Riferimenti geotopografici per la verifica dell'accuratezza posizionale e correzione geometrica delle immagini raster

Virgilio Cima[1], Alessandra Amoroso[2], Laura Magnabosco[2], Carlo Masetto[2], Daniele Savio[2], Umberto Trivelloni[2]

[1] Libero professionista, virgiliocima@gmail.com
[2] Regione del Veneto, Direzione Pianificazione Territoriale, alessandra.amoroso@regione.veneto.it, laura.magnabosco@regione.veneto.it, carlo.masetto@regione.veneto.it, daniele.savio@regione.veneto.it, umberto.trivelloni@regione.veneto.it

Abstract. Nel presente lavoro viene identificata una metodologia per la costituzione di una banca dati di punti di controllo geotopografici adeguatamente distribuiti sull'intero territorio del Veneto, con densità e caratteristiche tali da consentirne l'utilizzo per la verifica metrica di dati geotopocartografici in formato raster. Tali punti possono essere utilizzati anche come elementi di vincolo per operazioni di raddrizzamento geometrico delle immagini.

Parole chiave: Ortofoto, Immagini satellitari, Verifiche di conformità, Georiferimento.

1 Introduzione

Fra le molte funzioni della Regione del Veneto c'è anche il compito di elaborare una rappresentazione geocartografica del territorio strutturata in conformità agli standard nazionali ed europei, fondamento per le attività di programmazione, pianificazione e monitoraggio del territorio che trovano costante supporto nell'ecosistema dell'Infrastruttura Dati Territoriali della Regione del Veneto (IDT-RV) [1][2][3].
Tra i livelli informativi principali del database geotopografico (DBGT) figurano i dataset dei punti di riferimento altimetrico e planimetrico; si tratta in sostanza di reti che, assieme a quelle per il posizionamento satellitare, consentono di applicare correttamente il georiferimento a qualsiasi dato geografico e a qualsiasi tematismo presente nell'IDT-RV.
Tali riferimenti fisici sono fondamentali anche per l'esecuzione di operazioni di verifica di conformità dei servizi di produzione di dati geotopocartografici; si registra tuttavia una crescente disponibilità delle possibili fonti informative geografiche che comprendono, in modo ormai ampiamente consolidato, anche droni e satelliti assieme a quelle metodologie basate sull'Intelligenza Artificiale (A.I.) per l'estrazione automatica di oggetti dalle immagini. La necessità di inserire tutti i nuovi dataset nel più vasto quadro dell'IDT-RV comporta quindi l'obbligo di individuare metodologie

speditive, ma affidabili, per la validazione dei dati sotto il profilo della correttezza geometrica [4].
La soluzione adottata consiste nella realizzazione di un dataset geografico di riferimento che consenta di effettuare rapidi confronti metrici tra punti di coordinate note e dati di nuova produzione.

2 Individuazione, strutturazione e monografie dei punti di verifica

2.1 Criteri per l'individuazione degli elementi di riferimento

I punti utili alla verifica di conformità di un dato geografico devono corrispondere a particolari ben riconoscibili nel prodotto da esaminare, sia esso vettoriale, un'ortofoto o un'immagine satellitare. Le loro coordinate devono essere espresse in un sistema di riferimento condiviso e avere un'incertezza nota, sufficientemente contenuta rispetto ai requisiti di accuratezza del prodotto sottoposto a verifica. Essi devono inoltre essere distribuiti su tutto il territorio potenzialmente soggetto a future verifiche; è quindi opportuno cercare di coprire la maggior parte possibile dell'intero territorio regionale.
Nell'ambito del progetto qui descritto sono state analizzate le fonti disponibili e sono state individuate due categorie di informazioni georiferite particolarmente adatte allo scopo: da un lato i punti relativi alle misure topografiche eseguite via via sul territorio in occasione delle verifiche di conformità dei vari lotti di cartografia (DBGT), ortofoto e LiDAR, e dall'altro le immagini ortorettificate dell'intero territorio relative alla copertura "ortofoto AGEA 2024".
I primi hanno la sola informazione delle coordinate misurate, ma derivano da acquisizioni topografiche satellitari di elevata accuratezza (tipicamente misure GNSS in modalità NRTK, che garantiscono un'accuratezza posizionale con incertezza inferiore ai 10 centimetri) che li rendono particolarmente adatti a verifiche puntuali di dati con elevata qualità metrica [5].
Le ortofoto consentono invece di acquisire "stralci" di immagini che, oltre a costituire un riferimento posizionale per un'eventuale verifica interattiva da parte di un operatore su dati per i quali l'accuratezza dei riferimenti (qualche decimetro) risulti sufficiente, possono costituire un valido ausilio per la verifica, o addirittura la calibrazione automatica, di immagini satellitari, per le quali l'accuratezza delle ortofoto da cui sono estratti gli stralci è senz'altro - ad oggi - più che sufficiente.

