

Zeitschrift: Geomatik Schweiz : Geoinformation und Landmanagement =
Géomatique Suisse : géoinformation et gestion du territoire =
Geomatica Svizzera : geoinformazione e gestione del territorio

Herausgeber: geosuisse : Schweizerischer Verband für Geomatik und
Landmanagement

Band: 113 (2015)

Heft: 10

Artikel: Batimetria laser terrestre con la MS50

Autor: Serantoni, Eugenio / Olgiati, Luca / Wieser, Andreas

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-583593>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 04.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Batimetria laser terrestre con la MS50

I laser scanner terrestri con portante nello spettro visibile, in certe condizioni, sono adatti a misurare attraverso l'acqua e sono quindi utilizzabili per la modellazione dei fondali. In questo articolo riassumiamo a titolo esemplificativo i risultati teorici e sperimentali ottenuti con la Multistation Leica MS50, al fine di mostrare la disponibilità e l'accuratezza di tali misure. Le nostre ricerche hanno evidenziato la possibilità di misurare attraverso strati di acqua spessi alcuni decimetri e di raggiungere deviazioni standard di pochi millimetri utilizzando questo strumento. Le accuratezze raggiungibili assumono valori appena maggiori e sono soprattutto condizionate dall'incertezza nel determinare l'altezza della superficie dell'acqua.

Dans certaines conditions, les laser scanner terrestres avec des ondes porteuses dans le spectre du visible permettent de mesurer des surfaces à travers l'eau. Cet article est un résumé des résultats théorétiques et expérimentaux et révèle, à l'exemple du Leica MS50, la précision et la disponibilité de ce type de mesures. Nos investigations ont montré qu'il est possible de mesurer à travers l'eau jusqu'à une profondeur de quelques décimètres et d'obtenir un écart type de l'ordre de quelques millimètres. L'exactitude est légèrement plus élevée et principalement limitée par l'incertitude concernant la détermination de la surface de l'eau.

E. Serantoni, L. Olgiati, A. Wieser

1. Introduzione

Negli ultimi anni il laser scanning aereo è divenuto un metodo piuttosto diffuso per misurare la profondità dei fondali a distanza, v. Gao (2009). In particolare, in caso di fondali relativamente bassi, la cosiddetta batimetria laser si è configurata come un'efficiente alternativa all'uso dell'ecometro e talvolta l'unico metodo profittevole. Il suo impiego comporta di regola alti costi e lunghi tempi di preparazione. In più, accuratezza e risoluzione spaziale sono limitate dalla quota di volo e dalla divergenza del raggio; inoltre, occlusioni dovute a vegetazione o edifici possono compromettere la completezza del rilevamento.

Per campagne particolarmente dettagliate o di dimensioni modeste, la batimetria laser terrestre si pone come una variante di evidente interesse, v. Smith et al. (2012), Smith e Vericat (2014). Questa

tecnica consiste nella misurazione del fondale con un laser scanner terrestre e comporta in primo luogo la modellazione di due fenomeni fisici che influenzano fortemente le misure: l'assorbimento in acqua, che limita il campo di misura dello strumento, e la rifrazione, soprattutto all'interfaccia aria-acqua, che rende necessaria la correzione degli angoli e delle distanze misurate.

Come mostrato in figura 1, non tutte le lunghezze d'onda del raggio laser si confanno alle misure batimetriche. Mentre l'intensità della luce blu-verde con lunghezza d'onda di circa 500 nm è dimezzata da uno strato d'acqua spesso 30 m circa (strato emivalente), basta uno strato di soli 0.6 mm per dimezzare l'intensità di un laser infrarosso con lunghezza d'onda di circa 1400 nm. Per questo motivo, la luce emessa dai laser utilizzati per applicazioni di batimetria aerea appartiene di norma allo spettro verde.

Nella figura sono mostrate indicativamente le lunghezze d'onda di alcuni laser scanner terrestri attualmente in commercio. Sebbene questi valori non bastino per determinare la profondità massima raggiungibile, l'illustrazione fornisce chiare

indicazioni circa quali laser scanner siano più o meno indicati per applicazioni batimetriche.

