

DSM multi-temporali per la documentazione 3D delle trasformazioni urbane recenti: il caso dell'area ex-Textid a Torino

Giulia Sammartano ^(a,b), Emilio Abbate ^(a,b), Nannina Spanò ^(a,b)

^(a) LabG4CH. Dipartimento di Architettura e Design (DAD) - Politecnico di Torino Viale Mattioli 39, 10125 Torino (Italy)

^(b) Polito FULL | the Future Urban Legacy Lab, Toolbox coworking. Via Agostino da Montefeltro 2, 10125 Torino (Italy)

emilio.abbate@polito.it; giulia.sammartano@polito.it; antonia.spanò@polito.it

Abstract

La ricerca vuole proporre un'indagine sul patrimonio urbano e sulle sue attuali trasformazioni attraverso il beneficio dell'uso di dati geospaziali. Questo è particolarmente interessante quando gli studi riguardanti la morfologia, la pianificazione e la progettazione alla scala urbana sono calate sulle città storiche e stratificate e possono contribuire, all'identificazione, alla localizzazione e alla misura, rapida e accurata, delle trasformazioni (volumi demolizioni e nuove costruzioni, ecc ...). In questo ambito, il confronto e l'analisi di informazioni multi-temporali, multi-sorgente e multi-scala derivanti dalle infrastrutture di dati (Spatial Data Infrastructures, SDI) gestite dall'Amministrazione Comunale e Regionale (ortofotografie e DSM) sono un supporto cruciale per l'analisi diacronica: in questo modo è possibile confrontare nuovi scenari urbani (DSM attuali) con situazioni urbane passate (DSM storici). Questi ultimi possono essere generati a partire dalla digitalizzazione di grandi dataset di fotogrammi aerei storici e dal loro processing per *image-matching*. L'obiettivo è quello di valutare e valorizzare questa disponibilità d'archivio, per testarla a fianco a strumenti innovativi attualmente in uso dai servizi cartografici. La ricerca è stata condotta nell'ambito del laboratorio di ricerca FULL@Polito, che indaga le *legacies* urbane, la loro rigenerazione e il loro rapporto con la città contemporanea. Il focus è l'area del Parco Dora a Torino Nord, un tempo occupata dalle industrie siderurgiche che erano ivi attive fino al 1992 e oggetto di riqualificazione e riconversione post-industriale negli ultimi decenni.

Key words

change-detection, DSM, multi-scala, multi-temporale, fotogrammetria storica, SDI, LiDAR, ortofoto

Introduzione

Negli ultimi decenni, l'adozione di sistemi di dati geografici tramite l'approccio delle scienze geospaziali e dei GIS (Geospatial Information Science), non si rivolge esclusivamente all'aggiornamento della cartografia numerica contenuta nelle banche dati delle amministrazioni, con l'obiettivo di creare o aggiornare la modellazione degli oggetti urbani con sistemi sempre più accurati (Rottensteiner,