2.2 Punti relativi alle misure topografiche

Per prima cosa si è provveduto a fare un censimento delle misure disponibili, che sono risultate consistere in un totale di oltre 11000 punti distribuiti nell'intero Veneto.
I vari set di misure, eseguite da soggetti e in periodi temporali diversi, risultavano disomogenei in termini di sistema di coordinate e tipo di quota (ellissoidica o già convertita in ortometrica). Si è quindi provveduto ad una loro omogeneizzazione, trasformando le coordinate originali di ciascun set verso i sistemi di riferimento che si

è ritenuto opportuno mantenere nel costruendo database: coordinate geografiche ETRF2000 (EPSG 6706), altezza ellissoidica ETRF2000, quota ortometrica, coordinate piane TM-ETRF2000 nel fuso "12" (EPSG 7795), coordinate piane TM-ETRF2000 nel fuso 32 (EPSG 7791).
Data la natura dei punti e considerati gli scopi di utilizzo della banca dati, non si è ritenuto necessario (né opportuno) esprimere le coordinate in altri sistemi di riferimento, come ad esempio il Gauss-Boaga, che non appartengano alla famiglia dei sistemi "satellitari", ovvero alle varie realizzazioni del sistema geodetico ETRS89.
I dati così uniformati sono stati quindi organizzati in forma di database, all'interno di un ambiente DBMS. Per questa operazione si è scelto l'ambiente SpatiaLite, e cioè il diffusissimo DBMS SQlite integrato con il modulo spaziale per la gestione della componente geometrica, i cui contenuti possono essere utilizzati direttamente mediante le apposite interfacce CLI (Command Line Interface) o GUI (Graphical User Interface) oppure possono essere facilmente trasferiti in altri ambienti DBMS, come ad esempio PostGIS o Oracle (Spatial).
I punti delle misure topografiche sono stati organizzati in una specifica tabella, denominata “misure_topogr”, con la seguente struttura:

nome attributo	tipo di dato	contenuto
obj_id	integer	identificativo univoco
codice	testo	codifica (univoca) del punto
tipo	testo	tipo di punto (es. GNSS NRTK)
anno_misur	testo	anno della misura
istat_prov	testo	provincia
istat_com	testo	comune
data_coord	testo	data del sistema di coordinate (allo stato attuale 2008.0)
lat_d_6706	double	latitudine ETRF2000 in gradi sessadecimali
lon_d_6706	double	longitudine ETRF2000 in gradi sessadecimali
altez_ell	double	altezza ellissoidica ETRF2000
quota_orto	double	quota ortometrica (rif. Genova 1942)
mod_geoide	testo	modello di geoide usato per la conversione altimetrica (Italgeo_2005)
e_7795	double	coordinata E nel sistema TM-ETRF2000 fuso "12"
n_7795	double	coordinata N nel sistema TM-ETRF2000 fuso "12"
e_7791	double	coordinata E nel sistema TM-ETRF2000 fuso 32
n_7791	double	coordinata N nel sistema TM-ETRF2000 fuso 32
note	testo	eventuali annotazioni

Per garantire l'univocità della codifica dei punti, utile per la gestione in un database, è stato aggiunto al valore codice di ogni record un prefisso in forma di sigla sintetica a riferimento del lotto di provenienza, che è diventato parte integrante del codice stesso.

