

## APPLICAZIONE DELLA TECNOLOGIA LIDAR PER LO STUDIO DEI CORSI D'ACQUA

### APPLICATION OF LIDAR TECHNOLOGY FOR RIVERS ANALYSIS

MARCO CAVALLI(\*) & PAOLO TAROLLI(\*\*)

(\*) Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica - Corso Stati Uniti, 4 - 35127 Padova, Italy  
E-mail: marco.cavalli@irpi.cnr.it

(\*\*) Università degli Studi di Padova, Dipartimento Territorio e Sistemi Agroforestali - Viale dell'Università, 16 - 35020 Legnaro (PD), Italy  
E-mail: paolo.tarolli@unipd.it

#### RIASSUNTO

Poter disporre di dettagliati dati topografici è un requisito fondamentale per lo studio dell'ambiente fluviale sia in termini qualitativi che quantitativi. Infatti, i dati topografici forniti dalle tradizionali carte topografiche regionali sono spesso non sufficientemente accurati per consentire l'individuazione e la mappatura delle morfologie presenti mentre, a fronte di una maggiore accuratezza, i rilievi di terreno (teodolite, GPS), richiedono notevoli risorse temporali e finanziarie. Il LiDAR (Light Detection And Ranging) aereo consente l'acquisizione di dati topografici ad alta risoluzione, con accuratezza verticale ed orizzontale di pochi centimetri, su vaste aree, contribuendo significativamente ad una migliore rappresentazione della superficie terrestre a costi sempre più accessibili. Un aspetto particolarmente qualificante di questa recente tecnologia, che la rende decisamente vantaggiosa rispetto alle tradizionali tecniche di rilievo del territorio, è la capacità di derivare modelli digitali del terreno (DTM) ad alta risoluzione (~ 1 m) a partire dai soli punti corrispondenti al suolo generati rimuovendo dalla nuvola di punti originaria, con processi di filtraggio automatizzati, i punti relativi alla vegetazione e a strutture antropiche (case, ponti). La complessità morfologica, la varietà di copertura del suolo e la presenza di corpi idrici, che notoriamente caratterizzano l'ambiente fluviale, rendono l'applicazione del LiDAR aereo in questo contesto più complicata rispetto ad altri ambiti. L'obiettivo di questo contributo è quello di mettere in luce potenzialità e limiti del LiDAR aereo nello studio dei corsi d'acqua, presentando alcune significative ricerche ed i principali aspetti metodologici di questa tecnologia in ambiente fluviale.

**PAROLE CHIAVE:** DTM, LiDAR aereo, LiDAR batimetrico, geomorfologia fluviale

#### INTRODUZIONE

La morfologia del terreno riveste un ruolo fondamentale nella comprensione, modellazione ed analisi dei processi fisici ad essa correlati. La necessità di avere a disposizione modelli digitali del terreno sempre più accurati, per rispondere alle più svariate esigenze di studio del territorio, è sempre più pressante. Numerose sono le applicazioni, nelle ultime due decadi, che utilizzano rappresentazioni digitali della morfologia del terreno come base informativa fondamentale in vari settori

#### ABSTRACT

The availability of high resolution topographic data is strategic for quantitative and qualitative analysis of river environment. The topographic data derived by traditional regional cartography are often too coarse for detailed recognition and mapping of surface morphologic features, while the more accurate data derived by GPS or theodolite are expensive and time-consuming. The airborne laser altimetry technology (LiDAR, Light Detection And Ranging) provides high-resolution topographic data over large areas with high vertical and horizontal accuracy, thus can significantly contribute to a better representation of land surface. A valuable characteristic of this technology, which marks advantages over the traditional topographic survey techniques, is the capability to derive a high-resolution (~ 1 m) Digital Terrain Model (DTM) from the bare ground LiDAR data, by filtering vegetation and man-made features points (buildings, bridges) from raw data. The complex morphology, the wide range of land cover categories, and the presence of deep water bodies, make the airborne LiDAR application in river environments more complicated than application in different contexts. The aim of this work is to highlight the capabilities but also the limitations of airborne LiDAR in river studies, presenting some relevant researches and the main methodological aspects of this technology in fluvial environment.

**KEY WORDS:** DTM, airborne LiDAR, bathymetric LiDAR, fluvial geomorphology

#### INTRODUCTION

The surface morphology plays a key role in understanding, modeling and analyzing the earth surface processes. The need of high DTM resolution and accuracy for analyses related to earth surface is a critical issue in the earth science research. In the last two decades several applications used the digital representation of surface morphology as the fundamental layer for engineering and environmental modeling, planning and management. Even the research in hydrology

applicativi dell'ingegneria e della pianificazione e gestione territoriale, come pure per finalità di ricerca in geomorfologia ed idrologia. In questo senso, la tecnologia LiDAR (Light Detection and Ranging) rappresenta uno strumento in grado di contribuire significativamente ad una miglior rappresentazione della morfologia del terreno mediante il rilievo ad alta risoluzione della topografia e, dunque, ad una migliore analisi dei processi di superficie ad essa connessi (TAROLLI *et alii*, 2009).

Le tecniche fotogrammetriche, che rappresentano la metodologia tradizionale di costruzione dei modelli digitali, risultano sufficientemente accurate per le zone prive di ostacoli mentre sono limitate nelle aree caratterizzate da vegetazione, specialmente se densa ed ad alto fusto. È proprio in questi ambiti che il LiDAR aereo si dimostra più efficiente rispetto ai metodi tradizionali. Un aspetto particolarmente qualificante di questa recente tecnologia, che la rende decisamente vantaggiosa rispetto alle tradizionali tecniche di rilievo del territorio, è la capacità di discernere, con processi di filtraggio automatizzati, i punti relativi agli oggetti giacenti al di sopra del terreno, come vegetazione ed edifici, da quelli corrispondenti al suolo. Pur non essendo una tecnologia esente da problematiche, in ambito fluviale legate soprattutto all'assorbimento dell'impulso laser da parte delle superfici bagnate, e che spesso richiede l'intervento di un operatore esperto per ottenere risultati accurati, il LiDAR aerotrasportato rappresenta uno strumento di estremo interesse per derivare Modelli Digitali del Terreno (DTM) ad alta risoluzione di zone molto articolate e complesse come sono le piane inondabili dei grandi fiumi o i piccoli bacini dei corsi d'acqua montani. Questi modelli del terreno forniscono una base informativa migliore che consente di rendere più efficace l'utilizzo di metodi tradizionali, nonché di sviluppare nuove metodologie d'analisi, per la caratterizzazione morfologica ed idrologica di queste aree, fondamentali per lo studio e la comprensione dei processi relativi all'idrologia ed alla dinamica del sedimento (TAROLLI & DALLA FONTANA, 2009). Quando la profondità del corpo d'acqua è elevata, il LiDAR batimetrico, denominato anche *green* LiDAR, può essere d'aiuto in quanto garantisce una buona penetrazione nell'acqua.

L'obiettivo di questo contributo è quello di mettere in luce potenzialità e limiti della tecnologia del LiDAR aereo, presentando alcune significative ricerche ed applicazioni nello studio dei corsi d'acqua.

## LA TECNOLOGIA LIDAR

Il termine LiDAR indica un sensore laser, più o meno complesso, per la misura di distanze, rispetto ad un bersaglio, senza alcun riferimento alla piattaforma (terrestre o aerea) sulla quale il sensore è montato. Alcuni autori propongono l'utilizzo del termine di *Airborne Laser Scanning* (ALS) (WEHR & LOHR, 1999) quando si vuole fare riferimento agli apparati laser scanner montati su elicotteri o aeroplani per distinguerlo dal sistema LiDAR terrestre. In questo lavoro, per semplicità, sarà utilizzato il termine generico LiDAR per indicare la scansione laser da aeromobile; nello specifico distingueremo dal punto di vista terminologico i due sensori che verranno descritti, rispettivamente il LiDAR topografico e LiDAR batimetrico. La tecnologia LiDAR

and geomorphology benefits a lot from the growing availability of digital topographic data. For such applications, LiDAR technology has really played a key role since it allows a better earth surface representation, and it improves the understanding of related earth surface processes (TAROLLI *et alii*, 2009).

The traditional photogrammetric techniques are useful and sufficiently accurate for the analysis of surfaces free of obstacles as canopy cover, while they present several limitations for the digital representation of terrain surface of vegetated areas, especially of dense forest stands. In this context LiDAR technology is more efficient than traditional techniques. A valuable characteristic of LiDAR technology compared to traditional photogrammetric techniques is the capability to derive topographic data related to bare ground surface by automatically filtering vegetation and man-made features points. Although for river environment studies this technology presents some limitations due to the fact that laser pulse does not penetrate deep water, LiDAR is surely an interesting tool for deriving high resolution Digital Terrain Models (DTM) of complex areas, such as river floodplains or small headwater catchments. LiDAR derived DTMs provide a best type of informative layer. They allow a more efficient application of traditional methods, the development of new of analysis methodologies and a finer morphological and hydrological characterization of these areas, thus they improve the understanding of hydrological and sediment transport processes (TAROLLI & DALLA FONTANA, 2009). When the water is deep, the bathymetric LiDAR also known as *green* LiDAR, overcomes the limitations of topographic airborne LiDAR.