2014), ma supporta anche gli studi urbani per localizzare, quantificare e mettere in relazione la complessità dei fenomeni, e non solo la loro più tradizionale lettura e rappresentazione. Considerando il rapido modificarsi del costruito, le ricerche nei campi progettuali e pianificatori si orientano sempre di più verso lo studio morfologico con l'adozione di dati geo-spaziali, per spazializzare le trasformazioni legate alla società antropizzata e per monitorarne fenomeni e trasformazioni come: l'accessibilità, i trasporti, gli spazi verdi urbani, l'energia e le risorse, la morfologia del tessuto urbano, ecc... Gli approcci innovativi orientati alla simulazione urbana digitale rappresentano un valido supporto ai processi decisionali e trovano efficacia soprattutto nel fornire modelli 3D urbani accurati e aggiornati dal punto di vista geometrico e semantico, i cosiddetti 3D GIS, che integrano una modellazione basata su dati geo-spaziali 3D, come ad esempio i Modelli Digitale di Superficie (DSM) e i poligoni dell'edificato derivati dalla cartografia numerica. Un obiettivo ambizioso è quello di indagare sia la flessibilità dei prodotti cartografici tradizionali e digitali esistenti, ortofoto e DSM, e i database cartografici di enti pubblici e privati, così come di implementarli con dati geo-spaziali mediante un aggiornamento ad hoc con metodi innovativi della Geomatica. Infatti, grazie alle tecniche di rilevamento è possibile ragionare a scala più ampia sulla città e offrire strategie efficaci per il monitoraggio urbano. In questo quadro, la ricerca presentata è stata calata nell'area del Parco Dora di Torino, che è stato coinvolto negli ultimi decenni nella grande trasformazione di Spina 3, secondo il P.R.G. del 1993, e che per questo rappresenta un caso di studio ideale per la presente ricerca. L'area di circa 360.000 mq si è evoluta, dagli anni Novanta ad oggi, in un nuovo assetto residenziale/terziario. La ricerca vuole riflettere su una proposta di raccolta e analisi di dati urbani multi-scala e multi-temporali per la localizzazione delle micro- e macro-trasformazioni e per l'aggiornamento cartografico attraverso la documentazione su larga scala e multi-temporale tramite operazioni di change-detection (di seguito, CD).

Torino e le infrastrutture di dati disponibili

Le esigenze e le finalità alla base del monitoraggio della morfologia urbana che sono state qui affrontate riguardano Torino, città industriale del secolo scorso, che è stata caratterizzata dagli ultimi decenni da importanti trasformazioni derivanti dall'eredità industriale che la ha profondamente caratterizzata, impattando nella sua immagine di città tecnologica del futuro e attenta alla sua eredità culturale. Nell'area del Parco della Dora, l'ampio giardino attraversato da una passerella in acciaio è oggi un'area destinata a spazio pubblico polifunzionale adatto ad ospitare eventi e attività sportive: questa area deriva da un processo di trasformazione della città, iniziato nella prima metà dell'Ottocento ed ancora oggi in vigore, ed è l'eredità del recente passato insieme ai resti delle strutture industriali e i grandi pilastri preesistenti.

Negli anni 2000, da quando l'adozione delle infrastrutture di dati territoriali si è affermata a livello internazionale, e la Regione Piemonte e il Comune di Torino possono contare su un'infrastruttura di dati e servizi ricca, completa e avanzata dal punto di vista dell'armonizzazione dei sistemi di riferimento e della strutturazione dei modelli di dati secondo standard condivisi. Tra i principali sviluppi avvenuti: (1) l'adozione del modello di dati coerente con il modello Intesa GIS conforme alla norma ISO-TC 211 e successiva parziale strutturazione

secondo la norma INSPIRE per la cartografia numerica regionale; (2) l'avvio dagli anni 2000 di un ampio progetto di armonizzazione geometrica e sistemi di riferimento tra database cartografia catastale e carta tecnica comunale; (3) il volo aereo fotogrammetrico (2009-2011 con fotocamera Leica ASL) ed elaborazione di un'ortofoto regionale e DTM che ha poi permesso lo sviluppo di ricerche correlate quali il consumo del suolo e i rischi ambientali; (4) il rilascio dei geo-servizi dell'OGC, Web Map Service (WMS), che consente la visualizzazione simultanea con protocollo http dei geo-dati allocati in diversi server e distribuiti gratuitamente dal [geoportale](#).

L'indagine relativa al lotto ex-Teksid è iniziata quindi con un'ampia esplorazione preliminare per chiarire le potenzialità dei dati disponibili 2D e 2.5D, utili per la realizzazione di un'applicazione che permettesse di monitorare nel tempo i cambiamenti fisici dei luoghi a partire da ortofoto, DTM, frame storici e cartografie di diversa datazione, basate su DB geo-spaziali. Per questo sono stati presi in attenta considerazione le scale, le risoluzioni, le coperture, la datazione, i sistemi di riferimento e la disponibilità dei dati sull'area: le carte IGM storiche (1880-1882 la prima in Italia) con i dati geo-spaziali del BDT sovrapposti. Le immagini nella Figura 1 rappresentano tre diverse ortofoto d'epoca (1979, 1990, 2018) che forniscono la possibilità di confronto visivo in quadri temporali distinti.