2.3 Riferimenti geografici in forma di immagine (stralci di ortofoto)

I punti raccolti nella banca dati appena descritta sono idonei ad un utilizzo interattivo per le verifiche di accuratezza posizionale di dati vettoriali, ortofoto e prodotti LiDAR, ma non sono ottimali per la verifica dell'accuratezza posizionale né per la calibrazione automatica di immagini georiferite, quali ad esempio le scene satellitari, la cui dimensione del pixel potrebbe non essere congrua con la natura dei particolari misurati.

Per quest'ultimo scopo occorrono riferimenti costituiti da oggetti ben riconoscibili sulle immagini, che siano facilmente individuabili non solo da un operatore umano ma anche da una procedura di correlazione automatica. Trattandosi di punti di verifica - oppure di correlazione - fra immagini già ortorettificate, è sufficiente che la loro geometria sia bidimensionale.
Si è quindi ritenuto confacente allo scopo utilizzare stralci di immagini, ben georiferiti, estratti da ortofoto che abbiano una risoluzione geometrica e un'accuratezza posizionale sufficienti a costituire un valido campione di riferimento. La fonte più adatta da cui prelevare l'informazione è al momento l'ortofoto 2024, che copre in modo omogeneo l'intero territorio regionale con una risoluzione geometrica di 0.20 m.
Tale copertura geografica è disponibile in forma di "mosaico" di immagini RGB in formato GeoTIFF, suddivisa per unità di consegna ("tile") che corrispondono agli elementi 1:5000 della CTR, per complessivi 2243 file.
La numerosità di file suggerisce, come soluzione per determinare una buona quantità di punti di riferimento, l'estrazione di uno stralcio per ogni elemento di ortofoto disponibile. Possono però verificarsi casi eccezionali, specialmente in alta montagna, in cui in un intero elemento non è presente alcun particolare antropico con caratteristiche idonee di definizione geometrica e riconoscibilità.
Si è provveduto quindi ad esplorare l'intero territorio regionale, cercando di individuare una posizione di riferimento in ciascuna area corrispondente ad un elemento di ortofoto 2024. Escludendo alcune aree montane prive di particolari adeguatamente riconoscibili, sono state individuate complessivamente oltre 2100 posizioni idonee alla formazione degli stralci.
In corrispondenza di ciascun punto sono stati estratti due stralci di ortofoto, entrambi centrati sulle coordinate del punto, a due diversi livelli di zoom, per fornire sia il dettaglio del particolare sia il contesto appena più generale in cui esso è inserito.



Fig. 1. Esempio di stralcio di ortofoto ai due diversi livelli di dettaglio

Per ciascun punto di riferimento è stata prodotta anche una seconda copia dell'immagine di dettaglio, all'interno della quale è stato inserito un "marker" a forma di croce che identifica il particolare scelto, per facilitare la consultazione da parte di un operatore umano. Le immagini così modificate sono state usate per comporre il catalogo delle schede monografiche, in formato HTML, di tutto il complesso dei punti di riferimento.

A corredo di ogni coppia di immagini (dettaglio e contesto), le schede monografiche contenute nel catalogo riportano il codice identificativo del punto di riferimento, che per questo set di punti di impianto coincide col numero di elemento della CTR all'interno del quale il punto ricade seguito dal suffisso "_2025", e le coordinate del punto stesso nel sistema TM-ETRF2000 fuso "12".



Fig. 2. Esempio di parte del "catalogo" HTML delle monografie

L'elenco dei riferimenti è disponibile anche in forma di shapefile puntuale, anch'esso in coordinate TM-ETRF2000 fuso "12", nonché in forma di tabella all'interno del DBMS dei punti geodetici in ambiente SpatiaLite già contenente i punti delle misure topografiche.
I punti sono stati organizzati in una specifica tabella, denominata “riferim_immagini”, con la seguente struttura:

nome attributo	tipo di dato	contenuto
obj_id	integer	identificativo univoco
codice	testo	codifica (univoca) del punto
tipo	testo	tipo di punto (es. stralcio_ortofoto)
fonte	testo	fonte di provenienza (es. ortofoto_2024)
anno_def	testo	anno di definizione del punto
anno_verif	testo	anno di ultima conferma di validità dell'immagine rispetto al territorio
istat_prov	testo	provincia
istat_com	testo	comune
elem_ctr	testo	numero dell'elemento di CTR 1:5000
tavol_25k	testo	codifica della tavoletta 1:25000
foglio_50k	testo	numero del foglio 1:50000
data_coord	testo	data del sistema di coordinate (allo stato attuale 2008.0)
lat_d_6706	double	latitudine ETRF2000 in gradi sessadecimali
lon_d_6706	double	longitudine ETRF2000 in gradi sessadecimali
e_7795	double	coordinata E nel sistema TM-ETRF2000 fuso "12"

