

Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia

Scuola di Dottorato

High Mechanics and Automotive Design & Technology

Ciclo XXVII

**Aspetti metodologici per la conoscenza geometrica e  
l'analisi multi-temporale con sistemi a scansione laser  
in applicazioni ingegneristiche**

*Riccardo Rivola*

Relatore

Prof. Alessandro Capra

Coordinatore della scuola

Prof. Paolo Tartarini

Anni Accademici

2012-2014



*L'unico modo di fare un ottimo lavoro è amare quello che fai.  
Se non hai ancora trovato ciò che fa per te, continua a cercare, non fermarti,  
come capita per le faccende di cuore, saprai di averlo trovato non appena ce l'avrai davanti.  
E, come le grandi storie d'amore, diventerà sempre meglio col passare degli anni.  
Quindi continua a cercare finché non lo troverai. Non accontentarti.*

*Stay hungry. Stay foolish.*

Steve Jobs



# Indice

---

<b>Sommario .....</b>	<b>1</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>3</b>
<b>Presentazione .....</b>	<b>5</b>
<b>Obiettivi della ricerca.....</b>	<b>7</b>
<b>Struttura della tesi.....</b>	<b>11</b>
<b>1. Ingegneria geomatica .....</b>	<b>13</b>
Geomatica: una disciplina con grandi prospettive di sviluppo .....	14
Discipline e tecniche della geomatica .....	15
Geomatica nella vita quotidiana .....	19
<b>2. Monitoraggio con tecniche geomatiche .....</b>	<b>21</b>
Rilevamento metrico con tecniche geomatiche.....	21
Finalità del monitoraggio geomatico .....	23
Problematiche comuni nel monitoraggio geomatico.....	25
Predisposizione di un sistema di monitoraggio.....	26
<b>3. Sistemi terrestri a scansione laser .....</b>	<b>31</b>
Rilevamento 3D con laser scanner .....	32
Tecnologie e campi applicativi .....	39
Problematiche generali nel monitoraggio con laser scanner .....	45
<b>4. Indagini in ambito territoriale: dissesto di versanti instabili.....</b>	<b>49</b>
Monitoraggio di versanti instabili: stato dell'arte .....	50
Caso studio: la frana di Col Piagneto (Reggio Emilia) .....	53
<i>Generalità e inquadramento della problematica.....</i>	<i>54</i>
<i>Prime evidenze ed evoluzione del fenomeno.....</i>	<i>54</i>
<i>Scopo e modalità di esecuzione delle misure.....</i>	<i>57</i>
<i>Elaborazione delle misure .....</i>	<i>60</i>

<i>Calcolo degli spostamenti</i> .....	63
<i>Validazione e interpretazione dei risultati</i> .....	66
Rilevamento a lunghissima portata: problematiche e potenzialità .....	71
<b>5. Indagini in ambito architettonico: assetto geometrico di edifici storici</b> .....	<b>77</b>
Rilevamento architettonico e strutturale: stato dell'arte .....	78
Caso studio: la Torre Garisenda di Bologna .....	80
<i>Generalità e inquadramento della problematica</i> .....	81
<i>Prime evidenze ed evoluzione del fenomeno</i> .....	82
<i>Scopo e modalità di esecuzione delle misure</i> .....	83
<i>Elaborazione delle misure</i> .....	85
<i>Analisi geometriche e variazioni di assetto</i> .....	87
<i>Validazione e interpretazione dei risultati</i> .....	94
Rilevamento a media portata: potenzialità e problematiche .....	95
<b>6. Indagini in ambito artistico: danneggiamento di opere scultoree</b> .....	<b>99</b>
Documentazione 3D a scopo conservativo: stato dell'arte .....	100
<i>Tecniche di documentazione 3D</i> .....	101
<i>Finalità della documentazione 3D</i> .....	102
Caso studio: l'apparato scultoreo della Torre Ghirlandina di Modena.....	106
<i>Generalità e inquadramento della problematica</i> .....	106
<i>Prime evidenze ed evoluzione del fenomeno</i> .....	107
<i>Scopo e modalità di esecuzione delle misure</i> .....	108
<i>Elaborazione delle misure</i> .....	112
<i>Quantificazione del danneggiamento</i> .....	116
<i>Interpretazione dei risultati e utilizzi</i> .....	121
Rilevamento a breve portata: potenzialità e problematiche .....	123
<b>7. Conclusioni</b> .....	<b>125</b>
Monitoraggio di versanti instabili .....	125
Monitoraggio di strutture storiche .....	128
Monitoraggio di sculture.....	131

<b>8. Discussione .....</b>	<b>135</b>
<b>Bibliografia.....</b>	<b>139</b>
<b>Ringraziamenti .....</b>	<b>155</b>



## Sommario

---

Il presente lavoro di ricerca nasce nell'ambito delle più avanzate tecnologie della geomatica e si sofferma sulla definizione di un corretto approccio metodologico per la documentazione geometrica attraverso la tecnica laser scanning. In particolare è stato svolto un approfondito studio per la determinazione degli aspetti tecnici e metodologici fondamentali da conoscere e considerare per una corretta programmazione delle campagne di rilievo tridimensionale con tecnologia laser scanning, con particolare riferimento all'efficace progettazione di analisi multi-temporali in diversi contesti e campi applicativi.

