

APPENDICE B
RILIEVI LASERSCAN

D.1 I sistemi LiDAR

La qualità dell'informazione topografica utilizzabile come input per simulazioni idrauliche è un elemento di fondamentale importanza. L'avvento di nuove tecnologie e la loro implementazione per l'applicazione pratica per la rilevazione dei punti al suolo ha offerto innumerevoli possibilità di aumentare la raffinatezza e il dettaglio dell'informazione topografica disponibile. È il caso dell'impiego di sensori laser (conosciuti con l'acronimo di LiDAR) da terra o montati su aeromobile che ha contribuito ulteriormente all'aumento di sensibilità di questo tipo di informazioni.

LiDAR è l'acronimo di *Light Detection and Ranging*. Questo tipo di tecnologia prevede l'utilizzo di laser per poter effettuare rilievi di dettaglio delle elevazioni.

Il principale vantaggio della tecnologia LiDAR è legato alla lunghezza d'onda utilizzata per i rilievi: [lunghezze d'onda ultraviolette](#), nel [visibile](#) o nel vicino infrarosso rendono possibile localizzare e ricavare immagini e informazioni su oggetti molto piccoli, di dimensioni pari alla lunghezza d'onda usata, perciò il LiDAR è molto sensibile agli [aerosol](#) e al particolato in sospensione nelle [nuvole](#) ed è molto usato in [meteorologia](#) e in fisica dell'atmosfera. La coerenza e densità del fascio laser è ottima; la lunghezza d'onda è molto più breve dei sistemi radio e può andare dai 10 [micron](#) a circa 250 [nm](#). Onde di questa lunghezza sono riflesse ottimamente dai piccoli oggetti, con un comportamento detto [retrodiffusione](#).

Un laser ha in genere un fascio molto stretto che permette la mappatura di caratteristiche fisiche con [risoluzione](#) molto alta; inoltre molti composti chimici interagiscono più attivamente con le lunghezze d'onda del visibile che non con le microonde, permettendo una definizione anche migliore: adatte combinazioni di laser permettono la mappatura remota della composizione dell'atmosfera rilevando le variazioni dell'intensità del segnale di ritorno in funzione della lunghezza d'onda.

I sistemi laser scanner hanno offerto nuove e interessanti possibilità nel rilievo anche in zone molto articolate, complesse e di difficile accesso. Il principio su cui si basa la tecnologia "laser scanner" è il calcolo del tempo di oscillazione di un impulso laser. L'impulso elettrico prodotto da un generatore, collimato da un diodo laser trasmittente, crea un raggio di luce infrarossa (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 (vedi Figura D.1, Figura D.2). Il tempo di oscillazione, ossia l'intervallo che intercorre tra l'emissione

dell'impulso e il ritorno, misurato tramite un orologio con una frequenza stabilizzata al quarzo, consente di ricavare il modulo del vettore che va dal centro dello strumento al punto rilevato.

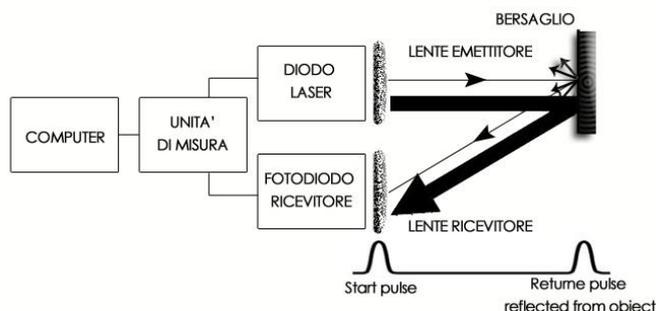


Figura D.1 - Funzionamento del trasmettitore

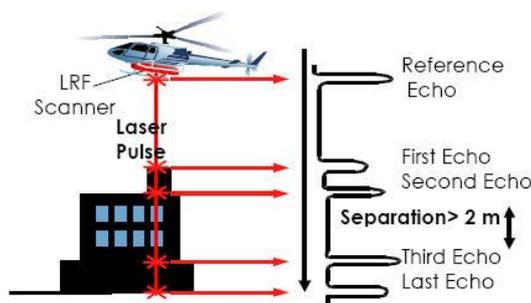


Figura D.2 - Impulsi laser sistema TopEye (Al-Bayari et al. 2002)

Anche in presenza di vegetazione, estrapolando i dati con opportuni calcoli, è possibile ricavare una buona rappresentazione delle superfici.

Il risultato di un rilievo LiDAR è una serie di punti, caratterizzato ognuno da tre parametri (x,y,z), ovvero la loro posizione (x,y) ed elevazione (z).

Al calcolo del tempo di volo è associata anche una misura angolare di precisione (data dal movimento di specchi rotanti) che, creando la spaziatura tra i differenti punti rilevati, genera un grigliato di punti. Oltre alle coordinate cartesiane X, Y, Z di ogni misurazione il sistema registra inoltre l'intensità di segnale dipendente dalla natura dell'oggetto rilevato, cioè dalla sua riflettività (Conforti Andreoni et al. 2003)

Esistono Laser Scanner di tipo terrestre e aviotrasportato. La tecnologia Laser Scanner Terrestre non necessita della presenza di sistemi di posizionamento; i punti rilevati dal laser-scanner vengono memorizzati secondo un sistema di riferimento relativo con origine nel sensore laser. Oltre alle coordinate X, Y, Z, viene registrata l'intensità del segnale di ritorno in funzione della

riflettività del materiale. Successivamente, attraverso appositi software, si può creare un modello continuo e completo dell'oggetto rilevato. La portata (distanza massima di ripresa) e la precisione, diversamente da quanto succede in un rilievo tradizionale, dipendono anche dal grado di riflettività della superficie rilevata, variabile da 0 a 1 (Conforti Andreoni et al. 2003).

Lo sviluppo del GPS negli [anni '80](#) ha reso possibile e pratico lo sviluppo di apparecchiature LiDAR aviotrasportate o su satelliti artificiali, a scopo di mappatura e rilevamento. L'implementazione di laser scanner su aeromobili ha offerto la possibilità di effettuare rilievi topografici ad altissimo dettaglio: mediante l'uso di LiDAR si è in grado di rilevare il profilo altimetrico sia della superficie terrestre che di tutte le altre componenti che su di essa si possono trovare (vegetazione, agglomerati urbani, strade, costruzioni...). Il sistema è costituito da un telemetro laser o LRF (*Laser Range Finder*) che permette la misura della distanza fra l'apparecchio e il suolo, mentre un sistema GPS e una piattaforma inerziale (INS- Inertial Navigation System) valuta l'assetto dell'aeromobile ricavando l'orientazione e la posizione assoluta del LRF durante la misura (Figura D.3).