n_7795	double	coordinata N nel sistema TM-ETRF2000 fuso "12"
e_7791	double	coordinata E nel sistema TM-ETRF2000 fuso 32
n_7791	double	coordinata N nel sistema TM-ETRF2000 fuso 32
valore_gsd	double	dimensione del pixel, in metri
accur_pos	double	stima dell'accuratezza posizionale, in metri
note	testo	eventuali annotazioni
tipo_img_1	testo	tipo immagine di maggior dettaglio (FK campo "tipo" tabella "percorsi")
nome_img_1	testo	nome del file con l'immagine di maggior dettaglio
tipo_img_2	testo	tipo immagine di contesto (FK campo "tipo" tabella "percorsi")
nome_img_2	testo	nome del file con l'immagine di contesto

L'insieme delle informazioni che concorrono a completare la descrizione dei punti comprende anche delle immagini, che sono salvate esternamente all'ambiente DBMS, in modalità file system. È però opportuno che all'interno della banca dati siano presenti i riferimenti a tali file. Per garantire, nei limiti del possibile, una certa flessibilità nella gestione della posizione dei file, i percorsi esterni sono memorizzati in un'apposita tabella denominata “percorsi”, con la seguente struttura:

nome attributo	tipo di dato	contenuto
obj_id	integer	identificativo univoco
tipo	testo	nome univoco per il tipo di immagine (es. "pt_rif_dettaglio")
percorso	testo	percorso della cartella destinata a quel tipo di immagine

La tabella dei punti di riferimento contiene, per ognuna delle immagini relative ad un punto, il nome del file senza percorso e il valore del campo tipo (chiave esterna) della tabella percorsi da cui prelevare il percorso del file. Nel caso in cui venga modificata la posizione dei file delle immagini, ovvero il nome delle cartelle in cui sono contenuti, è sufficiente aggiornare i soli contenuti della tabella percorsi.
Per evitare ridondanza nell'informazione lo shapefile dei punti riporta negli attributi solo il codice identificativo, che fa da chiave esterna verso il campo codice della tabella presente all'interno del database.

3 Considerazioni sull'utilizzo dei punti a scopo di verifica

Una volta garantita la disponibilità dei punti di controllo, è stata posta l'attenzione sulle metodologie e le procedure applicabili per l’utilizzo di tali punti nelle operazioni di verifica di conformità.
Nella sostanza, gli elementi di lavoro sono due: da una parte il dato da sottoporre a verifica (es. immagine satellitare georiferita, di cui si vuole valutare l'accuratezza posizionale) e dall'altra l'insieme dei punti di coordinate note, dei quali sono disponibili gli stralci di ortofoto. Si tratta quindi di selezionare i punti di riferimento che ricadono nell'area geografica interessata dal dato da controllare, e per ogni punto valutare la distanza che intercorre fra le coordinate di riferimento e quelle che il medesimo particolare assume all'interno del dato oggetto di verifica.
Operativamente si può procedere in vari modi, tutti riconducibili all'attività che risponde all'aspetto di sostanza, e cioè il riconoscimento dei punti di riferimento sul

dato da valutare. Ad esempio, tale riconoscimento può avvenire in modo interattivo, sotto la gestione diretta di un operatore, oppure può essere il prodotto di procedure di correlazione automatica delle immagini, con l'eventuale ausilio di tecniche di intelligenza artificiale [6][7].
Nel primo caso si tratta di visualizzare il dato in ambiente GIS, riconoscere i particolari corrispondenti ai punti noti, confrontare le coordinate con quelle di riferimento e valutare l'entità delle differenze rispetto ai requisiti della fornitura, applicando gli opportuni criteri statistici [8]; nel secondo caso i valori delle differenze sono forniti direttamente dalla procedura automatica.