Contestualmente alla redazione una tesi di master, abbiamo indagato teoricamente e sperimentalmente nel campo della batimetria laser facendo uso di una selezione di laser scanner terrestri. Nel presente articolo riassumiamo i nostri risultati, con particolare considerazione di quelli ottenuti grazie allo strumento Leica Multistation MS50. Mostriamo inoltre che questo strumento è in grado di misurare attraverso l'acqua fondali poco profondi. Gli esperimenti sono stati condotti presso il Laboratorio di Idraulica, Idrologia e Glaciologia (VAW) del Politecnico Federale di Zurigo (ETH Zürich), dove la misura di modelli idraulici in scala rappresenta un caso applicativo della tecnologia sotto esame.

2. Modellazione della propagazione del segnale

Il segnale si propaga dallo scanner dapprima attraverso l'atmosfera fino alla superficie dell'acqua (in verde, in figura 2). Il rallentamento del segnale dovuto alla densità e alla composizione dell'aria è descritto dalle note correzioni meteorologiche per distanziometri. Per misure a corta distanza (poche decine di metri nei casi considerati) e buone condizioni di visibilità, l'assorbimento (ossia l'indebolimento del segnale) in atmosfera è trascurabile. È altresì trascurabile la curvatura della traiettoria del segnale dovuta al gradiente dell'indice di rifrazione trasversale alla direzione di propagazione.

Dove il fascio luminoso penetra la superficie dell'acqua, una frazione dell'energia incidente è riflessa a dipendenza della sua polarizzazione e dell'angolo d'incidenza. La quota di energia riflessa può essere calcolata grazie alle equazioni di Fresnel (Hecht, 2011). Per luce non polarizzata il cui angolo di incidenza varia da 90° (ossia ortogonale alla superficie dell'acqua) a 12°, la frazione riflessa varia dal 5 al 50 %, rispettivamente. Per angoli di incidenza minori la quasi totalità dell'energia incidente viene riflessa.

1 Olgiati L. (2015) Investigation of Short-range Laser Bathymetry using Terrestrial Laser Scanners. Tesi di Master, ETH Zürich, IGP.

La deviazione del fascio luminoso presso la transizione dall'aria all'acqua può essere descritta grazie alla legge di Snell, noti l'angolo d'incidenza e l'indice di rifrazione dell'acqua (1.33 circa). Altri parametri coinvolti sono la pressione atmosferica, la temperatura dell'acqua, la salinità ed ulteriori grandezze, su tutte l'altezza della superficie dell'acqua rispetto al centro strumentale del laser scanner. Inoltre, se la superficie dell'acqua è increspata, sia la rifrazione che la riflessione parziale all'interfaccia aria-acqua possono essere descritte solo in modo stocastico.

Noto l'indice di rifrazione del mezzo, la velocità di propagazione del laser è calcolabile e descrivibile in modo analogo in aria od in acqua. Inoltre, la curvatura del fascio può essere calcolata numericamente mediante tecniche di ray tracing. L'indebolimento del segnale attraverso lo strato d'acqua può essere calcolato grazie alla conoscenza del coefficiente di assorbività molare o dello strato emivalente del materiale.

In generale, la radiazione incidente sul fondale viene riflessa in modo diffuso. Tuttavia, l'intensità del segnale riflesso dipende anche dalle proprietà del materiale del fondale. In prima approssimazione, la riflessione e indebolimento del segnale sul fondo possono essere descritte col modello di Oren-Nayar (Oren e Nayar, 1994). La frazione di energia riflessa che torna al sensore dello scanner subisce durante il suo tragitto i medesimi effetti già incontrati ma ovviamente in ordine inverso (in rosso, in figura 2).

L'indebolimento del segnale dovuto all'assorbimento ed alla riflessione parziale all'interfaccia condizionano il rumore del segnale, la quantità di punti misurati (massima distanza misurabile in acqua) e la precisione dei valori misurati. Questi aspetti non verranno ulteriormente trattati in questo articolo.

