Applicazione di tecniche di GeoAI per l'aggiornamento speditivo del Database Geotopografico regionale alla scala 1:5000

Carlo Masetto[1], Sara Nordio[2], Andrea Ghirardi[3], Alessandra Amoroso[1], Laura Magnabosco[1], Daniele Savio[1], Umberto Trivelloni[1], Virgilio Cima[4]

[1] 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
[2] IRS, nordio@i-r-s.it
[3] Pr.El.Cart, a.ghirardi@prelcart.it
[4] Libero professionista, virgiliocima@gmail.com

Abstract. La Regione del Veneto ha introdotto metodologie di GeoAI per l'aggiornamento speditivo dei Database Geotopografici. Il progetto ha interessato circa 4.500 km², con rilievi aerofotogrammetrici e ortofoto a 15 cm. Tecniche di GeoAI consentono l'estrazione semiautomatica di edifici, strade, corpi idrici e vegetazione. I controlli di qualità mirano a garantire la coerenza dei dati e la compatibilità con la scala 1:5000, riducendo tempi e costi rispetto ai metodi tradizionali.

Parole chiave: Geodatabase, CTR, GeoAI, Machine Learning.

Introduzione

La Regione del Veneto, ai sensi della L.R. 16 luglio 1976, n. 28, si occupa di produrre e aggiornare la Carta Tecnica Regionale (CTR) alle scale 1: 5000 e 1:10000 e, a seguito della L.R. 23 aprile 2004, n. 11 "Norme per il governo del territorio e in materia di paesaggio", anche alla scala 1:2000 per la formazione dei Quadri Conoscitivi su cui si basano gli strumenti di pianificazione urbanistica a livello locale. Nel corso degli anni, l'evoluzione tecnologica ha trasformato la tradizionale CTR analogica prima nella cartografia numerica (CTRN) e, successivamente, nella struttura in forma di Database Geotopografico (DBGT) come sancito dal DM del 10 novembre 2011 "Regole tecniche per la definizione delle specifiche di contenuto dei database geotopografici".

All'evoluzione dello strumento cartografico di base, si è accompagnato il percorso di trasformazione dal Sistema Informativo Territoriale all'Infrastruttura di Dati Territoriali della Regione del Veneto (IDT-RV), realizzata secondo quanto stabilito dalla direttiva 2007/2/CE "INSPIRE", e in osservanza del D.Lgs. 7 marzo 2005, n. 82 "Codice dell'amministrazione Digitale".

Tutte le informazioni georiferite che popolano IDT-RV (dati topografici, cartografie storiche, banche dati tematiche, dati satellitari, modelli digitali dell'elevazione etc.) si

basano sulla CTR, strutturata come DBGT; per questo motivo risulta di primaria importanza perseguire il costante aggiornamento e, ove possibile, il miglioramento di questo dato di base.
L'aggiornamento cartografico secondo i metodi tradizionali basati sull'aerofotogrammetria, prevede complesse fasi di produzione che, come noto, comprendono: il rilievo aerofotogrammetrico nadirale (con contestuale produzione di ortofoto), l'inquadramento plano-altimetrico, la restituzione, la ricognizione in campagna e la formazione del DBGT.
Il processo produttivo appena descritto si rivela molto efficace in termini di qualità dei dati prodotti, ma risulta limitante in termini di tempistiche di produzione e costi; entrambe le criticità sono dovute al necessario massiccio ricorso a operatori ad alto livello di specializzazione nelle diverse fasi di realizzazione.
Proprio al fine di abbattere tempi e costi di produzione delle cartografie di base, si stanno esplorando, con crescente successo, metodologie di Intelligenza Artificiale Spaziale (GeoAI) [1] . Nel recente passato possono citarsi simili esempi, principalmente per gli elementi cartografici relativi all'edificato [4].
L'impiego di tali tecniche per l'ottimizzazione, tramite procedure semi-automatiche, di cartografie e DBGT rappresenta infatti una delle frontiere più promettenti per lo sviluppo nel prossimo futuro, anche alla luce del progressivo miglioramento degli aspetti computazionali e degli algoritmi [2]; sovente tali tecniche sono mutuate dalle produzioni di cartografie tematiche, ove di fatto si classificano oggetti territoriali di dimensioni più consistenti e i rilievi vengono eseguiti a scale nominali non superiori a 1:10000.
In questo quadro d'insieme, la Regione del Veneto ha già realizzato una produzione cartografica con supporto di tecniche GeoAI nel territorio del Bacino Imbrifero Montano dell'Adige nella provincia di Verona, dove è stato effettuato un rilevamento da piattaforma aeromobile tra luglio e agosto 2023, ricavandone esiti molto promettenti che hanno consentito di individuare utili prescrizioni da inserire nei capitolati tecnici di successivi rilievi analoghi [3]. Poiché si è rilevata la percorribilità di ricorrere a procedure di GeoAI per ottenere alcune classi di oggetti con accuratezze metriche paragonabili a quelle proprie della scala 1:5000 e con affidabilità pari al 95%, si è ritenuto di riproporre la metodologia in un successivo servizio di produzione cartografica che, per le metodologie utilizzate dalle Imprese affidatarie (IRS Italian Remote Sensing S.R.L. per la ripresa aerofotogrammetrica e Pr.El.Cart. Europe Engineering S.R.L. per la produzione di dati mediante tecniche di A.I.) e per le azioni di verifica di conformità messe in atto dalla Direzione Pianificazione Territoriale, ha fornito ottimi esiti che si ritengono meritevoli di descrizione nei successivi paragrafi.