The aim of this work is to highlight capabilities and limitations of airborne LiDAR technology, presenting some researches and applications in river environment studies.

## THE LIDAR TECHNOLOGY

The term LiDAR is related to a laser sensor for the measure of target distance and applies to both terrestrial and aerial platforms. Some authors suggested the term *Airborne Laser Scanning* (ALS) (WEHR & LOHR, 1999) when the laser is mounted on helicopter or airplane, in order to distinguish it from terrestrial LiDAR system. In this work, we use the term LiDAR for the airborne laser scanning. In the text we adopted two different terminologies related to the two different sensors described: topographic LiDAR and bathymetric LiDAR. The LiDAR technology (BALTSAVIAS, 1999; CASELLA, 2003) consists in a topographic survey by an airborne laser that measures the distance between the emitted and the received signal backscat-

(BALSAVIAS, 1999; CASELLA, 2003) è basata sulla scansione del territorio sorvolato da un aereo o da un elicottero per mezzo di un telemetro laser che misura la distanza tra il punto di emissione, rappresentato dal telemetro, ed il punto di riflessione corrispondente ad un generico punto appartenente alla superficie rilevata colpito dal laser (Fig. 1). Nel LiDAR topografico l'impulso elettrico prodotto da un generatore crea un raggio di luce infrarossa (lunghezza d'onda  $\lambda = 1064$  nm), con una divergenza variabile a seconda della qualità dello strumento; il segnale riflesso dall'elemento colpito viene captato da un fotodiodo ricevitore che genera un segnale elettrico di ricezione. Il telemetro misura il tempo  $\Delta t$ , denominato tempo di volo, impiegato dall'impulso laser a percorrere il percorso di andata e ritorno. Il tempo di volo è misurato tramite un orologio con una frequenza stabilizzata al quarzo. La distanza di presa ( $D$ ) è una funzione del tempo di volo  $\Delta t$ :

$$D = \frac{\Delta t \cdot c}{2} \quad (1)$$

dove  $c$  rappresenta la velocità di propagazione del segnale e, quindi, in questo caso, della velocità della luce ( $3 \cdot 10^8$  m/s).

Il risultato fondamentale di un rilievo LiDAR è la restituzione delle coordinate  $x$ ,  $y$ ,  $z$  di ogni misura. Per calcolare le coordinate dei punti colpiti, oltre alla distanza fra il velivolo ed il punto a terra, è necessario conoscere anche la posizione e l'assetto del velivolo in ogni istante. A questo scopo sono integrati nel sistema LiDAR aerotrasportato un sistema inerziale (INS/IMU) che determina l'assetto del velivolo rilevando i tre gradi di libertà dovuti a rollio, beccheggio e deriva ed un GPS che determina la posizione assoluta del telemetro rispetto al sistema di coordinate di riferimento. Una volta determinati mediante i sensori GPS ed INS/IMU le coordinate del telemetro e l'orientamento della retta normale all'aereo, è possibile ricavare l'equazione della retta passante per il sensore montato sull'aereo ed il punto colpito dall'impulso laser. La conoscenza della distanza fra i due punti consente, infine, di ricavare le coordinate  $x$ ,  $y$ ,  $z$  del punto bersaglio. Alcuni strumenti misurano, oltre al tempo di volo necessario per determinare la posizione del punto colpito, l'intensità del segnale di ritorno. L'intensità laser è un'informazione particolarmente interessante in quanto rispecchia direttamente le caratteristiche fisiche di riflettanza delle superfici colpite.

Una delle caratteristiche di maggior delicatezza della tecnologia LiDAR è la dimensione variabile dell'impronta a terra del raggio laser. La dimensione dell'impronta del raggio laser può variare da circa 0.1 m a 2 m ed è proporzionale all'altitudine e all'apertura angolare del sensore e consente di generare echi multipli: ad esempio, quando un raggio incontra la chioma di un albero, una parte del segnale viene riflessa, mentre la rimanente prosegue fino a terra per essere riflessa successivamente. Le riflessioni multiple aumentano notevolmente la probabilità che, anche in zone boscate, una parte dei raggi raggiunga il terreno determinando la quota dei punti a terra. Esse infatti vengono registrate dal ricevitore in tempi diversi consentendo già una prima discriminazione in fase di registrazione: il primo eco di ritorno (*first pulse*) corrisponderà al primo oggetto incontrato (ad es. chioma di un albero) mentre l'ul-

terato dal oggetto superficie (Fig. 1). In topografico LiDAR il laser pulse consists of an infrared beam (wavelength usually 1064 nm) with a divergence related to the quality of the instrument used. The signal reflected by the object surface is then captured by a photodiode detector which generates an electric receiver signal. The range finder measures the time of flight  $\Delta t$  of a light pulse, as the time between the emitted and received pulse. The time of flight is recorded by a quartz clock. The distance between the ranging unit and the target ( $D$ ) is a function of travelling time  $\Delta t$ :

where  $c$  is the speed of signal propagation, in this case the speed of light ( $3 \cdot 10^8$  m/s).

The final result of a LiDAR survey is the return of  $x$ ,  $y$ ,  $z$  coordinates related to each measured pulse. For the determination of the laser pulse coordinates it is also necessary to know aircraft locations and stability in real time. This is possible because the aircraft is endowed with an Inertial Measurement Unit (INS/IMU), that assess its stability, and with an integrated GPS that records the absolute locations of the telemeter with respect to a known coordinate system. When the telemeter coordinates and the direction of the normal aircraft line vector are determined, it is possible to derive the equation of the line vector between the airborne sensor and the surface target. From the distance between these two points it is possible to derive the target  $x$ ,  $y$ ,  $z$  coordinates. Some instruments, in addition to the flight time required to record the target position, have the capability to measure also the intensity of returned pulse. This information is useful since it is directly related to reflectance of objects on the earth surface.

One of the most critical issue of this technology is the size of ground footprint of each pulse. The footprint size may range from 0.1 m to 2 m. It is proportional to the altitude and angular divergence of the laser, and it allows the generation of multiple return signals. Usually when the laser beam reaches a tree crown, part of the signal is immediately reflected, while part reaches the bare ground surface and then it is reflected. The multiple returns increase the probabilities for part of ground surface to be surveyed within high density vegetated areas. Returns are recorded by the receiver within different times and this allows a first classification: the first recorded return of a single beam (first pulse) is related to the first highest object (e.g. vegetation), while the last one (last pulse) is related to the bare ground surface (Fig. 2). Raw LIDAR data, that contain information related to vegetation, buildings, technological lines and birds, may be processed by filtering algorithms, after choosing an appropriate

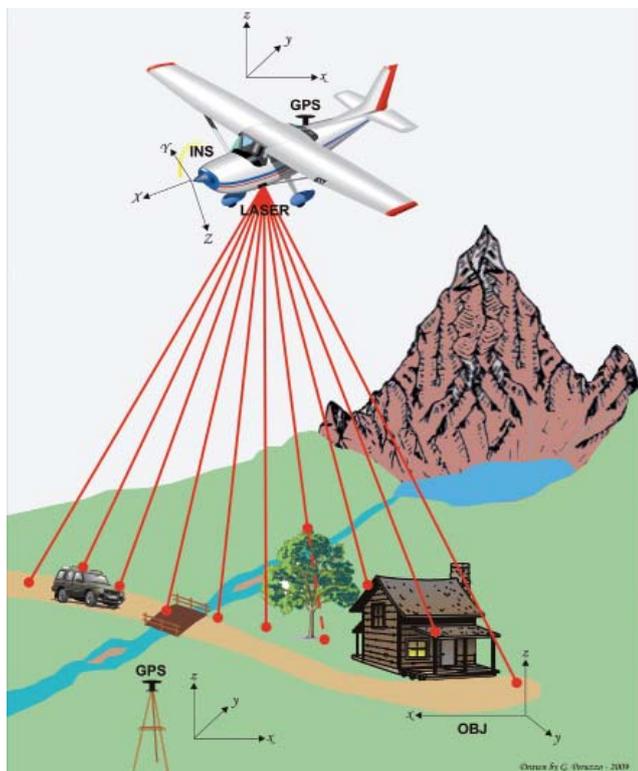


Fig. 1 - Componenti e funzionamento del sistema LiDAR aerotrasportato  
- Main components and example how airborne LiDAR works

timo (*last pulse*) è riconducibile alla quota del terreno sotto copertura (Fig. 2). Mediante opportune operazioni di post-processamento basate sull'utilizzo di algoritmi di filtraggio della nuvola di punti rilevati in origine (*raw data*), che contiene quindi dati relativi ad eventuale vegetazione, edifici, veicoli, cavi di linee elettriche, uccelli in volo etc., è possibile derivare mediante la scelta di un opportuno metodo di interpolazione il Modello Digitale del Terreno (DTM) (PIROTTI & TAROLLI, 2010) costituito dalle quote dei soli punti a terra. Si parla, invece, di Modello Digitale delle Superfici (DSM) nel caso di un modello digitale costruito a partire dai dati LiDAR non filtrati.

