

VALUTAZIONE DEGLI ERRORI SISTEMATICI NELLA PRODUZIONE DI DTM CON TECNOLOGIA LIDAR AVIOTRASPORTATA

Camillo BERTI (*), Fabio CAMICIOTTOLI (**), Riccardo NESPOLI (***),
Marco REDINI (****), Luciano SURACE (*****)

(*) Università di Firenze, Dipartimento Studi Storici e Geografici, Via San Gallo, 10, Firenze, camillo.berti@gmail.com

(**) Provincia di Arezzo, Servizio Difesa del Suolo, Via Arrigo Testa, 2, Arezzo, fcamicciottoli@provincia.arezzo.it

(***) Provincia di Arezzo, Servizio Difesa del Suolo, Via Arrigo Testa, 2, Arezzo, rnespoli@provincia.arezzo.it

(****) Comune di Pisa, Ufficio Urbanistica, m.redini@comune.pisa.it

(*****) Istituto Idrografico della Marina, Passo dell'Osservatorio, 4, Genova, luciano.surace@libero.it

Riassunto

Scopo del presente lavoro è valutare il grado di precisione altimetrica desumibile da modelli digitali di superficie (primo e ultimo impulso) acquisiti con tecnica Lidar e indagare la possibilità, in analisi a scala locale, di migliorare ulteriormente tale valore, identificando la presenza di eventuali errori sistematici, al fine di minimizzarli in fase di pre-elaborazione. Lo studio si è basato sul confronto puntuale di dati altimetrici derivanti da Lidar con rilievi topografici di controllo effettuati con tecnica GPS e ha confermato l'eccezionale qualità dei dati ottenuti tramite laser scanning. L'argomento è di particolare interesse perché il miglioramento della qualità altimetrica dei modelli può apportare benefici sia quando i dati sono di ausilio a modellistiche idrauliche, sia quando sono funzionali alla determinazione dei costi nelle fasi di redazioni di progetti di opere pubbliche.

Abstract

The goal of this work is to evaluate the precision of the altimetric datum which is obtained by digital surface models using Lidar technology (first and last pulse). At the same time, in the frame of local analysis, this work looks inside the possibility of improving the quality of the datum by identifying and minimizing systematic errors during the pre-processing phase.

The study is based on a comparison between altitudinal datum based on Lidar technology and topographical surveys carried out with GPS; the research has confirmed the exceptional quality of the data obtained by laser scanning.

The subject and the results of this work is of great interest since the presented quality improvement of the altimetric model can bring benefits both in the field of hydraulic modelling and in the determination of financial costs during the editing of "public works" projects.

Introduzione

Il previsto innalzamento di livello della diga ENEL di Levane, utilizzata per la produzione di energia idroelettrica e per la regolazione dei deflussi del fiume Arno, ha indotto il Servizio Difesa del Suolo della Provincia di Arezzo ad effettuare una campagna di indagine conoscitiva di dettaglio su tutta la zona a monte della diga, interessata dall'eventuale risalita del livello delle acque durante gli eventi di piena. Disponendo di una solida base di dati, costituita dal modello digitale del terreno acquisito nel 2004 con tecnica laser scanning aviotrasportata, la fase di studio è stata rivolta principalmente alla definizione quantitativa delle precisioni ottenibili al di sotto dei 30 cm previsti dal capitolato di appalto.

Dati

I dati utilizzati per l'analisi derivano da una campagna di rilevamento con tecniche Lidar condotta sui fondovalle della Provincia di Arezzo e da vari rilievi di controllo a terra eseguiti prevalentemente con tecnica GPS¹.

Per la presente valutazione si è preso in considerazione, come area campione, il fondovalle del Fiume Arno in prossimità dell'abitato di Laterina in provincia di Arezzo, dove sono stati svolti i rilievi topografici di controllo nel contesto delle verifiche preliminari all'innalzamento dei livelli nella zona a monte della diga di Levane. All'interno dell'area rilevata con tecnologia laser scanning, sono state individuate 3 microaree in cui è stato eseguito un rilievo topografico di dettaglio²; per la valutazione si sono prescelte aree con superfici il più possibile pianeggianti (piazzi asfaltati, incroci strade) in modo da minimizzare le eventuali variazioni dovute a lievi differenze di quota.