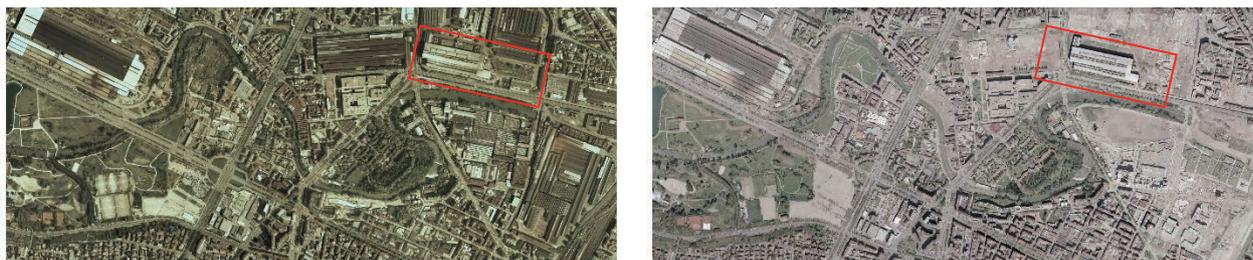


Figura 1 – Dati spaziali dal Geoportale di Torino: ortofoto del 1979 e ortofoto del 2004

Dati geo-spaziali a supporto del monitoraggio di trasformazioni urbane: approcci di Change Detection (CD) per le analisi multi-temporali

Le questioni aperte derivanti dall'analisi multi-scala e multi-temporale del contesto urbano sono in primo luogo la risoluzione spaziale e la copertura dei dati disponibili, ovvero, quale risoluzione adottare al fine di rilevare e monitorare, anche nel caso di frame multi-temporali, i fenomeni di trasformazione urbana. Convenzionalmente, gli approcci più recenti del telerilevamento si basano essenzialmente su acquisizioni di dati *image-* e *range-based*: l'elaborazione dei dati viene condotta basandosi sull'analisi del contenuto radiometrico dei dati 2D/3D derivanti da immagini satellitari e dati aerei (LiDAR o fotogrammetrici) al fine di analizzare, segmentare e classificare immagini o DSM/DEM, ed estrarre gli oggetti urbani tramite processi automatizzati: principalmente edifici, vegetazione, terreno, ecc. Il tipo di dato da utilizzare è in gran parte dipendente dalla scala ricercata, dalle dimensioni spaziali/temporali e dalla disponibilità dei dati stessi. Se da un lato è ben noto che negli ultimi decenni, la tecnica di acquisizione più diffusa per la modellazione 3D a scala urbana risulta essere quella del LiDAR aereo (innumerevoli casi in letteratura hanno anche mostrato approcci sperimentali ad hoc, che richiedono algoritmi di filtraggio e ottimizzazione di DSM e classificazione delle nuvole di punti e dei derivanti oggetti antropici per particolari condizioni (Vosselman&Maas, 2010). Recentemente, anche il contributo dei Mobile Mapping

Systems (MMS) in ambito urbano montati su veicoli o dispositivi portatili, ha dimostrato che l'integrazione di tecniche di acquisizione più rapide con metodi *close-range* è utile all'aggiornamento della cartografia numerica e la ricostruzione 3D a scala urbana (Toschi et al., 2017).