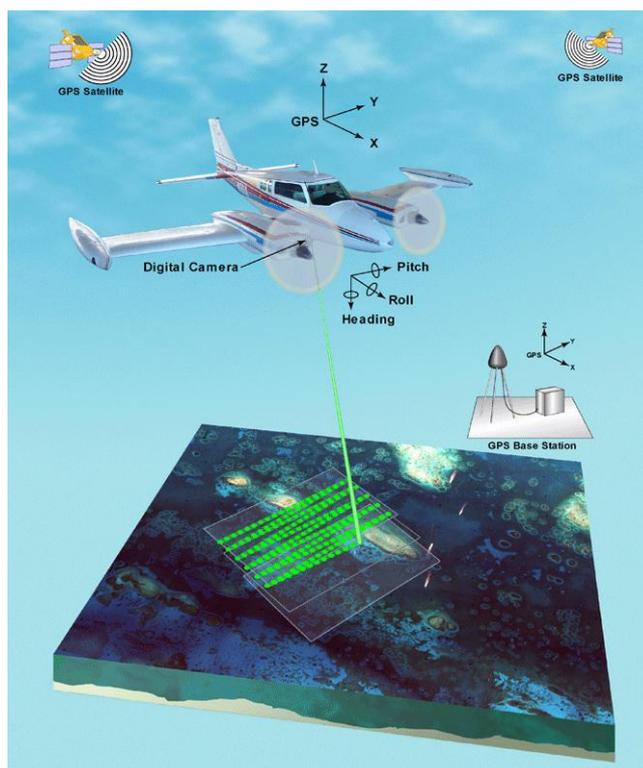


Figura D.3 - Schema di laser scanner aviotrasportato

Gli impulsi generati vengono riflessi tramite uno specchio oscillante verso il terreno in senso

ortogonale alla direzione del velivolo, e conoscendo il tempo intercorso tra l'emissione ed il ritorno è possibile risalire alla distanza del punto colpito dal velivolo. Il sistema permette la registrazione sia del primo sia dell'ultimo impulso laser e la relativa riflettività (Conforti Andreoni et al. 2003).

Il sistema LiDAR può essere montato sia su elicotteri sia su aerei ad ala fissa, consentendo sia il rilievo ad alta risoluzione di fasce territoriali (corridoi) per le applicazioni d'ingegneria sia la registrazione del modello digitale delle elevazioni (DSM-Digital Surface Model e DTM-Digital Terrain Model) di vaste superficie per il settore ambientale e cartografico.

L'utilizzo e la corretta elaborazione dei punti rilevati tramite programmi GIS, permette di migliorare la qualità dell'accuratezza dei modelli digitali del terreno (DTM e DSM) ed è in grado di fornire anche maggiori informazioni in merito alla copertura del suolo.

La qualità del dato del rilievo LiDAR può essere influenzata da diversi fattori tra cui:

- errori determinati dal veicolo (relativi a variazioni di velocità o di altezza del volo);
- errori determinati dal GPS (che causano un rilevamento non corretto della posizione del punto);
- errori determinati dallo strumento;
- errori determinati da condizioni meteo non ottimali;
- errori nella parametrizzazione della vegetazione.

L'accuratezza del posizionamento tridimensionale dipende da vari fattori: oscillazione del velivolo, posizionamento e direzione del raggio laser. Baltsavias (1999) ha analizzato i contributi all'errore di posizionamento legati alle varie componenti del sistema, ossia il GPS, l'apparato inerziale, il telemetro laser e i disallineamenti temporali tra i sensori. Alharthy *et al.* (2004) e Ahokas *et al.* (2005) hanno, tra gli altri, investigato invece sui fattori d'errore esterni al sistema, tra cui quelli legati ai parametri dell'atmosfera, all'altezza del volo, alla pendenza del terreno e alla copertura vegetale.

I possibili errori sono però compensati dagli innumerevoli vantaggi che la tecnologia offre, come ad esempio la possibilità di ottenere DTM e DSM di elevata risoluzione (anche inferiore al metro), di misurare e rilevare anche strutture artificiali presenti sul terreno, di rilevare spessore e copertura della coltre vegetativa e soprattutto la disponibilità di dati sempre attuali e aggiornabili.

Il rilievo LiDAR consente svariate applicazioni (si veda anche Figura D.4) quali:

1. l'analisi e la classificazione della morfologia fluviale (tramite l'elaborazione del profilo delle pendenze lungo la direzione dei torrenti);
2. la mappatura ad elevatissimo dettaglio delle aree di esondazione o delle probabili aree di esondazione;
3. la mappatura, tramite appositi algoritmi, di strade forestali;
4. la mappatura e la classificazione della vegetazione in base alla sua altezza, e la conseguente analisi dell'uso del suolo;
5. la quantificazione della biomassa delle foreste;
6. la mappatura delle aree urbane e la quantificazione delle aree verdi urbane;
7. applicazioni ingegneristiche in generale.

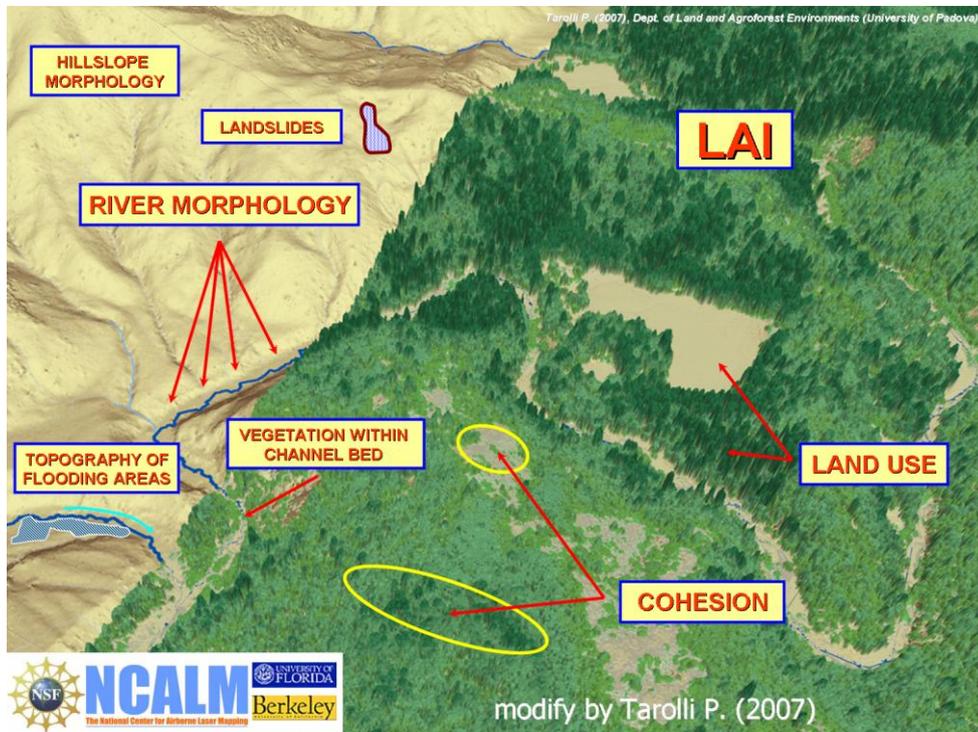


Figura D.4 - Possibili impieghi dei dati LiDAR

Tra i vantaggi della tecnologia LiDAR si può ricordare che:

- i sistemi LiDAR sono sistemi attivi, che generano automaticamente il segnale usato per le misurazioni, inoltre operano indipendentemente dal grado di illuminazione esterna e quindi i rilievi possono essere effettuati anche di notte;
- il raggio laser prodotto può penetrare attraverso strati non troppo densi di vegetazione, dal

momento che le misurazioni multi-impulso sono spesso in grado di rilevare il terreno sotto la vegetazione: in questo modo possono essere ricavati DTM anche su aree coperte da vegetazione;

- i moderni sistemi LiDAR sono in grado di registrare fino a cinque segnali di ritorno per ogni impulso laser emesso e questo dimostra l'abilità del LiDAR di distinguere non solo la copertura vegetazionale o il terreno nudo, ma anche la superficie composta da entrambi; per esempio in aree urbane, il primo segnale di ritorno misura le quote di vegetazione ma anche di edifici o strutture sopraelevate, mentre gli altri impulsi di ritorno misurano sia le superfici libere che le superfici sottostanti;
- il complesso di registrazione dati e di postprocessing permettono di generare DEM e DTM per aree molto vaste (>100km²) in tempi relativamente brevi;
- i sistemi LiDAR hanno anche la capacità di elaborare dati di riflettività degli oggetti, oltre alle loro coordinate xyz; i valori di riflettività (espressi in percentuale) differiscono in base al tipo di superficie bersaglio; questi dati possono in ogni caso essere rielaborati per produrre un file raster georeferenziato utile ad esempio per l'identificazione dei diversi usi del suolo o, in un secondo momento, come base per altre rielaborazioni;
- la tecnologia LiDAR offre l'opportunità di ottenere dati relativi a pendii scoscesi, aree in ombra o aree inaccessibili nel caso di rilievi con metodi più classici;
- la tecnologia LiDAR risulta estremamente efficace per la generazione di DEM e DTM di bacini fluviali per creare database per le simulazioni di eventi di piena (come nel caso del presente lavoro) e per la pianificazione di lavori e applicazioni di ingegneria. Oltretutto in aree con minime differenze di quota e/o con minori contrasti (come le zone costiere) è possibile utilizzare i dati LiDAR per monitorare i processi di erosione. In aree boscate i dati LiDAR sono utili per generare DTM relativi alla superficie sottobosco e per derivare parametri quali l'altezza della copertura forestale, l'analisi dei volumi. In ambiente urbano è poi possibile rielaborare dati LiDAR per ottenere accurati modelli tridimensionali delle città stesse.

Tra gli svantaggi di questa tecnologia si ricorda che:

- le campagne di acquisizione dati richiedono ancora elevati investimenti finanziari; è inoltre necessario pianificare i voli aerei che possono essere influenzati tra l'altro dalle condizioni meteorologiche che;
- le aree che possono essere coperte sono -se paragonate a quelle rilevate con l'uso di satelliti- minori;
- i dati da LiDAR sono estremamente "pesanti" e necessitano di abilità e tempo per essere

rielaborati. Al giorno d'oggi solo poche compagnie e istituti di ricerca hanno esperienza in questo tipo di lavoro;

- le procedure di analisi dei dati LiDAR non sono ancora standardizzate: esistono diversi software (spesso costosi) che non sono di libero utilizzo.

D.2 Relazioni base e formule che regolano il funzionamento del LiDAR

Si riporta di seguito una breve panoramica e delle relazioni base e delle formule che regolano il funzionamento del LiDAR, sulla base di quanto riportato in Baltsavias E., 1999, e Wehr et al. 1999.

Un tipico sensore per la scansione laser può essere diviso nelle seguenti unità chiave: un'unità laser, uno scanner ottometrico e un'unità di controllo e elaborazione dati.

L'unità laser comprende l'emittente laser e il ricevitore. L'apertura di trasmissione e ricezione (solitamente di 8-15 cm di diametro) sono montate in modo tale che entrambe condividano lo stesso percorso ottico per il raggio laser. Questo assicura che la superficie del bersaglio colpito dal laser sia sempre all'interno del campo visuale (FOV- Field Of View) del ricevitore ottico.

A differenza delle microonde utilizzate nelle tecniche radar, i laser offrono vantaggi nelle misurazioni per un duplice motivo: da un lato perché in un minore intervallo di tempo può essere realizzata una maggiore energia di pulsazione e dall'altro lato perché la loro inferiore lunghezza d'onda può essere collimata usando aperture minori (Wehr et al. 1999).

Nelle misurazioni campo visuale del laser (*Range*- ovvero la distanza tra il laser stesso e il suo bersaglio) sono applicati due principi: *Pulse-Ranging* e *CW-Ranging*.

Il metodo principale utilizzato per la misurazione del *range* è quello di derivarlo dalla misurazione del tempo di percorrenza (T_L) che impiega un breve impulso laser per raggiungere la superficie del bersaglio e tornare al ricevitore (*Pulse Ranging*). La lunghezza dell'impulso T_p determina la risoluzione (R) e l'accuratezza (σ_R) del *range*. Per i sistemi a raggio pulsante, la risoluzione determina quanto lontani devono essere due potenziali bersagli in modo che possano essere visualizzati dal laser come due entità separate. Diverso è il caso dei laser a onda continua (*Continuous Wave Laser* o *CW-Laser*) dove l'intensità del raggio laser è modulata secondo funzioni ben definite (ad esempio sinusoidali). Questa modulazione ha un periodo di oscillazione proprio T_p . In questo caso il tempo di volo (T_L) del raggio viene calcolato misurando la differenza di fase tra il segnale trasmesso e quello ricevuto in risposta al contatto tra la superficie rilevata e il raggio laser stesso.

La misura più diretta del tempo di percorrenza (T_L) è quindi data dalla relazione tra la distanza tra

l'emittente e la superficie bersaglio (R) e la velocità della luce c secondo la formula

$$T_L = 2 \frac{R}{c} \quad (\text{Eq. D.1})$$

Come conseguenza più ovvia, conoscendo il tempo di volo T_L dell'apparecchio è possibile calcolarne il range secondo la formula inversa a (D.1):

$$R = c \frac{T_L}{2} \quad (\text{Eq. D.2})$$

Se il laser trasmette con un segnale continuo, il range può essere ottenuto, ad esempio, modulando l'intensità del raggio con un segnale sinusoidale (vedi Figura D.5). L'immagine mostra che il segnale sinusoidale venga ricevuto con un ritardo di tempo T_L , così come per il laser a pulsazione.