Descrizione del Servizio

Il Servizio, che si è svolto nelle annualità 2025 e 2026, ha avuto come oggetto il rilevamento da piattaforma aeromobile del territorio dell'intera provincia di Treviso e di parte delle province di Venezia, Verona e Vicenza e la formazione di prodotti derivati dai dati acquisiti dal volo. L'area interessata dal progetto è pari a 4.591 km².
Sono state quindi realizzate le documentazioni di seguito elencate:

- ripresa aerea con un Ground Sample Distance (GSD) nominale di 0,10 m e relativa Triangolazione Aerea (T.A.), con le caratteristiche idonee all'utilizzo per il rilievo fotogrammetrico;
- ortofoto digitale a colori con dimensione nominale del pixel al suolo di 0,15 m;
- livelli informativi vettoriali generati con procedure automatiche relativamente a: edificato, viabilità, idrografia, vegetazione.

Nell'immagine seguente (Fig. 1) sono indicate le aree della regione del Veneto oggetto di aggiornamento cartografico.

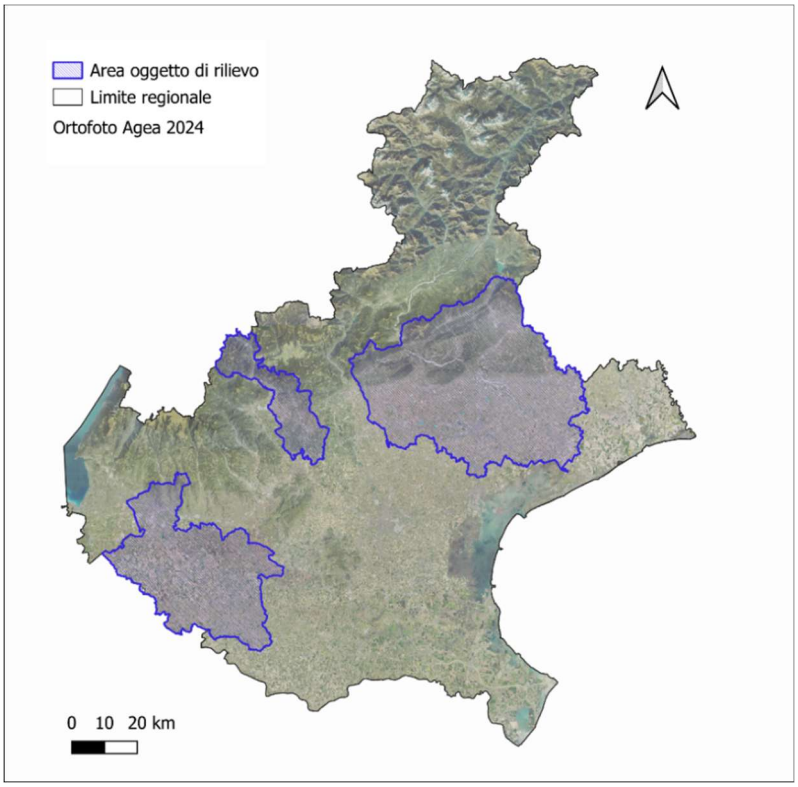

Fig. 1. Individuazione delle aree interessate dall'aggiornamento cartografico (intera provincia di Treviso, parte della provincia di Venezia, Verona e Vicenza).