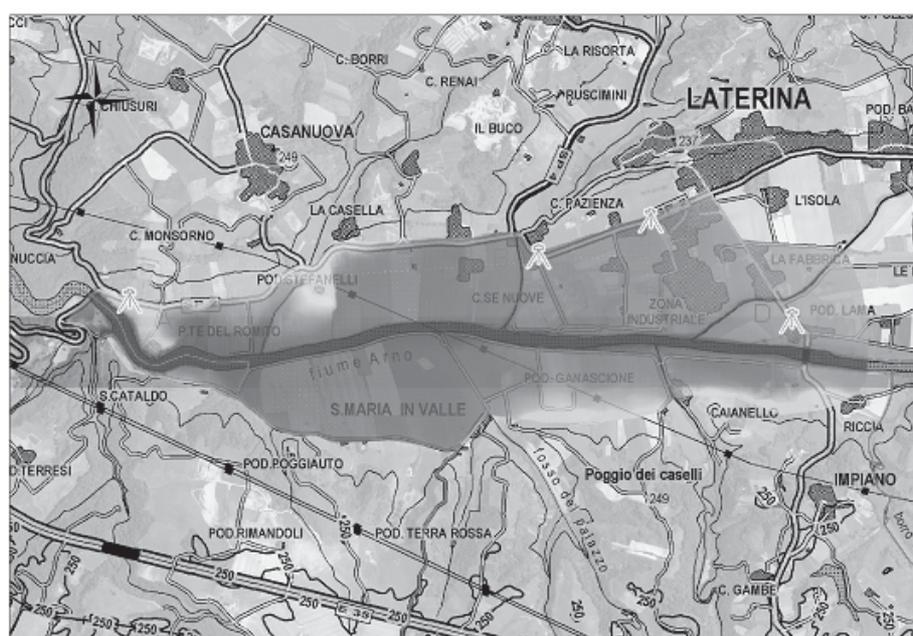


Figura 1 – Inquadramento dell'area di studio e localizzazione delle zone di controllo topografico

Il modello digitale del terreno con passo di 2 x 2 metri è stato acquisito con tecnologia laser scanning da piattaforma aerea dalla Compagnia Generale Riprese Aeree (CGR) di Parma nell'ambito di una campagna di rilevamento dei fondovalle dei corsi d'acqua principali del Casentino e della Valtiberina toscana³. Il rilievo, promosso dal Servizio Difesa del Suolo della Provincia di Arezzo nell'ambito dell'attività istituzionale è stato realizzato nella primavera del 2004 con il sensore Toposys e inquadrato nel sistema di riferimento ETRF89-IGM95 attraverso la correzione differenziale dei dati estratti dal ricevitore GPS montato a bordo dell'aereo e collegato al

¹ Sono stati presi in considerazione anche i dati rilevati durante la fase di collaudo del modello digitale del terreno realizzato dalla CGR di Parma sulla base dei dati Lidar. Tale rilievo è stato eseguito con tecniche miste GPS-stazione totale. Per maggiori dettagli si rimanda al volume Camiciottoli et al., 2005.

² Nelle tre aree (Figura 1, A, B, C) il rilievo topografico è stato eseguito per ottenere una stima quantitativa della precisione altimetrica del DTM da Lidar al di sotto del valore dei 30 cm previsti dal capitolato d'appalto. Una quarta area (Figura 1, D) era stata acquisita per il collaudo e la validazione del modello digitale del terreno.

³ Il Modello Digitale del Terreno con passo di 2x2 metri è stato generato con algoritmo proprietario (non reso disponibile dalla ditta Toposys che ha prodotto il sensore) attraverso il filtraggio della "nuvola di punti" (densità media di 2-3 punti al m²) nella quale sono contenute le informazioni relative al primo e all'ultimo impulso ricevuti dal sensore.

sistema inerziale IMU. Per la compensazione è stata utilizzata la stazione permanente di Arezzo⁴, le cui coordinate sono state determinate rispetto ai tre trigonometrici IGM95 “di primo perimetro”, in accordo con le specifiche secondo le indicazioni per il raffittimento della rete geodetica IGM95.