Come mostrato in figura 3, la deviazione ed il rallentamento dovuti alla rifrazione influenzano fortemente le misure stesse e devono assolutamente essere corretti con opportune riduzioni. A seconda dell'angolo di incidenza e della profondità dell'acqua questi effetti possono indurre

deviazioni grandi fino a dieci volte la profondità dell'acqua. Si nota poi che, a causa dell'incertezza sulla posizione e forma della superficie dell'acqua, la curvatura del raggio può venire trascurata ed una correzione basata sul calcolo approssimativo del punto di ingresso del segnale in acqua è sufficiente per questo tipo di applicazioni.

3. Applicazioni sperimentali

Al fine di verificare le funzioni di correzione e l'utilizzabilità di una MS50 per la batimetria laser, sono state eseguite diverse acquisizioni di un canale nel laboratorio del Laboratorio di idraulica, idrologia e glaciologia (VAW) del Politecnico Federale di Zurigo. Il canale mostrato in figura 4 ha una lunghezza di 30 m circa, il fondo ha una larghezza di 2 m e pendenza costante dell'1,7 ‰, la sezione è uniforme e la superficie omogenea. La MS50 è stata posta circa 3 m sopra la superficie dell'acqua. Grazie alla configurazione sperimentale si sono potute effettuare misure con diversi livelli dell'acqua nel canale, così come misure di riferimento a canale vuoto. Ciò ha permesso di valutare sia la precisione sia l'accuratezza dei risultati delle acquisizioni. Inoltre, si sono potuti provare diversi metodi per la determinazione della quota dell'acqua a partire dalle misure stesse, senza l'uso d'informazioni aggiuntive. In future fasi di esercizio dell'impianto, il canale conterrà anche sedimenti: la modellazione del fondale verrebbe notevolmente semplificata grazie a questa tecnica, in quanto l'ottenimento d'informazioni geometriche come la quantificazione della stratificazione dei sedimenti sarà più semplice e celere.

Al fine di determinare un modello di riferimento, il canale è stato preliminarmente scansionato in condizioni asciutte con tre diversi strumenti (Leica P15, Zoller+Fröhlich 5006i, Leica MS50). Le nuvole di punti ottenute sono state coregistrate con l'aiuto di target sferici posti su ambo i lati del canale e quindi ulteriormente elaborate in Geomagic (rimozione degli outlier, triangolazione). Le deviazioni verticali dei

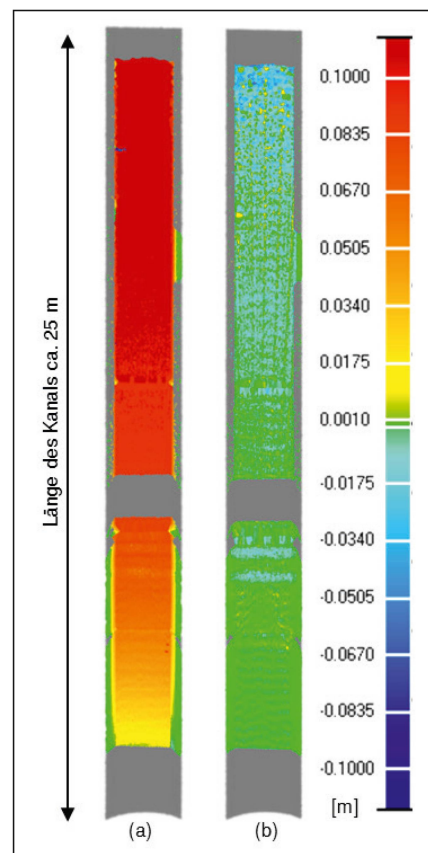


Fig. 5: Deviazioni verticali della nuvola di punti misurati attraverso l'acqua rispetto al modello di riferimento (altezza dell'acqua di 150 mm ca.), senza correzione (a) e con correzione (b).

