

## L'USO DI MODELLI DIGITALI DEL TERRENO COME STRUMENTO PER LO STUDIO DELL'EVOLUZIONE MORFOLOGICA DEI CORSI D'ACQUA: PROPOSTE METODOLOGICHE E PRIMI RISULTATI

Giorgio Lollino<sup>1</sup>, Daniele Giordan<sup>1</sup>, Marco Baldo<sup>1</sup>, Paolo Allasia<sup>1</sup> & Federica Pellegrini<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CNR IRPI, Strada delle Cacce 73, 10135 Torino, tel 011/3977810

<sup>2</sup>AIPO, Via Garibaldi 75 - 43100 PARMA

e-mail: giorgio.lollino@irpi.cnr.it

RIASSUNTO: Lollino G. et al., *L'uso di modelli digitali del terreno come strumento per lo studio dell'evoluzione morfologica dei corsi d'acqua: proposte metodologiche e primi risultati* (IT ISSN 0394-3356, 2008).

La disponibilità di strumentazioni per il rilevamento su vaste aree come il LIDAR offre, forse per la prima volta, la possibilità di realizzare modelli Digitali del Terreno (DTM) ad alta risoluzione (2 - 8 punti al metro quadrato) di ampie porzioni di territorio tra cui anche i fiumi. L'elevata complessità morfologica dei corsi d'acqua e la necessità di rilevare anche le porzioni sommerse, rende tale contesto particolarmente complesso. L'uso esclusivo del LIDAR non è infatti spesso sufficiente per ottenere un DTM completo e devono quindi essere ad esso abbinati altri sistemi di rilevamento delle porzioni sommerse. Come per tutte le strumentazioni relativamente recenti, anche in questo caso non esistono ancora delle modalità di rilevamento standard; esiste dunque forse la necessità, a fronte di progetti di ampia portata, di provare a definire delle possibili combinazioni di più metodi di rilevamento che si adattino alle differenti situazioni riscontrabili alla scala, per esempio, del Bacino Padano. L'esperienza condotta dal CNR IRPI di Torino in tale ambito ha permesso sin ora di riconoscere una possibile relazione tra tipologia di corso d'acqua e modalità di rilevamento. Tale ipotesi, ancora sperimentale, è comunque il frutto di un'esperienza pluriennale nel campo del rilevamento dei corsi d'acqua con tali tecniche, ma anche dell'impiego di tale tipologia di dati per lo studio dell'evoluzione morfologica. Generato il DTM ad una specifica maglia (la cui densità di punti idonea a rappresentare fedelmente le discontinuità morfologiche del territorio è anch'essa oggetto di ricerca) sono infatti possibili diverse applicazioni: dalle più semplici come l'estrazione di sezioni topografiche alle più complesse, che prevedono la comparazione di modelli digitali realizzati in tempi diversi sui medesimi tratti di alveo. L'obiettivo di tale comparazione è quello di riconoscere e misurare le variazioni occorse, attraverso la creazione di una metodologia di gestione e trattamento dei dati che presuppone specifiche conoscenze sia in campo topografico che geomorfologico. Il processo di comparazione proposto non è infatti un mero esercizio informatico, ma un percorso basato su una serie di tappe alle quali seguono necessariamente un controllo ed una validazione su basi geomorfologiche attraverso l'impiego di ortofoto digitali rilevate contestualmente al volo LIDAR. I risultati sin ora raggiunti con questa tecnica sperimentale riguardano sia la possibilità di valutare in modo continuo le variazioni altimetriche occorse che il calcolo delle variazioni volumetriche del medesimo periodo. In questo modo è forse possibile affiancare agli studi condotti su sezioni topografiche, un nuovo approccio di tipo areale (attraverso dei grigliati con passo di 1 m<sup>2</sup>) che prende in considerazione con continuità l'intero corso d'acqua.

Alla luce dei risultati raggiunti ed in parte esposti, tale metodologia sembra essere in grado di evidenziare le variazioni recenti di un corso d'acqua con un grado di dettaglio estremamente elevato e di creare un nuovo metodo di studio da abbinare a quelli già comunemente utilizzati dalla comunità scientifica. L'utilizzo poi di sistemi informativi territoriali, consente anche di creare un'unica base di dati in cui, tenendo conto delle enormi differenze in termini di precisioni, possono essere inseriti i dati provenienti dalle cartografie storiche, a fianco delle variazioni volumetriche occorse negli ultimi 3-4 anni; l'obiettivo è quello di poter alla fine ottenere un quadro il più possibile esaustivo di tutte le informazioni disponibili, in un'ottica di analisi multidisciplinare del contesto fluviale. L'oggetto della ricerca non riguarda tuttavia solamente la definizione della metodologia di comparazione dei DTM, ma prende in considerazione anche le modalità stesse con cui essi vengono generati: la necessità di affiancare al LIDAR altre strumentazioni finalizzate ai rilevamenti delle aree sommerse (*single beam*, *multibeam*, *side scan sonar*) ha innescato una profonda riflessione circa la necessità di definire delle linee guida che mettano in relazione le tipologie di rilevamento con le caratteristiche morfologiche dei corsi d'acqua analizzati.

ABSTRACT: Lollino G. et al., DTMs comparison methodology as a tool for studying morphological river evolution (IT ISSN 0394-3356, 2008).

*The availability of new instruments for large area survey activities such as LIDAR gives, perhaps for the first time, the possibility to make Digital Terrain Model (DTM) of rivers and other geomorphological contexts. The high geomorphological complexity of rivers and the necessity to also carry out surveys of the submerged zone, make this context very complex.*

*For this reason the exclusive LIDAR use is not always enough and often the use of other survey instrumentation is necessary to obtain a high resolution (2 - 8 point per meter) river DTM. As for other recent instrumentation, also for LIDAR standard survey methodology is still not available. From this point of view, there is probably the necessity to try to define possible relationships between survey methods and morphological river characteristics, for example, at Po Basin scale. The experience conducted by the CNR IRPI of Turin in this field has so far allowed us to recognize a possible relationship between river morphology and surveying methods. Such a hypothesis, until now experimental, has been made due to years of experience in the field of stream surveying using such techniques and this data typology. When a DTM is calculated, it is then in fact possible to use different applications: starting from the more simple such as topographical river section extraction, to arrive at the most complex, such as a digital model comparison carried out at different times on the same river bed areas. The goal of such comparisons is to recognize and measure variations which occurred, through the creation of a management and treatment data methodology that implies specific knowledge in both topographical and in the geomorphologic field. The comparison process here proposed is not in fact a simple computational exercise but a path based on a series of steps where a control and validation from a geomorphologic point of view, through a digital orthophoto analysis, is taken during the LIDAR survey. In this way it is maybe possible to place along side the studies conducted using topographical sections, a new areal approach (through regular grids with a footstep of 1 m<sup>2</sup>), that takes into consideration the whole river bed.*

*In the light of collected results and partly shown, such methodology seems to be able to underline recent variations of a water course with an high degree of reliability and to create a new study methodology to commonly combine those already used by the scientific community. The use of geographic information systems, thus, also allows us to create an unambiguous database in which, keeping in mind the enormous differences, data coming from the historical cartographies, with the variations which occurred in the last 3-4 years, can be imputed; the final goal is to create a more exhaustive scenery using all the available information from a multidisciplinary analysis point of view of a river domain. The aim of this research is not only to define the DTM comparison methodology, but also to evaluate the best way to do them: the necessity to use not only the LIDAR but also some instrumentation to carry out the DTM of submerged areas (single beam, multibeam, side scan sonar) required the possibility to define a survey methodology that assigns the relationship between river morphology and survey activity*

Parole chiave: Corso d'acqua, DTM, LIDAR, evoluzione morfologica del corso d'acqua.

Keywords: river, DTM, LIDAR, river bed morphological evolution.

## 1. INTRODUZIONE

Lo studio dell'evoluzione dei corsi d'acqua rappresenta un tema di ricerca da sempre molto interessante per le molteplici ripercussioni che esso ha sia da un punto di vista scientifico, ma anche rispetto alla complessa opera di gestione del territorio. Per quanto riguarda in special modo il secondo aspetto, è ovvio che maggiore è il carico antropico delle aree immediatamente limitrofe al corso d'acqua, maggiore saranno anche le problematiche di gestione delle relazioni tra le necessità dell'uomo e gli spazi vitali per il corso d'acqua. Tale situazione è perfettamente riscontrabile nell'area oggetto della ricerca che fa parte del bacino del Fiume Po, il più lungo fiume italiano che attraversa da E a W la parte settentrionale della Penisola: un settore densamente abitato, in cui l'uomo nel corso dei secoli ha progressivamente occupato ampie porzioni di territorio anticamente di pertinenza del fiume (GOVI & TURITTO, 1993; SURIAN & RINALDI, 2003).