In letteratura, le analisi di CD 2D sulle aree urbane sono generalmente basate come si è detto su immagini, utilizzando l'analisi dello spettro luminoso al fine di individuare e misurare fenomeni su larga scala. Nello specifico, questi approcci si presentano sotto forma di numerosi workflow integrati con lo scopo di estrarre informazioni in corrispondenza della variazione dei dati da due finestre temporali distinte e quindi poter misurare i cambiamenti nel corso degli anni, ad esempio per l'aggiornamento dei Geo-Database (GDB). La lettura di questi fenomeni avviene generalmente per calcoli di differenze *pixel-based*. I limiti che tipicamente influenzano l'analisi basata su immagini per la CD 2D risiedono nella grande variabilità dei valori radiometrici (finestre temporali stagionali), nella distorsione delle immagini (dati nadirali) e nella perdita effettiva della terza dimensione (solo le variazioni planimetriche possono essere considerate affidabili per fenomeni su larga scala). Per questo, nel caso studio presentato i dati di partenza sono stati scelti come DSM 3D multi-temporali per l'operazione di CD.

I metodi di CD 3D impiegano approcci di differenze di DSM e integrano nella *detection* dati di tipo LiDAR e/o fotogrammetrico; una panoramica dei metodi e dello stato dell'arte attuale si trova in (Qin et al., 2016) e si fa riferimento a Abbate et Al., 2018 per approfondimenti. Si può riassumere che il corretto approccio procedurale per eseguire una CD 3D dovrebbe prendere in considerazione diversi fattori: (1) Il dato iniziale, che ha caratteristiche intrinseche diverse sulla base ad esempio del sensore. L'eterogeneità di accuratezza e risoluzione comporta analisi con affidabilità differenti e quindi anche per le informazioni derivate. (2) I dati 3D derivati da algoritmi di *image-matching* (Remondino et al., 2014) possono presentare errori di eccessivo rumore e sono necessarie procedure di filtratura per la loro correzione. Qui infatti viene presentato un DSM derivato da un approccio di *image-matching* eseguito su immagini storiche. (3) I risultati della CD possono essere influenzati, come nel caso presentato, dalla difficoltà della co-registrazione dei dati, cioè il corretto allineamento dei DSM tra loro anche in parte legato a problemi di georeferenziazione non uniforme lungo i periodi considerati. (4) La morfologia dell'area, con occlusione dalla vegetazione o da tessuti urbani densi e storici, come in questo caso, condiziona l'accuratezza dei risultati perché influisce sulla ricostruzione 3D degli oggetti o eventuali errori e artefatti, sotto forma di pixel o punti riconosciuti ed estratti. (5) La selezione dell'algoritmo di esecuzione differenza è fondamentale e dipende dal dato iniziale. Sebbene sia disponibile anche un confronto geometrico-radiometrico integrato (Qin et al., 2016), in questo caso verrà eseguito un confronto geometrico in base alle differenze di valori. Il computo della differenza euclidea coinvolge effettivamente il dato 3D secondo le normali alle superfici ma è strettamente influenzato dalla co-registrazione dei dati. Invece, la differenza in altezza, qui impiegata, considera il confronto verticale tra i valori di Z del DSM ma soffre notevolmente di errori di rumore ai bordi degli oggetti della *detection*.

I metodi di *image-matching*, supportati da algoritmi avanzati in grado di elaborare DSM da nuvole di punti dense, permettono di sfruttare il potenziale delle immagini

degli archivi storici (Feurer&Vinatier, 2018). Una volta digitalizzati, possono essere utili per il calcolo di nuovi DSM relativi a epoche passate e confrontabili con lo stato attuale (Nocerino et al., 2012). I punti critici nell'impiego di immagini storiche digitalizzate riguardano ancora la digitalizzazione delle pellicole con scanner fotogrammetrico e la stima dei parametri originali di orientamento interno ed esterno della camera e soprattutto il posizionamento assoluto per confrontare con dati più recenti, e per rendere coerenti i DSM appartenenti ad epoche diverse secondo il principio di co-registrazione. La sfida più ambiziosa nel gestire tali dati risiede nell'eseguire un'analisi multi-temporale in grado di rilevare le trasformazioni (CD) nell'area test di Torino attraverso l'utilizzo di dataset multi-temporali. La preliminare individuazione, localizzazione e quantificazione attraverso un metodo sperimentale di rapida esecuzione, rileva macro-trasformazioni morfologiche a scala urbana, utili ad analisi urbane e studi di progettazione urbana. L'approccio presenta tuttavia criticità derivanti dalla diversità dei dati iniziali, in termini di accuratezza, risoluzione e da alcune incertezze sui risultati. Questi sono presi in considerazione per ulteriori miglioramenti metodologici.