Le esperienze di valutazione dell'effettivo potenziale d'utilizzo di questa tecnologia per l'identificazione di parametri geometrici tra epoche successive (spostamenti e deformazioni) sono ancora poche, anche nell'intero contesto internazionale. Negli ultimi anni la comunità scientifica si è interrogata sulle modalità con cui svolgere i rilievi e sugli algoritmi con cui elaborare i dati acquisiti al fine di ottenere significative analisi multi-temporali, essenziali in molte applicazioni ingegneristiche. L'introduzione sul mercato di strumentazione sempre più efficiente e prestazionale ha reso possibile elaborazione ed interpretazioni repute irraggiungibili, fino a pochi anni fa.

La ricerca è condotta nel campo della geomatica applicata, e nello specifico di quella disciplina ancora sconosciuta in Italia e pionieristica nel panorama internazionale definita Ingegneria Geomatica (considerata una delle discipline con le più grandi prospettive di sviluppo). L'attività si basa pertanto sull'identificazione di contesti e scenari reali su cui sono state sperimentate e validate le metodologie citate, sia di progettazione ed esecuzione dei rilievi, sia di elaborazione e interpretazione dei dati.

I sistemi terrestri a scansione laser (TLS) sono ormai largamente diffusi ed utilizzati per un elevato numero di applicazioni, soprattutto per la rapidità con cui riescono a rilevare grandi moli di dati (punti nello spazio) ad elevata risoluzione e accuratezza. Sono impiegati per rilievi in ambito ambientale, su siti interessati da dissesto idrogeologico e franoso, civile, per l'analisi dell'assetto geometrico degli edifici mediante misure ad alta precisione, e conservativo, per lo studio del deterioramento dei monumenti nell'ambito dei beni culturali. Le applicazioni ingegneristiche su cui si è finalizzata la ricerca appartengono agli ambiti del rischio idrogeologico, dell'indagine strutturale e della quantificazione del danno; per ciascun ambito sono state esplorate le differenti soluzioni tecnologiche disponibili sul mercato.

Esistono infatti varie tipologie di laser scanner: nelle applicazioni terrestri a media o lunga portata, decine o centinaia di metri, la misura delle coordinate dei punti avviene mediante il calcolo del tempo di volo o della differenza di fase dell'impulso emesso; nelle applicazioni a breve portata, invece, le strumentazioni a scansione laser sfruttano il principio dell'intersezione

in avanti e vengono perciò definiti triangolatori. Ogni strumento ha peculiari caratteristiche che lo rendono più o meno adatto alle varie applicazioni.

## Abstract

---

This research, arising from practical application of state-of-the-art geomatic technology, seeks to define a sound methodology for geometric data capture using laser scanning techniques. In particular, it seeks to define technical and methodological criteria that must be considered to correctly program three-dimensional relief measurement campaigns with laser scanning technology, with emphasis on effective design of multi-temporal analysis in a variety of contexts and applications.

There is limited experience in use of this technology to identify geometric variations between successive epochs (displacements and deformations), even internationally. The scientific community has focused recently on how best to carry out surveys and on which algorithms are most effective for multi-temporal analysis of survey data, an essential aspect in many engineering applications. Ever-increasing efficiency and capability of commercially-available instrumentation makes possible analysis and interpretation that was unobtainable only a few years ago.

This research is in the field of applied geomatics, and specifically in Geomatic Engineering, a pioneering discipline on the international level with strong potential for rapid development, but which is still mostly unknown in Italy. Its aim is to identify the contexts and real-world cases in which the investigated methodologies were applied and validated, both for planning and execution of surveys and for processing and interpretation of the resultant data.

Terrestrial Laser Scanning (TLS) systems are now widely available and used for many applications due to the speed with which they can acquire a large amount of data (points in space) with high resolution and accuracy. TLS systems are used for 3D measurements on sites affected by hydrogeological and landslide risks in the environmental field, for high-precision geometrical analysis on buildings in the civil engineering field, and for the study of the deterioration of monuments in conservation and cultural contexts.

There are various types of laser scanners: in terrestrial applications at medium or long range (tens or hundreds of meters) measurements are performed by calculating time of flight or phase shift of the emitted pulse; however, in short range applications instruments exploit the principle of the forward intersection, hence the name triangulation. Each instrument has unique characteristics that make it suitable for a certain range of applications.

This research covers the engineering applications of hydrological risk, structural survey, and damage analysis and for each application, proposes best practices in the selection and use of the various technical solutions available on the market.



## Presentazione

---

Riccardo Rivola è laureato in Ingegneria per la Sostenibilità dell'Ambiente presso l'Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia. Interessato della disciplina della topografia fin dai tempi dell'Istituto per Geometri, fa parte del gruppo di ricerca del Laboratorio di Geomatica del Dipartimento di Ingegneria "Enzo Ferrari" di Modena dal 2010, prima come assegnista di ricerca e successivamente come dottorando della scuola in "High Mechanics and Automotive Design & Technology".

Nel corso di questi anni si è occupato principalmente di esecuzione ed elaborazione di campagne di rilievo e monitoraggio con strumentazione laser scanner ad alta e altissima risoluzione, sviluppando solide competenze in ambito architettonico, archeologico, territoriale e artistico/culturale. Ha condotto inoltre esperienze significative di rilevamento tramite tecniche fotogrammetriche per l'elaborazione di immagini digitali e successiva modellazione 3D. È coautore di varie pubblicazioni scientifiche.