Abb. 5: Vertikale Abweichungen der Punktwolke vom Referenzmodell bei Scan durchs Wasser (MS50; ca. 150 mm Wasserhöhe), ohne Korrektur (a) bzw. mit Korrektur (b).

punti delle singole scansioni rispetto alla referencia così calcolata mostrano un livello di rumore (RMSE) di circa 1.3 mm. Diverse sovrastrutture poste trasversalmente al canale (v. figura 4) ne occludono in parte la misura; pertanto, i punti appartenenti a queste sovrastrutture sono stati eliminati. Inoltre, anche le zone nascoste sono state escluse dall'analisi poiché non è stato possibile ivi determinare una superficie di riferimento. Per ragioni di semplicità, tutte le scansioni sono state eseguite da un singolo punto di osservazione. Circa il confronto delle scansioni, queste sono state condotte in momenti diversi misurando diverse altezze dell'ac-

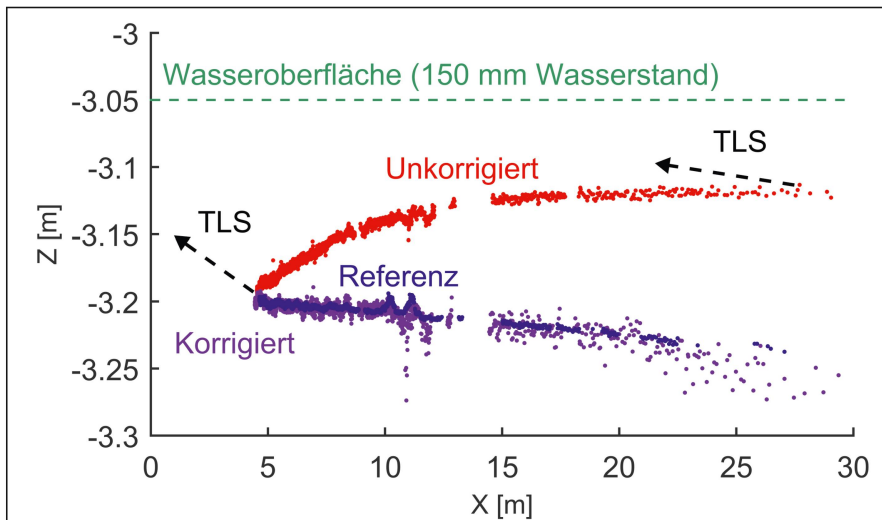


Fig. 6: Profili longitudinali del modello di riferimento, della nuvola di punti corretta e della nuvola di punti non corretta. Altezza dell'acqua: 150 mm (scala verticale della rappresentazione esagerata).

Abb. 6: Referenzmodell, unkorrigierte und korrigierte Punktwolke eines Längsprofils bei ca. 150 mm Wasserhöhe (stark überhöhte Darstellung).

qua; perciò sei target sferici sono stati lasciati montati su ambo i lati del canale ai fini della successiva registrazione.

La figura 5a mostra che i punti più lontani dallo scanner, misurati da un raggio laser che incide in modo fortemente obliquo sulla superficie dell'acqua, appaiono tutti al di sopra del livello reale dell'acqua, e che le deviazioni ammontano sino a 120 mm nel caso lo strato d'acqua sia spesso 150 mm. Invece, dopo aver applicato le correzioni geometriche relative alla rifrazione presso l'interfaccia aria-acqua ed al rallentamento del raggio in acqua, la nuvola di punti ricalca la forma del fondale con un'accuratezza considerevolmente maggiore (v. figura 5b). Gli ordini di grandezza in gioco e gli effetti delle correzioni sono ben riconoscibili in figura 6, che rappresenta un arbitrario profilo longitudinale del canale.