4 Possibile utilizzo dei punti di riferimento a scopo di calibrazione

Le operazioni sopra descritte riguardo all'utilizzo dei punti per le verifiche di conformità producono valori di differenze di coordinate localizzate sui medesimi punti, che costituiscono nella sostanza una serie di vettori (bidimensionali) applicati sul piano delle immagini.
Oltre che per un'attestazione della qualità metrica del prodotto da verificare, tali vettori possono essere utilizzati anche come elementi di vincolo per sottoporre il prodotto ad una trasformazione geometrica di raddrizzamento.
Il modello matematico da utilizzare per la trasformazione deve essere scelto in base al contesto applicativo, a seconda del numero di gradi di libertà che si ritiene opportuno adottare [9]; l'obiettivo generale è però sempre lo stesso, e cioè la rimozione o mitigazione di eventuali deformazioni geometriche.
Nel caso di informazioni geografiche raster scaricate in modo periodico, come potrebbe essere l'esempio delle scene satellitari, ciò potrebbe costituire un processo di aggiustamento che agisce in modo automatico a valle di ogni download, con l'obiettivo di migliorare la qualità metrica del dato.

5 Conclusioni

L'attività descritta ha consentito di produrre una banca dati di elementi geotopografici di riferimento, comprendente sia i punti acquisiti con misure topografiche durante le verifiche di conformità dei vari lotti di cartografia (DBGT), ortofoto e LiDAR sia una serie di stralci di immagini ortorettificate distribuiti sull'intero territorio regionale.
I punti e gli stralci di immagini, archiviati conservando la georeferenziazione, costituiscono elementi di confronto che possono essere usati da un operatore per l'esecuzione delle verifiche di conformità metrica di altri set di dati, o anche da procedure automatiche che, riconoscendo per correlazione radiometrica lo stesso particolare (o l'intero stralcio) nell'immagine da verificare o calibrare e conoscendo le coordinate del particolare in quanto situato al centro esatto dello stralcio, possono procedere alla documentazione delle differenze di posizione oppure alle opportune operazioni di rettifica.

La disponibilità di questi riferimenti consente il raggiungimento dell'importante obiettivo di poter sottoporre dati geografici con tipologia geometrica raster nei quali siano riconoscibili elementi omologhi ad una verifica / calibrazione metrica (anche automatica) preventivamente al loro inserimento all'interno delle banche dati regionali.

Riferimenti bibliografici

1. Regione del Veneto, Capitolato Speciale d'Appalto per il Servizio per il rilievo aerofotogrammetrico con produzione di ortofoto e derivazione automatica di oggetti dell'intera provincia di Treviso e di parte delle province di Venezia, Verona e Vicenza, https://bandi.regione.veneto.it/Public/Download?idAllegato=33512, ultimo accesso 2026/10/12.
2. Ciarapica A., Trivelloni U., Cima V., Mazzi C., Milan P., Preparazione di modelli di capitolato per le varie tipologie di rilevamento. In: Atti XXII Conferenza ASITA, Bolzano (2018).
3. Cilloccu, F., et al., Ortoimmagini e modelli altimetrici: Specifiche tecniche per la produzione di ortofoto e modelli altimetrici alla scala 1:10.000, CISIS, Roma (2009).
4. Joint Research Centre (JRC), Guidelines for Best Practice and Quality Checking of Ortho Imagery (EUR 23638 EN), Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg (2008).
5. Crosilla, F., Mussio, L., Progettazione e ottimizzazione del rilievo topografico e fotogrammetrico di controllo, CISM, Udine, (2001).
6. Sutton, M. A., Wolters, W. J., Peters, W. H., Ranson, W. F., & McNeill, S. R., Determination of displacements in a 2D digital image correlation. In: Image and Vision Computing, 1(3), 133-139, (1983).
7. Kobayashi, T., Otsu, N., Image feature extraction using gradient local auto-correlations. In: European Conference on Computer Vision (pp. 340-351), Springer, Berlin, Heidelberg (2008).
8. ISO 19157-1:2023, Geographic information - Data quality, https://www.iso.org/standard/78900.html, ultimo accesso 2026/10/12.
9. Jensen, J. R., Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective, Pearson (2015).