È presidente di GEIS – Geomatics Engineering Innovative Solutions srl, start-up innovativa ai sensi della Legge n. 221 del 2012 costituita insieme a due colleghe a maggio 2014. La società, spin-off dell'Università di Modena e Reggio Emilia, è operante nel settore dell'ingegneria geomatica per la progettazione di soluzioni a problematiche di rilevamento e posizionamento con tecniche e metodologie innovative, sfruttando in modo integrato gli strumenti che la geomatica mette a disposizione.



## Obiettivi della ricerca

---

La geomatica è la scienza che si occupa del rilevamento e trattamento informatico dei dati relativi alla Terra e all'ambiente. Le attività di osservazione della Terra hanno origini molto lontane ma, negli ultimi decenni, lo sviluppo delle discipline del rilevamento è stato prorompente. Oggi la geomatica svolge un ruolo fondamentale, anche se spesso oscuro, in moltissime attività della moderna vita quotidiana: quasi ogni ambito della nostra vita di ogni giorno è influenzato da flussi di dati e di informazioni geografiche. Il termine geomatica rappresenta l'insieme di discipline e tecniche che mira a fornire un vitale supporto nella gestione del territorio e del costruito per un'adeguata misura delle condizioni statiche e per l'identificazione e l'analisi delle possibili evoluzioni dinamiche, in modo da conoscere e prevedere situazioni di pericolosità e di rischio al servizio di possibili attività di allerta in condizioni operative prossime a quelle del tempo reale.

La geomatica assume un ruolo importante nei processi di monitoraggio di strutture, infrastrutture e ambienti naturali. In questo ambito, monitorare significa controllare attraverso misure l'evoluzione nel tempo di un fenomeno deformativo, attraverso punti di riferimento che si trovano all'interno o in prossimità di un'area. I dispositivi di misurazione utilizzati per un monitoraggio geomatico dipendono dall'applicazione, dal metodo scelto e dalla frequenza richiesta ma hanno la caratteristica comune di poter misurare gli spostamenti di punti lungo una, due o tre dimensioni. La geomatica quotidiana è molto diversa da quella di soli 20 anni or sono, non solo per i nuovi strumenti a disposizione. Le numerose innovazioni tecnologiche, frutto dei nuovi principi di funzionamento di questi strumenti e del massiccio intervento delle discipline informatiche, hanno comportato la necessità per gli operatori del settore di un'approfondita conoscenza delle basi su cui si fonda questa disciplina e la capacità di interagire in modo completo con altri specialisti. Questo fatto implica la necessità per il geomatico di possedere, oltre a un'ottima conoscenza delle tecniche di misura, la necessaria flessibilità per adattare strumenti, tempi di esecuzione e validazione dei risultati in modo da soddisfare le richieste del monitoraggio.

Il monitoraggio rappresenta oggi una delle maggiori sfide del settore geomatico, dal momento che necessita di alta precisione e massima affidabilità degli strumenti di analisi e calcolo. L'attività di ricerca applicata svolta in questi anni ha permesso di individuare aspetti tecnici e metodologici fondamentali da conoscere e considerare per una corretta progettazione dei sistemi di monitoraggio indipendentemente dalla tecnica geomatica utilizzata. Infatti, sebbene ogni tecnica o strumentazione abbia delle particolari e ben specifiche caratteristiche che la contraddistinguono rispetto alle altre, è comunque possibile ricondurre la fase di studio e progettazione del sistema di monitoraggio ad un'unica metodologia comune.

Il contributo scientifico e metodologico del settore della geomatica è particolarmente evidente nella fase di conoscenza geometrica del manufatto o porzione di territorio indagata. Gli strumenti a scansione laser offrono enormi potenzialità sotto questo punto di vista ed hanno infatti comportato una rivoluzione dei classici metodi di rilievo topografico. La filosofia della scelta di un numero discreto di punti caratteristici da rilevare autonomamente sull'oggetto è stata completamente ribaltata dalla possibilità di acquisizione automatica di un elevatissimo numero di punti, offerta dai laser scanner. Inoltre, il velocissimo progresso tecnologico di questi sistemi ha reso l'utilizzo della tecnologia a scansione sempre più frequente per un elevatissimo numero e tipologia di applicazioni di rilevamento.

Tuttavia, i sistemi di monitoraggio hanno lo scopo di fornire informazioni per la conoscenza, la comprensione ed il controllo di una problematica legata ad un fenomeno in evoluzione, per cui non è sufficiente effettuare la misurazione delle coordinate spaziali dei punti ad un unico istante temporale (rilevamento). I sistemi di monitoraggio devono infatti essere in grado di garantire un controllo proattivo, analizzando e quantificando la variazione della posizione (in una, due o tre dimensioni) di punti caratteristici dell'oggetto nel tempo. La fase più delicata del processo di conoscenza del fenomeno indagato è quindi rappresentata dall'analisi dei risultati per l'estrazione e l'interpretazione del contenuto informativo dai dati di monitoraggio acquisiti tramite i sensori.

La tecnica a scansione laser presenta aspetti peculiari, in particolare l'impossibilità di scegliere i punti esatti da rilevare, che ne rendono particolarmente problematico l'utilizzo con pure finalità di monitoraggio geomatico. Tuttavia, l'elevata densità dei punti rilevati permette di ottenere risultati di confronto estremamente scenografici e ricchi di contenuto informativo. Le potenzialità dei sistemi a scansione per il rilevamento metrico hanno quindi progressivamente spinto l'interesse dei ricercatori all'utilizzo di questa tecnologia per finalità di monitoraggio. Nonostante le esperienze significative reperibili in bibliografia, soprattutto in alcuni specifici ambiti, inizino ad essere molteplici, nella maggior parte dei casi le problematiche di analisi ed interpretazione dei risultati vengano completamente sottovalutate o addirittura non considerate.