Il rilievo topografico di controllo è stato eseguito con tecnica GPS in modalità RTK in riferimento ad una stazione master determinata con log statico di 3 ore acquisito simultaneamente allo svolgimento della sessione RTK e compensato rispetto alla stazione permanente di Arezzo. In particolare, l'acquisizione dei punti è stata effettuata tramite 2 ricevitori GPS doppia frequenza (Leica Geosystem SR 530) con le seguenti impostazioni:

Lettura e aggiornamento del dato satellitare	0,5 sec.
Frequenza di registrazione	1 sec.
Maschera di elevazione sull'orizzonte	15°
Antenna ricevente montata su bipede con asta di 2 m	Leica AT502

Durante il rilievo dei punti di dettaglio, effettuato con tempi di acquisizione di 60 epoche, sono state eseguite anche misure in modalità statica al fine di effettuare dei controlli incrociati sulla qualità dei dati. Le operazioni di *post-processing* per la determinazione delle coordinate dei vertici nel sistema di riferimento WGS84 delle sessioni di rilievo sono state eseguite con il software Leica Geo Office versione 4.0.



Figura 2 – Una delle aree dove è stato eseguito il rilievo topografico di controllo (area B)

Per garantire il corretto inquadramento geografico e nell'ottica di costituire una banca dati geografica condivisa ed omogenea, tutti i dati utilizzati sono stati raccolti, in accordo con le specifiche di rilievo redatte dal Servizio Difesa del Suolo della Provincia di Arezzo, utilizzando le seguenti procedure:

- la georeferenziazione dei dati nel sistema di riferimento WGS84 è realizzata riferendosi alla stazione permanente GPS di Arezzo, utilizzata quale stazione *master* principale;
- le trasformazioni, dal sistema WGS84 nel sistema di riferimento cartografico nazionale, vengono eseguite attraverso l'impiego del software VERTO 2 e dei relativi grigliati (nella prima versione *gr1*) dei fogli in scala 1:50.000, prodotto dall'Istituto Geografico Militare;

⁴ La Stazione Permanente GPS di Arezzo (<http://gps.provincia.arezzo.it/>), ubicata nei locali del Servizio Difesa del Suolo in via A. Testa ad Arezzo, fa parte sia della rete di stazioni GPS della Regione Toscana, sia della rete nazionale Leica ItalPoS.

Tali specifiche hanno permesso di minimizzare gli scarti dovuti agli errori legati all'inserimento nei sistemi cartografici nazionali di riferimento planimetrico (Gauss-Boaga Roma 40) ed altimetrico (quote ortometriche riferite al mareografo di Genova) e hanno consentito di realizzare una georeferenziazione omogenea e comparabile tra i dati acquisiti con tecnica LIDAR e con metodi topografici classici per il rilievo di dettaglio.

Metodologia

Lo studio ha previsto quindi l'analisi dettagliata di singole porzioni dei modelli digitali per verificare l'eventuale presenza di errori sistematici e di quantificarne l'entità. L'analisi è stata condotta calcolando gli scarti esistenti nell'area di controllo tra i dati derivanti dalla campagna Lidar e quelli topografici GPS.

Alle quote dei punti rilevati è stata associata, attraverso le funzioni di analisi spaziale del software GIS utilizzato, l'informazione altimetrica presente nel DTM a maglia regolare eseguendo un'interpolazione bilineare⁵. Tale scelta ha consentito di attribuire, ad ogni singolo punto, un valore altimetrico calcolato sulla base del valore associato ai quattro pixel più vicini secondo la seguente equazione:

$$Q_{(x,y)} = ax + by + cxy + d \quad [1]$$

in cui x e y sono le parti decimali del punto e a , b , c e d sono i quattro coefficienti determinati in modo tale che la funzione assuma i valori noti dei quattro pixel coinvolti.

Infine alle quote calcolate per interpolazione a partire dal DTM da Lidar sono stati sottratti i valori altimetrici che potremmo definire "reali", cioè rilevati tramite GPS,

Risultati

Il confronto dei valori di quota ha mostrato che gli scarti esistenti per i 121 punti rilevati hanno un valore medio di 0,032 m (0,045 per la media dei valori assoluti) e sono comunque sempre inferiori a 10 cm; la maggior parte dei valori si concentra tuttavia nella sezione positiva della distribuzione di frequenza degli scarti, con una mediana di 0,037 m.