In particolar modo, gli effetti più pesanti dell'azione dell'uomo sul corso d'acqua possono essere sicuramente ricondotti al XX secolo, durante il quale il prelievo di materiale in alveo ha raggiunto livelli molto elevati (GOVI & TURITTO, 1993). Terminato il periodo a cavallo tra gli anni '50 e '70 in cui questo prelievo ha raggiunto l'apice (MARCHETTI, 2002), è emersa a partire dagli anni '90 (soprattutto a causa anche di due catastrofici eventi alluvionali verificatisi nel 1994 e nel 2000) una nuova necessità di eseguire degli studi sul possibile trend evolutivo del "sistema Po" finalizzato ad una corretta gestione delle risorse e delle criticità in esso presenti.

In particolare, l'attenzione sia dei ricercatori che degli Enti preposti alla gestione del territorio si è concentrata sull'evoluzione recente del corso d'acqua e sulle modalità per ottenere delle metodologie in grado di valutarne il trend evolutivo, al fine di definire uno strumento di pianificazione finalizzato alla gestione dei sedimenti (RINALDI et al., 2005).

In tale ambito nascono e si sviluppano una serie di progetti di ricerca frutto della collaborazione scientifica tra l'AIPO (Agenzia Interregionale per il Fiume Po) e il CNR IRPI di Torino, finalizzati alla definizione di una metodologia di studio per la comprensione dell'evoluzione dei corsi d'acqua da applicare ad una corretta opera di manutenzione e gestione. Il progetto di ricerca ha visto impegnati i ricercatori e tecnici dei due Enti a partire dal 2004 con una serie di attività volte soprattutto a studi a carattere storico abbinati all'utilizzo delle più moderne tecnologie di rilevamento quali i rilievi LIDAR - *Light detection and ranging* e quelli *single* e *multi-beam* (FRENCH, 2003; ANDERSON et al., 2006). Le esperienze sperimentali note in letteratura hanno infatti evidenziato come grazie all'impiego di sistemi di monitoraggio ad alta risoluzione sia spesso possibile portare al riconoscimento ed allo studio delle dinamiche erosive e deposizionali (LAWLER, 2005); in particolare, l'utilizzo di DTM realizzati in serie sembra possa essere un valido strumento per lo studio della dinamica dei corsi d'acqua (LOLLINO et al., 2005). È infatti emerso come la possibilità di generare Modelli Digitali del Terreno (DTM) ad alta risoluzione con una densità di punti (che nel caso del LIDAR arriva ad essere di 2-8 punti al m<sup>2</sup>) consente di avere una definizione della superficie topografica su ampie aree difficilmente raggiungibile con altri strumen-

ti. Inoltre, la possibilità di ottenere dei rilevamenti in serie sui medesimi corsi d'acqua permette di poterli analizzare da un punto di vista morfologico (BRANSINGTON et al., 2006) e di valutarne le differenze in termini piano altimetrici e volumetrici, rappresentando così uno strumento conoscitivo estremamente efficace per la comprensione della evoluzione recente del corso d'acqua.

Tale approccio presuppone tuttavia la definizione di una metodologia che individui le tipologie di rilevamento da utilizzare per la realizzazione di DTM in modo da garantire un elevato grado di ripetibilità oltre che di affidabilità del dato. La metodologia messa a punto non deve solamente considerare i problemi tecnici connessi all'esecuzione dei rilievi, ma deve anche valutare le diverse caratteristiche dei vari corsi d'acqua presenti all'interno dell'area di studio. Il "Sistema Po" è infatti un sistema molto complesso ed articolato, in cui sono presenti realtà anche molto diverse tra loro. Date le caratteristiche del dato LIDAR e le sue limitazioni connesse alla scarsa (e comunque non affidabile) risposta in corrispondenza alle aree sommerse, è verosimile supporre che tale sistema non possa assolutamente essere considerato sufficiente per la restituzione di DTM continui, soprattutto nei casi in cui gran parte dell'alveo attivo si trovi ad essere sommerso per gran parte dell'anno. Esiste dunque la necessità, se si vuol provare ad utilizzare il metodo di comparazione dei DTM in modo estensivo, di affiancare al LIDAR altre tecniche di rilevamento delle zone sommerse che siano in grado di colmare le lacune. Le esperienze condotte sin ora hanno evidenziato come esistano sostanzialmente tre tipologie di strumentazione in grado di garantire tale possibilità: *single beam*, *side scan sonar* e *multi beam*. Si tratta in tutti e tre i casi di sistemici sonici in grado di rilevare la profondità del fondale emettendo un singolo impulso o una sequenza di impulsi che, attraverso un sistema di posizionamento GPS, può portare alla generazione di una nuvola di punti compatibile con quella prodotta dal LIDAR.

Il lavoro presentato riguarda una parte delle esperienze sin ora condotte su una serie di tratti di diversi corsi d'acqua del Bacino Padano che hanno permesso di giungere ad interessanti risultati relativi allo studio dei singoli tratti indagati corsi d'acqua e di fornire delle interessanti indicazioni per la messa a punto di una metodologia di riferimento da estendere progressivamente a tutto il bacino. L'obiettivo è infatti quello di aumentare il grado di conoscenza dello stato di evoluzione attuale dei corsi d'acqua del bacino Padano utilizzando le nuove tecnologie disponibili, in modo da affiancare alle metodologie di studio e ricerca già in essere anche un approccio quantitativo che misuri l'evoluzione recente dei corsi d'acqua stessi. Tale metodologia prevede l'utilizzo integrato dei DTM rilevati in epoca recente e della loro comparazione anche con i risultati derivanti dalla ricerca e dall'analisi della cartografia storica disponibile. Lo studio condotto su un intervallo di tempo sufficientemente ampio (almeno 100 anni) permette di ricostruire nel tempo e nello spazio le variazioni planimetriche occorse al corso d'acqua, a cui vanno ad aggiungersi anche i dati ricavati per lo studio dell'evoluzione recente che hanno l'interessante caratteristica di essere in tre dimensioni, prendendo cioè anche in considerazione le variazioni altimetriche (prima

difficilmente desumibili se non in corrispondenza a sezioni topografiche). Partendo dal presupposto che un corso d'acqua sia un'entità che si evolve su una scala temporale che non è confrontabile con la percezione umana del tempo, questo studio va quindi visto come uno sforzo di integrare diverse tecniche d'indagine in modo da poter coprire un lasso di tempo il più possibilmente ampio con un dettaglio via via crescente.

## 2. METODOLOGIA UTILIZZATA

Le attività di ricerca dei progetti condotti dal CNR IRPI di Torino sono state rivolte sia ad uno studio dell'evoluzione storica tramite la realizzazione di un sistema informativo delle differenti basi cartografiche e delle informazioni dedotte da riprese aerofotogrammetriche degli ultimi 150 anni, che ad una caratterizzazione delle condizioni attuali tramite analisi sedimentologiche e realizzazione di DTM ad alta risoluzione. In particolare, per mettere a punto una metodologia d'indagine basata sull'uso di DTM, sono stati presi in esame differenti porzioni di corsi d'acqua del Bacino Padano in modo da ottenere un set di dati ed esperienze che fossero il più possibile rappresentativi di diverse condizioni presenti nel Bacino; particolar per tale ragione, sono stati analizzati con tecniche e metodologie di rilevamento differenti i seguenti tratti:

- due tratti del Fiume Po: il primo, per un totale di circa 6 km, in corrispondenza a Pontelagoscuro (FE) e il tratto di Po di Tolle da Porto Tolle al Mare; i due tratti rilevati sono molto brevi e finalizzati esclusivamente a condurre una serie di valutazioni sull'operatività del *side scan sonar*; esiste infatti un rilevamento completo dell'alveo a cura dell'Autorità di Bacino del fiume Po realizzato integrando la tecnica LIDAR con quella *multibeam* (FILIPPI *et al.*, 2004; CAMORANI *et al.*, 2006). Rilevamenti eseguiti: LIDAR aereo + *side scan sonar*; anno di rilevamento: 2006
- il Torrente Orco - Regione Piemonte, sinistra idrografica del Fiume Po; il tratto indagato è lungo circa 40 km (da Pont Canavese a confluenza Po) e manifesta un assetto planimetrico riconducibile al modello fluviale che ha, come aspetto peculiare, la presenza di più canali di deflusso con interposte isole e numerose barre, a testimonianza della componente grossolana della granulometria che costituisce il fondo alveo dotato di elevata mobilità. Rilevamenti eseguiti: LIDAR aereo; anno di rilevamento: 2003, 2004, 2006, 2007;
- il Fiume Adda - Regione Lombardia, sinistra idrografica del Fiume Po; il tratto indagato è lungo circa 21 km (da confluenza Brembo a Bisnate) e manifesta un andamento unicursale a tratti pseudomeandriiforme. Rilevamenti eseguiti: LIDAR aereo + *single beam*; anno di rilevamento: 2004, 2006
- il Fiume Taro - Regione Emilia Romagna, destra idrografica del Fiume Po; il tratto indagato è lungo circa 16 km (da Fornovo di Taro a Noceto) In base a quelle che sono le classificazioni conosciute (ROSGEN, 1994; THORNE, 1998) è molto difficile inquadrare la tipologia dell'alveo del Fiume Taro, che può essere definito come un corso d'acqua a più canali di deflusso, molti dei quali effimeri in condizioni di livelli idrometrici bassi. Inoltre, da un'osservazione generale

appare evidente come l'alveo del corso d'acqua si configuri come molto ampio con situazioni in cui i canali attivi scorrono in prevalenza nelle parti laterali, in destra e sinistra dell'alveo attivo. Nella parte centrale si sviluppa un sistema di barre più o meno attive caratterizzate generalmente da una quasi totale assenza di vegetazione. Rilevamenti eseguiti: LIDAR aereo; anno di rilevamento: 2004, 2006;