Le prescrizioni del Capitolato [5], redatto basandosi sui risultati delle positive esperienze precedenti [3], prevedevano nello specifico il georiferimento dei dati nel Sistema di Riferimento Geodetico Nazionale ETRF2000 (RDN2008) all'epoca 2008.0, Fuso 12, con quote geoidiche riferite al sistema verticale Genova 1942 mediante il modello di geoide Italgeo2005. Le ortofoto digitali dovevano presentare una dimensione nominale del pixel al suolo di 0,15 metri con un'accuratezza posizionale planimetrica con errore inferiore a 0,60 metri al livello di confidenza del 97%. I livelli informativi vettoriali estratti mediante algoritmi di Intelligenza Artificiale (edificato, strade e ponti, acque interne e vegetazione arborea) dovevano rispettare una tolleranza

planimetrica e di altezza di 1,5 metri nel 95% dei casi. L'estrazione prevedeva una superficie minima di 16 metri quadrati per i poligoni generici e una larghezza minima di 2 metri per gli elementi stradali lineari. Per la classe dell'edificato era espressamente richiesta la caratterizzazione dell'altezza del corpo di fabbrica come attributo e la separazione dei volumi adiacenti quando presente una differenza di altezza superiore a 3 metri. I dataset automatici sono stati sottoposti a procedure rigorose di editing a video, smoothing geometrico e sgrondatura automatica delle coperture, per poi essere corredati da metadati conformi agli standard stabiliti dalle norme nazionali e comunitarie.

Caratteristiche del rilievo aerofotogrammetrico

Il rilievo fotogrammetrico è stato eseguito mediante acquisizione aerea con sistema UltraCam Osprey 4.2 di Vexcel, adottando una metodologia di acquisizione e di elaborazione finalizzata non solo al raggiungimento di elevati standard di accuratezza geometrica, ma anche alla conservazione della qualità radiometrica del dato e alla produzione di una base fotogrammetrica ottimizzata per le successive attività di restituzione automatica mediante tecniche di Intelligenza Artificiale.
Le scelte metodologiche adottate hanno riguardato in particolare due aspetti:

- la gestione e uniformazione della componente radiometrica, mediante il workflow proprietario Vexcel per ridurre le discontinuità tra strisciate;
- l'adozione di una sovrapposizione fotogrammetrica significativamente superiore a quella convenzionale, finalizzata alla generazione di modelli tridimensionali più robusti e geometricamente affidabili.

Queste scelte hanno consentito di ottenere un prodotto caratterizzato da elevata continuità radiometrica, stabilità temporale del segnale e migliori caratteristiche geometriche, particolarmente importanti nell'ambito di processi di restituzione automatica.
Nello specifico delle strategie di acquisizione, al fine di garantire la massima uniformità dei prodotti, il rilievo è stato pianificato ed eseguito concentrando le operazioni di volo nel minor intervallo temporale possibile. Questa scelta ha consentito di minimizzare le variazioni naturali della scena dovute al cambiamento delle condizioni atmosferiche, dell'illuminazione solare e, più in generale, all'evoluzione temporale delle condizioni ambientali e stagionali.
La combinazione tra acquisizione concentrata temporalmente, controllo delle condizioni di volo e workflow proprietario di bilanciamento radiometrico Vexcel ha permesso di ottenere un dataset caratterizzato da elevata uniformità radiometrica e continuità dell'informazione, riducendo le discontinuità tra strisciate e tra differenti sessioni di acquisizione.
Per quanto concerne la sovrapposizione tra immagini si evidenzia che per la realizzazione dei modelli tridimensionali utilizzati nelle successive fasi di elaborazione è stata adottata una configurazione con sovrapposizione longitudinale pari al 60% e trasversale pari all'80% (60/80), significativamente superiore alla configurazione convenzionale generalmente adottata nei rilievi fotogrammetrici, tipicamente nell'ordine del 30%-60%. Tale caratteristica è stata scelta specificamente in funzione della successiva generazione dei modelli DTM e DSM attraverso procedure di