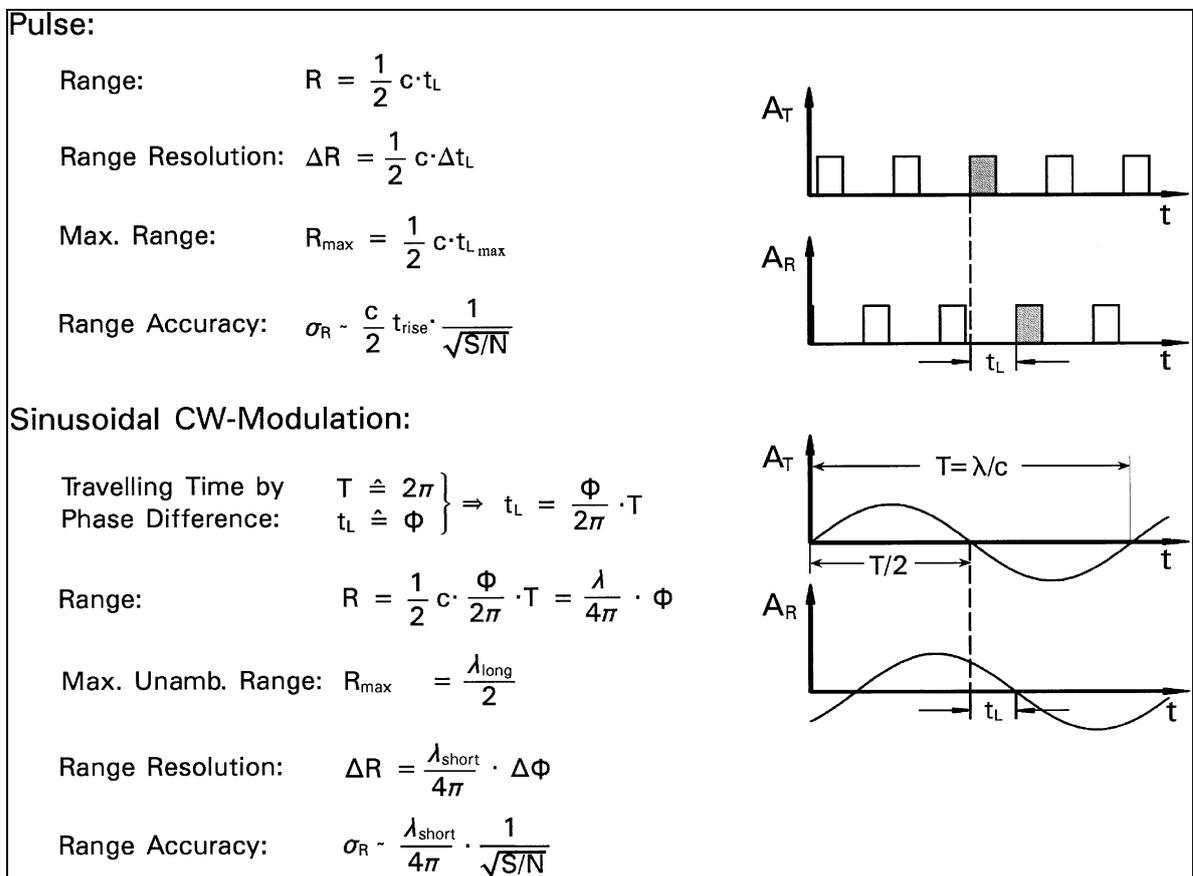


Figura D.5 - Principio di misurazione dei laser. A destra, la prima e terza figura mostrano il segnale trasmesso, la seconda e la quarta il segnale ricevuto. A_T e A_R sono l'ampiezza, rispettivamente, del segnale trasmesso e di quello ricevuto. (Wehr et al. 1999).

Il periodo T del segnale è noto e quindi il tempo T_L è direttamente proporzionale alla differenza di

fase ϕ tra il segnale trasmesso e quello ricevuto. T_L viene calcolato come:

$$T_L = \frac{\phi}{2\pi} T + nT \quad (\text{Eq. D.3})$$

dove n è il numero di onde complete incluse nella distanza tra il trasmettitore e il ricevitore laser.

Dal momento che la frequenza f dell'oscillazione del segnale, è inversamente proporzionale al periodo T di oscillazione, T_L può essere calcolato anche secondo la formula:

$$T_L = \frac{\phi}{2\pi} \frac{1}{f} \quad (\text{Eq. D.4})$$

Se la differenza di fase è nota, il *range* è determinato da:

$$R = \frac{1}{4\pi} \frac{c}{f} \phi \quad (\text{Eq. D.5})$$

Analogamente la risoluzione viene calcolata come:

$$\Delta R = \frac{1}{4\pi} \frac{c}{f} \Delta \phi \quad (\text{Eq. D.6})$$

Dalla formula (eq. D.6) è facile osservare come una maggior risoluzione del laser (minor ΔR) si possa ottenere aumentando la frequenza f di pulsazione.

Altri due parametri molto importanti sono il *Maximum Unambiguous Range* (R_{MAX} , vedi eq. D.7), definito come il massimo intervallo di tempo in cui un impulso può essere riflesso e ricevuto prima dell'emissione dell'impulso successivo, e l'accuratezza del segnale (σ_R).

Partendo dall'idea che la massima differenza di fase possibile (ϕ_{max}) sia pari a 2π (360°) il valore di R_{MAX} viene derivato dall'eq.D.5:

$$R_{MAX} = \frac{1}{4\pi} \frac{c}{f} \phi = \frac{1}{4\pi} \lambda \phi = \frac{\lambda}{2} \quad (\text{Eq. D.7})$$

con λ pari alla lunghezza d'onda del segnale considerato.

L'accuratezza del segnale (σ_R) dipende dal periodo di oscillazione (T_p) del segnale e dal Signal-to-noise Ratio (S/N), ovvero dal rapporto esistente tra la potenza del segnale e quella del disturbo in grado di interferire con esso.

$$\sigma_{R_{pulse}} = \frac{c}{4\pi} T_p \frac{1}{\sqrt{S/N}} \quad (\text{Eq. D.8})$$

$$\sigma_{R_{CW}} = \frac{\lambda}{4\pi} \frac{1}{\sqrt{S/N}} \quad (\text{Eq. D.9})$$

Se c è la velocità della luce, T_p è l'ampiezza della pulsazione e λ la lunghezza d'onda del segnale (Bachman, 1979).

Per quanto riguarda le scansioni laser (come il caso di laser scanner implementati su aeromobile) il processo è illustrato nella Figura D.6.

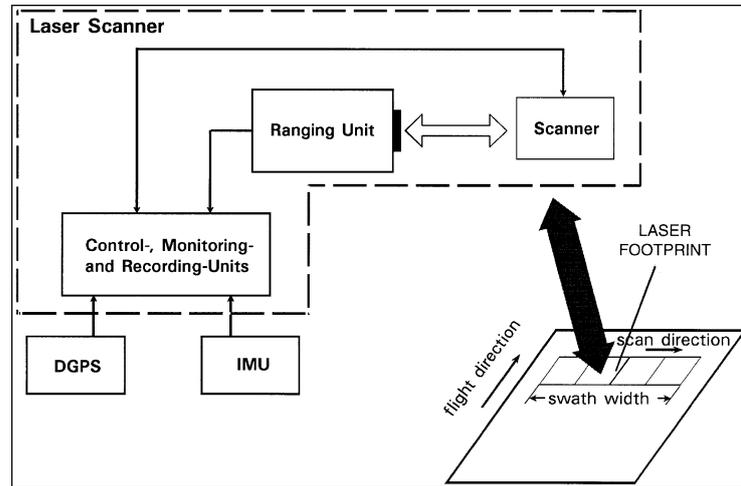


Figura D.6 - Tipico sistema LiDAR. (Wehr et al. 1999)

A tal proposito, i parametri da considerare sono allora l'area coperta dal fascio laser (*Laser footprint*) e l'ampiezza della scansione che è possibile effettuare (*SW- Swath Width*).