Al contrario, la caratteristica di indistinta acquisizione di punti sull'oggetto del rilevamento, che determina l'impossibilità del confronto diretto e puntuale tra le coordinate dei punti acquisiti, rende di fondamentale importanza la fase di elaborazione dei dati rilevati per una corretta analisi ed interpretazione dei risultati. Lo scopo principale della ricerca intrapresa è quindi stato rivolto alla valutazione delle potenzialità e dei limiti della tecnologia laser scanning per finalità di monitoraggio geomatico. Per annoverare il laser scanning terrestre tra la strumentazione geomatica di monitoraggio, al pari delle tecniche storicamente riconosciute tali, è stato reputato fondamentale analizzare la possibilità di calcolare, tramite i risultati delle scansioni, spostamenti o deformazioni agenti sull'oggetto monitorato con buona accuratezza e indipendenza, relativamente ai differenti casi studio affrontati.

La tematica dei versanti instabili ha un forte impatto sulla vita sociale a causa del gran numero di eventi franosi che si sviluppano soprattutto nelle zone di montagna e del rischio associato a causa della presenza di strade, insediamenti umani, attività turistiche e commerciali. Tra le attività di previsione e prevenzione del dissesto geologico-idraulico un ruolo importante è giocato dagli interventi (non strutturali) di pianificazione, creazione e gestione di Sistemi Informativi Territoriali (SIT). I sistemi informativi per il monitoraggio e il rilievo in continuo del dissesto, sul medio e lungo periodo, possano servire oltre che per l'aggiornamento delle delineazioni spaziali della cartografia del dissesto, all'attribuzione dello stato di attività dei fenomeni franosi e quindi per valutazioni più affidabili e precise della pericolosità geomorfologica.

Attualmente, il ricorso alla strumentazione laser scanning terrestre può ormai considerarsi un approccio standard allo studio della morfologia e della cinematica di un versante. Tali analisi, di rilevante importanza per la valutazione delle condizioni di stabilità di un versante in roccia, permettono di ottenere le caratteristiche spaziali delle famiglie di superfici di discontinuità, grazie anche a procedure automatizzate. Tuttavia, per distanze operative superiori a 1 km, e movimenti del corpo franoso nell'ordine di pochi centimetri l'anno, l'utilizzo del laser scanner a scopo differenziale (monitoraggio) è ancora lontano dall'essere una procedura di routine. Di conseguenza, e con riferimento ad un caso reale di fenomeno attivo con movimento lento in roccia, è stata condotta un'intensa attività di ricerca finalizzata a: integrare i rilievi laser scanning aviotrasportati e terrestri a lungo raggio per ricavare un Modello Digitale del Terreno (DTM) ad alta risoluzione e supportare la mappatura del fenomeno; effettuare analisi differenziali da scansioni laser a lunghissima portata da posizione non fissa; sfruttare i prodotti ottenuti per migliorare il piano di monitoraggio e la conoscenza delle caratteristiche della frana.

Il controllo periodico delle costruzioni rappresenta il principale strumento per una consapevole conservazione, in quanto consente di programmare la manutenzione ed attuare in tempo, quando realmente necessari, gli interventi di riparazione, in caso di danno strutturale, e di consolidamento, finalizzato alla prevenzione. Per impostare un programma di monitoraggio è necessario eseguire preventivamente un'accurata analisi del funzionamento strutturale, e quindi un'interpretazione dei dissesti in atto, in modo da definire i parametri più significativi che, misurati in continuo o con scadenze temporali adeguate, consentono di certificarne il buon comportamento ovvero di valutare eventuali evoluzioni pericolose per la stabilità di insieme o di singole parti dell'edificio.

L'uso diagnostico del laser scanner, soprattutto nell'ambito strutturale, risulta particolarmente efficace quando è necessario effettuare analisi sulla geometria di oggetti o strutture, a partire dalla nuvola di punti, per estrarre parametri ed informazioni utili ai fini della valutazione della stabilità o dell'assetto geometrico. Tuttavia, i laser scanner sono ancora oggi scarsamente utilizzati con finalità di monitoraggio strutturale di alta precisione, dal momento che per la maggior parte delle applicazioni la loro accuratezza (almeno qualche millimetro) non

è sufficiente. Nel contesto architettonico e strutturale (ingegneria civile) vi sono ormai una moltitudine di esperienze, reperibili in letteratura, di utilizzo della strumentazione laser scanner a supporto di indagini geometriche e analisi strutturali ma pochissime con finalità di monitoraggio. Di conseguenza, e con riferimento ad un caso reale di struttura storica a prevalente sviluppo verticale (torre), è stata condotta un'intensa attività di ricerca finalizzata a: approfondita e dettagliata conoscenza geometrica della struttura; analisi differenziale da scansioni laser a media portata da posizione non fissa per la valutazione delle variazioni di particolari anomalie geometriche riscontrate nella fase precedente.

