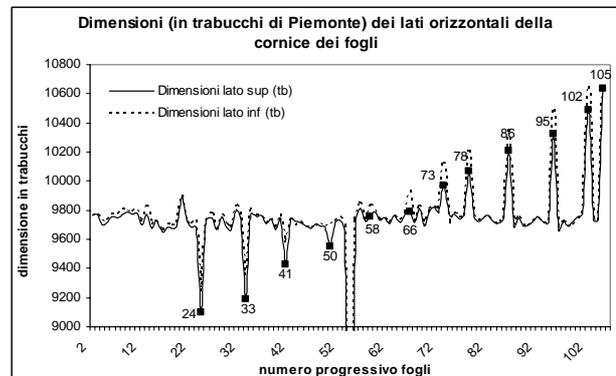
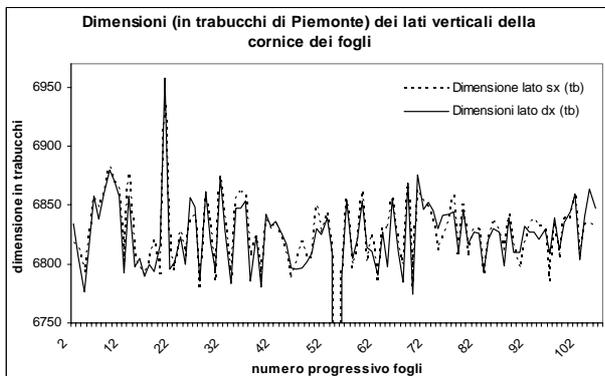


Figura 4 – Grafici relativi alle dimensioni orizzontali e verticali misurate sui singoli fogli (espresse in trabucchi di Piemonte). In ascisse un identificativo progressivo necessario al rintracciamento del foglio. I valori riportati a grafico sono gli identificativi della colonna 5 secondo la codifica originaria.

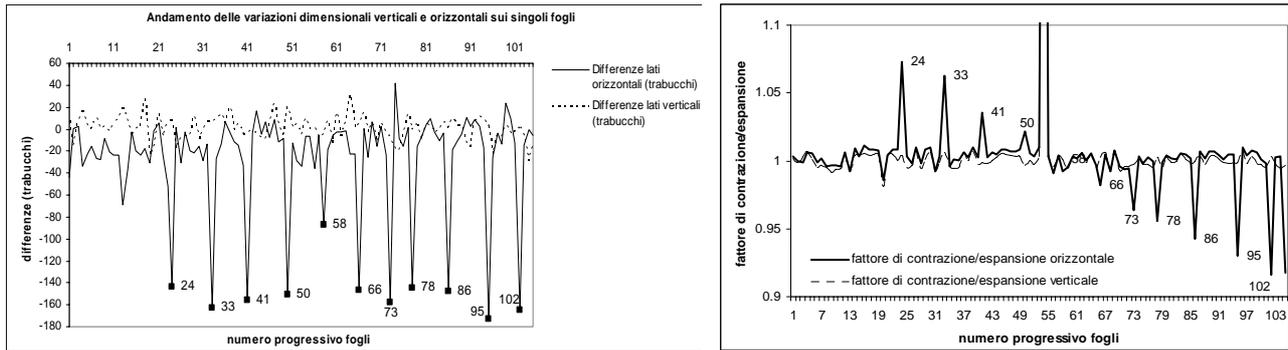


Figura 5 – (sinistra) Variazioni dimensionali verticali e orizzontali all'interno dei singoli fogli. Da notare anche in questo caso l'evidente anomalia rappresentata dalla colonna 5 del quadro d'unione. (destra) Fattore di contrazione/espansione (nella situazione più sfavorevole verificata su ciascun foglio) in fase di aggancio delle scansioni ad un grigliato regolare di dimensioni di 9739 per 6827 trabucchi.

		H_{sup}	H_{inf}	V_{sx}	V_{dx}	H_{medio}	V_{medio}
Medie	Trabucchi	9733.18	9744.74	6827.58	6826.72	9738.96	6827.15
	Metri	30040.49	30076.18	21072.64	21069.99	30058.33	21071.31
Dev. Std.	Trabucchi	41.98	44.29	28.17	29.28	42.37	28.18
	Metri	129.57	136.71	86.94	90.36	130.77	86.98

Figura 6 – Medie e deviazioni standard delle dimensioni verticali e orizzontali misurate sulle scansioni

(B,C) Realizzazione del grigliato di riferimento e trasformazione omografica dei fogli

Sulla base delle indicazioni provenienti dalla fase precedente è stato deciso di agganciare mediante omografia tutti i fogli al grigliato regolare definito: l'operazione di trasformazione omografica è stata condotta utilizzando una procedura software sviluppata in linguaggio IDL.

L'origine del sistema è stata fissata in modo da garantire positività a tutte le coordinate dei fogli: le coordinate dell'angolo superiore sinistro del grigliato sono state fissate a ($E=0$, $N=500.000$) e le operazioni sono state condotte utilizzando le unità di misura proprie della carta (trabucchi); le omografie sono state prodotte con risoluzione geometrica corrispondente a 5 m sul terreno.

L'esistenza del grigliato assicura continuità e coincidenza ai vertici delle cornici dei fogli adiacenti, nella speranza, poi disattesa, che tutti i particolari dei lati a contatto vadano a coincidenza.