Per un'altezza di volo definita come h , l'ampiezza dell'area coperta dal fascio laser (A_L) dipende dalla divergenza del raggio laser γ , mentre la SW è funzione dell'angolo di scansione θ , secondo le formule (eq. D.10) e (eq. D.11):

$$A_{L_{INST}} = \frac{h}{\cos^2(\theta)} \gamma \quad (\text{Eq. D.10})$$

$$SW = 2h \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (\text{Eq. D.11})$$

Oltre a questi due parametri, importante quando si operano dei rilievi è anche la conoscenza della densità dei punti rilevati, densità che è strettamente dipendente dalla tipologia di laser scanner utilizzata e dalla velocità dell'aeromobile v . Considerando una normale scansione laser, la distanza tra i punti perpendicolarmente alla direzione di volo (dx_{across}) dipende soprattutto dalla frequenza di ripetizione degli impulsi (PRF) nel caso di laser ad impulsi, mentre dipende dalla frequenza di misurazione nel caso di CW-laser, e può essere calcolata (ad esempio) secondo la formula:

$$dx_{\text{CROSS}} = \frac{h}{\cos^2(\theta)} \frac{\theta}{PRF} \quad (\text{Eq. D.12})$$

mentre la densità di punti nella direzione di volo è derivata dalla formula:

$$dx_{\text{LONG}} = vt_{\text{sc}} \quad (\text{Eq. D.13})$$

Molto importante è anche la definizione delle dimensioni minime degli oggetti rilevabili. Questo valore non dipende dalla dimensione del bersaglio quanto piuttosto dalla sua riflettività (vedi Figura D.7).

Material	Reflectivity (%)
Dimension lumber (pine, clean, dry)	94
Snow	80–90
White masonry	85
Limestone, clay	Up to 75
Deciduous trees	Typ. 60
Coniferous trees	Typ. 30
Carbonate sand (dry)	57
Carbonate sand (wet)	41
Beach sands, bare areas in dessert	Typ. 50
Rough wood pallet (clean)	25
Concrete, smooth	24
Asphalt with pebbles	17
Lava	8
Black neoprene (synthetic rubber)	5

Figura D.7 - Riflettività di vari materiali in relazione ad una lunghezza d'onda di 900nm (da Wehr et al, 1999)

Presupponiamo che un sensore sia in grado di misurare la distanza di una superficie di area A con una riflettività di appena il 5%. Allora, la minima superficie di un oggetto rilevabile (con riflettività 100%) posto alla stessa distanza sarà data da A/20. Ad esempio per un laser con un passo di 0.5 m, l'area illuminata sarà 0.2 m² e la dimensione minima rilevabile sarà di 0.01 m² (10 cm x 10 cm oppure 2 cm x 50 cm, ecc...). In ogni caso, molti altri fattori influenzano la rilevabilità di un oggetto, come ad esempio parametri caratteristici del laser utilizzato quali il range, la potenza o la lunghezza d'onda del raggio, o elementi quali le condizioni atmosferiche, la radiazione di base, il tipo di riflettività del bersaglio (si avranno risultati diversi a seconda che il bersaglio abbia una riflettività di tipo diffusa, speculare o entrambe), l'inclinazione del terreno, la struttura tridimensionale del bersaglio.

D.3 Tecnologia LiDAR: applicazioni attuali e sviluppi futuri

D.3.1 La tecnologia LiDAR nel settore idrogeomorfologico.

L'approccio moderno alla gestione del settore idrogeomorfologico si è sviluppato sempre più attorno alla necessità di poter prevedere l'andamento di eventi calamitosi come quelli di piena e, in maniera più semplice, di poter conoscere il reale funzionamento di un sistema e le sue risposte in relazione a determinati input. La simulazione della realtà tramite specifici modelli diventa quindi la chiave di volta per poter meglio comprendere l'evoluzione dell'ambiente e la dinamica input-output in esso presente.

Alla base di una corretta simulazione vi è, oltre alla conoscenza delle dinamiche intrinseche di un sistema, anche una sua corretta rappresentazione. È in quest'ottica che si inserisce la conoscenza e l'applicazione della tecnologia LiDAR all'interno del settore idrogeomorfologico.

Ogni sistema viene identificato come una serie di stadi in cui l'output di ogni elemento diventa l'input per l'elemento successivo; la stima del rischio idrogeologico può essere allora condotta basandosi su un modello idraulico che permetta la determinazione delle aree inondabili o esondabili da queste relazioni di input-output. Con le recenti innovazioni tecnologiche che hanno permesso la diminuzione dei tempi di calcolo, è possibile utilizzare con questa finalità sia modelli monodimensionali che bidimensionali. Il progresso ha poi reso disponibili strumenti quali i sistemi GIS che correlati all'uso di modelli, permettono la rappresentazione in una o due dimensioni dei parametri idraulici simulati.

Per quanto riguarda la modellistica idraulica, l'elemento più critico è la topografia dei canali e dell'area inondabile, che possono influenzare sia gli aspetti prettamente idraulici di una piena che l'estensione delle aree inondate risultante da un evento di piena simulato (Nicholas e Walling, 1997; Horrit e Bates, 2001). Il rilievo dell'area esondabile determina una serie di errori che possono produrre enormi differenze nella delineazione dell'area esondata durante le simulazioni idrauliche (Bates e De Roo, 2000). L'effetto potenziale di questi errori nella gestione del rischio idraulico, degli eventi di piena e nella classificazione dei vari livelli di rischio nelle varie aree, sottolinea l'importanza dell'ottimizzazione della qualità dei dati topografici (e conseguentemente la qualità di DTM e DSM).

Sono stati condotti diversi studi per confrontare il diverso range di errori associabile a DTM in funzione delle loro diverse origini, studi che hanno dimostrato come, anche analizzando la relazione costi-tempi di elaborazione, i dati derivanti da rilievi LiDAR siano un produttivo e valido

mezzo di sviluppo di DTM con un livello di accuratezza elevato, soprattutto per l'analisi di aree estese (Casas A. *et al.* 2006).

Altro elemento da considerare nella scelta dei dati di origine per la creazione di DTM è la risoluzione a cui si può arrivare: a seconda della qualità sul quale vengono basate le analisi, un processo può essere infatti più o meno correttamente rappresentato (Tarolli e Tarboton, 2006; Tarolli e Dalla Fontana, 2006).