- il Fiume Secchia - Regione Emilia Romagna, destra idrografica del Fiume Po; il tratto indagato è lungo circa 17 km (da confluenza Torrente Dolo a Castellarano). Il tratto di Fiume Secchia analizzato si inserisce ancora in un contesto decisamente appenninico, caratterizzato anche da un'importante interazione con la dinamica di versante molto attiva in quest'area. Il Fiume Secchia ha sviluppato nel corso del tempo un andamento a più canali di deflusso raggiungendo in tratti e tempi diversi una morfologia di tipo *braided*, con la presenza di numerosi canali attivi (molti dei quali effimeri o di dimensioni ridotte al momento del rilievo). Rilevamenti eseguiti: LIDAR aereo; anno di rilevamento: 2004, 2006;

Questa prima trincea di rilevamenti ha coperto un'area di più di 60 km<sup>2</sup>, fungendo da *test site* per la messa a punto delle metodologie di rilevamento e di analisi dei dati oggetto del presente lavoro. Ad essi si vanno attualmente aggiungendo ulteriori 250 km<sup>2</sup> di corsi d'acqua del Bacino Padano su cui si sta applicando la proposta metodologica ivi presentata, la quale è oggetto di un nuovo progetto di ricerca.

L'impiego congiunto di DTM ad alta risoluzione degli ultimi anni e della ricerca storica ha permesso di integrare informazioni diverse sia in termini di scala temporale che di risoluzione; lo scopo è quello di unire efficacemente le diverse fonti di dato per riuscire ad ottenere una visione del fenomeno il più completa possibile.

Le tecniche utilizzate sono state impiegate con estrema attenzione, in modo da ottenere dei prodotti con un grado di precisione tale da permettere una loro comparazione per lo studio dell'evoluzione morfologica dei corsi d'acqua. In quest'ottica, sono stati sperimentati diversi sistemi in grado di rilevare sia la parte emersa che quella sommersa dell'alveo, cercando di ottenere sempre dei rilevamenti di tipo areale che fossero al tempo stesso rappresentativi del tratto indagato, ma che tenessero in somma considerazione anche la sostenibilità economica del rilevamento. Per quanto riguarda le zone emerse, il sistema maggiormente utilizzato è stato il LIDAR aviotrasportato (GOMES PEREIRA & WICHERSON, 1999; CHARLTON *et al.*, 2003), al quale sono state affiancate reti GPS di inquadramento e controllo e rilevamenti topografici di tipo tradizionale. Nel caso, invece, delle zone sommerse, sono stati impiegati a seconda delle condizioni di navigabilità e della profondità media del fondale sia sistemi *single beam* che *side scan sonar* (HORRITT *et al.*, 2006).

Tutti i set di dati sono stati verificati utilizzando punti di controllo a terra su aree ritenute invariate nel tempo. Una volta accertata la conformità dei dati laser alle specifiche dichiarate dalla ditta esecutrice dei rilevamenti, che come verrà dettagliato in seguito sono risultate essere contenute in 15cm r.m.s. sulla componente ellissoidica WGS84, si è passati alle procedure di

generazione delle superfici per il processo di confronto temporale. I dati ricavati sono infatti stati opportunamente processati attraverso una metodologia sperimentale messa a punto dal CNR che ha permesso di ottenere anche delle indicazioni interessanti in merito alle variazioni morfologiche occorse nel periodo considerato, sia di tipo qualitative che quantitative.

Le esperienze condotte nelle diverse realtà operative legate al particolare contesto morfologico hanno evidenziato come esista la necessità, per ottenere una procedura il più possibile omogenea, di definire uno schema classificativo che descrive le modalità di rilevamento per la creazione di un DTM in funzione della caratteristiche morfologiche del corso d'acqua; i dati sin ora raccolti hanno permesso di definire sperimentalmente tale schema che, allo stato attuale, deve comunque essere considerato ancora di tipo sperimentale.

## 2.1 Tecniche di rilevamento LIDAR utilizzate e loro accuratezza

Per gli studi di comparazione effettuati si è partiti da una base dati costituita da rilevamenti LIDAR eli/aerotrasmessi effettuati con sensori ALTM e RIEGL, abbinati a camere fotografiche ROLLEI e HASSELBLAD.

I rilevamenti sono stati pianificati per l'acquisizione di una nuvola di punti con densità non inferiore a 2 punti/mq, con una risoluzione fotografica di 15-20 cm/pixel. Alla quota di volo media dei singoli voli, risultata essere di circa 500 - 700m AGL (*Above Ground Level*), l'affidabilità, verificata a posteriori, è risultata essere di circa 10 - 15cm sulla componente altimetrica ellissoidica WGS84, mentre quella planimetrica, sul medesimo ellissoide, è risultata essere di circa 20 - 40cm.

Poiché i modelli di *planning* di volo, vengono progettati per offrire ampie garanzie di copertura tramite dei coefficienti di sicurezza sui dati di input iniziali (densità di punti a terra; copertura trasversale e longitudinale delle strisciate fotografiche ecc.), la densità di punti al suolo riscontrata a posteriori è risultata essere decisamente superiore a quella di progetto, con presenza media di variabile tra 2 - 8 punti/mq).

La risoluzione a terra delle ortofoto utilizzate è risultata essere di 20cm/pixel, con un'affidabilità di orientamento planimetrico del singolo *tile* appartenente all'ortomosaico di circa 40cm. Tale margine, risultante congruente con quello della nuvola di punti laser, costituisce di fatto il margine di affidabilità con cui sono state effettuate le successive operazioni di scontornamento delle aree sommerse e delle aree reputate rappresentative per l'esecuzione dei computi volumetrici analitici secondo un procedimento che verrà descritto nel capitolo seguente.

## 2.2 Tecnica di comparazione dei DTM

I dati così rilevati sono stati utilizzati per lo studio dell'evoluzione morfologica del corso d'acqua attraverso una tecnica basata sul confronto multitemporale di DTM attraverso una metodologia sperimentale messa a punto dal CNR IRPI (LOLLINO *et al.*, 2005). Il procedimento prevede infatti l'esecuzione, mantenendo invariate le condizioni al contorno, di rilevamenti LIDAR aerotrasmessi di tratti di corsi d'acqua ad intervalli

temporali prestabiliti, per poterne poi valutare numericamente le variazioni; la frequenza con la quale vengono eseguiti tali rilievi è anch'essa oggetto di studio e deve essere correlata alla scala d'indagine geomorfologica (LANE *et al.*, 1993). Allo stato attuale dello studio, tale sistema prevede l'impiego di rilevamenti LIDAR e delle ortofoto ad esso associate per riconoscere e perimetrare, mediante interpretazione visiva l'area emersa dei tratti di alveo indagati. Una volta definita la superficie su cui verranno eseguiti i calcoli analitici per la determinazione delle variazioni volumetriche occorse (il rilevamento LIDAR viene solitamente effettuato su un perimetro pari alla fascia B PAI - fascia fluviale che, per convenzione, prende in considerazione la superficie potenzialmente occupata dal corso d'acqua in occasione di una piena con tempo di ritorno duecentennale) si procede, a partire dalla nuvola di punti non regolarizzata (con densità tipicamente dell'ordine di 2 - 8 punti/mq), alla creazione di grigliato a maglia regolare (definito in tale metodologia di ampiezza pari a 1m<sup>2</sup>) che indica punto per punto la variazione altimetrica media avvenuta tra i due rilievi. Tale variazione, derivata da una maglia molto fitta e regolarizzata con passo di 1m<sup>2</sup>, risulta avere un'accuratezza media di circa 10-15cm sulla componente altimetrica ellissoidica WGS84. In questo modo è possibile ottenere sia delle tavole che evidenziano tali variazioni tramite scale di colori, che procedere ad un calcolo volumetrico delle variazioni avvenute (LOLLINO *et al.*, 2005). È tuttavia da sottolineare come tale metodologia non possa essere considerata come una semplice applicazione informatica, ma come un procedimento basato su una serie di tappe fondamentali alle quali corrispondono altrettante fasi di controllo dei risultati ottenuti su basi geodetiche e geomorfologiche; il ruolo della geomorfologia nello studio di queste dinamiche è infatti fondamentale (CONACHER, 2002), ed anche nella metodologia sperimentale messa a punto dal CNR IRPI svolge un ruolo di primaria importanza: sia la perimetrazione delle aree emerse che il successivo riconoscimento delle zone in cui è effettivamente avvenuta una variazione volumetrica superiore alla tolleranza strumentale delle misure avviene attraverso un'analisi di affidabilità del dato laser, ma soprattutto grazie all'impiego di ortofoto e tramite un'attenta analisi da parte di operatori esperti che valutano la corrispondenza tra i dati ottenuti e le evidenze morfologiche di tale evoluzione.