La statistica di questi risultati sperimentali è riassunta in figura 7, dove le nuvole di punti presentate in figura 5 sono state suddivise in classi a dipendenza della distanza orizzontale dallo scanner. Per ogni classe sono stati calcolati il valor medio e la deviazione standard. In più, la figura mostra l'errore sistematico (valor medio delle deviazioni) così come l'angolo d'incidenza del fascio laser sulla superficie

dell'acqua. Sino ad un angolo di incidenza di circa 11° , ossia fino ad una distanza di 16 m, sia il valor medio che la deviazione standard non superano i 5 mm. Per

punti più vicini allo scanner (angolo d'incidenza minore di 20°) la qualità della nuvola di punti corretta è assimilabile a quella di riferimento ottenuta scansando il canale asciutto. Maggiore l'angolo di incidenza, maggiore la deviazione residua non corretta. Gli esperimenti condotti mostrano che il minimo angolo d'incidenza per cui la misura è ancora possibile corrisponde a 5° circa ed in tale situazione la profondità del fondale viene sottostimata del 20 %. La figura 7 denota che in caso di misure molto oblique si assiste ad una crescente dispersione dei valori. Inoltre, la figura 7 suggerisce chiaramente che alcuni errori sistematici persistono e che la correzione geometrica può essere ulteriormente migliorata.

L'errore sistematico residuo non è riconducibile né ad una né alla somma delle seguenti potenziali cause: curvatura del raggio in acqua, pendenza del fondale, stima imprecisa del coefficiente di rifrazione dell'acqua, misura inaccurata dell'altezza dell'acqua. Ulteriori ricerche potranno chiarire se questo errore sistematico sia

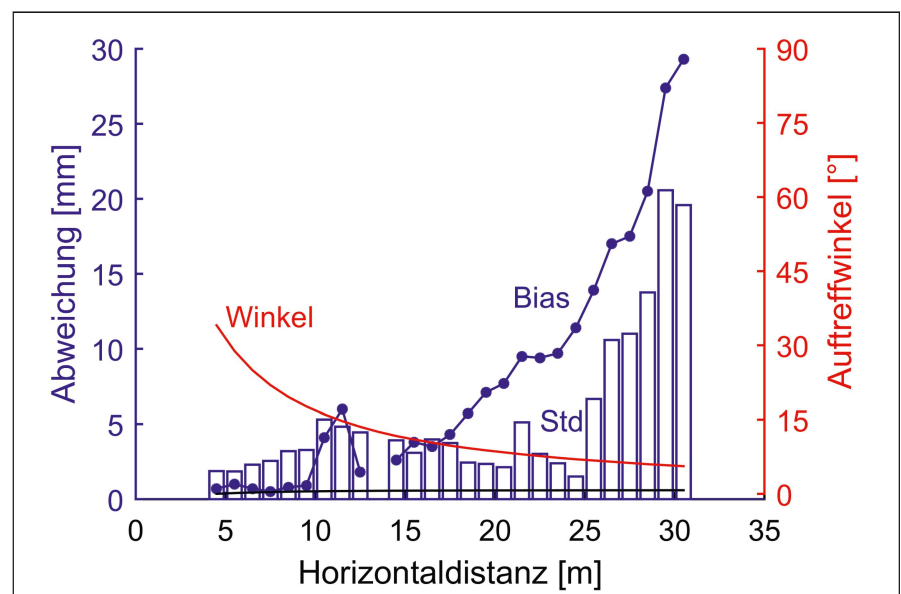


Fig. 7: Deviazione standard campionaria (std) e valor medio degli scarti verticali fra la nuvola di punti corretta e la referencia (bias) al variare della distanza orizzontale dallo scanner e dell'angolo di incidenza del fascio laser sulla superficie dell'acqua (profondità 150 mm).