È importante segnalare che le superfici di profondi corpi d'acqua non riflettono il segnale con le sole eccezioni nel caso di acqua torbida o dell'utilizzo di LiDAR batimetrico. Il LiDAR batimetrico, il cui principio di funzionamento è uguale a quello del LiDAR topografico, emette impulsi laser sia alla lunghezza d'onda del verde ( $\lambda = 532 \text{ nm}$ ) sia dell'infrarosso ( $\lambda = 1064 \text{ nm}$ ). La lunghezza d'onda dell'infrarosso è riflessa dall'acqua, mentre la lunghezza d'onda del verde penetra l'acqua e viene riflessa quando raggiunge il fondo o un oggetto. Per questo motivo il LiDAR batimetrico è anche chiamato *green LiDAR*. Una volta che il sensore ha registrato il segnale di ritorno dei due impulsi le distanze sensore-superficie dell'acqua e sensore-fondale sono calcolate considerando la velocità della luce nell'aria e nell'acqua. In condizioni

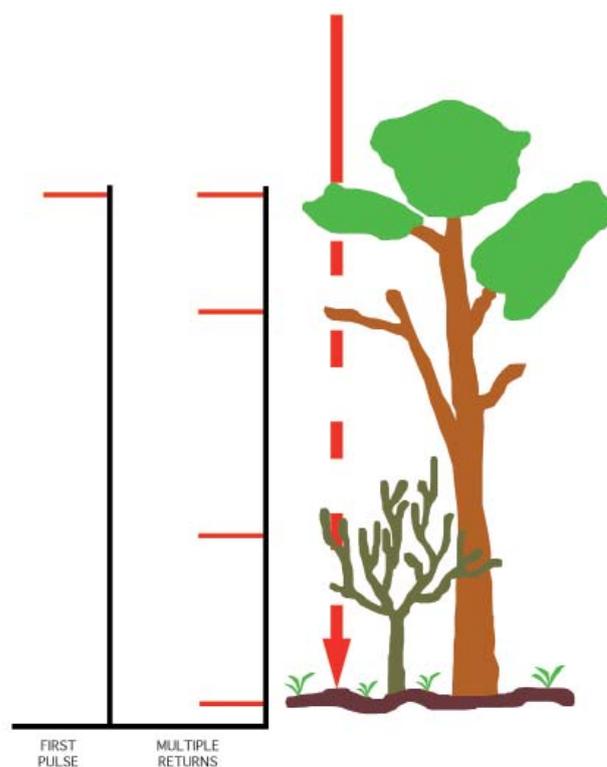


Fig. 2 - Le riflessioni multiple dell'impulso laser  
- Multiple returns of laser pulse

interpolation method, in order to derive the Digital Terrain Model (DTM) (PIROTTI & TAROLLI, 2010) from bare ground data. Differently, a Digital Surface Model (DSM) is derived by LiDAR data without any filtering process.

It is important to remember that the deep water surfaces normally do not reflect the signal: however this is not true in case of presence of floating sediments or when using bathymetric LiDAR. The bathymetric LiDAR, that is based on the same principles as topographic LiDAR, emits laser beams in two wavelengths: an infrared (1064 nm) and a green one (532 nm). The infrared wavelength is reflected on the water surface, while the green one penetrates the water and is reflected by the bottom surface or other objects in the water. Due to this reason the bathymetric LiDAR is also called *green LiDAR*. The laser records the returned signal of the two pulses: instrument-water surface, instrument-channel bed. The distances are then derived considering the speed of light within air and water. During optimal environment condition, when the water is clear, the green LiDAR survey may reach 50 m water depth with an horizontal accuracy of  $\pm 2.5 \text{ m}$ , and vertical accuracy of  $\pm 0.25 \text{ m}$ . Recently, this technology is growing fast, and some of the first applications in the river environments are coming (HILLDALE & RAFF, 2008; MCKEAN *et alii*, 2009).

ottimali e quindi, con acqua particolarmente limpida, la profondità di penetrazione può raggiungere i 50 m con un'accuratezza orizzontale di  $\pm 2.5$  m e accuratezza verticale di  $\pm 0.25$  m. Recentemente questa tecnologia sta avendo un notevole sviluppo e destando interesse anche per studi in ambito fluviale (HILLDALE & RAFF, 2008; MCKEAN *et alii*, 2009).

### APPLICAZIONI AI CORSI D'ACQUA

La possibilità di condurre veloci ed accurati rilievi topografici di vaste aree ad un costo sempre più accessibile, assieme alla capacità di acquisire simultaneamente altri dati da sensore remoto, come ortofoto ad alta risoluzione ed immagini iperspettrali, hanno reso la tecnica LiDAR un importante strumento per diversi campi di applicazione connessi alla pianificazione e gestione del territorio. In campo geomorfologico sono diffuse le ricerche riguardanti l'utilizzo del LiDAR topografico per caratterizzare grandi movimenti franosi (MCKEAN & ROERING, 2004; GLENN *et alii*, 2006), per la definizione di inventari di frane (VAN DEN ECKHAUT *et alii*, 2005; ARDIZZONE *et alii*, 2007) e per il riconoscimento di forme deposizionali sui conoidi alluvionali (STALEY *et alii*, 2006; FRANKEL & DOLAN, 2007; CAVALLI & MARCHI, 2008). La complessità morfologica, la varietà di copertura del suolo e la presenza di corpi idrici, che notoriamente caratterizzano l'ambiente fluviale, rendono l'applicazione del LiDAR topografico in questo contesto più complicata rispetto a quella finalizzata allo studio delle dinamiche di versante. Tale problematica non ha impedito lo sviluppo di ricerche che utilizzano dati LiDAR per lo studio dei corsi d'acqua, seppur in quantità minore rispetto a quanto avviene in altri ambiti.

Le principali applicazioni che sfruttano questa tecnologia nel contesto fluviale possono essere raggruppate in sette gruppi tematici:

- modellistica idraulica ed idrologica (COBBY *et alii*, 2001; FRENCH, 2003; FEMA, 2003; HOLLAUS *et alii*, 2005);
- mappatura geomorfologica ed estrazione di informazioni quantitative nelle piane inondabili (i.e. sezioni trasversali) (CHARLTON *et alii*, 2003; CHALLIS, 2006; JONES *et alii*, 2007; JAMES *et alii*, 2007; NOTEBAERT *et alii*, 2009);
- monitoraggio e quantificazione delle variazioni morfologiche recenti integrando il dato LiDAR con sistemi sonici (HICKS *et alii*, 2008; LOLLINO *et alii*, 2008) o usando LiDAR batimetrico (MCKEAN *et alii*, 2009);
- classificazione automatica delle superfici bagnate (HÖFLE *et alii*, 2009);
- quantificazione delle variazioni morfologiche di lungo termine (MAGIRL *et alii*, 2005);
- analisi dell'erosione di sponda (THOMA *et alii*, 2005);
- caratterizzazione della morfologia d'alveo (CAVALLI *et alii*, 2008b; TREVISANI *et alii*, 2010).

Di seguito sono discussi alcuni importanti aspetti relativi all'applicazione della tecnologia LiDAR in ambito fluviale.

L'alta risoluzione spaziale della singola cella del DTM derivato dal LiDAR ed gli accurati valori altimetrici (accuratezza di 0.1-0.2 m per la componente verticale e di 0.5-2 m per quella orizzontale) ad essa

### APPLICATIONS IN RIVER ENVIRONMENTS

The possibility to carry out fast and accurate topographic surveys of large areas at a relatively affordable cost with the capability of acquiring simultaneously other remote sensing data, such as high resolution aerial photographs and hyperspectral images, makes LiDAR technology an important tool for several applications related to environmental planning and management. In the geomorphologic field, airborne topographic LiDAR data have been widely used for studying landslide morphology and distribution (MCKEAN & ROERING, 2004; GLENN *et alii*, 2006), for landslide inventories development (VAN DEN ECKHAUT *et alii*, 2005; ARDIZZONE *et alii*, 2007), and for recognizing the depositional features on alluvial fans (STALEY *et alii*, 2006; FRANKEL & DOLAN, 2007; CAVALLI & MARCHI, 2008). The complex morphology, the wide range of land cover categories, and the presence of deep water bodies characterizing river environments makes the topographic LiDAR application more complicated than the one aimed at studying hillslope processes. Nevertheless, this issue has not delayed the development of LiDAR data for river environment studies, even if such applications are less numerous than in other fields.