DSM per il paesaggio urbano del passato a Torino: uso di immagini storiche tramite 3D dense-matching

La Regione Piemonte, CSI, conserva un ricco archivio di immagini e dati storici, parzialmente indagato in (Cassatella et al., 2015). Una sezione specifica interessa i voli fotogrammetrici sull'area urbana, la collina e l'area metropolitana con una disponibilità nel 1936, 1957, 1957, 1968, 1968, 1979, 1990, ecc... Il dataset selezionato, è il volo fotogrammetrico effettuato nel 1990 da Ali Toscane per Città di Torino per scopi di aggiornamento cartografico, con una camera aerea calibrata ZEISS RMK-A 15/23 e focale grandangolare di 153mm e pellicola 23x23 cm.



Figura 2 – Esempio di immagine aerea del volo del 1990 e uno zoom sulla zona della Dora

Il piano di volo ha previsto una quota di volo di circa 1800m per la produzione di cartografia in scala 1:10000, e suddiviso in 16 strisciate fotogrammetriche totali (20% trasversale, 60% longitudinale). I negativi sono stati digitalizzati a 800dpi con uno scanner non fotogrammetrico, e distribuite dal Comune di Torino in immagini di 7244x7244px (Figura 2).

Al fine di modellare il DSM datato al 1990 dell'aerea oggetto di studio, è stato selezionato un blocco di 40 fotogrammi ed è stato eseguito il calcolo dell'orientamento interno ed esterno della camera per *image-matching* e la densificazione: questo si chiamerà **DSM_{sfm}**. L'orientamento del blocco considerato è stato effettuato utilizzando un set di n°20 vertici plano-altimetrici

selezionati tra i vertici topografici di riferimento stabili e riconoscibili sulle immagini aeree, e usati come Ground Control Points (GCP) e Check Points CP. La limitata qualità radiometrica dei fotogrammi, oltre alla bassa sovrapposizione allora convenzionalmente adottata, ha restituito un RMSE su n°15 GCP di circa 0.36m e n°5 CP di 0.30m, con un conseguente DSM_{SfM} piuttosto impreciso, affetto da errori di rumore e grandi *outliers*, soprattutto in prossimità di aree di vegetazione e di blocchi di edifici stretti e alti, che ha richiesto una fase di filtro per ottimizzare tramite *downsampling* (*Convolutional filter; kernel size 6×6px*).

Change Detection multi-temporale nell'area ex-Teksid di Torino

Tra i dati DSM disponibili sono stati selezionati tre dataset relativi ad anni diversi per un'analisi multi-temporale efficace (Figura 3), e denominati come segue:

T1/1990) Il DSM_{SfM} nasce dalle immagini fotogrammetriche storiche del 1990 con un GSD=0.5m/px, come introdotto nel paragrafo precedente.

T2/2004) Il **DDEM** deriva da una procedura presentata in (Biason et al, 2004) per l'estrazione di una ortofoto accurata della città di Torino, ed è stato calcolato sulla base dell'allora cartografia numerica in scala 1:1000 della città di Torino, (poligoni con quota di elevazione al suolo e valore altezza). Il DDEM ha una risoluzione pari a di $20 \times 20 \text{ cm}^2$ per pixel, (adatto per ortofoto in scala 1:2000).