Confronto quote DTM Lidar – rilievo GPS	
Numero dati	121
Media	0,032
Media valori assoluti	0,045
Mediana	0,037
Minimo	-0,106
Massimo	0,096
Range	0,202
Varianza	0,002
Deviazione standard	0,041
Asimmetria	-0,933
Curtosi	0,815

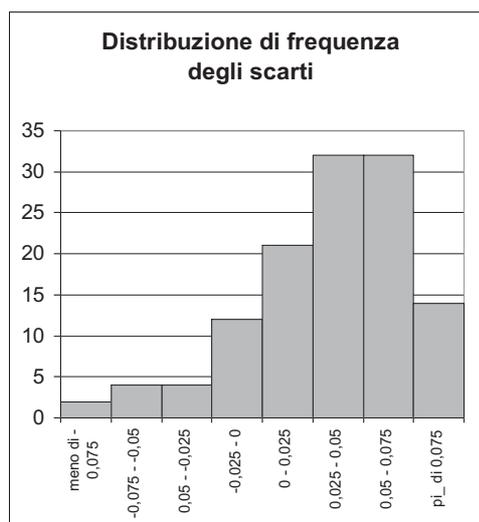


Figura 3 – a) Tabella contenente i parametri statistici relativi agli scarti rilevati tra DTM Lidar e rilievo GPS; b) Distribuzione di frequenza degli scarti

⁵ L'attribuzione dei valori altimetrici è stata ottenuta attraverso la funzione "Surface Spot" dell'estensione 3D Analyst del software ESRI ArcGIS 9.2.

Complessivamente si può sottolineare, come in precedenti occasioni si è già avuto modo di notare (Berti C. et al., 2006; Berti C. et al., 2007), l'ottima qualità del dato altimetrico LIDAR, dato che per le zone controllate mostrano differenze rispetto al dato rilevato con metodi topografici minori di 10 cm e quindi di gran lunga inferiori ai 30 cm richiesti dal capitolato d'appalto. Tuttavia l'osservazione della distribuzione di frequenza ha fornito anche un'informazione aggiuntiva: la maggior parte degli scarti è compresa tra 0 e 0,075 m, con dati complessivamente piuttosto omogeneo tra tutti i punti considerati. Va notato che risultati comparabili si erano ottenuti anche durante la fase di collaudo⁶, confrontando i dati Lidar con i valori rilevati con tecnica mista con stazione totale / GPS in modalità statica (log di 1 ora).

Il fatto che gli scarti risultino pressoché costanti lascia supporre che i dati derivati da laser scanning, per l'area in esame, siano caratterizzati da un sistematismo su cui merita indagare. Tale circostanza è verosimilmente imputabile alla presenza di particolari condizioni atmosferiche oppure ad una peculiare configurazione dei satelliti o infine ad altri fattori che possono aver in qualche modo condizionato le misure.

Va inoltre considerato che l'operazione di ricampionamento nella produzione del modello digitale del terreno, insieme alla successiva necessaria interpolazione per ottenere dati puntuali, pur rendendo il dato in formato *grid* di più semplice ed immediato utilizzo, comporta la perdita di una certa quantità di informazione rispetto al dato grezzo originario della "nuvola di punti", sulla base del quale potrebbe rivelarsi molto interessante effettuare ulteriori valutazioni.

Possiamo quindi ipotizzare di utilizzare il risultato per effettuare una calibrazione a posteriori dei dati da effettuarsi sottraendo ai dati stessi la media dei valori più frequenti dell'offset rilevato, operazione che ci sembra di grande utilità per effettuare una valutazione dettagliata delle quote derivate da laser scanning nell'ambito di analisi idrologiche di precisione.