correlazione automatica e di autocorrelazione, con l'obiettivo di migliorare la robustezza della ricostruzione tridimensionale. L'elevata sovrapposizione adottata consente di disporre di un numero maggiore di osservazioni dello stesso elemento da differenti posizioni della camera. Questo permette ai processi di correlazione di individuare e verificare più efficacemente i corrispondenti omologhi presenti nelle diverse immagini, migliorando la geometria della ricostruzione tridimensionale.
Particolare attenzione è stata posta alla qualità geometrica delle superfici ricostruite. La configurazione 60/80 è stata infatti adottata con l'obiettivo di ottenere geometrie il più possibile prossime alla reale configurazione verticale degli elementi presenti sul territorio, riducendo le deformazioni prospettiche e le ambiguità che possono risultare più evidenti nei processi automatici di ricostruzione basati su una minore ridondanza delle immagini. Il maggiore numero di osservazioni consente infatti di migliorare la capacità del modello di ricostruire correttamente sia la geometria complessiva sia i dettagli locali.
Le metodologie adottate, oltre a garantire la massima accuratezza metrica, hanno in sostanza dato luogo ad un'ottimizzazione dei prodotti aerofotogrammetrici per la restituzione cartografica automatica mediante IA che, come noto, operano su informazioni geometriche e radiometriche con la qualità del dato di ingresso che influenza direttamente la capacità del sistema di riconoscere, interpretare e ricostruire correttamente gli elementi territoriali.
Il risultato è un dataset nel quale qualità radiometrica, accuratezza geometrica e capacità di conservazione del dettaglio sono state considerate come componenti integrate dello stesso processo, con l'obiettivo finale di ottenere una cartografia automatizzata caratterizzata dal miglior livello possibile di affidabilità e dettaglio.

Soluzione metodologica basata sull'AI

Per raggiungere lo scopo prefissato dal Capitolato, è stata adottata una procedura metodologica basata sull'algoritmo di machine learning non supervisionato *k-means*, applicato a uno stack multispettrale e altimetrico a 5 bande. Il pacchetto di input (stack) integra i tre canali del visibile (Rosso, Verde, Blu), la banda dell'Infrarosso Vicino (NIR) e la quota derivata dal Modello Digitale della Superficie (DSM). Per garantire l'omogeneità computazionale ed evitare che la differente scala metrica del DSM distorca il calcolo delle distanze euclidee dell'algoritmo, tutte le bande sono state ricampionate sulla medesima griglia geografica e sottoposte a un riscalamento lineare dei valori di intensità nell'intervallo 0–255 (profondità di radiometria a 8 bit). Tale normalizzazione assicura pari peso statistico a ciascun layer informativo [6].
Per superare i limiti tipici della segmentazione puramente spettrale — che fatica a distinguere oggetti con firma ottica analoga ma differente natura geometrica e altimetrica (es. coperture edili e pavimentazioni stradali, oppure chiome arboree e prati) — il processo di clusterizzazione è stato vincolato da un'analisi spaziale dei gradienti:

1. Estrazione del massimo gradiente [7]: Mediante un filtro di convoluzione spaziale (operatore di Sobel 3×3) applicato alle singole bande, è stata calcolata la variazione locale di intensità dei pixel. Dall'inviluppo dei risultati è stato estratto il valore di massimo gradiente multicanale.

2. Generazione della maschera: Applicando una soglia opportuna, i pixel caratterizzati da elevata discontinuità spettrale e altimetrica sono stati isolati per comporre una maschera dei bordi.
3. Clusterizzazione vincolata (*k-means*): Ciascun pixel, rappresentato da un vettore a 5 dimensioni, è stato raggruppato tramite l'algoritmo *k-means*. La maschera di discontinuità agisce da vincolo topologico interrompendo la continuità dei cluster: in questo modo aree spettralmente omogenee, ma separate da marcate variazioni di quota o di riflettanza, vengono suddivise in segmenti spazialmente distinti e geometricamente coerenti.

Dalla fase di segmentazione non supervisionata si sono ottenuti aggregati di pixel (cluster) privi di significato semantico diretto. Il passaggio dai segmenti alle classi tematiche definitive dell'aggiornamento cartografico è avenuto attraverso una fase di classificazione e contestualizzazione supervisionata, in cui le caratteristiche spettrali e altimetriche medie dei singoli segmenti sono state confrontate con firme di riferimento e validate dall'operatore (o incrociate con banche dati ausiliarie) per l'attribuzione della classe corrispondente.