T3/2009) Il DSM_{LiDAR} è stato acquisito ed elaborato tra il 2008-2009 e poi distribuito dal Ministero Italiano MATTM secondo la direttiva INSPIRE. Le acquisizioni LiDAR aeree, a copertura nazionale, hanno lo scopo di rilevare e monitorare i corsi d'acqua a rischio idrogeologico, nell'ambito del "Piano straordinario di telerilevamento ambientale". Nello specifico, il DSM_{LiDAR} utilizzato è il DSM_{last} , con risoluzione al suolo pari a 1×1 . A causa della presenza di vegetazione, è stato necessario effettuare operazioni di filtratura sul DSM_{last} indagato.

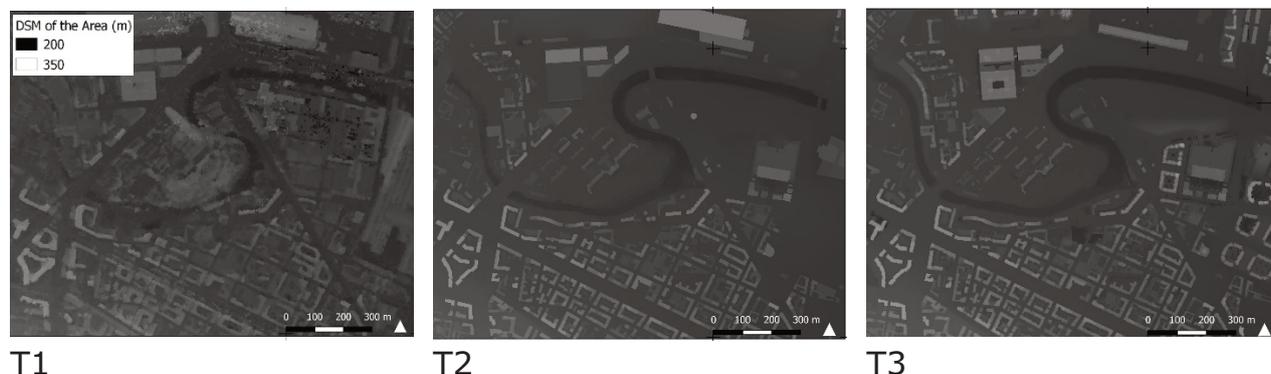


Figura 3. Visualizzazione a scala di grigio dei tre DSM considerati nell'approccio

Il processo di CD, insieme alle procedure di ottimizzazione e ricampionamento, è stato eseguito per sottrazione di pixel tramite algoritmi di differenza di raster implementati nell'interfaccia di SAGA GIS (QGIS 3.2). I prodotti derivati sono denominati Digital Surface Model *Difference* (DSM_D).

$DSMD_{T2-T1}$ è stato realizzato per rilevare e localizzare le differenze volumetriche tra il 1990 e il 2004. Parallelamente, $DSMD_{T3-T2}$ restituisce le differenze tra il 2004 e il 2009. In Figura 4a viene mostrata un'area campione di $DSMD_{T2-T1}$ e $DSMD_{T3-T2}$ lungo l'ansa del fiume Dora riguardante i complessi industriali. I DSMD risultanti sono stati ottimizzati con filtro morfologico, *square Kernel mode*, raggio di 2 celle, con metodo *erosion*. I valori di soglia nella classificazione e rappresentazione dei cambiamenti sono stati attentamente e criticamente considerati a causa del

problema alla base relativo della qualità e risoluzione dei dati iniziali del $DSMD_{SfM}$. Di conseguenza, sono state selezionate 5 classi per rappresentare il rilevamento e la classificazione delle differenze. Valori $<5m$, considerati sotto la soglia di affidabilità, non sono visualizzati (anche valori negativi, associati a sottrazione di volume, demolizione, non sono considerati nelle prime mappature, e così quelle informazioni relative alle modifiche medio-piccole come sopraelevazioni).