(D,E) Recupero della continuità spaziale tra le omografie prodotte

Dopo aver eseguito le 112 omografie utilizzando come vertici per la determinazione degli otto parametri della funzione le coordinate immagine e grigliato dei 4 vertici della cornice di ciascun foglio, è stato possibile produrre un primo mosaico sul quale verificare l'effettiva continuità spaziale tra i fogli adiacenti, attraverso un'ispezione visiva dei particolari cartografati presenti nelle zone di contatto (strade, agglomerati urbani, corsi d'acqua): tale ispezione, pur confermando una sostanziale continuità tra i fogli, ha tuttavia evidenziato che gli scostamenti presenti tra gli stessi particolari disegnati su due scansioni adiacenti spesso superavano ampiamente la tolleranza ammessa per una cartografia alla scala nominale 1:50.000.

Questa indicazione ha suggerito di procedere al recupero di una più accurata continuità spaziale attraverso la predisposizione di una seconda fase di georeferenziazione: utilizzando le omografie prodotte, è stato generato un mosaico "a scacchiera" al quale partecipano le omografie relative a fogli alterni, lasciando libero lo spazio intermedio.

Le omografie relative agli spazi rimasti vuoti (che, dunque, non partecipano al mosaico), sono state poi agganciate alla “scacchiera” attraverso una trasformazione geometrica *TPS (Thin Plate Spline)* basata su punti di appoggio costituiti da tutti i particolari cartografati riconoscibili su ciascuna scansione da agganciare (denominata **A** in Figura 7) e le scansioni già mosaicate che la circondano (denominate **B**); si ricorda che tale funzione ha la caratteristica di passare esattamente per i punti che servono a calibrarla.

In questa fase, utilizzando l'apposita procedura disponibile all'interno del *software* commerciale *PCI Orthoengine 9.1*, sono stati collimati complessivamente 8122 punti: l'abbondanza di punti di appoggio distribuiti lungo i lati di ciascuna scansione da agganciare ha garantito una sufficiente rigidità della funzione *TPS*, contenendo le eventuali distorsioni locali anomale.

Una volta eseguite tutte le trasformazioni *TPS* delle omografie relative ai fogli non mosaicati ed avendo verificato un effettivo recupero di continuità spaziale senza l'introduzione di evidenti distorsioni geometriche, si è proceduto alla mosaicatura finale che ha dato luogo ad un mosaico completo della cartografia non georiferito rispetto ad alcun sistema moderno.

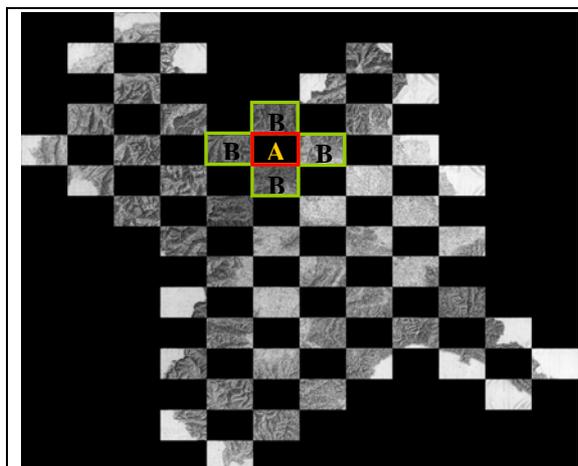


Figura 7 – Mosaicatura a scacchiera delle omografie prodotte, utilizzata come grigliato di appoggio per il recupero della continuità spaziale dei fogli. **A** = foglio da agganciare, **B** = porzioni di mosaico utilizzate per l'aggancio.

(F) Georeferenziazione del mosaico

Al duplice scopo di consegnare un prodotto cartografico in grado di interagire con le cartografie odierne, permettendo analisi multitemporali del territorio e di recuperare almeno parzialmente le distorsioni introdotte per i fogli dimensionalmente più anomali rispetto alle dimensioni scelte per le maglie del grigliato di appoggio, si è proceduto alla georeferenziazione del mosaico (sistema UTM/WGS84).

Le basi cartografiche di appoggio utilizzate per il reperimento dei punti di appoggio necessari a calibrare una trasformazione geometrica ad azione locale (*Triangolazione di Delaunay, TDL*) sono state selezionate secondo criteri di scala (scale sempre superiori a 1:50.000) e disponibilità:

- per il territorio piemontese è stata utilizzata una cartografia raster alla scala 1:25000;
- per i territori valdostano, ligure e francese sono state per ora utilizzate le ortofoto disponibili su *Google Earth*, avendo cura di validarne preventivamente la precisione, che si è rivelata essere comunque compatibile con quella attesa per una cartografia 1:50000 (10 m).

Sono stati individuati complessivamente circa 500 punti di cui la maggior parte su territorio piemontese.

L'utilizzo della TDL esclude la possibilità di misurare in corso di collimazione le prestazioni della trasformazione stessa; tuttavia l'adozione di un semplice modello polinomiale del primo o secondo ordine consente di intuire l'esistenza di forti distorsioni differenziate sul dato di partenza che variano tra i pochi metri e il chilometro, evidenziando quindi ulteriori criticità sulla complessiva trasposizione cartografica, senza soluzioni di continuità, della carta storica sulle carte tecniche.

Allo stato attuale sono in corso operazioni di verifica a posteriori sul prodotto finale generato adottando la TDL, i cui risultati verranno presentati in future comunicazioni.

Bibliografia

Isabella MASSABÒ RICCI, Guido GENTILE, Blythe ALICE RAVIOLA (a cura di): *“Il Teatro delle terre: cartografia sabauda tra Alpi e Pianura”*, L'Artistica, Savigliano, 2006.