Verifiche di conformità

Nel corso dello svolgimento del servizio vi sono state numerose verifiche intermedie dei prodotti cartografici in fase di realizzazione con frequenti occasioni di confronto tra la Stazione Appaltante e le Imprese, sia attraverso la modalità della videoconferenza sia con l'esecuzione di verifiche in campagna. Tanto in corso d'opera quanto a conclusione delle attività, sono stati oggetto di verifica di rispondenza alle prescrizioni del capitolato i fotogrammi realizzati (con verifica della sovrapposizione longitudinale e trasversale, e del rispetto del GSD prescritto), l'ortofoto prodotta, le misure topografiche associate, la rispondenza della cartografia derivata attraverso procedure semiautomatiche dalle riprese aerofotogrammetriche. Le attività hanno incluso anche le verifiche metriche, effettuate tramite rilievi speditivi eseguiti in quattro diverse campagne tra l'autunno del 2025 e l'estate del 2026 con l'individuazione di 46 zone campione per complessivi 2598 punti campione. Tutte le verifiche eseguite hanno dato esito positivo, come da Certificato di Regolare Esecuzione emesso il 7 ottobre del 2026. Una particolare attenzione è stata dedicata ai prodotti vettoriali ottenuti con le procedure descritte in precedenza; i controlli sono stati molto frequenti e hanno contemplato verifiche a campione dapprima su successivi stralci di consegna, poi sull'intero materiale trasmesso dalle Imprese. Lo sviluppo temporale delle verifiche, che si sono orientate a valutare la correttezza dell'effettivo contenuto informativo e geometrico dei dataset, è stato particolarmente virtuoso proprio per la positiva dialettica che si è instaurata tra la Stazione Appaltante e le Imprese; si è infatti verificato un progressivo miglioramento qualitativo nelle procedure adottate con conseguente ampio miglioramento della qualità dei prodotti.

Le analisi hanno interessato tutti i livelli informativi oggetto del servizio e hanno fornito esiti soddisfacenti; in particolare si evidenzia come i livelli qualitativi previsti dal capitolato siano stati ampiamente superati per il layer dell'edificato e per quello delle coperture arboree, particolarmente apprezzabili in zona urbana. Si sono segnalate

soltanto modeste criticità puntuali, trascurabili nel quadro di produzione complessivo, e situazioni di complessità interpretativa, peraltro tipiche anche di altre tecniche di produzione, nei centri urbani densi e specialmente nei centri storici.
Le immagini che seguono offrono alcuni esempi circa la qualità della rappresentazione ottenuta sull'intero territorio oggetto del servizio.

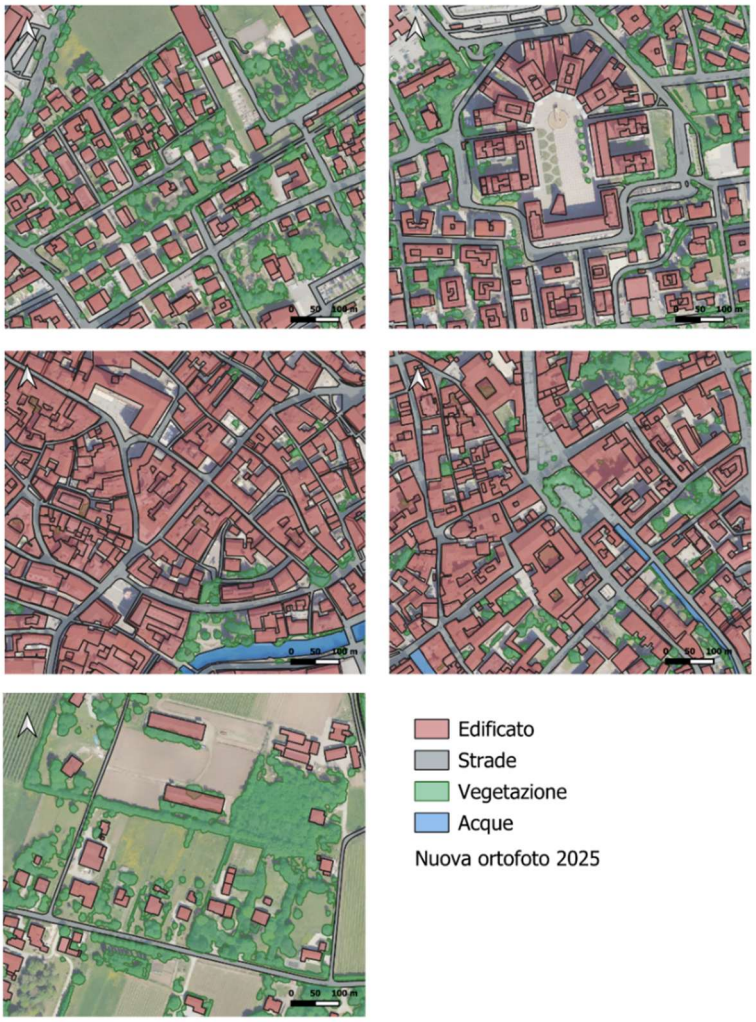

Fig. 2. Esempi dei prodotti cartografici finali: livelli vettoriali derivati sovrapposti alla base ortofoto 2025 (Treviso).