A tal proposito sono stati fatti anche studi riguardanti la creazione di DTM con varie risoluzioni a partire da dati LiDAR, dimostrando come la differenza di scala influenzasse in maniera significativa i risultati delle varie simulazioni, sia in ambiente urbano che in ambiente agrario. La risoluzione dei vari DTM prodotti influenza varie caratteristiche degli eventi di piena simulati, quali l'estensione del territorio inondato, la velocità della corrente, la profondità dell'acqua esondata e i percorsi dell'acqua stessa attraverso il territorio così come caratterizzato dai vari DTM (Haile e Rientjes, 2005).

Nelle aree urbane, caratteristiche quali strade, edifici, argini hanno un enorme effetto sulla dinamica e sulla caratterizzazione di un evento di piena e in quest'ottica devono essere verosimilmente rappresentati per poter essere correttamente simulati. Questo tipo di contesto risulta normalmente difficilmente analizzabile con l'uso di sensori che operano con lunghezze d'onda molto corte nel visibile o nell'infrarosso, soprattutto a causa dell'elevata dispersione di segnale che si ha nell'atmosfera. L'uso della tecnologia LiDAR, soprattutto per la raccolta di dati indipendenti dal tempo, quali quelli utili per la creazione di modelli tridimensionali delle città, risulta spesso essere un valido strumento.

L'elevata accuratezza e risoluzione ottenibile da dati LiDAR permette di differenziare le principali caratteristiche morfologiche di un paesaggio.

Per quanto riguarda l'analisi del rischio idrogeologico in ambienti montani, è possibile ricordare l'uso di dati LiDAR per la caratterizzazione di grandi aree franose, come base per la modellazione numerica di frane superficiali, per l'identificazione di zone di possibile deposito e per lo studio del profilo longitudinale dei torrenti (Cavalli *et al.* 2007).

Grazie alla risoluzione ottenibile, è possibile l'analisi di processi complessi quali la stabilità del terreno, elemento fondamentale per la creazione di mappe di rischio di dissesto o per identificare i possibili punti di inizio di colate detritiche o fenomeni franosi.

Nel corso degli anni, la creazione di modelli della distribuzione spaziale della potenziale

instabilità di pendii è stata fatta con l'introduzione dei TSM che combinavano lo stato di fatto dell'assunto idrologico con il modello di stabilità dei pendii indefiniti. L'accuratezza di questo tipo di approccio dipendeva dalla qualità dei dati di input: l'uso del LiDAR per i rilievi ha contribuito all'aumentare la qualità dei dati e a permettere la creazione di nuovi DTM e DSM da utilizzare nelle elaborazioni (Tarolli e Tarboton, 2006; Tarolli e Dalla Fontana, 2006).

McKean e Roering (2004) hanno analizzato la possibilità di costruire DTM ad elevata risoluzione derivati da elaborazione di dati LiDAR per mappare un complesso franoso e il terreno circostante: la scelta della risoluzione influenza la possibilità di distinguere il corpo franoso dal terreno circostante e la possibilità di riconoscere e classificare i diversi tipi di massi presenti.

I dati LiDAR sono più facili da elaborare delle informazioni derivanti da SAR e possono essere ottenuti con una densità dell'ordine di 1 m e un'accuratezza verticale attorno ai 20-30 cm a seconda dell'abilità dell'operatore, dalla strumentazione e dall'irregolarità della superficie rilevata. Lo studio ha dimostrato come l'andamento della superficie possa essere accuratamente misurato a partire da DEM ad alta risoluzione. Contrasti nell'irregolarità della superficie possono essere interpretati per identificare zone di frana, possono essere mappati sia come estensione sia come possibili percorsi di futuri eventi e permettono di studiare anche le dinamiche interne di una frana.

Glenn *et al.* (2006) hanno verificato la possibilità di utilizzare dati LiDAR per esaminare la morfologia di una frana, per calcolarne l'irregolarità della superficie, la pendenza, la varianza e la dimensione dei detriti. I risultati hanno dimostrato come l'alta risoluzione dei dati a disposizione abbia il potenziale di differenziare morfologicamente i componenti all'interno di una frana e di dare un'idea generale del tipo di materiale presente e dell'attività del corpo franoso.

Tarolli e Tarboton (2006) identificano le dimensioni ottimali delle celle per la valutazione e lo studio di frane superficiali.

Staley *et al.* (2006) usano elementi topografici derivati da analisi dei dati LiDAR ad alta risoluzione per differenziare zone di deposito in zone soggette a debris-flow. Frankel e Dolan (2007) combinano misure della scabrezza superficiale ottenute da dati LiDAR con metodi classici di geomorfologia e analisi dei sedimenti per caratterizzare e differenziare conoidi alluvionali con diverse età relative. Storesund e Minear (2006) analizzano la morfologia fluviale e il modellamento di canali a partire da dati LiDAR. Magirl *et al.* (2005) valutano i cambiamenti di lungo termine creati dall'attività fluviale e dai debris-flow sul fiume Colorado lungo il Gran Canyon (USA) a partire da dati topografici LiDAR, confrontandoli con dati topografici rilevati con teodolite.

Sul territorio italiano Cavalli *et al.* (2008) hanno condotto uno studio che mira ad analizzare le opportunità dell'uso di dati LiDAR per il riconoscimento delle principali unità morfologiche presenti in torrenti Alpini.

D.3.2 La tecnologia LiDAR nel settore forestale

In ambito forestale la tecnologia LiDAR è ampiamente utilizzata.

L'elevata densità di punti al suolo rilevabile, permette la creazione di una nuova generazione di mappe della vegetazione ad elevatissima risoluzione e aggiornabile costantemente; l'applicazione LiDAR su territori di pregio o interesse nazionale può tradursi in elaborazioni utilizzabili all'interno degli stessi parchi nazionali o regionali, con una classificazione delle aree umide, delle coste, delle foreste secolari o dei sentieri già presenti sul territorio.

La qualità dei dati da rilievo LiDAR consente di stimare in maniera più che precisa l'entità della copertura forestale (Hyypä e Ikinen, 1999; Popescu e Wynne, 2004), ricavando anche DSM utilizzabili per nuove rielaborazioni (Wagner *et al.*, 2006) dato che può essere utile sia a livello di selvicoltura sia a livello di pianificazione e uso delle risorse idriche nonché di sistemazioni idraulico-forestali, poiché si tratta di un elemento che può influenzare l'evoluzione dei processi di erosione o di accumulo di acqua al suolo.

Dall'altezza della vegetazione rilevata è poi possibile derivare la coesione radicale a seconda della specie classificata in base alla sua altezza: è quindi possibile migliorare le performance di modelli di stabilità superficiale.

Grazie all'elevata precisione è possibile derivare una nuova generazione di modelli per la stima dell'evapotraspirazione e di conseguenza è possibile ricalibrare tutti i modelli meteo-idrologici già applicati.