Negli ultimi anni il campo dei Beni Culturali ha suscitato grande interesse da parte della comunità scientifica. Le nuove tecnologie afferenti alla geomatica e all'informativa offrono oggi notevoli potenzialità applicative per la documentazione dei Beni Culturali, sia per quanto riguarda le fasi di acquisizione del dato, sia per tutte le fasi di rappresentazione, diffusione e comunicazione multimediale. Si assiste sempre più a restituzioni virtuali dell'ambiente che ci circonda, con ambientazione e visualizzazioni 3D prodotte per varie applicazioni quali la documentazione, la conservazione, il restauro virtuale, la simulazione, la didattica, l'animazione, la cartografia, la gestione territoriale, il monitoraggio.

L'opera d'arte non è un'entità fissa e immutabile nel tempo: un problema particolare, ad esempio, è costituito dalla conservazione delle sculture all'aperto, minate dai danni provocati dall'inquinamento e dagli agenti atmosferici, e per le quali solitamente si tende ad un'azione preventiva di consolidamento e manutenzione in loco. Nell'ambito della conservazione dei Beni Culturali, il rilievo metrico offre oggi diverse soluzioni tecnologiche e diversi metodi di rilevamento 3D (*reality-based*), tra cui la fotogrammetria (*image-based*) e la scansione laser o a luce strutturata (*range-based*) sono le maggiormente utilizzate. La conservazione del patrimonio culturale mediante archiviazione digitale è diventato un obiettivo globale e una sfida per i ricercatori scientifici; tuttavia, ad oggi, non risultano esserci esperienze significative di confronto tra modelli 3D ad altissima risoluzione per la quantificazione delle modificazioni nel tempo subite da opere scultoree. Di conseguenza, e con riferimento ad un caso reale di scultura lapidea, è stata condotta un'interessante attività di ricerca finalizzata alla digitalizzazione dell'opera con finalità di documentazione e conservazione e, successivamente ai danneggiamenti subiti dalla stessa a causa degli effetti sismici, all'analisi differenziale da scansioni laser a breve portata per la quantificazione metrica del danneggiamento subito.

## Struttura della tesi

---

La tesi si compone di tre parti:

La prima parte, costituita da tre capitoli, intende definire l'attuale scenario della disciplina geomatica, con particolare riferimento all'attività di monitoraggio di spostamenti, o deformazioni, e alle potenzialità della tecnologia laser scanning per questo particolare scopo.

- Il primo capitolo di descrizione generale delle scienze e delle tecniche che costituiscono la geomatica, considerata una delle discipline con le più grandi possibilità di sviluppo, in cui vengono inoltre brevemente presentate alcune delle molteplici applicazioni di comune utilizzo nella vita quotidiana basate su tecniche geomatiche.
- Nel secondo capitolo si illustrano le potenzialità e le problematiche legate al monitoraggio degli spostamenti, o delle deformazioni, con le tecniche geomatiche, finalizzabile alla realizzazione di Sistemi Informativi Geografici (GIS) o Sistemi di Supporto alle Decisioni (DSS).
- Con il terzo capitolo si espongono le prestazioni e le peculiarità delle differenti tipologie di sistemi terrestri a scansione laser, enunciandone le potenzialità e le criticità a scopi di monitoraggio.

Nella seconda parte si passa alla trattazione dei tre casi di studio oggetto della ricerca applicata sulle tematiche di monitoraggio tramite scansioni laser scanning su scale e ambiti applicativi completamente differenti.

- Il quarto capitolo affronta la tematica del monitoraggio in ambito territoriale: l'esperienza condotta è riferita all'osservazione di un versante instabile in lento movimento con un modello di laser scanner a lunghissima portata (oltre 1 km).
- Nel quinto capitolo l'ambito d'analisi è quello architettonico, legato in particolare ad edifici storici per i quali può essere importante attuare politiche di monitoraggio sull'assetto geometrico a scopo preventivo.
- Nel sesto capitolo si analizzano le potenzialità dei laser scanner triangolatori, con ridottissime portate ma grandi accuratezze, per analisi di degrado o danneggiamento su opere scultoree di particolare pregio storico-artistico.

La terza parte è completamente dedicata alle conclusioni e alla discussione dei risultati ottenuti, sia in modo mirato sui tre casi di studio sia in modo generalizzato sulle possibilità di monitoraggio con sistemi a scansione laser.

## 1. Ingegneria geomatica

---

Le attività di osservazione della Terra hanno origini molto lontane. Intorno al 230 a.C. Eratostene da Cirene, considerato il padre della geografia matematica, misurò per la prima volta le dimensioni della Terra ottenendo un valore del diametro terrestre inferiore di soli circa 113 km rispetto a quello oggi accettato. La geografia ha poi avuto una rapida espansione nei secoli: nella seconda metà del XX secolo si è assistito ad una notevole accelerazione tecnologica e metodologica, anche se esiste tuttora una scarsa consapevolezza di come utilizzare correttamente e in modo proficuo le enormi potenzialità messe a disposizione.

Negli ultimi decenni, lo sviluppo delle discipline del rilevamento è stato prorompente. Settori economici sempre più ampi utilizzano dati di natura e caratteristiche diverse, rilevati con una crescente molteplicità di procedure, tra cui il posizionamento satellitare, la fotogrammetria digitale, la scansione laser, il telerilevamento multi- e iperspettrale [Fea e Gomarasca, 2008]. Si tratta di grandi quantità di dati, e di informazioni derivate, che devono essere necessariamente organizzati, elaborati, gestiti, rappresentati in cartografie digitali e numeriche e utilizzati in tempi brevi per una corretta rappresentazione e conoscenza della situazione territoriale attraverso Sistemi Informativi Territoriali (SIT) e Sistemi di Supporto alle Decisioni (DSS - Decision Support System).