The main applications of this technology in the river environments may be grouped into seven thematic categories:

- hydraulic and hydrologic modelling (COBBY *et alii*, 2001; FRENCH, 2003; FEMA, 2003; HOLLAUS *et alii*, 2005);
- geomorphologic mapping and quantitative analysis of floodplains (i.e. cross section profiles) (CHARLTON *et alii*, 2003; CHALLIS, 2006; JONES *et alii*, 2007; JAMES *et alii*, 2007; NOTEBAERT *et alii*, 2009);
- monitoring and analysis of recent river morphological changes by integrating topographic LiDAR data with sonic systems (HICKS *et alii*, 2008; LOLLINO *et alii*, 2008) or by using bathymetric LiDAR (MCKEAN *et alii*, 2009);
- automatic classification of water surfaces (HÖFLE *et alii*, 2009);
- long term morphological river evolution (MAGIRL *et alii*, 2005);
- bank erosion analysis (THOMA *et alii*, 2005);
- characterization of channel bed morphology (CAVALLI *et alii*, 2008b; TREVISANI *et alii*, 2010).

Some important topics related to the application of LiDAR technology in river environments are discussed below.

The high resolution of LiDAR derived DTM and the accurate altimetry value (0.1-0.2 m vertical and 0.5-1 m horizontal accuracy) allow to carry out accurate analyses of fluvial and flood plains morphology. In the field of hydraulic and hydrologic modeling, the high number of accurate cross sections that could be extracted from DTM along the river path may serve as basis for accurate simulations of floods, drawing the attention of agencies and authorities in charge of environmental management (MASO, 2002; FEMA, 2003). Several researchers used the airborne topographic LiDAR data for hydraulic applications (GOMES PEREIRA & WICHERSON, 1999; FRENCH, 2003; HOLLAUS *et alii*, 2005). In particular, MARKS & BATES (2000) evaluated the effects of LiDAR topographic information on

associati permettono di eseguire analisi della morfologia fluviale e delle piane inondabili. Nel campo della modellistica idrologica ed idraulica, il piano quotato prodotto e l'alto numero di sezioni progressive estraibili dal DTM, nonché la loro intrinseca precisione, costituiscono una valida base dati per i modelli di simulazione destando sempre più l'attenzione degli enti preposti alla gestione del territorio (MASO, 2002; FEMA, 2003). Diversi autori hanno utilizzato le informazioni ricavate da LiDAR topografico per applicazioni di tipo idraulico (GOMES PEREIRA & WICHERSON, 1999; FRENCH, 2003; HOLLAUS *et alii*, 2005). In particolare, MARKS & BATES (2000) hanno valutato gli effetti della rappresentazione topografica derivata da dati LiDAR nella previsione dell'estensione delle aree di esondazione. Gli autori hanno dimostrato che la topografia restituita dalla tecnica LiDAR fornisce condizioni al contorno più attendibili nella piana inondabile rispetto alle tecniche di rilievo tradizionali, consentendo un più accurato utilizzo dei modelli idraulici bidimensionali. La capacità del LiDAR di registrare ritorni multipli può essere d'aiuto nell'individuare all'interno del dominio di calcolo le strutture tridimensionali presenti come vegetazione, rilevati stradali ed edifici ma anche nello stimare la scabrezza della superficie. Nel caso dei modelli idraulici, la scabrezza del corso d'acqua è, notoriamente, un parametro di fondamentale importanza. COBBY *et alii* (2001) hanno descritto un approccio per stimare l'altezza della bassa vegetazione utilizzando una regressione logaritmica in grado di stabilire l'altezza della vegetazione in base alla deviazione standard delle altezze LiDAR detrendizzate in un piccolo intorno di celle. MASON *et alii* (2003) descrivono diversi approcci utilizzati in letteratura per trasformare l'altezza della vegetazione misurata dal LiDAR in coefficienti di scabrezza. COBBY *et alii* (2003) hanno utilizzato l'informazione dell'altezza della vegetazione per assegnare in modo distribuito un coefficiente di scabrezza alle diverse zone della piana inondabile, incrementando così l'accuratezza dei dati in entrata ai modelli idraulici. Ovviamente, la possibilità di migliorare la prestazione dei modelli idraulici conduce ad una miglior mappatura del pericolo di piena. La Federal Emergency Management Agency degli Stati Uniti (FEMA) prevede l'utilizzo dei DTM ricavati da LiDAR topografico come base per la creazione delle Flood Insurance Rate Maps (FIRMs), che sono mappe utilizzate per determinare le quote assicurative che i proprietari di case e terreni in aree a rischio di piena devono corrispondere. A tale scopo la FEMA ha prodotto interessanti e dettagliate linee guida e specifiche che devono essere usate dai soggetti che si occupano del rilievo LiDAR per l'acquisizione dei dati necessari alla creazione dei modelli digitali da utilizzare come base per la modellazione idraulica (FEMA, 2003).

L'integrazione del dato LiDAR con l'ambiente GIS ed il recente sviluppo di nuove tecniche di visualizzazione valorizza notevolmente l'alta risoluzione dell'informazione topografica fornita da questa tecnologia. In una recente ricerca condotta sul Dee River in Galles (UK), JONES *et alii* (2007) sono pervenuti ad una caratterizzazione morfologica del corso d'acqua mediante una semplice analisi multiscale del modello digitale LiDAR basata sulla classificazione delle variazioni altimetriche. Le diverse forme presenti sono state individuate e map-

flood inundation extent prediction. These authors demonstrated that the topography derived by LiDAR data significantly improves the performance of 2-D hydraulic models respect to topography derived by traditional techniques. The capability of LiDAR technology of recording multiple returns can help the identification, within the calculation domain, of 3-D structures such as vegetation, road banks and buildings and it can improve the evaluation of surface roughness. COBBY *et alii* (2001) presented an innovative work where they estimated the vegetation heights based on the standard deviation of elevation within a given moving window after trend removal. MASON *et alii* (2003) reviewed several approaches for the roughness coefficients calculation using the vegetation heights. COBBY *et alii* (2003) used the vegetation heights for the calculation of a spatial distributed roughness index within a flood plain, thus improving the accuracy of input data of their hydraulic model. The improvement of hydraulic models performance obviously leads to better results in terms of flood hazard mapping. The Federal Emergency Management Agency of United States (FEMA) demands the use of topographic LiDAR derived DTMs as the basis for deriving accurate Flood Insurance Rate Maps (FIRMs). These maps offer the basis for insurance rates estimation for those people having a house in a flood risk area. FEMA presented also some specific and detailed guide lines for LiDAR surveys in order to collect accurate topographic data in support to hydraulic modeling (FEMA, 2003).

The possibility to integrate high resolution DTM within Geographical Information System (GIS), in addition to new visualization tools emphasizes the advantages of high resolution topography achievable with LiDAR technology. JONES *et alii* (2007), presented a research carried out in the Deer River in Galles (UK), where they characterized the river morphology through a simple multiscale analysis of DTM, based on the classification of elevations changes. The different morphologies have then been mapped in GIS according to different classification ranges (from 4 to 0.1 m). This approach allowed to map morphologies at different spatial scale, showing similar results to classification obtained with the traditional photo interpretations analysis.

LiDAR data filtering procedures is another fundamental issue that has been discussed in some recent researches (JONES *et alii*, 2007; JAMES *et alii*, 2007; CAVALLI *et alii*, 2008a). The automatic filtering procedures of LiDAR raw data may decrease the quality of DTM due mainly to the decreasing of bare ground points density and to the bringing of a systematic error on filtered data. This fact has a strong influence on the representativeness of the derived DTM. Differently, an appropriate and site-specific filtering procedure, may overcome these problems resulting then in a high quality DTM where river morphology, cross section and longitudinal river profiles are correctly detected. One of the first studies that used the topographic LiDAR data for morphological analysis of river environments is given by CHARLTON *et alii* (2003). These researchers tested the suitability of LiDAR data for the cross section extraction

pate in GIS utilizzando diversi intervalli di classificazione (da 4 a 0.1 m). Questo approccio ha consentito l'individuazione e la contestuale mappatura delle forme a differenti scale di dettaglio. La mappatura così ottenuta è stata successivamente posta a confronto con una carta geomorfologica prodotta tramite fotointerpretazione ed i più gravosi rilievi di terreno, mostrando un elevato grado di similarità.