Abb. 7: Empirische Standardabweichungen und Mittelwerte der vertikalen Abstände zwischen korrigierter Punktwolke und Referenzmodell in Abhängigkeit von Entfernung bzw. Auftreffwinkel der Laserstrahlen auf der Wasseroberfläche (150 mm Wasserhöhe).

riconducibile alle irregolarità della superficie dell'acqua (onde, increspature) od alle proprietà del fondale bagnato e se possa essere calcolato e quindi corretto. Alcune considerazioni teoriche indicano che il principale contributo all'incertezza sulla nuvola di punti corretta consiste nell'errore di determinazione dell'altezza dell'acqua. Più in dettaglio, con determinazione dell'altezza dell'acqua si intende la conoscenza della posizione del punto di incidenza del fascio laser sulla superficie dell'acqua e del versore localmente normale alla superficie. I diversi approcci usati per determinare automaticamente queste grandezze (identificazione di variazioni brusche dell'intensità del segnale riflesso, analisi della deformazione fittizia del fondale che intercorre fra misure ottenute con diverse altezze dell'acqua, localizzazione di pieghe apparenti in elementi rettilinei o planari parzialmente sommersi) si sono mostrati efficaci solo se si misurano superfici dalle proprietà geometriche e radiometriche adeguate e sommerse da acque lente o minimamente increspate. Nel caso della MS50, non si è riusciti ad identificare la superficie dell'acqua analizzando le riflessioni multiple o la massa sospesa. Inoltre, nei succitati esperimenti l'altezza dell'acqua è stata misurata grazie all'ecometro integrato nel sistema di regolazione del flusso, mentre la superficie dell'acqua è stata assunta orizzontale.

Al momento, la batimetria laser con la MS50 presuppone una superficie dell'acqua calma ed orizzontale, la cui posizione va stimata separatamente, possibilmente grazie ad un corpo galleggiante o infisso sul fondo (ad es. una stadia verticale) la

cui parte sommersa sia riconoscibile nella nuvola di punti acquisita.

4. Riassunto

Pur con limitazioni circa le accuratezze raggiungibili, il laser scanning terrestre, se effettuato con un fascio laser appartenente allo spettro visibile nel campo incluso fra il verde ed il rosso, può trovare applicazione anche per misure a corto raggio attraverso l'acqua. Lo abbiamo qui mostrato presentando l'esempio della Leica MS50. Nel misurare un fondale a una profondità di 150 mm abbiamo riscontrato distorsioni di pochi mm per angoli d'incidenza del raggio maggiori di 11°. Ulteriori indagini aiuteranno a chiarire le cause degli errori sistematici residui ed a stimare la massima profondità per cui la batimetria laser terrestre è praticabile in funzione dei parametri strumentali, della qualità dell'acqua e della conformazione del fondale.

Sebbene questa tecnica non rappresenti una nuova applicazione standard per laser scanner terrestri, l'ampliamento del campo di utilizzo dello strumento rende possibile affrontare in modo più efficiente alcuni problemi particolari. Oltre al monitoraggio di modelli idraulici già presentato, le possibili applicazioni includono il rilievo continuo di sponde, scarpate e fondali lacustri e la misurazione di strutture sommerse.

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano il VAW, ed in particolare Fabian Friedl, per lo stimolo a condurre questa ricerca e per il supporto offerto durante le misure.

Bibliografia:

- Gao J (2009) Bathymetric mapping by means of remote sensing: methods, accuracy and limitations. *Progress in Physical Geography* 33(1), 103-116.
- Hale GM, Query MR (1973) Optical Constants of Water in the 200-nm to 200- μ m Wavelength Region. *Applied Optics* 12/3, 555-563.
- Hecht E (2011) *Optics*, Addison Wesley, 113-116.
- Oren M, Nayar SK (1994) Generalization of Lambert's reflectance model. *Proceedings of the 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, 239-246.
- Smith MW, Vericat D (2014) Evaluation shallow-water bathymetry from through-water terrestrial laser scanning under a range of hydraulic and physical water quality conditions. *River Res. Applic.* 39, 905-924.
- Smith M, Vericat D, Gibbins C (2012) Through-water terrestrial laser scanning of gravel beds at the patch scale. *Earth Surf. Process. Landforms* 37, 411-421.

Eugenio Serantoni
Luca Olgiati
Prof. Dr. Andreas Wieser
Geosensors and Engineering Geodesy
Institute of Geodesy and Photogrammetry
ETH Zürich
Stefano-Franscini-Platz 5
CH-8093 Zürich
wieser@geod.baug.ethz.ch