Altra possibile utilizzazione dei dati LiDAR è quella che permette di derivare la biomassa della vegetazione (Hyypä e Hyypä, 1999). Altezza in m ed estensione in m² dei dati di copertura della vegetazione derivati da LiDAR permettono il calcolo della massa in m³, cosa che permette di ottenere nuove e più precise informazioni utili alla stima della distribuzione di CO₂ o al quantificare in termini economici il valore di una foresta sulla base della produzione legnosa.

Dopo i primi lavori di Hyypä *et al.* (2000; 2001), con Reutebuch *et al.* (2003) viene portata avanti una verifica sperimentale in cui un DTM LiDAR relativo ad aree ricoperte da foresta è stato confrontato rispetto a 347 areole di controllo, determinate mediante GPS e stazione totale, scelte in modo da rappresentare quattro diverse tipologie boschive: aree in cui è stato effettuato il

taglio a raso, aree pesantemente disboscate, aree con minima presenza di tagli selettivi, aree vergini con rilevante sviluppo di sottobosco. La scansione laser ad alta densità (> 4 punti/m²), e l'impostazione "last pulse", ha dato luogo ad errori molto contenuti, compresi tra 0.22 e 0.24 m (0.32 m RMSE), con basse correlazioni rispetto a fattori quali densità della copertura fogliare, altezza della vegetazione, pendenza del terreno, ed altezza della vegetazione del sottobosco. Ahokas *et al.* (2005), in un rapporto generale sulla qualità dei rilievi Lidar, e più dettagliatamente Hyyppä *et al.* (2005), riportano anch'essi una precisione generale dell'ordine dei 0.20 metri, osservando come questa sia influenzata, anche se non in modo rilevante, da fattori quali: altezza di volo, utilizzo dei "first" anziché dei "last pulse", pendenza del terreno, copertura fogliare e sviluppo del sottobosco - parametri, questi ultimi, legati al periodo dell'anno.

Barilotti A. *et al* (2006) hanno confrontato la qualità di un DTM ad alta definizione derivante da una scansione LiDAR su un'area campione della Foresta di Pramodio, nelle Alpi Carniche, con il corrispondente DTM ottenuto da rilievo topografico a terra, eseguito sotto chioma mediante stazione totale ad inseguimento automatico e prisma riflettore, dimostrando tra l'altro come la determinazione di DTM in aree ricoperte da foresta, mediante scansione laser da aeromobile consenta di ovviare efficacemente e con ottimi risultati alle gravi limitazioni cui è soggetto l'impiego delle tecniche tradizionali fotogrammetriche e terrestri.

La conoscenza della corretta distribuzione ed entità delle aree verdi ottenibile con i dati LiDAR permette di attuare politiche di pianificazione e distribuzione ragionata delle aree verdi.

D.3.3 Possibili sviluppi futuri

I possibili sviluppi della tecnologia LiDAR possono essere analizzati sotto svariati aspetti, dall'evoluzione nel tempo della produzione di dati LiDAR, alle innovazioni alla tecnologia stessa.

Per quanto riguarda la produttività, c'è da sottolineare come essa ottenga beneficio dal miglioramento nei software in vendita e nell'aumento delle esperienze nel settore, elementi che si traducono in un minore tempo necessario all'elaborazione dei dati. Ancora, la fusione di dati di vario tipo migliora l'accuratezza del filtraggio dei dati e la classificazione delle varie caratteristiche analizzate e lavori integrati garantiscono una diminuzione dei costi di elaborazione; un aumento del controllo di qualità incide allo stesso modo sulla riduzione dei costi.

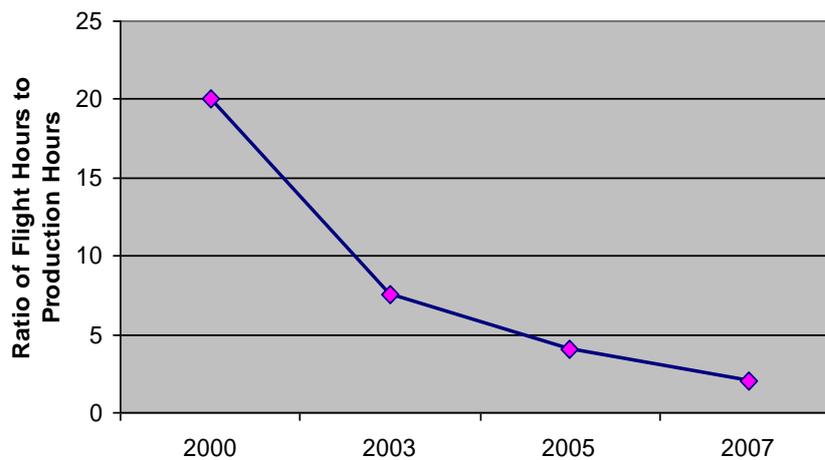


Figura D.8 - Andamento del rapporto tra ore di volo e tempo di elaborazione dei dati (Tilley, 2006)

Con lo sviluppo tecnologico si arriverà a raddoppiare se non triplicare la frequenza degli impulsi laser, cosa che permetterà una maggiore copertura di informazioni (tradotta anche in un minor costo di acquisizione dei dati) e a una maggiore densità di punti utilizzabili per le svariate applicazioni ingegneristiche della tecnologia LiDAR.

Miglioramenti nell'automazione della produzione di profili del terreno si traducono anch'essi in una diminuzione nei costi di elaborazione e in un aumento dell'accuratezza delle quote restituite (con una precisione verticale con un errore di circa 6-8 cm, contro i 15 cm odierni).

Il tutto si può tradurre in un maggior numero di prodotti che è possibile derivare da rilievi LiDAR con conseguente maggior valore all'investimento nell'acquisizione dei dati e ampliamento dell'uso della tecnologia.

C'è da considerare che già oggi la produzione di DEM da dati LiDAR si presenta come quella con la maggiore accuratezza, tuttavia rimane una delle più costose (vedi Figura D.9): lo sviluppo della produzione e i miglioramenti permetteranno però di ridurre i prezzi, aumentando la disponibilità di questo tipo di dati (Tilley, 2006).

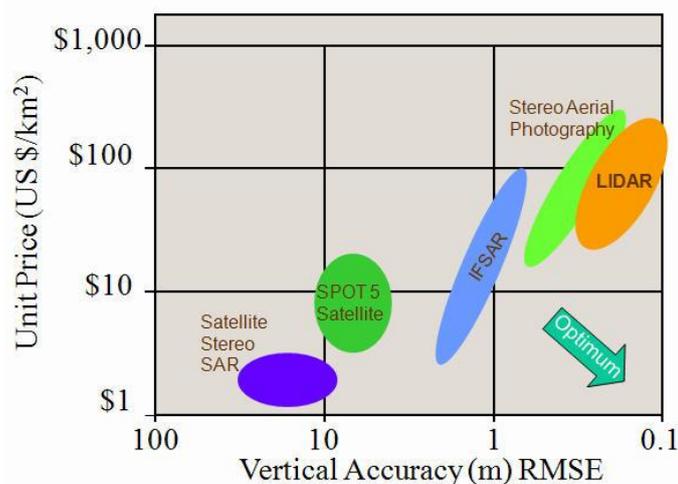


Figura D.9 - Rapporto tra prezzo e accuratezza verticale dei principali metodi di rilievo (Tilley, 2006); i costi unitari si riferiscono a rilievi di superfici regolari e di una certa estensione (maggiori di 100 km²) e possono aumentare di uno-due ordini di grandezza per superfici più limitate o andamenti planimetrici particolarmente complessi.