Questo tipo di calibrazione, pur essendo di grande utilità per la validazione dei dati da LIDAR e per ottenere dati maggiormente affidabili, è tuttavia applicabile soltanto ad aree ristrette nello spazio e rilevate durante la medesima sessione di volo: la qualità dei dati altimetrici Lidar, calcolati sulla base del tempo di ritorno del raggio laser riflesso dalla superficie terrestre, è con ogni probabilità influenzata dalla distanza da terra del sensore, dalle condizioni atmosferiche (in particolare dall'umidità); invece, le misure posizionali determinate con i sistemi GPS-IMU montati sull'aereo che trasporta il sensore sono dipendenti in primo luogo dalla configurazione dei satelliti al momento della rilevazione

Conclusioni

Per concludere, ci sembra quindi opportuno sottolineare l'importanza di effettuare una calibrazione dei dati Lidar. Quando si ha l'esigenza di disporre di dati altimetrici maggiormente affidabili in ambito locali, cioè da effettuarsi solo per aree limitate rilevate nell'ambito della medesima sessione di volo (in modo da garantire la medesima configurazione dei satelliti, la medesima altezza di volo e analoghe condizioni atmosferiche); ugualmente molto utile risulta la possibilità di disporre, come d'altronde in ogni misura, di una documentazione accurata e completa di tutte le fasi dell'acquisizione dei dati Lidar e della produzione dei modelli digitali da essi derivati da parte delle ditte esecutrici al momento della consegna agli Enti committenti⁷.

I dati da laser potranno essere quindi, a seguito di questa ulteriore fase di calibrazione, essere utilizzati con maggiore affidabilità per le valutazioni altimetriche necessarie all'attività istituzionale del Servizio Difesa del suolo della Provincia di Arezzo, quali ad esempio la determinazione delle sezioni trasversali dei corsi d'acqua e conseguentemente il calcolo del perimetro "bagnato" e dell'area sottesa dalla sezione.

⁶ Durante il collaudo sono stati battuti 274 punti all'interno di un piazzale asfaltato in prossimità del ponte sull'Arno lungo la provinciale Laterina-Ponticino in prossimità della zona industriale di Laterina. Cfr. Camiciottoli et al., 2005.

⁷ Nel nostro caso, ad esempio, i dati rilevati con il sensore Toposys vengono in genere consegnati, come "pacchetto chiuso" e privo di metainformazione.

Uno sviluppo del lavoro potrebbe essere costituito dall'esecuzione della valutazione svolta finora su altre aree, rilevate in tempi e condizioni atmosferiche diverse.

Ulteriori valutazioni potrebbero inoltre basarsi sull'analisi della riflettanza che corredata il dato altimetrico da laser scanning, in modo da verificare se e quanto la tipologia dei materiali presenti al suolo (per natura, forma, tessitura, colore, etc) influenzi la risposta altimetrica del sensore Lidar. In tal caso sarebbe opportuno, nella scelta dei punti da utilizzare in fase di calibrazione, individuare un campione significativo di punti scelti in aree caratterizzate da diversi usi del suolo e dove siano presenti materiali differenti.

Riferimenti bibliografici

Berti C. et al. (2006). "Confronto tra rilievo topografico integrato con misure GPS e dati laser-scanning da aereo", *Atti 10^a conferenza nazionale ASITA*, Bolzano, 14 - 17 novembre 2006.

Berti C. et al. (2007). "Modelli digitali da laser-scanning per la ricostruzione di sezioni fluviali. Strategie di valutazione delle precisioni", *Atti del Convegno Nazionale SIFET*, Arezzo, 27-29 giugno 2007.

Camiciottoli F., Radicchi L. (2005), *Disciplinare tecnico. Campagna di rilevamento topografico piano altimetrico per la definizione della geometria di alcune sezioni fluviali, al fine della valutazione del rischio del reticolo secondario del bacino Tevere Toscano*, Provincia di Arezzo - Servizio Difesa del Suolo, Arezzo.

Camiciottoli F., Redini M., Surace L. (2005). *Tecnologia laser-scanning e rischio idraulico*, Pisa, Pacini.

Il sistema GPS. Applicazioni e sviluppi nel rilievo del territorio (2003). Rimini, Maggioli.

Surace L. (1998), "La georeferenziazione delle informazioni territoriali", *Bollettino di Geodesia e Scienze Affini*, 57-2: 181-234.