Un aspetto interessante, messo in luce da molti lavori (JONES *et alii*, 2007; JAMES *et alii*, 2007; CAVALLI *et alii*, 2008a), è che le operazioni di filtraggio automatico della vegetazione possono apportare un decremento qualitativo nei DTM dovuto principalmente alla diminuzione di densità dei punti al suolo ma anche all'apporto di un errore di tipo sistematico nel dato filtrato. Ciò influisce notevolmente sulla rappresentatività della morfologia del terreno fornita dal modello digitale. Un DTM LiDAR opportunamente filtrato, oltre ad essere un eccellente livello informativo per analisi interpretative delle morfologie in ambiente fluviale, rappresenta uno strumento di notevole importanza per l'estrazione di informazioni di tipo quantitativo fondamentali per lo studio delle dinamiche fluviali, quali profili longitudinali e le sezioni trasversali. Uno dei primi studi che utilizza il dato LiDAR in ambito fluviale è quello di CHARLTON *et alii* (2003). Questi autori hanno analizzato la potenzialità dei dati LiDAR nella caratterizzazione topografica, mediante estrazione di sezioni trasversali, di un corso d'acqua a letto ghiaioso (River Coquet, Inghilterra), caratterizzato, nel tratto analizzato, da alta instabilità laterale ed avulsione del canale (Fig. 3). In questo studio, le sezioni trasversali del canale attivo e delle barre, sono state utilizzate per confrontare le misure ottenute mediante l'estrazione della sezione a partire da un DTM a 2 m di risoluzione derivato dai dati da LiDAR topografico di prima generazione, in grado di registrare solo il primo ritorno, con le misure derivate da rilievi di terreno effettuati con teodolite. È stata osservata un'elevata accuratezza nella rappresentazione della superficie delle barre, ma si sono notate anche notevoli discrepanze nelle aree caratterizzate dalla presenza di vegetazione (deterioramento dell'impulso) e di acqua profonda (assorbimento dell'impulso). Nonostante l'utilizzo di dati caratterizzati da minore risoluzione, accuratezza e qualità, come efficacemente dimostrato dagli evidenti difetti osservabili nella mappa ombreggiata del DTM in Fig.3, rispetto a quelli rilevabili con gli attuali sensori LiDAR, il lavoro di CHARLTON *et alii* (2003) ha dimostrato l'enorme potenzialità di questa tecnologia nello studio dei corsi d'acqua.

La perdita di accuratezza del dato LiDAR nella rappresentazione delle aree sotto copertura è stata analizzata da JAMES *et alii* (2007) in un lavoro finalizzato alla caratterizzazione del reticolo idrografico in aree densamente vegetate. Gli autori, confrontando le sezioni topografiche di piccoli canali estratte dal DTM LiDAR topografico con i rilievi di terreno, hanno notato che le prime presentano una sottostima della profondità ed una sovrastima delle larghezze rilevate alla sommità delle sponde. Le due cause principali sono individuabili nell'eccessivo decremento della densità spaziale originaria dei dati rilevati causata dall'utilizzo di algoritmi di filtraggio automatici e dall'effetto di "ombreggiamento" delle sponde e del fondo del canale, imputabile al basso angolo di inci-

of a gravel-bed river (River Coquet, England), characterized, in the analyzed reach, by lateral instability and channel avulsion (Fig. 3). The topographic LiDAR used was a first generation single return instrument. Active river channel and bar units cross sections extracted from a 2 m LiDAR DTM have been compared with ground survey-derived cross profiles. The results indicated an high accuracy of bar surface detection, nevertheless anomalies were observed within vegetated and deep water areas. The research by CHARLTON *et alii* (2003) has demonstrated the potential offered by LiDAR for the mapping of river environments. The results are really promising considering that input data were characterized by lower resolution, accuracy, and quality than those achievable by more recent LiDAR sensors, as emphasized by the clearly visible anomalies in the shaded relief map of Fig. 3.

The loss of accuracy of LiDAR data for the detection of ground surface in vegetated areas for river environment studies has been analyzed by JAMES *et alii* (2007). This work presented an interesting

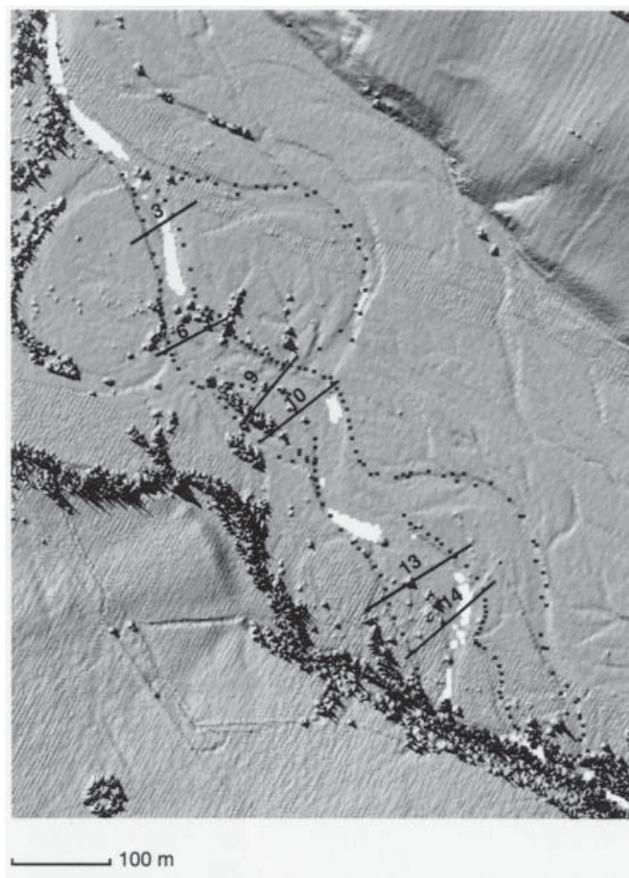


Fig. 3 - Mappa ombreggiata del DTM del River Coquet, Regno Unito, da CHARLTON *et alii* (2003)  
- Shaded relief map of River Coquet, United Kingdom, from CHARLTON *et alii* (2003)

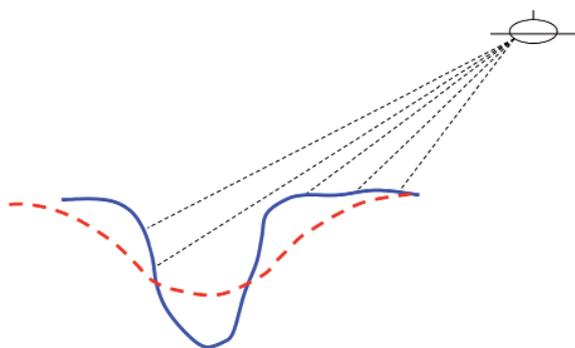


Fig. 4 - Effetto del basso angolo di incidenza dell'impulso laser: sottostima della profondità del canale e sovrastima delle larghezze rilevate alla sommità delle sponde (modificata da JAMES *et alii*, 2007). La linea blu rappresenta un'ipotetica sezione topografica mentre la linea rossa indica il profilo rilevato con il LiDAR

- *Effect of low scan laser angle: underestimate of channel deep, and overestimate of bankfull width (modified from JAMES *et alii*, 2007). The blue line represents an hypothetical cross-section profile, while the red line shows the LiDAR-derived profile*

denza dell'impulso laser alle estremità delle strisciate (Fig. 4).

La mancata restituzione del segnale in presenza di corpi d'acqua profondi pone un limite importante nella rappresentazione delle aree sommerse. L'utilizzo del dato LiDAR per l'estrazione di accurate informazioni topografiche è, quindi, più idoneo per lo studio dei corsi d'acqua dove le dinamiche laterali sono più importanti di quelle verticali. È possibile, infatti, considerare la topografia delle sole sponde anziché l'intera geometria della sezione trasversale per poter quantificare dettagliatamente fenomeni quali migrazione laterale ed allargamento del canale (NOTEBAERT *et alii*, 2009).

Disporre di due o più rilievi LiDAR effettuati in epoche diverse, offre un'importante opportunità per condurre studi dell'evoluzione morfologica recente dei corsi d'acqua mediante tecniche di confronto multitemporale dei DTM, non più basati sull'analisi delle variazioni di singole sezioni topografiche. In questo ambito, interessanti sono le esperienze condotte da LOLLINO *et alii* (2008) in numerosi corsi d'acqua del bacino Padano. Questi autori hanno proposto diverse modalità di rilievo e creazione di DTM in relazione alle caratteristiche morfologiche dei corsi d'acqua, sottolineando la necessità, per corsi d'acqua unicursali con tiranti superiori al metro, di integrare i dati LiDAR nelle aree sommerse con dati batimetrici rilevati tramite sistemi sonici (single beam, multi beam e side-scan sonar). Il solo dato LiDAR è, invece, ritenuto sufficiente per la stima delle variazioni morfologiche nei corsi d'acqua pluricursali. L'utilizzo di un DTM differenziale si è rivelato utile anche per lo studio di singoli processi, come, ad esempio l'erosione spondale. THOMA *et alii* (2005) hanno quantificato l'apporto di sedimento da parte delle sponde in un tratto di 56 km del Blue Earth River (Minnesota, USA) calcolando il prodotto tra le variazioni volumetriche occorse tra il 2001 ed il 2002, utilizzando i dati da LiDAR topografico acquisiti nei due anni, e le proprietà fisiche del materiale