La risposta a tutte queste moderne esigenze è data dalla Geomatica. Questo termine è nato nell'Università di Laval in Canada nei primi anni Ottanta del secolo scorso, a seguito della precisa cognizione che le crescenti potenzialità offerte dal calcolo elettronico stavano rivoluzionando le scienze del rilevamento e della rappresentazione e che l'uso del disegno computerizzato era compatibile con il trattamento di quantità di dati fino a quel momento impensabili. La rivoluzionaria e geniale intuizione di quel periodo fu imperniata sulla georeferenziazione, vale a dire sull'attribuzione delle corrette coordinate geografiche a tutto ciò che è posizionato sul nostro pianeta.

L'essenza della geomatica risiede quindi fondamentalmente nella gestione del contenuto informativo dei dati territoriali e ambientali utilizzando le scienze informatiche, vale a dire tramite la sistematica e rigorosa elaborazione dell'informazione attraverso strumenti tecnici avanzati (hardware), metodi, modelli e algoritmi (software) e una sempre più sofisticata automatizzazione. La geomatica è definita, quindi, come un approccio sistemico, integrato e multidisciplinare per selezionare gli strumenti e le tecniche appropriate per acquisire in modo metrico e tematico, integrare, trattare, analizzare, archiviare e distribuire dati spaziali georiferiti con continuità in formato digitale.

L'importante sviluppo della geomatica, l'accresciuto interesse nel campo dell'informazione spaziale, la complementarità, l'integrazione e il sinergismo tra le discipline e le tecniche che la

caratterizzano, hanno recentemente portato a delineare una nuova figura professionale: il geomatico. Si avverte, infatti, sempre più concretamente la necessità di dover fornire una sufficientemente convincente motivazione culturale per la conoscenza scientifica e tecnologica nelle discipline che si occupano del rilevamento, dell'elaborazione e della restituzione dei dati avendo come obbiettivo la rappresentazione del territorio e il supporto alle decisioni. Una figura professionale di questo tipo esiste nel Nord America dagli inizi degli anni Ottanta del secolo scorso e in alcuni paesi d'Europa si sta progressivamente affermando. Oggi, anche in Italia, le prospettive professionali per l'esperto del rilevamento e del controllo di qualità sono in continua e progressiva crescita e si può pertanto pronosticare l'emergere rapido, costante e progressivo di questa nuova figura professionale.

## **Geomatica: una disciplina con grandi prospettive di sviluppo**

*Si chiama geomatica (neologismo che unisce geografia e informatica) una delle discipline con le più grandi prospettive di sviluppo. Comprende le diverse tecniche di rilevamento, elaborazione e analisi dei parametri metrici e fisici dell'ambiente che ci circonda. Con un ruolo di primo piano dell'informatica nel trattamento dei dati. Topografia, dunque, ma anche fotogrammetria (rilievo dei dati metrici di un oggetto mediante fotografia), telerilevamento satellitare, sistemi informativi territoriali. E un gran numero di ambiti di sbocco, dall'analisi strutturale degli edifici ai rilievi per la geologia, fino alla protezione territoriale e civile e alla cartografia.*

**Paolo Ardisson, Sole 24 Ore, 12 giugno 2008, Nòva 24, p. 8.**

Una precisa testimonianza della fondamentale importanza di questi temi viene dal fatto che in Europa sono state sviluppate iniziative che tengono largamente conto delle discipline e delle tecniche della geomatica per regolamentare l'uso dell'informazione geospaziale nel senso tridimensionale e per utilizzare adeguatamente i dati di osservazione della Terra per la conoscenza e la gestione dei rischi ambientali. Il progetto della Commissione Europea chiamato INSPIRE (Infrastructure of spatial information in the European Community) è divenuto una direttiva dell'Unione Europea (2007/2/EC del 14 marzo 2007) a supporto della stesura di politiche che possano avere un impatto diretto o indiretto sull'ambiente. In Italia la Direttiva è stata recepita con il D.Lgs. 32/2010 recante "Attuazione della direttiva 2007/2/CE, che istituisce un'infrastruttura per l'informazione territoriale nella Comunità europea (INSPIRE)".

Questa attività si è sviluppata in parallelo a quella di un altro progetto europeo chiamato GMES (Global monitoring for environment and security), che dal 2001 ha l'ambizione di studiare soluzioni per proporre un sistema articolato finalizzato alla gestione globale del rischio su scala europea, soprattutto attraverso l'osservazione della Terra dallo spazio. Il contributo di forte innovazione portato dai sistemi di Earth Observation e dai dati satellitari forniti può arricchire chi questi dati potrebbe utilizzare per porre mano ai suoi compiti di governo del

territorio. Dall'esigenza di creare un raccordo tra la domanda e l'offerta di informazioni su ambiente e territorio, nel 2008, nasce il network NEREUS (Network of European Regions Using Space Technologies) con l'obiettivo principale della creazione e della promozione di uno spazio di dialogo, di scambio e di riflessione tra le regioni europee e gli attori della politica spaziale sulle tecnologie e sulla diffusione di utili applicazioni [Bilotta, 2012].