Da un punto di vista procedurale, il modello concettuale che regola il riconoscimento e l'estrazione delle zone su cui verrà calcolata la variazione volumetrica è schematizzato nella Figura 1. È infatti importante sottolineare come uno dei limiti maggiori dell'impiego del LIDAR sia l'impossibilità da parte di tale strumento di restituire un modello digitale anche della parte d'alveo sommersa. Per prima cosa si è dunque definita una procedura che permettesse l'estrazione delle aree sommerse e l'esclusione di esse dai calcoli successivi; questa limitazione, seppur importante, deve comunque essere valutata tenendo sempre in considerazione l'elevata risoluzione spaziale della strumentazione utilizzata (ANDERSON *et al.*, 2006) e la possibilità che tale strumento offre di condurre un'analisi di tipo areale e non più legata all'utilizzo di sezioni topografiche una tantum (che comunque restano di primaria importanza per il controllo del dato LIDAR e per relazionare i dati futuri

con l'importante bagaglio storico disponibile).

Oltre alle aree sommerse, un altro fattore che deve essere preso in seria considerazione sia durante il trattamento che l'analisi dei dati riguarda la presenza di vegetazione e il suo effetto sull'accuratezza della misura (HERITAGE & HETHERINGTON, 2007); anche in questo caso l'impiego delle ortofoto digitali permette di eseguire un controllo accurato della risultante dalla comparazione tra i DTM alla ricerca di eventuali anomalie.

Oggetto della ricerca è stata dunque anche la definizione delle modalità di realizzazione di un grigliato a maglia regolare (*grid*) da utilizzare per le operazioni di confronto dei DTM. Il miglior compromesso in fatto di rappresentatività delle caratteristiche geomorfologiche e di utilizzabilità del dato per questioni di dimensioni dei file utilizzati è risultata essere la generazione di un *grid* a passo regolare di 1m. Tale *grid*, utilizzato per le comparazioni, è derivato dall'interpolazione (con algoritmo *Natural Neighbourhood*) della nuvola di punti totale con densità sopra descritta attraverso un'azione di ricampionamento che ha, di fatto, diminuito il numero di punti a terra (non c'è stato quindi un'interpolazione volta ad infittire artificiosamente i dati di partenza ma, al contrario, una loro regolarizzazione mediante sfoltimento). In queste condizioni, sulla base di test effettuati con *grid* a passo minore, non sono state riscontrate apprezzabili differenze sulle stime analitiche a posteriori effettuate.

L'approssimazione risultante, infatti, deve comunque essere figlia di una buona densità per unità di terreno, continuando quindi a rappresentare in maniera affidabile la morfologia del zona rilevata.

L'utilizzo di maglie inferiori si sarebbe quindi tradotto in un eccessivo dilatamento dei tempi macchina necessari per processare la grande quantità di dati, senza tuttavia offrire maggiori vantaggi ai fini delle successive interpretazioni sul carattere evolutivo dei corsi d'acqua analizzati.

I risultati ottenibili dal confronto dei DTM (figura 2) sono dunque un *grid* (sempre passo 1 m) che evidenzia le variazioni altimetriche occorse tra i due DTM ed un calcolo volumetrico eseguito sulle aree in cui si è avuta una reale variazione morfologica (validata sia dal *grid* che dall'analisi delle ortofoto)

La metodologia fin ora descritta prende in considerazione i DTM derivati dall'utilizzo esclusivo dei dati LIDAR. Tale metodologia può dunque apparire più complessa a causa della necessità di escludere tutte quelle aree in cui il dato LIDAR non è ritenuto attendibile; tuttavia, se si analizzano nel complesso le operazioni di rilevamento e trattamento dati, è possibile notare come essa risulti la più semplice perché connessa ad una sola fonte di dati. Non a caso tutto il procedimento è nato su queste basi e si è sviluppato successivamente affiancando anche altri sistemi di rilevamento batimetrico in grado di completare le zone in cui il dato LIDAR è lacunoso.

Nel caso, dunque, si consideri anche il contributo di altre fonti di dati il procedimento non cambia nella sostanza, ma ad esso devono essere aggiunti solamente alcuni passaggi: dopo aver depurato il dato LIDAR dei dati non considerati attendibili, si aggiungono nelle medesime aree quelli provenienti dagli altri sistemi di rilevamento, ottenendo così un DTM senza lacune. Il successivo procedimento di comparazione dei DTM non cambia, così come non cambiano i risultati ottenibili.

### 3. APPROCCIO METODOLOGICO ALLE ATTIVITA' DI RILEVAMENTO E STUDIO DEI CORSI D'ACQUA DEL BACINO PADANO: LINEE GUIDA E RISULTATI OTTENUTI

Una volta definito il metodo per il trattamento dei dati e l'esecuzione del processo di comparazione, prima fondamentale tappa nello sviluppo della metodologia presentata, ci si è concentrati sulla sua applicabilità su vaste aree quali, per esempio, il Bacino Padano. L'elemento fondamentale chiaramente emerso sin dalle prime battute riguarda la forte eterogeneità dell'ambito studiato, che si riflette necessariamente sulle modalità di esecuzione delle attività di rilevamento per la creazione dei DTM. Oggetto della ricerca appare dunque non essere solo la valutazione delle potenzialità dei DTM e del loro utilizzo, ma anche tutto ciò che concerne le operazioni di rilevamento per la generazione degli stessi. Per utilizzare al meglio le potenzialità dei DTM risulta infatti sempre più evidente come sia necessario poter definire delle linee guida per l'esecuzione degli stessi, in modo da ottenere dei dati omogenei e tra loro comparabili. Il tema risulta essere quanto mai attuale, in quanto, al momento, molti Enti ed Unità di Ricerca hanno infatti fatto eseguire rilevamenti in aree specifiche senza

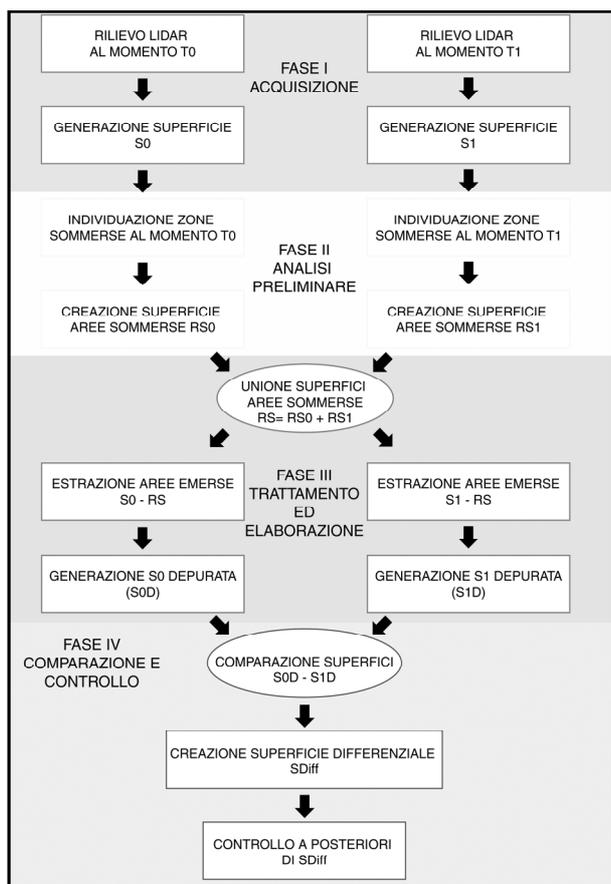


Fig. 1 - Schema concettuale delle fasi principali del processo di comparazione dei DTM (LOLLINO *et al.* 2005).