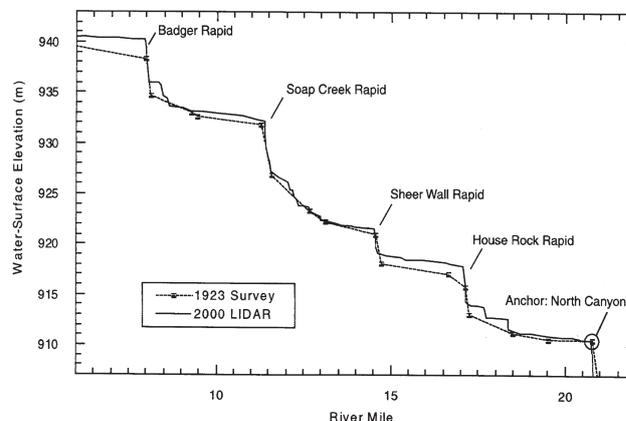


Fig. 5 - Confronto tra il profilo longitudinale del pelo libero del 1923 (rilievi di terreno) e del 2000 (rilievo LiDAR topografico) in un tratto del Colorado River (MAGIRL *et alii*, 2005)

- *Comparison between the longitudinal profile of the channel reach of Colorado River in 1923 (field survey) and in 2000 (topographic LiDAR survey) (MAGIRL *et alii*, 2005)*

analysis on channel network recognition under high density vegetated areas. The authors, after comparing small gullies cross section profiles derived by LiDAR DTM with those acquired during field surveys, noted that cross section derived by topographic LiDAR DTM showed underestimation of depths and overestimation of gullies top widths. Two main reason are related to these two issues: first the decreasing of LiDAR point density due to automating (not appropriate and site specific) filtering procedures, second the noise effect of banks shading and channel bed due to the low scan angle (Fig. 4).

The loss of information in correspondence of deep water bodies is a critical limit when the interest is on surveying underwater surfaces. Topographic LiDAR is more suitable for the analysis of river environments where lateral fluvial dynamics are much more important than vertical dynamics. In such a cases, it is possible in fact to consider only the topography of river banks instead the entire cross section in order to quantify the lateral channel migration and channel widening (NOTEBAERT *et alii*, 2009).

The availability of two or more LiDAR surveys collected in different time steps, is strategic since it is possible to analyze the morphologic evolution of channels by comparing different DTM with a multitemporal approach. This allow a distributed analysis of morphological changes no more linked to single cross section profiles. In this field, an interesting research has been carried out by LOLLINO *et alii* (2008) in different rivers of the Po catchment. These researchers analyzed different approaches to derive the DTM in relation to the different morphologies of rivers. They suggested the need to integrate the topographic LiDAR data with sonic surveys (single beam, multi beam e side-scan sonar) for single channel river when the water depth exceeds 1 m. The only topographic LiDAR data are considered sufficient for erosion and deposition evaluation of

costituente le sponde, stimate a partire dall'analisi di diversi campioni prelevati sul campo. Il carico di sedimenti è stato, infine, stimato sulla base delle percentuali di materiale trasportabile presente nelle sponde. L'analisi di THOMA *et alii* (2005) è stata condotta escludendo la porzione sommersa delle sponde per i problemi di assorbimento dell'impulso laser già discussi in precedenza.

Nonostante l'acqua agisca principalmente come un corpo assorbente alla lunghezza d'onda dell'infrarosso, alcuni impulsi del sensore LiDAR topografico possono essere riflessi dalla superficie bagnata. Le caratteristiche di riflessione (bassa intensità del ritorno registrato) tipiche dell'acqua alla lunghezza d'onda dell'infrarosso sono state utilizzate per lo sviluppo di metodi di classificazione automatica delle superfici bagnate (HÖFLE *et alii*, 2009). Il dato topografico ottenuto in queste superfici è affetto anche da errori maggiori rispetto ai punti LiDAR acquisiti in condizioni ottimali. Per studi finalizzati all'analisi di variazioni morfologiche di qualche ordine di grandezza superiori alla tolleranza strumentale è possibile fare ricorso anche a questo tipo di informazione come efficacemente dimostrato dal lavoro di MAGIRL *et alii* (2005). Questi autori hanno studiato i cambiamenti di lungo termine indotti dalla attività delle colate detritiche e dal rimaneggiamento fluviale nei conoidi dei tributari del Colorado River lungo il Grand Canyon (USA), ponendo a confronto due profili longitudinali (del 1923, da rilievi di terreno condotti dall'USGS e del 2000, mediante LiDAR topografico; in entrambi i casi la portata era di circa 250 m<sup>3</sup>/s) del pelo libero (Fig. 5).

Un'analisi di questo tipo consente di valorizzare efficacemente l'informazione storica disponibile e permette di studiare la morfologia di lunghi tratti fluviali senza ricorrere ad onerosi e, a volte, impraticabili rilievi di terreno. Quando l'interesse dello studio dei sistemi fluviali intende considerare scale spaziali e temporali molto piccole, il LiDAR terrestre è sicuramente uno strumento di rilievo idoneo, poiché è in grado di acquisire dati da cui derivare DTM ad elevata accuratezza e risoluzione (dimensione della cella di 0.01 m) ed è facilmente ripetibile. Queste caratteristiche ne fanno uno strumento di notevole interesse per il monitoraggio di morfologie soggette a cambiamenti repentini (HERITAGE & HETHERINGTON, 2007).

È evidente come i limiti principali del LiDAR topografico in ambito fluviale siano connessi, principalmente, alla scarsa risposta restituibile in corrispondenza dell'interfaccia aria-acqua. Le limitazioni del LiDAR topografico in aree con tiranti di profondità elevata, non si presentano nei piccoli corsi d'acqua montani, dove determinate accortezze in fase di rilievo, come ad esempio la scelta del periodo di rilievo in condizioni di magra dei torrenti, rendono particolarmente idoneo l'utilizzo di questa tecnologia per il rilievo topografico. Disporre di un DTM ad alta risoluzione dell'intero alveo di torrenti montani offre l'opportunità di condurre analisi finalizzate alla caratterizzazione ed al riconoscimento della morfologia d'alveo mediante l'utilizzo o lo sviluppo di indicatori morfometrici (CAVALLI *et alii*, 2008b; VIANELLO *et alii*, 2009; TREVISANI *et alii*, 2010). In questo contesto, VIANELLO *et alii* (2009), hanno studiato i *pattern*

braided rivers. Using differential DTM is useful even to study single processes, such as banks erosion. THOMA *et alii* (2005) quantified the sediment production of banks in a 56 km reach of Blue Earth River (Minnesota, USA). They evaluated the changes of sediment volume occurred from 2001 to 2002, using topographic LiDAR data collected at different time steps. They considered also the physical properties of banks soil derived by some laboratory analysis of samples collected in the field. The sediment load has then been evaluated on the basis of transportable material present along the river banks. The analysis of THOMA *et alii* (2005) excluded the submerged area of the banks since the water adsorbs the laser beam.

As described in the section on LiDAR technology, the infrared wavelength is mainly adsorbed by water bodies, nevertheless few laser pulses can be reflected by the water surfaces. The characteristics of water reflectivity in the infrared wavelength (low intensity of laser return) have been used for the development of automatic methods for classification of water surface (HÖFLE *et alii*, 2009).

LiDAR data related to water surfaces are obviously affected by larger errors than data collected in terrain surfaces, anyway it is possible to use such kind of information to analyze morphological changes with a range of variations greater than the instrument tolerance as demonstrated in the work of MAGIRL *et alii* (2005). This research analyzed the long term changes induced by debris flow activities, and by fluvial reworking of tributaries alluvial fans material of the Colorado River along the Gran Canyon (USA). Two longitudinal profiles of water surface have been compared: one surveyed in the field by USGS in 1923, the other derived by topographic LiDAR survey in 2000. Both were surveyed under the same discharge conditions of about 250 m<sup>3</sup>/s (Fig. 5).

Such kind of analysis enhances the information given by historical data, and at the same time allows the study of morphology of long river reaches avoiding the difficulties of field surveys. When the analyses are focused on finer spatial and temporal scale, the terrestrial LiDAR is preferred since it is more accurate, the derived DTM presents a higher resolution (0.01 m grid size), and the survey is easily repeatable. These specifications underline the usefulness of this instrument for monitoring the river morphologies under frequent and fast changes (HERITAGE & HETHERINGTON, 2007).