La geomatica è dunque un insieme di discipline e tecniche che mira a fornire un vitale supporto nella gestione del territorio per un'adeguata misura delle condizioni territoriali statiche e per l'identificazione e l'analisi delle possibili evoluzioni dinamiche, in modo da conoscere e prevedere situazioni di pericolosità e di rischio al servizio di possibili attività di allerta in condizioni operative prossime a quelle del tempo reale.

Un esempio è dato dalla costituzione di sistemi per il monitoraggio di strutture, infrastrutture o porzioni di territorio: i sistemi, basati sulla raccolta di dati, sia immagini sia dati numerici puntuali rilevati a terra, da aereo e da satellite con sensori attivi e passivi, pur nascendo come Sistemi Informativi Territoriali (SIT), si possono configurare come Sistemi a Supporto delle Decisioni (DSS), qualora siano costituiti da sistemi informativi in grado di creare scenari possibili attraverso la modellizzazione della realtà e di offrire una scelta di soluzioni al decisore.

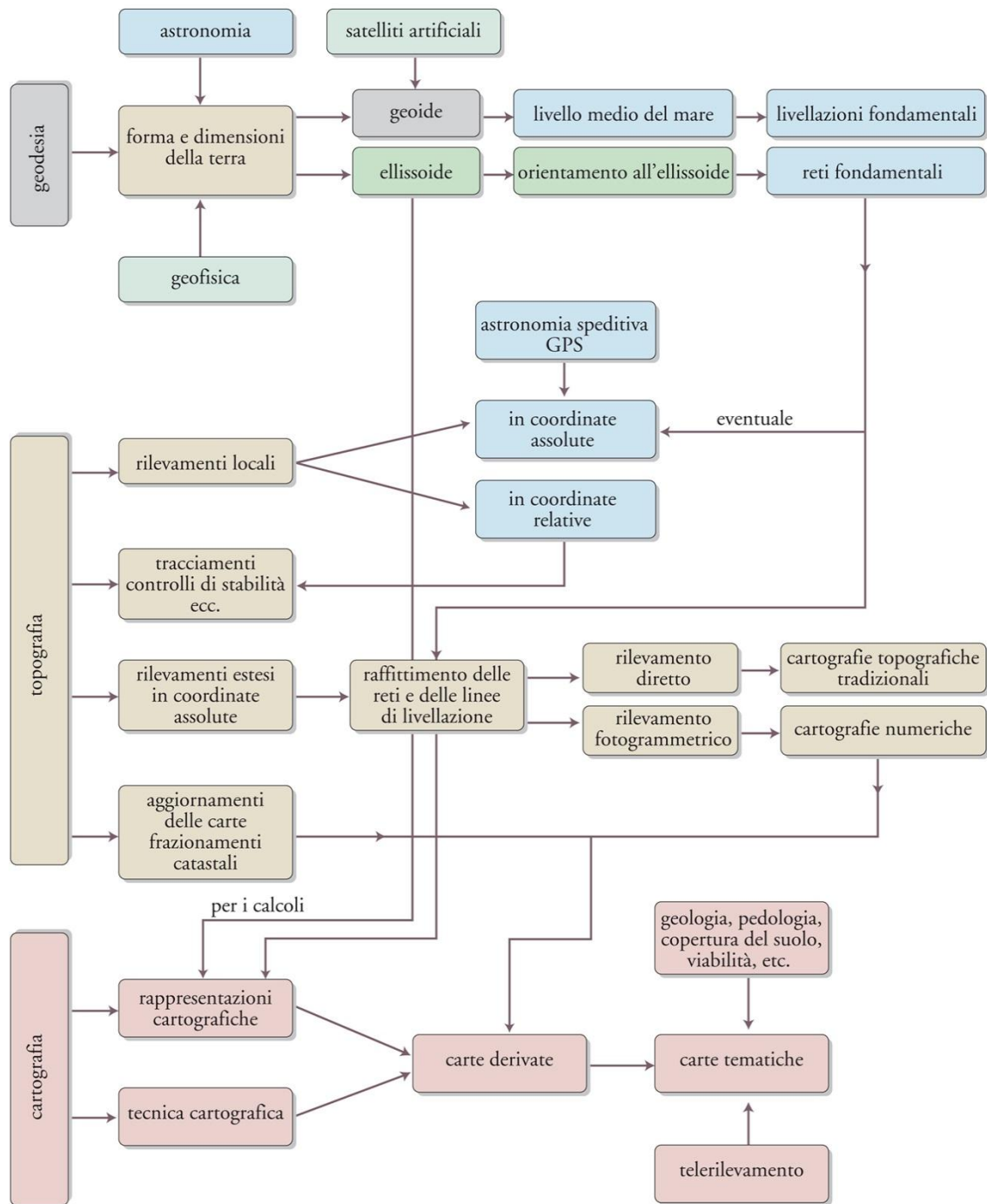
Un sistema di monitoraggio avanzato può essere configurato con un insieme di strumenti (hardware e software) in grado di ricevere opportuni dati georeferenziati, accoglierli, memorizzarli, richiamarli, elaborarli, trasformarli e soprattutto rappresentarli in forma di scenari possibili per fornire ai decisori elementi oggettivi di valutazione sulle possibili conseguenze di un evento. Il sistema informativo sviluppato in questo modo è quindi molto più di un mezzo per codificare, memorizzare e richiamare dati, perché è concepito come un modello di rappresentazione del mondo reale.