Conclusioni

La valutazione degli esiti del percorso effettuato parte dagli aspetti di natura tecnica, che hanno evidenziato come l'elevata qualità delle riprese aerofotogrammetriche comporti non solo un miglioramento dei prodotti ottenuti in modo diretto, ma costituisca

un fattore determinante per poter applicare con successo metodologie basate sull'Intelligenza Artificiale. A proposito di quest'ultima si evidenzia come l'uso combinato di quota e maschera di gradiente consenta di generare segmenti con bordi aderenti alle discontinuità reali, riducendo la fusione tra classi spettralmente affini. Il metodo richiede solo due parametri (k - numero di cluster e T - soglia). La metodologia si è rivelata particolarmente efficace nell'acquisizione della vegetazione e dell'edificato. Per le acque e la viabilità la componente del massimo gradiente influisce sulla segmentazione in modo inferiore, rischiando talvolta di introdurre rumorosità nel dato. Per tale ragione nell'estrazione di queste classi si è attribuito un peso maggiore alla componente *k-means* al fine di ottimizzare il risultato finale.
Sul piano strategico, si rileva, anche rispetto alle esperienze precedenti, una marcata crescita qualitativa negli esiti di queste procedure a carattere fortemente innovativo; ciò, in virtù della crescente maturità tecnologica di queste soluzioni, rafforza l'indirizzo di adottare tali metodologie per aggiornare speditivamente anche le cartografie di base per scale nominali non superiori a 1:5000. La conseguenza diretta è la prospettiva di un'oggettiva sensibile riduzione dei costi di produzione, valutabile pari a un ordine di grandezza, in ragione del minor intervento di operatori esperti che restano, al momento, indispensabili per la produzione di cartografie a scale superiori. Pare infine opportuno sottolineare come, trattandosi di dinamiche in costante evoluzione, siano da prendere in considerazione anche specifiche prescrizioni in modo da modulare livelli di attenzione diversi in ragione delle differenti caratteristiche dei territori da rilevare. A titolo di esempio, si può citare la necessità di prevedere operazioni di ricognizione in campagna nei centri storici, oppure di eseguire fasi di editing più spinte in casi di specifiche criticità.

Riferimenti bibliografici

1. Li, W. (2021). GeoAI and Deep Learning. In International Encyclopedia of Geography (eds D. Richardson, N. Castree, M.F. Goodchild, A. Kobayashi, W. Liu and R.A. Marston). https://doi.org/10.1002/9781118786352.wbieg2083.
2. Li, W., Batty, M., Goodchild, M. F., Hu, Y., Gao, S., Wang, S., & Zhang, F. (2024). GeoAI for Science and the Science of GeoAI. Journal of Spatial Information Science, (29), 1–17. https://doi.org/10.5311/JOSIS.2024.29.384.
3. Magnabosco L., Masetto C., Trivelloni U., Cima V.: Analisi comparativa di metodologie per l'aggiornamento speditivo di cartografie di base alle scale 1:5000 e 1:2000. Atti della 27ª Conferenza ASITA (2024).
4. Olivucci S., Nerieri M., Ruggieri G., Romani M., Ceresini S. e Gentili G. (2019) Il nuovo strato Edificato da tecniche "deep learning" come fonte per l'aggiornamento del Database Topografico e per il monitoraggio del consumo di suolo. ATTI ASITA 2019
5. Ciarapica A., Trivelloni U., Cima V., Mazzi C., Milan P. (2018) Preparazione di modelli di capitolato per le varie tipologie di rilevamento. ATTI ASITA 2018
6. MacQueen, J.: Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In: Proceedings of the 5th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, vol. 1, pp. 281–297. University of California Press, Berkeley (1967).
7. Gonzalez, R.C., Woods, R.E.: Digital Image Processing. 4a ed. Pearson, New York (2018).