It is clear how the main limitations of topographic airborne LiDAR for the river environments analysis are related to the water surfaces. The limits of airborne topographic LiDAR in deep water channels are not present for the small and shallow headwater alpine streams, where some watchfulness in the survey, such as the sound choice of surveying time (e.g. low flow condition period), make the mountainous environment particularly suitable for the use of LiDAR technology. For these areas a high resolution DTM derived by topographic LiDAR is useful to recognize channel bed morphology by using or developing morphometric indexes (CAVALLI *et alii*, 2008b; VIANELLO *et alii*, 2009; TREVISANI *et alii*, 2010). VIANELLO *et alii* (2009) compared different methods for computing channel

di pendenza, derivata applicando differenti algoritmi di calcolo a DTM di diversa risoluzione, caratterizzanti i tratti colluviali ed alluvionali di un piccolo bacino alpino, indicando l'importanza di una scelta dell'algoritmo attenta alle dimensioni dei canali analizzati ed alla risoluzione del DTM di partenza. CAVALLI *et alii* (2008b) hanno condotto un'analisi sul canale principale del Rio Cordon (Dolomiti), finalizzata alla caratterizzazione della morfologia del corso d'acqua, applicando su DTM LiDAR a differente risoluzione (0.5 e 1 m) un indice di scabrezza espresso come la deviazione standard della topografia residua, derivata mediante sottrazione tra il DTM LiDAR ed un DTM mediato. Il calcolo della scabrezza mediante utilizzo della topografia residua consente una misura di questo indice indipendente dall'effetto di larga scala e quindi del trend di pendenza lungo la superficie. Il canale principale del Rio Cordon è stato analizzato sia a scala monodimensionale, prendendo in esame la morfologia lungo il thalweg, sia a scala bidimensionale, considerando anche lo sviluppo trasversale del corso d'acqua. Associando gli alti valori di scabrezza superficiale (elevata variabilità delle quote) alla presenza di grossi blocchi o, se posizionati in modo continuo in senso trasversale alla corrente, di step, è possibile discriminare le differenti morfologie d'alveo presenti lungo il corso d'acqua (Fig. 6). L'indice di scabrezza superficiale proposto in questo studio sfrutta appieno la potenzialità dei DTM derivati da dati LiDAR come base informativa per analisi condotte a scala metrica. La variabilità topografica a questa scala è un parametro di notevole importanza in quanto, in base alle caratteristiche di scabrezza riscontrabili in una determinata area, è possibile riconoscere zone o forme ascrivibili a differenti processi naturali che hanno originato, o concorso nell'originare, la morfologia dell'area studiata.

slope using LiDAR-derived digital terrain models (DTMs) at different grid cell resolutions. This study has been carried out for colluvial and alluvial reaches in a small headwater alpine basin. They addressed that channel slope can be derived by choosing an appropriate method after considering both the DTM resolution and channel width. CAVALLI *et alii* (2008b) presented an analysis conducted on the main channel of Rio Cordon basin (Dolomites). The analysis consisted in the recognition of channel-bed morphology using 0.5 m and 1 m resolution LiDAR derived DTMs by deriving an index of roughness. The surface roughness index has been calculated as the standard deviation of residual topography, as the cell by cell difference between LiDAR DTM and the DTM averaged within a moving window. The calculation of the surface roughness by means of the residual topography grid provided a measure of this index independent from the effect of slope along the channel. The analysis was carried out both at 1-D (along the thalweg) and 2-D scale considering the whole bankfull width. With the surface roughness index it is possible to recognize in detail the channel bed morphology (Fig. 6), since higher values of the index are related to a high variability of elevations, so to an abrupt changes of slope, as happens for step-pool morphologies. Otherwise lower values of the index are associated to smoothed surfaces as riffle pool morphologies. This index really shows the capability of topographic LiDAR, and the derived sub-meter resolution topography for such applications. The detailed fine scale analysis of these morphologies may also be used for analyzing different processes that affected and formed a mountain streams.

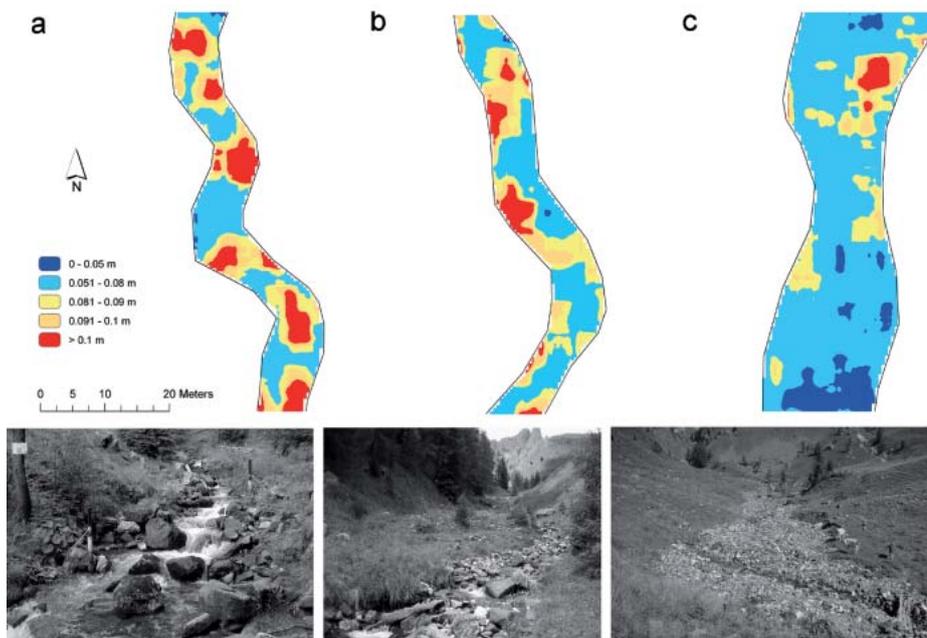


Fig. 6 - Mappe dell'indice di scabrezza (CAVALLI *et alii*, 2008b) per tre diverse morfologie d'alveo: a) step pool, b) rapida c) riffle pool  
- Roughness index maps (CAVALLI *et alii*, 2008b) related to three different channel bed morphologies: a) step pool, b) cascade, c) riffle pool

## CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Le ricerche presentate in questo lavoro evidenziano potenzialità e limiti della tecnologia LiDAR nello studio degli ambienti fluviali. L'impiego del sensore LiDAR topografico aerotrasportato si rivela strategico per la definizione in tempi ristretti della superficie topografica su ampie aree ad una qualità di dettaglio difficilmente ottenibile con altre strumentazioni a parità di tempo di rilievo. L'impiego di DTM ad alta risoluzione derivati da rilievo LiDAR consente lo studio delle dinamiche erosive e deposizionali dei corsi d'acqua non più basati sull'analisi delle variazioni di singole sezioni topografiche. I dati LiDAR possono essere altresì impiegati per lo sviluppo di analisi, sia di tipo qualitativo che quantitativo, finalizzate al riconoscimento ed alla caratterizzazione delle morfologie presenti nel contesto fluviale. I limiti principali di questa tecnologia sono connessi alla scarsa risposta restituibile in corrispondenza dell'interfaccia aria-acqua ed alla degradazione di qualità ed accuratezza del dato in presenza di vegetazione. Pertanto l'utilizzo del dato ricavato da LiDAR topografico per l'estrazione di accurate informazioni topografiche si rivela più idoneo per lo studio dei corsi d'acqua dove le dinamiche laterali sono più importanti di quelle verticali o dove la profondità del tirante è limitata, come nel caso dei piccoli corsi d'acqua montani. Tuttavia, notevoli sforzi da parte di produttori e ricercatori sono attualmente indirizzati all'affinamento degli algoritmi di filtraggio del dato, ed al miglioramento, sia in termini di accuratezza sia di integrazione con i sensori tradizionali, della tecnologia LiDAR batimetrico per il rilievo topografico di dettaglio di superfici in ambito fluviale caratterizzate dalla presenza di profondi corpi d'acqua.

## RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano Lorenzo Marchi per la rilettura critica del testo, Giulia Sofia per la revisione del testo inglese e Giuseppe Peruzzo, autore di alcune immagini.