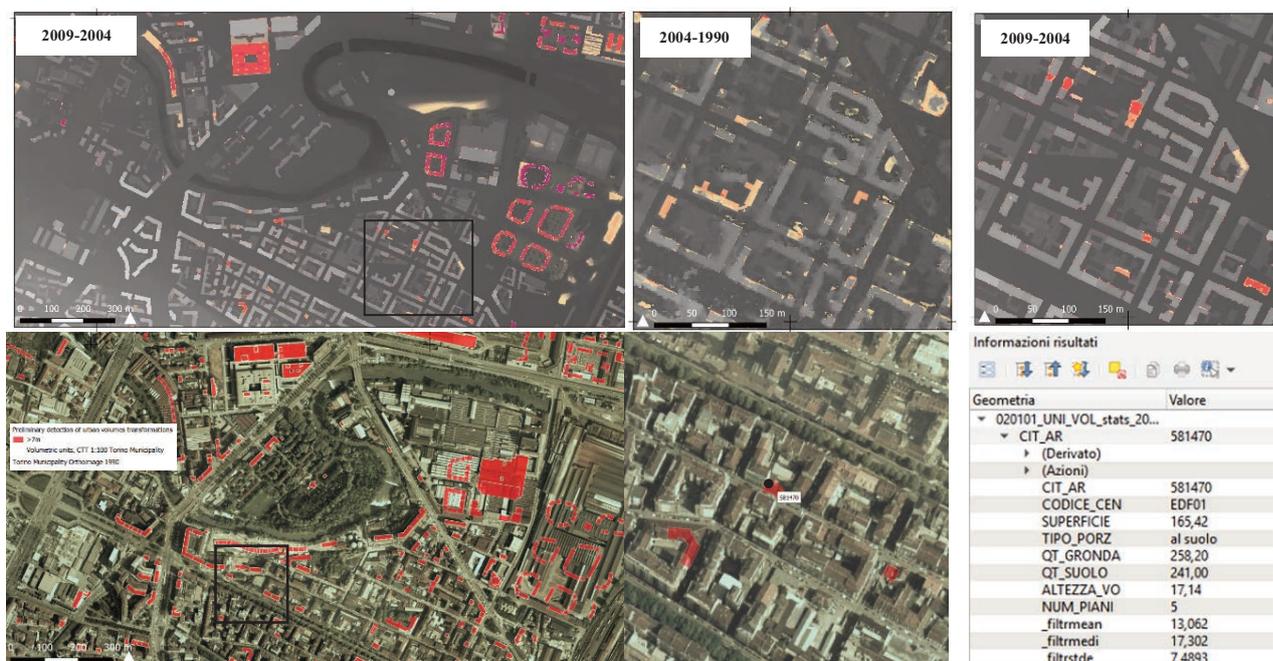


Figura 4. (a) Rappresentazione del risultato di $CD DSMD_{T3-T2}$ e zoom di confronto con $DSMD_{T2-T1}$; (b) controllo dell'affidabilità tramite comparazione dell'informazione delle volumetrie da BDT

Un primo tentativo per verificare l'incertezza relativa alla componente 2.5D nella differenza dei DSM e valori derivati utili a localizzare e quantificare le variazioni, viene proposto di seguito. L'utilizzo delle geometrie delle entità volumetriche (*020101_Unità Volumetrica* della BDT ufficiale della città di Torino) sono adottate per il loro attributo di "Altezza volume". Con il calcolo automatico dei valori derivanti dalle statistiche zonali per raster attraverso la topologia dell'impronta vettoriale (per esempio dal dataset $DSMD_{T3-T1}$), ogni poligono assume la media, mediana e deviazione standard di ogni pixel contenuto in $DSMD_{T3-T1}$. Quindi, l'attributo dai valori CD è associato all'attributo "Altezza volume" relativo ai poligoni vettoriali (Figura 4b). Sono assunti come positivi i poligoni con $media > 7m$, cioè quei poligoni che tra il 1990 e il 2009 hanno subito una modifica positiva dell'altezza del volume superiore a 7m. Le linee guida in vigore in Italia (Brovelli et al., 2009) per la valutazione dell'accuratezza della produzione di ortofoto e DTMs prevedono la strategia di determinare una rete di CP utilizzando tecniche di misura caratterizzate da una precisione pari ad un ordine di grandezza superiore al prodotto da valutare. Poiché il test per la localizzazione e quantificazione dei cambiamenti urbani, sono stati effettuati alcuni controlli a campione di cui sopra, e la figura 4b mostra come vi siano buone corrispondenze tra la media dei valori di altezza dei pixel del $DSMD_{T3-T1}$ e le altezze nell'attributo dei poligoni edifici.