*Conceptual framework of principal DTM comparison process phases (LOLLINO *et al.* 2005).*

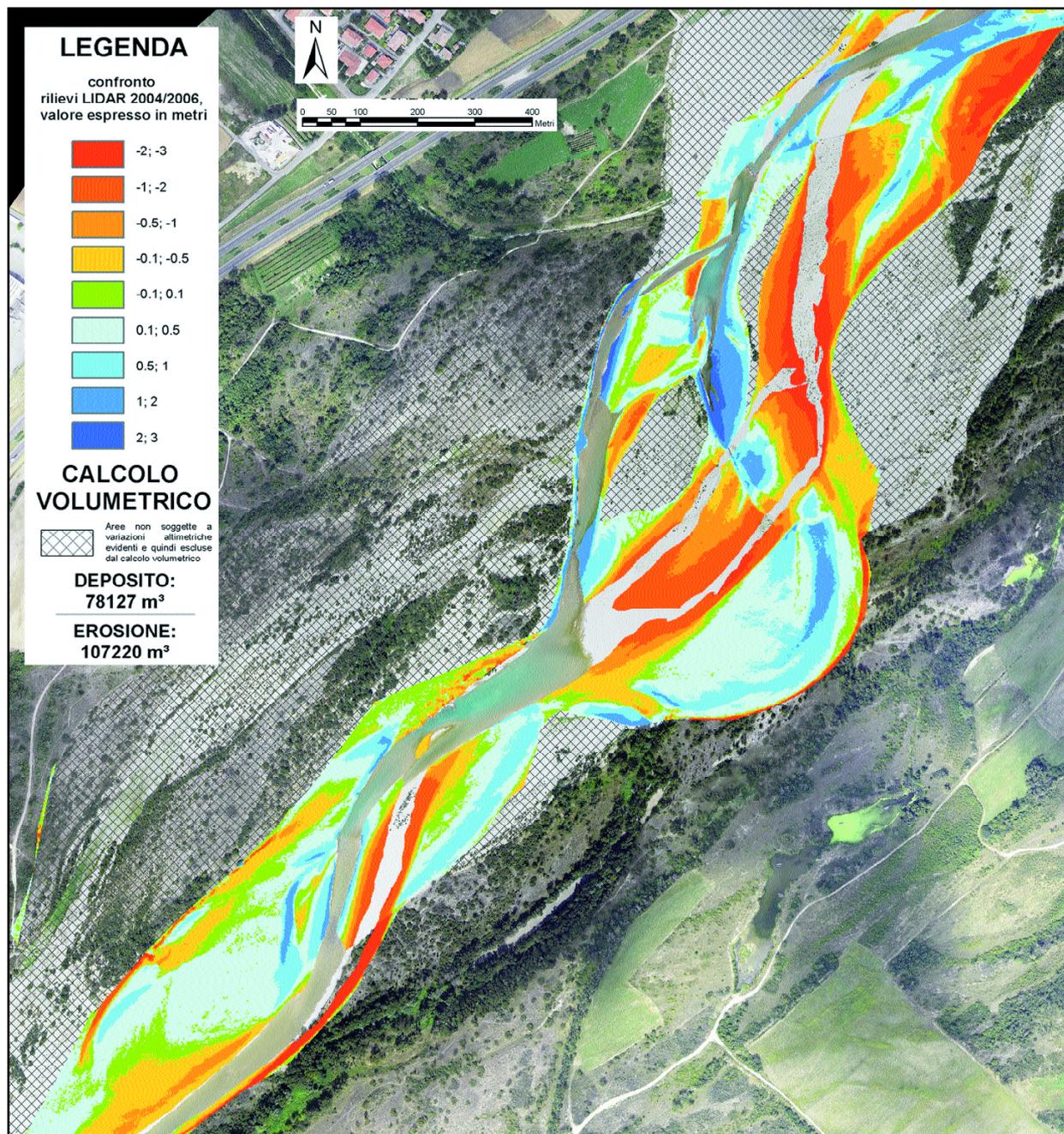


Fig. 2 - Tavola che mostra la risultanza grafica del processo di elaborazione dei DTM; nell'immagine sono evidenziate le aree che hanno subito delle variazioni altimetriche e su cui è stato eseguito il relativo calcolo delle variazioni volumetriche. Si noti inoltre come vi siano dei settori in cui non è presente il grigliato ma un graticciato nero: sono le zone in cui è stato eseguito il confronto dei DTM e su cui non sono state riscontrate variazioni volumetriche.

*Board showing graphic results of DTM processing; in the picture are highlighted areas with height variations where volumetric change computation was performed. There are sectors without a grid but marked with black grating: these are zones where DTM comparison was made and where no appreciable volumetric changes were detected.*

tuttavia utilizzare un sistema univoco di esecuzione (esistono infatti delle specifiche che riguardano quasi esclusivamente i rilevamenti LIDAR, o le caratteristiche dei DTM, ma non contemplanò, per il momento l'insieme delle possibili correlazioni strumentali).

Lungi dal voler pretendere di rappresentare un prospetto esaustivo delle possibilità di rilevamento nelle diverse realtà di un sistema complesso come quello del Bacino Padano, è tuttavia possibile tracciare un primo

bilancio delle esperienze condotte dal CNR IRPI di Torino in base ai dati acquisiti in questi ultimi anni (i primi rilevamenti risalgono infatti al 2003): l'approccio al momento più efficace pare possa essere quello di definire differenti tipologie di utilizzo combinato di più strumentazioni, in funzione delle caratteristiche morfologiche del singolo corso d'acqua analizzato. Per fare ciò è possibile proporre un primo e molto schematico raggruppamento dei corsi d'acqua in macro categorie che

tengano conto del battente d'acqua medio nei periodi di magra e del rapporto tra superficie dell'alveo di magra e dell'alveo ordinario. In questo modo è quindi possibile formulare una classificazione che lega le modalità di rilevamento e generazione dei DTM alle caratteristiche morfologiche dei corsi d'acqua. L'obiettivo è ovviamente quello di generare un DTM completo dell'alveo, tenendo tuttavia in considerazione i rapporti costi/benefici delle singole attività di rilevamento. È infatti probabile che, a fronte di un rilevamento continuo su tratti d'alveo considerevoli, la presenza di qualche zona senza dato, soprattutto se paragonate a metodi di studio basati su sezioni spesso distanti anche alcuni chilometri, possa essere considerata un compromesso accettabile.

Qui di seguito viene dunque illustrata una proposta di lavoro sperimentale, in cui per ogni tipologia di corso d'acqua sono anche stati descritti una parte dei risultati raggiunti. I risultati descritti sono presentati a titolo di esempio e non vogliono essere una descrizione esaustiva degli studi condotti, ma solamente la testimonianza dell'efficacia dell'approccio utilizzato.

### 3.1 Affluenti del Fiume Po

A - **torrenti in aree di montagna**, con materasso alluvionale non continuo ed alveo talvolta profondamente inciso direttamente nel substrato roccioso. In questi settori l'impiego della metodologia basata sui DTM potrebbe risultare poco efficace, le attività di rilevamento sono infatti rese difficoltose sia dalla presenza dei versanti che, molto spesso, dall'elevata vegetazione anche ad alto fusto presente in alveo. Inoltre, data l'elevata pezzatura del materiale in alveo e la sua disomogenea distribuzione, il rischio di rilevare delle ampie porzioni di territori per poi concentrarsi su poche e poco estese aree su cui le condizioni permettono lo studio tramite il confronto di DTM rende il metodo difficilmente sostenibile; nel caso in cui ci siano delle realtà molto particolari e strategiche si rende quindi necessario eseguire delle approfondite valutazioni preliminari caso per caso in quanto il rapporto costi/benefici può non essere a favore di un rilevamento LIDAR. Capitolo a parte meritano le zone di conoide, dove i rilevamenti LIDAR possano essere considerati come un ottimo strumento per l'esecuzione di modelli DTM attraverso i quali definire differenti caratteristiche morfologiche e morfometriche (CAVALLI & MARCHI, 2008) ed in base ai quali estrarre sezioni topografiche per la costruzione di modelli numerici.