## OPERE CITATE/REFERENCES

- ARDIZZONE F., CARDINALI M., GALLI M., GUZZETTI F. & REICHENBACH P. (2007) - *Identification and mapping of recent rainfall-induced landslides using elevation data collected by airborne LiDAR*. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **7**(6): 637-650.
- BALTSAVIAS E.P. (1999) - *Airborne laser scanning: basic relations and formulas*. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, **54**: 199-214.
- CASELLA V. (2003) - *Introduzione al laser scanning aereo*. In: CROSILLA F. & GALLETTO R. (eds) - *La tecnica del laserscanning - Teoria ed applicazioni*, 1-37, CISM, Udine.
- CAVALLI M. & MARCHI L. (2008) - *Characterisation of the surface morphology of an alpine alluvial fan using airborne LiDAR*. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **8**: 323-333.
- CAVALLI M., MATHYS N. & JACOME A. (2008a) - *Quality and vertical accuracy assessment of airborne LiDAR data: a case study on the Draix basins (French Alps)*. *Geophysical Research Abstracts*, 10, EGU2008-A-04926.
- CAVALLI M., TAROLLI P., MARCHI L. & DALLA FONTANA G. (2008b) - *The effectiveness of airborne LiDAR data in the recognition of channel-bed morphology*. *Catena*, **73**(3): 249-260.
- CHALLIS K. (2006) - *Airborne laser altimetry in alluviated landscapes*. *Archaeological Prospection*, **13**(2): 103-127.
- CHARLTON M.E., LARGE A.R.G. & FULLER I.C. (2003) - *Application Of Airborne LiDAR In River Environments: The River Coquet, Northumberland, Uk*. *Earth Surface Processes and Landforms*, **28**: 299-306.
- COBBY D. M., MASON D.C. & DAVENPORT I.J. (2001) - *Image processing of airborne scanning laser altimetry data for improved river flood modeling*. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, **56**: 121-138.
- COBBY D. M., MASON D. C., HORRIT M.S. & BATES P.D. (2003) - *Two-dimensional hydraulic flood modelling using a finite-element mesh decomposed according to vegetation and topographic features derived from airborne scanning laser altimetry*. *Hydrological Processes*, **17**: 1979-2000.
- FEMA (2003) - *Guidelines and Specifications for flood hazard mapping partners*, Appendix A: [www.fema.gov](http://www.fema.gov).
- FRANKEL K.L. & DOLAN J.F. (2007) - *Characterizing arid-region alluvial fan surface roughness with airborne laser swath mapping digital topographic data*. *J.*

## FINAL REMARKS

The research presented in this review underlines the capabilities of LiDAR technology in the analysis of river environments. The airborne topographic LiDAR is strategic since it is possible to survey larger areas in a short time and with a detail of information higher than the one derived by other topographic survey instruments. With the high resolution LiDAR derived DTMs it is possible to recognize and analyze the erosional and depositional processes within channels avoiding the analysis of single bankfull sections changes. It is also possible to use LiDAR data for qualitative and quantitative analysis related to recognition of different channel bed morphologies of rivers. The main limits of this technology are due to lack of information that is collected at the air-water surface, and to its loss of accuracy and quality within vegetation canopy areas. So the topographic LiDAR is more suitable for the analysis of small mountain streams where the dynamic of banks is the major issue, and where water depth is relatively shallow. However to overcome some of these limits, most of the efforts of the scientific community and private companies are currently addressed on honing multiple returns filtering algorithms, and on improving the accuracy, even by the integration of traditional instruments, of bathymetric LiDAR for the detailed topographic survey of the riverine environment surface characterized by deep water bodies.

## ACKNOWLEDGMENTS

The authors wish to thank Lorenzo Marchi for reading and commenting the manuscript, Giulia Sofia for reviewing the English text and Giuseppe Peruzzo for drawing some images.

- Geophys. Res. - Earth Surface, **112**: F02025, doi:10.1029/2006JF000644.
- FRENCH J.R. (2003) - *Airborne LiDAR in support of Geomorphological and Hydraulic Modeling*. Earth Surface Processes and Landform, **28**: 321-335.
- GLENN N.F., STREUTKER D.R., CHADWICK D.J., THACKRAY. & DORSCH S.J. (2006) - *Analysis of LiDAR-derived topographic information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity*. Geomorphology, **73**: 131-148.
- GOMES PEREIRA L.M. & WICHERSON R.J. (1999) - *Suitability of laser data for deriving geographical information: a case study in the context of management of fluvial zones*. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, **54**: 105-114.
- HERITAGE G. & HETHERINGTON D. (2007) - *Towards a protocol for laser scanning in fluvial geomorphology*. Earth Surface Processes and Landforms, **32**: 66-74.
- HICKS D.M., DUNCAN M.J., LANE S.T., TAL M. & WESTWAY R. (2008) - *Contemporary morphological change in braided gravel-bed river: new developments from field and laboratory studies, with particular reference to the influence of riparian vegetation*. In: HABERSACK H., PIÉGAY H. & RINALDI M. (2008, EDS) - *Gravel-bed rivers vi-from process understanding to river restoration*. Developments in Earth Surface Processes, elsevier amsterdam: 557-584.
- HILLDALE R.C. & RAFF D. (2008) - *Assessing the ability of airborne LiDAR to map river bathymetry*. Earth Surface Processes and Landforms, **33**: 773-783.
- HÖFLE B., VETTER M., PEIFER N., MANDLBURGER G. & STÖTTER J. (2009) - *Water surface mapping from airborne laser scanning using signal intensity and elevation data*. Earth Surface Processes and Landforms, **34(12)**: 1635-1649.
- HOLLAUS M., WAGNER W. & KRAUS K. (2005) - *Airborne laser scanning and usefulness for hydrological models*. Advances in Geosciences, **5**: 57-63.
- JAMES L.A., WATSON D.G. & HANSEN W.F. (2007) - *Using LiDAR data to map gullies and headwater streams under forest canopy: South Carolina, USA*. Catena, **71(1)**:132-144.
- JONES A. F., BREWER P. A., JOHNSTONE E. & MACKLIN M. G. (2007) - *High-resolution interpretative geomorphological mapping of river valley environments using airborne LiDAR data*. Earth Surface Processes and Landform, **32**: 1574-1592.
- LOLLINO G., GIORDAN D., BALDO M., ALLASIA P. & PELLEGRINI F. (2008) - *L'uso di modelli digitali del terreno come strumento per lo studio dell'evoluzione morfologica dei corsi d'acqua: proposte metodologiche e primi risultati*. Il Quaternario, **21(1B)**: 331-342.
- MAGIRL C.S., WEBB R.H. & GRIFFITHS P.G. (2005) - *Changes in the water surface profile of the Colorado River in Grand Canyon, Arizona, between 1923 and 2000*. Water Resources Research **41(5)**: Art. No. W05021.
- MARKS K. & BATES P. (2000) - *Integration of high-resolution topographic data with floodplain flow models*. Hydrological Processes, **14**: 2109-2122.
- MASO M. (2002) - *Note sulle metodologie operative per i rilievi laser-scanning e la generazione di DTM d'alta qualità*. Rivista Cinque Fiumi, Autorità di Bacino dell'alto Adriatico, **1**: 23-33.
- MASON D.C., COBBY D.M., HORRIT M.S. & BATES P.D (2003) - *Floodplain friction parametrisation in two-dimensional river flood models using vegetation heights derived from airborne scanning laser altimetry*. Hydrological Processes, **17**: 1711- 1732.
- MCKEAN J. & ROERING J. (2004) - *Objective landslide detection and surface morphology mapping using high-resolution airborne laser altimetry*. Geomorphology, **57**: 331-351.
- MCKEAN J., ISAAK D. & WRIGHT W. (2009) - *Geomorphic controls on salmon nesting patterns described by a new, narrow-beam terrestrial-aquatic lidar*. Frontiers in Ecology and Environment, **6(3)**: 125-130.
- NOTEBAERT B., VERSTRAETEN G., GOVERS G. & POESEN J., (2009) - *Qualitative and quantitative applications of LiDAR imagery in fluvial geomorphology*. Earth Surface Processes and Landform, **348**: 217-231.
- PIROTTI F. & TAROLLI P. (2010) - *Suitability of LiDAR point density and derived landform curvature maps for channel network extraction*. Hydrological Processes, **24**: 1187-1197.
- STALEY D.M., WASKLEWICZ T. A. & BLASZCZYNSKI J.S. (2006) - *Surficial patterns of debris flow deposition on alluvial fans in Death Valley, CA using airborne laser swath mapping data*. Geomorphology, **74**: 152-163.
- TAROLLI P. & DALLA FONTANA G. (2009) - *Hillslope to valley transition morphology: new opportunities from high resolution DTMs*. Geomorphology, **113**: 47-56.
- TAROLLI P., ARROWSMITH J.R. & VIVONI E.R. (2009) - *Understanding earth surface processes from remotely sensed digital terrain models*. Geomorphology, **113**: 1-3.
- THOMA D.P., GUPTA S.C., BAUERC M.E. & KIRCHOFF C.E (2005) - *Airborne laser scanning for riverbank erosion assessment*. Remote Sensing of Environment, **95**: 493-501.
- TREVISANI S., CAVALLI M. & MARCHI L. (2010) - *Reading the bed morphology of a mountain stream: a geomorphometric study on high-resolution topographic data*. Hydrology and Earth System Science, **14**: 393-405.
- VAN DEN ECKHOUT M., POESEN J., VERSTRAETEN G., VANACKER V., MOEYERSONS J., NYSSSEN J. & VAN BEEK L.P.H. (2005) - *The effectiveness of hillshade maps and expert knowledge in mapping old deepseated Landslides*. Geomorphology, **67**: 351-363.
- VIANELLO A., CAVALLI M. & TAROLLI P. (2009) - *LiDAR-derived slopes for headwater channel network analysis*. Catena, **76(2)**: 97-106.
- WEHR A. & LOHR U. (1999) - *Airborne laser scanning - an introduction and overview*. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, **54**: 68-82.

Received January 2010 - Accepted May 2010