Conclusioni e prospettive future

Grandi città come Torino possono contare oggi su una cospicua disponibilità di dati territoriali facilmente accessibili attraverso le SDI. È altrettanto vero che i fenomeni di trasformazione sono improvvisi ed è quindi estremamente necessaria una strategia di monitoraggio continuo del patrimonio costruito esistente e dei cambiamenti del paesaggio urbano per le finalità del governo del territorio. Questo lavoro ha dimostrato come la disponibilità di fotogrammi storici e quindi DSM storici, insieme a DSM attuali, possa consentire di ragionare sui fenomeni alla base delle trasformazioni in atto per pianificare strategie future. All'interno di queste si prevede che i dati derivati da sistemi rapidi e portatili di *mobile mapping*, che stanno assumendo una rilevanza significativa nel panorama dei sistemi terrestri, possano essere sempre più di grande impatto se indirizzati verso una standardizzazione dei dati 3D ottenibili, in modo che dopo una rapida acquisizione sia possibile convogliare gli aggiornamenti nei database spaziali della cartografia numerica a scala urbana in modo efficace e codificato.

Riferimenti bibliografici

- Abbate, E., Sammartano, G., & Spanò, A. (2019). Prospective upon multi-source urban scale data for 3D documentation and monitoring of urban legacies. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W11, 11–19
- Biasion, A.; Dequal, S.; Lingua, A. A new procedure for the automatic production of true orthophotos. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* **2004**, 35, 1682–1777.
- Brovelli, M.A.; Cina, A.; Crespi, M.; Lingua, A.; Manzano, A.; Garretti, L. Ortoimmagini E Modelli Altimetrici a Grande Scala-Linee Guida. *CISIS*, **2009**, 1–149.
- Cassatella, C.; Garnero, G.; Guerreschi, P.; Seardo, B. Recupero di riprese fotogrammetriche storiche per l'analisi e la pianificazione territoriale: il caso studio della Val Grande. Conferenza ASITA, **2015**, 237–244.
- Feurer, D.; Vinatier, F. Joining multi-epoch archival aerial images in a single SfM block allows 3-D change detection with almost exclusively image information. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* **2018**, 146, 495–506.
- Nocerino, E., Menna, F., and Remondino, F.: Multi-temporal analysis of landscapes and urban areas, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XXXIX-B4, **2012**, 85-90
- Qin, R.; Tian, J.; Reinartz, P. 3D change detection – Approaches and applications. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* **2016**, 122, 41–56.
- Rottensteiner, F.; Sohn, G.; Gerke, M.; Dirk, J.; Breitkopf, U.; Jung, J. *Results of the ISPRS benchmark on urban object detection and 3D building reconstruction*. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 2014, 93, 256–271.
- Remondino, F.; Spera, M.G.; Nocerino, E.; Menna, F.; Nex, F. State of the art in high density image matching. *Photogramm. Rec.* **2014**, 29, 144–166.
- Qin, R.; Tian, J.; Reinartz, P. 3D change detection – Approaches and applications. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* **2016**, 122, 41–56.
- Vosselman, G.; Maas, H.-G. *Airborne and terrestrial laser scanning*; Whittles Publishing, **2010**; ISBN 9781904445876.