BIBLIOGRAFIA ALL'APPENDICE D

- AHOKAS, E., YU X., KAARTINEN, H., HYYPPÄ, J., KAASALAINEN, S., MATIKAINEN, L., HONKAVAARA, E., HYYPPÄ H., RÖNNHOLM, P., SOININEN, A., (2005): *Quality of laser scanning*. In: EARSeL-Workshop on Remote Sensing, Porto, Portugal, 8 pp., CD-ROM.
- AL-BAYARI O.A. , AL-HANBALI N.N. , BARBARELLA M., NASHWAN A. (2002): *Quality assessment of DTM and orthophoto generated by airborne laser scanning system using automated digital photogrammetry*. Commission III, PCV Symposium 2002.
- ALHARTHY, A., BETHEL, J., MIKHAIL, E., M., (2004): *Analysis and accuracy assessment of airborne laserscanning system*. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Istanbul, Turkey, Vol. XXXV, part B2, pp. 144- 149.
- BALTSAVIAS, E., (1999): *Airborne Laser Scanning: Basic Relations and Formulas*. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing. 54 (2-3), pp. 199-214
- BARILOTTI A., BEINAT A., FICO B., SOSSAI E. (2006): *Produzione e verifica di DTM da rilievi lidar aerei su aree montane ricoperte da foresta*. Convegno nazionale SIFET "Le nuove frontiere della rappresentazione 3d"
- BATES PD, DE ROO APJ. (2000): *A simple raster-based model for flood inundation simulation*. Journal of Hydrology 236: 54-77.
- CASAS A., BENITO G., V.R. THORNDYCRAFT, Rico M., (2006): *The topographic data source of*

digital terrain models as a key element in the accuracy of hydraulic flood modelling. Earth surface processes and Landforms, 31, 444-456

CAVALLI M., MARCHI, L. (2008): *Characterisation of the surface morphology of an alpine alluvial fan using airborne LiDAR. Nat. Hazard Earth Syst. Sci. 8,232-333.2008*

CAVALLI, M., TAROLLI, P., MARCHI, L., DALLA FONTANA, G. (2007): *The effectiveness of airborne LiDAR data in the recognition of channel bed morphology. Catena, 73, 249-260, ISSN: 0341-8162, , <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2007.11.001>.*

CONFORTI ANDREONI D., MASSARI, G., POTLECA, M. (2003): *Generazione di modelli digitali del terreno dalla combinazione di dati lidar da piattaforma aerea e terrestri. VII conferenza nazionale ASITA "L'Informazione Territoriale e la Dimensione Tempo".*

FRANKEL, K.L., DOLAN, J.F., (2007): *Characterizing arid-region alluvial fan surface roughness with airborne laser swath mapping digital topographic data. Journal of Geophysical Research - Earth Surface 112, F02025. doi:10.1029/2006JF000644.*

GLENN, N.F., STREUTKER, D.R., CHADWICK, D.J., THACKRAY, G.D., DORSCH, S.J., (2006): *Analysis of LiDAR-derived topographic information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity. Geomorphology 73, 131-148.*

HAILE A.T. RIENTJES T.H.M. (2005): *Effects of LiDAR DEM resolution in flood modelling: a model sensitivity study for the city of Tegucigalpa, Honduras. ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop "Laser scanning 2005", Enschede, the Netherlands, September 12-14, 2005*

HORRITT MS, BATES PD. (2001): *Predicting floodplain inundation: raster-based modelling versus the finite-element approach. Hydrological Processes 15(5): 825-842.*

HYYPPÄ, H. , YU X., HYYPPÄ, J., KAARTINEN, H., KAASALAINEN, S. , HONKAVAARA, E., RÖNNHOLM, P., (2005): *Factors affecting the quality of dtm generation in forested areas. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Enschede, the Netherlands, Vol. XXXVI, Part 3/W19 , pp. 85-90.*

HYYPPÄ, J., HYYPPÄ H. and SAMBERG A. (1999): *Assessing Forest Stand Attributes by Laser Scanner. Laser Radar Technology and Applications IV. Proceedings of SPIE. 3707:57-69.*

HYYPPÄ, J., INKINEN, M., (1999): *Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanner. The photogrammetric journal of Finland, 16:27-42.*

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, W05021. doi:10.1029/2003WR002519.

- MCKEAN, J., ROERING, J., (2004): *Objective landslide detection and surface morphology mapping using high-resolution airborne laser altimetry*. *Geomorphology* 57, 331-351.
- NICHOLAS AP, WALLING DE. (1997): *Modelling flood hydraulics and overbank deposition on river floodplains*. *Earth Surface Processes and Landforms* 22: 59-77.
- POPESCU, S.C. and WYNNE, R.H., (2004): *Seeing the trees in the forest: using lidar and multispectral data fusion with local filtering and variable window size for estimating tree height*. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 70(5): 589-604
- REUTEBUCH S., E., MCGAUGHEY R., J., ANDERSEN H., CARSON W., (2003): *Accuracy of a high-resolution lidar terrain model under a conifer forest canopy*. *Canadian Journal of Remote Sensing* 29(5), pp. 527-535
- STALEY, D.M., WASKLEWICZ, T.A., BLASZCZYNSKI, J.S., (2006): *Superficial patterns of debris flow deposition on alluvial fans in Death Valley, CA using airborne laser swath mapping*. *Geomorphology* 74, 152-163.
- STORESUND, R., MINEAR, J., (2006): *Evaluation of ground-based LiDAR for use in fluvial geomorphology and river restoration*. *Eos Trans. AGU* 87 (52) Fall Meet. Suppl., Abstract G53C-0915.
- TAROLLI, P., and DALLA FONTANA, G., (2006): *Evaluation of LIDAR DEM resolution to terrain stability hazard mapping*. *Geophysical Research Abstracts*, 8, 03503. SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU06-A-03503
- TAROLLI, P., and TARBOTON, D. G., (2006): *A New Method for Determination of Most Likely Landslide Initiation Points and the Evaluation of Digital Terrain Model Scale in Terrain*
- TILLEY J. (2006): *Lidar future trends*
- WAGNER W., KUNZER C., ZANG J. (2006): *Remote Sensing in Integrated Watershed Management*. Script for the course Integrated Watershed Management (INWAMA) funded by the Asia-Link Program of the European Commission.
- WEHR. A., LOHR, U., (1999): *Airborne laser scanning-an introduction and overview* *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 54(1999)68-82