B - **corsi d'acqua pluricursali** in zone di pianura, con battente d'acqua medio di molto inferiore al metro (periodo di magra), e forte differenza in termini di aree relative all'alveo di magra (indicativamente il 15%) ed alveo ordinario. In questo caso l'esecuzione di un rilevamento LIDAR può essere considerato una soluzione esaustiva; il rilevamento è da eseguire necessariamente durante i periodi di magra che, nel caso analizzato coincidono con la stagione estiva o quella tardo invernale (rispettivamente i mesi di agosto o febbraio). Le esperienze sin ora condotte hanno evidenziato come tutti e due i periodi possibili per l'esecuzione dei rilevamenti siano caratterizzati da una serie di vantaggi e svantaggi: durante il periodo estivo sussiste il problema

della maggior copertura vegetativa, derivante soprattutto dalle latifoglie che schermano anche pesantemente il raggio laser mascherando porzioni di territorio; durante il periodo invernale possono esserci problemi connessi alla copertura di neve alla quote più alte e di repentina variabilità delle condizioni meteo che rendono difficoltosa la fase di pianificazione del volo; nel periodo invernale, inoltre, le foto abbinate al rilievo sono spesso meno contrastate e caratterizzate da ombre più lunghe che ne riducono sensibilmente l'efficacia. Per quanto riguarda le portate spesso non ci sono sostanziali differenze tra quelle estive ed invernali, fatto slavo per l'effetto legato ai prelievi antropici: è infatti emerso in molti casi come i prelievi connessi alla presenza di canali irrigui riducano fortemente la portata in alveo.

È importante ribadire nuovamente che il DTM così realizzato può presentare dei tratti in cui manca il dato di fondo alveo, spesso molto importante per lo studio del corso d'acqua; tuttavia, la disponibilità di un dato molto fitto delle zone emerse consente spesso un facile completamento del dato con altre metodologie di rilevamento tradizionali (per esempio rilevamenti GPS RTK), che può essere eseguito eventualmente anche solo in corrispondenza alle sezioni topografiche tradizionali, permettendo così un abbinamento tra le due metodologie d'indagine e confronto. Tale soluzione di compromesso è spesso necessaria in quanto le energie necessarie per effettuare il completamento di tutto l'alveo sono ingenti, rispetto alla limitata entità del territorio da rilevare.

Un esempio di questa tipologia di corso d'acqua è il tratto rilevato del Fiume Taro (da Fornovo di Taro a Noceto, per una lunghezza di circa 16 Km); si tratta di un corso d'acqua di tipo *braided* con depositi di tipo sabbioso ghiaioso.

In questo caso il rilievo ha interessato un'area di circa 15 Km<sup>2</sup> di cui 6.37 Km<sup>2</sup> di alveo attivo; di questi ultimi il 17 % corrisponde all'area esclusa dal procedimento di comparazione dei DTM in quanto sommersa almeno durante uno dei due rilevamenti, mentre su un'area corrispondente a ben 83 % è stato possibile effettuare la comparazione dei DTM. I risultati ottenuti comparando il rilievo del 2004 con quello eseguito nel 2006 hanno evidenziato un bilancio volumetrico complessivo pari a: 630 m<sup>3</sup> legati a variazioni positive e 475 m<sup>3</sup> connessi invece a settori in cui le variazioni sono state negative. Il risultato è un bilancio positivo di 154 m<sup>3</sup> di materiale sedimentato nell'arco di due anni. Oltre al dato volumetrico, il procedimento di comparazione permette di ottenere anche delle tavole tematiche che esprimono la variazione altimetrica espressa mediante un grigliato con celle di 1 m<sup>2</sup>. Queste tavole dimostrano chiaramente la tendenza evolutiva del corso d'acqua tramite la migrazione laterale dei canali e delle barre tipica di questa tipologia di corso d'acqua (figura 2).

C - **corsi d'acqua unicursali** con battenti d'acqua medio superiore al metro e con alveo molto incanalato (spesso caratterizzato anche dalla presenza di difese spondali continue che ne limitano fortemente la possibilità di divagare lateralmente), poca differenza tra alveo di magra ed alveo ordinario, con una superficie sommersa anche durante i periodi di magra superiore al 50% dell'alveo ordinario. In questo caso, invece, il rilevamento LIDAR deve necessariamente essere imple-

mentato con rilevamenti batimetrici che ne vadano a completare la parte sommersa (COREN *et al.*, 2003).

Data la scarsa continuità dal punto di vista della navigabilità che spesso caratterizza gli affluenti del fiume Po che hanno queste caratteristiche, sono da preferire sistemi di rilevamento *single beam* abbinati a natanti tipo hovercraft in grado di muoversi su tutti i terreni; tale configurazione si rende quanto mai necessaria soprattutto se si eseguono i rilevamenti durante il periodo primaverile o autunnale, in cui la poca copertura vegetativa delle sponde e le giornate non molto corte favoriscono la produttività del rilievo.

Un esempio può essere considerato il caso del Fiume Adda. Il tratto di Adda analizzato (da confluenza Brembo a Bisnate, per una lunghezza di circa 21 Km) è caratterizzato da uno andamento in prevalenza unicursale. Questo assetto planimetrico è dovuto all'elevato grado di antropizzazione di entrambe le sponde, lungo le quali la presenza di argini è pressoché continua. In questo caso la sola possibilità di ottenere un rilevamento continuo anche delle zone caratterizzate da battenti d'acqua molto bassi è risultato essere quello di utilizzare un hovercraft (fig. 3) come mezzo di trasporto; tale mezzo permette infatti di viaggiare indifferente su acqua e terra utilizzando un cuscino d'aria prodotto dal mezzo stesso. Il mezzo ha la possibilità navigare sia in modalità stazionaria (senza cuscino d'aria e con lo scafo a fondo piatto in acqua con un pescaggio ridotto di pochi centimetri), durante la quale avvengono le attività di rilevamento, che di navigare su cuscino d'aria, per effettuare i trasferimenti a velocità più sostenuta.

La figura 4 evidenzia l'inserimento delle traiettorie del rilevamento batimetrico (tracciate in bianco all'interno dell'alveo) nel contesto LIDAR; è chiaro che in questo caso la densità di punti della zona sommersa è inferiore a quella del LIDAR; le esperienze condotte dimostrano comunque che a seconda della forma dell'alveo e della velocità della corrente (che influisce molto sulla manovrabilità del mezzo), è possibile ottenere un buon modello anche solo con una singola passata sinuosa, eventualmente abbinata a due

rilevamenti laterali che ne definiscono meglio la morfologia sommersa delle sponde.

### 3.2 Fiume Po

Sino ad ora sono stati trattati solamente gli affluenti del Fiume Po, il quale costituisce, almeno nel suo tratto a valle di Torino, un corso d'acqua con caratteristiche differenti da quelle precedentemente descritte, soprattutto per quanto riguarda la portata (e di con-



Fig. 3 - Hovercraft allestito con un supporto verticale dotato di sensori *single beam* e GPS RTK.

*Hovercraft used for single beam and RTK GPS surveys.*

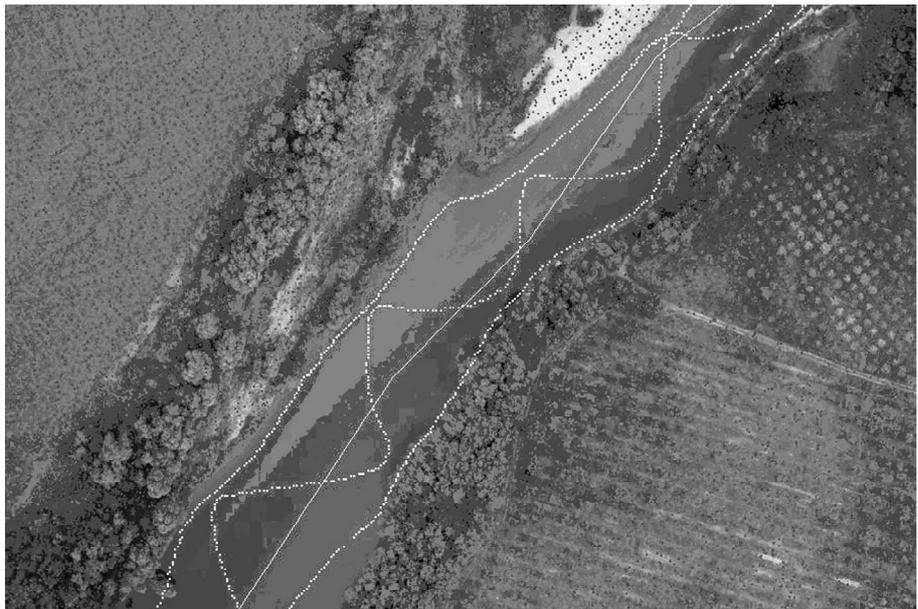


Fig. 4 - Esempio di rilevamento del fiume ADDA con accoppiamento dato LIDAR e *single beam*.

*Example of Adda river reach survey with LIDAR and single beam point cloud.*

seguenza la corrente) e le caratteristiche morfologiche.

A sua volta, dal punto di vista delle modalità di rilevamento e navigabilità, questo settore può essere ulteriormente suddiviso in due sottotratti:

A - il settore a monte di Cremona, caratterizzato da non continue condizioni di navigabilità e da un alveo di magra spesso considerevolmente inferiore all'alveo ordinario. In quest'area è possibile un utilizzo congiunto di rilevamenti LIDAR aviotrasportato e *single beam* (da utilizzare su natanti di dimensione adatta in funzione delle condizioni di navigabilità e della velocità della corrente).

Un esempio di tale modalità di rilevamento può essere considerato il caso della confluenza Po-Sesia. Per la realizzazione di un modello idraulico di tale settore (FUGAZZA *et al.*, 2007), il CNR IRPI è stato chiamato ad eseguire un rilevamento dell'intera area ed a fornire un DTM completo della parte sommersa ed emersa. In questo caso le condizioni di navigabilità hanno permesso di utilizzare un gommone a motore su cui è stato installato un *single beam* con posizionamento tramite GPS RTK. Le attività di rilevamento si sono dimostrate non di facile esecuzione a causa dell'elevata corrente e delle variazioni di profondità del fondale che hanno reso difficoltoso il passaggio del mezzo soprattutto nelle zone di collegamento tra due anse successive caratterizzate da un ridotto battente d'acqua.

B - Settore a valle di Cremona, caratterizzato da condizioni di navigabilità relativamente continue anche per natanti di dimensioni maggiori, in cui i rilevamenti della parte emersa costituiscono un elemento importante quasi esclusivamente nelle aree di golena, mentre i rilevamenti della porzione sommersa costituiscono la parte preponderante del rilievo. In questo caso è possibile utilizzare anche degli apparati più complessi e performanti dei *single beam* quali i sistemi *multi beam* o *side scan sonar*; si tratta di sistemi per l'esecuzione di rilevamenti batimetrici caratterizzati da una emissione di un fascio di impulsi che nascono per il rilevamento marino (GARDNER *et al.*, 2003), che possono anche essere applicati a grandi fiumi navigabili. Indipendente dal sistema utilizzato, queste strumentazioni sono in grado di emettere un fascio di impulsi e di registrarne i segnali di ritorno, che poi dovranno essere sincronizzati con i segnali provenienti dal GPS e compensati in base alle informazioni provenienti da un sistema inerziale in grado di misurare le variazioni di assetto (beccheggio, rollio e imbardata) del natante. L'elemento discriminante per la scelta del sistema più opportuno è rappresentata proprio dalla profondità media del fiume: per l'impiego di sistemi più complessi è richiesta una profondità che superi con una discreta continuità i due metri e che renda possibile l'utilizzo di un natante di medie dimensioni in grado di alloggiare tutta la strumentazione a bordo. Un esempio tratto dal progetto di ricerca è il rilevamento eseguito nei pressi di Pontelagoscuero, nei pressi di Ferrara. Si tratta di uno dei nodi idraulici importanti per il Po (basti pensare all'evento dell'ottobre 2000, durante il quale fu in parte sollevato il ponte ferroviario per il timore che l'ondata di piena non potesse transitare proprio in corrispondenza a tale attraversamento). Per i rilevamenti eseguiti si è optato per un sensore *side-scan sonar* in quanto caratterizzato da una maggior operatività in acque basse. Questo tratto campione ha permesso di valutare il grado di correlabi-

lità tra dato LIDAR e *side scan sonar*, ottenendo un DTM completo dell'alveo con un grado di dettaglio estremamente elevato.

#### 4. CONCLUSIONI

Sino ad ora sono state esposte una serie di esperienze condotte dal CNR IRPI di Torino nell'ambito del rilevamento dei corsi d'acqua finalizzato alla creazione di DTM ed ad un loro utilizzo per tentare di valutare quantitativamente l'evoluzione morfologica degli stessi. La disponibilità di strumentazioni per il rilevamento sempre più avanzate offre infatti oggi nuove possibilità per lo studio dell'evoluzione del territorio attraverso tecniche di rilevamento e monitoraggio dello stesso. L'utilizzo di strumentazioni LIDAR per lo studio dell'evoluzione topografica di un determinato settore soggetto a delle dinamiche evolutive esogene non è certo più una novità, ma trova applicazioni in ambiti geomorfologici sempre più vasti e differenziati (WHITE & WANG, 2003; HUNTER *et al.*, 2003; MCKEAN & ROERING, 2004; GOLD, 2004; SCHULTZ, 2004; LAWLER, 2005; THOMA *et al.*, 2005; LOLLINO *et al.*, 2007). Tuttavia, se paragonate ad altri ambiti come, per esempio, i fenomeni franosi, le esperienze di monitoraggio condotte sui corsi d'acqua con questi mezzi non sono ancora molte. Molto probabilmente la spiegazione è relativamente semplice e va ricercata nella maggior complessità che caratterizza un corso d'acqua, sia in termini di variabilità spaziale delle sue caratteristiche geomorfologiche, che dell'ampiezza del rilevamento e delle energie necessarie per eseguirlo, le quali sono decisamente più elevate rispetto ad un contesto arealmente più contenuto e topograficamente più omogeneo come un fenomeno franoso. In più, la necessità di doversi confrontare con l'interfaccia acqua/aria e di dover necessariamente abbinare differenti tecniche di rilevamento rende il tutto molto complesso.

Malgrado tali difficoltà, in Italia come in altri paesi (FRENCH, 2003) sono già stati realizzati, o sono in procinto di esserlo, ampi progetti finalizzati al rilevamento dei corsi d'acqua principali: tra di essi va sicuramente citato il "Piano Straordinario di Telerilevamento ad Alta Precisione per le aree a rischio idrogeologico" (previsto dall'articolo 27 della Legge n.179/2002) del Ministero dell'Ambiente e della tutela del Territorio e del Mare. Questi progetti di ampio respiro forniranno ovviamente una mole di dati importante e molto probabilmente evidenzieranno anche come via siano ancora una serie di problematiche non risolte sulle modalità di rilevamento dei corsi d'acqua. L'esperienza accumulata dal CNR IRPI ha permesso infatti di evidenziarne alcune e di cominciare ad ipotizzare delle possibili soluzioni, tenendo presente che uno dei concetti basilari per il monitoraggio di un qualsiasi fenomeno naturale consiste nella ripetibilità del rilevamento con modalità analoghe, in quanto l'obiettivo delle attività di rilevamento legate al monitoraggio consiste infatti nella possibilità di rendere confrontabili più set di misura. Come precedentemente evidenziato, infatti, l'oggetto della ricerca connesso allo studio dei corsi d'acqua non riguarda solamente l'utilizzo dei DTM e dei dati derivabili dal loro confronto, ma anche le tecniche stesse con cui tali DTM devono essere generati.

Nasce da qui la proposta metodologica sulle modalità di rilevamento dei corsi d'acqua in grado di mettere in correlazione le tecniche e gli strumenti per il rilevamento con le caratteristiche morfologiche dei corsi d'acqua stessi. La possibilità di analizzare diversi tratti di corsi d'acqua all'interno del Bacino Padano ha infatti evidenziato come sia possibile definire uno schema classificativo estremamente semplificato da un punto di vista morfologico ma con una elevata valenza operativa per quanto riguarda le operazioni di rilevamento dell'alveo.

Oltre alla proposta di relazionare le modalità di rilevamento con le caratteristiche del corso d'acqua, la disponibilità di tali dati apre anche nuovi orizzonti di ricerca inerenti al loro utilizzo; le tecniche sperimentali di comparazione dei DTM rappresenta infatti un primo passo in tale direzione, che in parte può permettere di intuire quale possa essere il potenziale di tale nuova tipologia di dato. L'utilizzo dei DTM rende infatti possibile un approccio nuovo e di tipo continuo, su vaste porzioni di territori, completamente slegato da metodi consolidati basati sullo studio delle sezioni topografiche; per certi versi, infatti, il processo di comparazione tra DTM può essere considerato come il naturale successore delle sezioni topografiche, oggi reso possibile dalle nuove tecnologie. I DTM realizzati oggi hanno infatti un elevato valore perché sono l'equivalente "moderno" delle prime sezioni topografiche in alveo, oggi ritenute preziosissime in quanto in grado di valutare, a distanza di anni, le modificazioni occorse in quei determinati punti considerati rappresentativi. Inoltre, la possibilità di poter valutare con continuità le variazioni occorse in un ambito tridimensionale offre anche delle elevate potenzialità nel calcolo delle variazioni volumetriche (LOLLINO et al., 2005), introducendo un ulteriore valore aggiunto alla tecnica messa a punto.

Malgrado i risultati raggiunti, appare comunque chiaro e deve essere sottolineato come tali dati riguardino al momento un lasso temporale estremamente ridotto e del tutto inadeguato a formulare delle ipotesi chiare sulla possibile evoluzione dei corsi d'acqua; esiste quindi la necessità di lavorare utilizzando un approccio integrato che permetta di rendere disponibili tutte le fonti di dati in un unico sistema. Anche in questo caso la tecnologia è in grado di fornire una possibile soluzione attraverso l'utilizzo di sistemi informativi territoriali, in grado di accogliere in un'unica struttura di gestione sia i dati storici che i dati connessi al monitoraggio con le più moderne tecniche disponibili. In questo modo è possibile analizzare le variazioni morfologiche occorse nel tempo, passando dinamicamente da dati storici risalenti ad oltre un secolo fa, ai rilevamenti LIDAR eseguiti negli ultimi anni. È ovvio che tale varietà di fonti diverse debba essere analizzata con cautela, tenendo sempre presente quali siano le caratteristiche ed i limiti di tutte le informazioni presenti all'interno del sistema informativo; tuttavia, la possibilità di creare un continuum in grado di evidenziare le variazioni morfologiche occorse nel tempo, consente la formulazione di una serie di ipotesi in merito all'evoluzione del corso d'acqua e mette in luce come tali variazioni siano spesso legate anche (e forse soprattutto) all'intervento dell'uomo. Sebbene a scale diverse e con un diverso grado di dettaglio, i dati ricavati dai vari corsi d'acqua raccontano una storia in cui l'evoluzione del corso d'ac-

qua è da molto tempo ormai inevitabilmente da mettere in relazione con gli interventi umani, siano essi finalizzati a difendere le strutture già esistenti o a edificare nuovi edifici o sistemi di comunicazione. In tutto questo non va dimenticato il ruolo preponderante assunto dall'attività estrattiva in alveo, soprattutto nell'immediato dopoguerra e fino agli anni ottanta, quando la legislazione ha messo un freno a questa pratica.

Da questo punto di vista il metodo di confronto dei DTM basato sul rilevamento LIDAR si sta rivelando uno strumento molto potente per la comprensione delle dinamiche recenti responsabili della situazione attuale dei tratti di corsi d'acqua analizzati. Risulta quindi opportuno, alla luce dei risultati sperimentali ottenuti, procedere alla definizione di una metodologia in grado di definire un sistema univoco di rilevamento di questi ambienti, per procedere alla progressiva creazione di un rilievo completo dell'intero "Sistema Po" da utilizzare come punto di partenza per indagini future.

## BIBLIOGRAFIA

- ANDERSON E.S., THOMPSON J.A. & CROUSE D.A. & AUSTIN R.E. (2006) - *Horizontal resolution and data density effect on remotely sensed LIDAR-based DEM* - *Geoderma*, **132**, pp. 406-415.
- BRASINGTON J., LANGHAM J. & RUMSBY B. (2003) - *Methodological sensitivity of morphometric estimates of coarse fluvial sediment transport* - *Geomorphology*, **53**, pp. 299-316.
- CAMORANI G., FILIPPI F., CAVAZZINI A., LOMBARDO G., PAPPANI G. & FORLANI G. (2006) - *Il rilievo altimetrico nel tratto tra confluenza Ticino e l'Incile* - *ASITA* 2006, **1**, pp. 320-326.
- CAVALLI M. & MARCHI L. (2008) - *Characterisation of the surface morphology of an alpine alluvial fan using airborne LiDAR* - *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **8**, pp. 323-333.
- 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**, pp.299-306.
- COREN F., MASO M. & PAGANINI P. (2003) - *Sterzai Integrazione di dati laser scan e multibeam per la generazione di DTM ad alta risoluzione: studio del fiume Brenta* - *ASITA* 2003, **1**, pp. 819-824.
- CONACHER A. (2002) - *A role for Geomorphology in Integrated catchment management* - *Australian Geographical Studies*, **40** (2), pp. 179-197.
- FILIPPI F., COLOMBO A., BANCHINI G., CAVAZZINI A., LOMBARDO G., MANZINO A. & RINAUDO F. (2004) - *Il nuovo DTM dell'Autorità di bacino del fiume Po* - *ASITA* 2004, **2**, pp. 1093-1098.
- FRENCH J. R. (2003) - *Airborne LIDAR in support of geomorphological and hydraulic modelling* - *Earth Surf. Process. Landforms* **28**, pp. 321-335.
- FUGAZZA M., MAGRI P., NATALE L. & SAVI F. (2007) - *La piena del Po alla confluenza con il Sesia nell'ottobre 2000* - *L'acqua*, **6**, pp. 9-16.
- GARDNER, J.V., DARTNELL P., MAYER, L.A. & CLARKE J.A.H. (2003) - *Geomorphology, acoustic backscatter, and processes in Santa Monica Bay from multi-*

- beam mapping* - Marine Environmental Research **56**, pp. 15-46.
- GOMES PEREIRA L.M. & WICHEKSON 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**, pp. 105-114.
- GOLD RD. (2004) - *A Comparative study of aerial Phoyographs and LIDAR imagery for landslide detection in the Puget Lowland, Washington*. Washington Division of Geology and earth Resources. Open File Report 2004-6.
- GOVI M. & TURITTO O. (1993) - *Processi di dinamica fluviale lungo l'asta del Po* - Acqua Aria, **6**, pp. 575-588.
- HERITAGE G. & HETHERINGTON, D. (2007) - *Towards a protocol for laser scanning in fluvial geomorphology* - Earth Surf. Process. Landforms **32**, pp. 66-74.
- HORRITT M.S., BATES P.D. & MATTINSON M.J. (2006) - *Effects of mesh resolution and topographic representation in 2D finite volume models of shallow water fluvial flow* - Journal of Hydrology, **329**, 306-314.
- HUNTER G., PINKERTON H., AIREY R. & CALVARI S. (2003) - *The application of a long-range laser scanner for monitoring volcanic activity on Mount Etna* - Journal of Volcanology and Geothermal Research **123**, pp. 203-210.
- LANE, S.N., RICHARDS K.S. & CHANDLER J.H. (1993) - *Developments in photogrammetry; the geomorphological potential* - Progress in Physical Geography **17**, pp. 306-328.
- LAWLER D.M. (2005) - *The importance of high-resolution monitoring in erosion and deposition dynamic studies: examples from estuarine and fluvial systems* - Geomorphology, **64**, pp. 1-23.
- LOLLINO G., BALDO M., GIORDAN D. & ALLASIA P. (2005) - *New methodology to evaluate morphological changes of river reaches: the case of Orco River (Piedmont, Italy)* - International Conference of Reservoir Operation & River Management (ICROM'05), September 17-23, 2005, Guangzhou and Three Gorges, China. 8 pp.
- LOLLINO G., PASCULLI A., SCIARRA N., BALDO M. & GIORDAN D. (2007) - *An integrated methodology based on LIDAR, GPS and photogrammetric surveys applied to large landslide in San Martino sulla Marrucina (Central Italy)* - In Proceedings of First North American Landslide Conference (Editors: Schaefer V.R., Schuster R.L., Turner A.K.), Vail Colorado, AEG Special Publication, **23**, pp. 356-365.
- McKEAN J. & ROERING J. (2004) - *Objective landslide detection and surface morphology mapping using high-resolution airborne laser altimetry* - Geomorphology, **57**, pp. 331-351
- MARCHETTI M. (2002) - *Environmental changes in the central Po Plain (northern Italy) due to fluvial modifications and anthropogenic activities* - Geomorphology, **44**, pp. 361-373.
- RINALDI M., WYZGA B. & SURIAN N. (2005) - *Sediment mining in alluvial channels: physical effects and management perspectives* - River Research and Applications, **21**, pp. 805-828.
- ROSGEN D.L. (1994) - *A classification of natural rivers* - Catena, **22**, pp. 169-199.
- SCHULZ W.H. (2004) - *Landslides mapped using LIDAR imagery, Seattle, Washington* - U.S. Geological Survey, Open-File Report 2004-1396.
- SURIAN N. & RINALDI M. (2003) *Morphological response to river engineering and management in alluvial channels in Italy* - Geomorphology, **50**, 307-326.
- THOMA D.P., GUPTA S.C., BAUER M.E. & KIRCHOFF C.E. (2005) - *Airborne laser scanning for riverbank erosion assessment* - Remote sensing of Environment, **95**, pp. 493-501.
- THORNE C.R. (1998) - *Stream reconnaissance handbook. Geomorphological investigation and analysis of the river channels*. Wiley, Chichester, 113 pp.
- WHITE S.A. & WANG Y. (2003) - *Utilizing DEMs derived from LIDAR data to analyze morphologic change in the North Carolina coastline* - Remote Sensing of Environment, **85** (1), pp-39-47.

Ms. ricevuto il 21 dicembre 2007  
 Testo definitivo ricevuto il 23 aprile 2008

Ms. received: December 21, 2007  
 Final text received: April 23, 2008