## **Discipline e tecniche della geomatica**

Il settore della geomatica si interessa dell'attività nei campi della geodesia fisica, geometrica e spaziale, della topografia, della fotogrammetria aerea e terrestre, della cartografia, del telerilevamento, della navigazione e dei Sistemi Informativi Geografici (GIS - Geographic Information System) [Allegato B del D.M. 336/2011]. I contenuti della disciplina riguardano invece l'acquisizione, l'elaborazione, la restituzione, l'analisi e la gestione di dati di natura metrica o tematica relativi alla superficie della Terra, o a porzioni di essa, ivi compreso l'ambiente urbano, le infrastrutture e il patrimonio architettonico, individuati dalla loro posizione spaziale e qualificati dalla precisione del rilevamento. Gli ambiti applicativi hanno per oggetto, in particolare, i sistemi di riferimento globali e locali, il campo di gravità globale e locale, gli strumenti e i metodi di rilevamento, di controllo e di monitoraggio del territorio, delle strutture e dei beni culturali, il trattamento dei dati di misura, la produzione e l'aggiornamento

della cartografia e dei database topografici, il tracciamento di opere ed infrastrutture, i sistemi mobili di rilevamento, i modelli numerici del terreno e delle superfici, la gestione e la condivisione dell'informazione geografica multidimensionale e multi-temporale.

La base fondamentale della geomatica è costituita dai contributi portati da discipline come la geografia, la geodesia e la cartografia. Per quanto detto, la geografia è una disciplina essenziale per la geomatica, perché possiede una specificità propria e un'autonomia epistemologica che le consentono di offrire validi strumenti per la comprensione della realtà terrestre, realizzando trame interpretative di sintesi tese ad analizzare relazioni, cause, effetti e tendenze evolutive. Considerando il fatto che il territorio prende forma sulla superficie terrestre, la geodesia mette a disposizione della geomatica informazioni essenziali relative alla Terra come corpo solido, attraverso le sue due branche: la gravimetria e l'astronomia di posizione; la prima, dall'analisi della gravità terrestre e delle sue anomalie, fornisce dati sulla forma e sulle dimensioni della Terra e sul geoide; la seconda permette la determinazione della posizione dei punti del globo tramite osservazioni riferite a stelle e a satelliti artificiali, note le leggi della meccanica celeste. La cartografia infine cerca di restituire, su diversi supporti e con diverse tecniche, le informazioni geografiche e territoriali rappresentandole in modo sintetico, chiaro e il più possibile corrispondente alla realtà. Le carte sono il prodotto grafico numerico nel quale si riporta in modo sintetico il lavoro di misura e di comprensione del territorio [Fea e Gomasca, 2008].



*Figura 1.1: Contributi delle discipline scientifiche alla geomatica.*

Le tecniche classiche di misurazione da cui è nato il moderno rilevamento geomatico sono indubbiamente la topografia e la fotogrammetria. La topografia fornisce la descrizione grafica e metrica dei luoghi della superficie fisica della Terra e contribuisce alla rappresentazione del territorio, attraverso rilievi planimetrici riferiti ad una medesima superficie di riferimento, rilievi altimetrici rispetto alla superficie del geode, la celerimensura e l'agrimensura per il computo di aree e rettifica di confini. L'apporto della fotogrammetria, sia analogica sia analitica e, oggi sempre più, digitale, risiede invece nelle informazioni metriche relative ad un oggetto

derivate in maniera rigorosa a partire da sue immagini fotografiche. Sebbene i principali cardini sui quali si basa la fotogrammetria continuano a restare gli stessi, questa disciplina è in rapida e continua evoluzione: l'utilizzo fotogrammetrico dei dati satellitari ad alta risoluzione e l'introduzione di tecnologie in grado di acquisire immagini in altre regioni dello spettro elettromagnetico ne hanno ampliato il significato estendendolo fino al telerilevamento.

Il contributo del telerilevamento alla geomatica è basato su tecniche che permettono di trarre informazioni di una realtà (oggetto o porzione di territorio) posta a una nota distanza dal sensore (*remote sensing*). Questo rappresenta l'elemento cardine di questa giovane disciplina che si suddivide in telerilevamento passivo, qualora le sorgenti naturali di energia siano il Sole e gli oggetti stessi, e telerilevamento attivo, qualora sia il sensore stesso l'emettitore dell'energia elettromagnetica. Nell'uso attuale, il termine telerilevamento, indica non solo l'acquisizione a distanza di informazioni qualitative e quantitative riguardanti il territorio e l'ambiente, ma anche l'insieme dei metodi, delle tecniche e degli algoritmi per la successiva elaborazione e interpretazione.

Fra le discipline del rilevamento acquista poi un particolare significato la tecnica della scansione laser (*laser scanning*), in quanto possiede tutte le prerogative per rivoluzionare il settore in virtù della completezza delle informazioni prodotte, della precisione conseguibile e dei livelli di automazione e di produttività che la caratterizzano. La scansione laser è una tecnica di (tele)rilevamento attivo che, tuttavia, rappresenta una significativa evoluzione di alcuni aspetti della fotogrammetria (tecnica passiva), in quanto fornisce direttamente il modello tridimensionale di una superficie riducendo al minimo l'intervento degli operatori per una quasi totale automazione del processo.

Altro contributo assai importante per la geomatica è dato dai sistemi spaziali di posizionamento e navigazione, che consentono la localizzazione tridimensionale e la navigazione di precisione di oggetti anche in movimento su tutto il globo terrestre, con qualsiasi condizione meteorologica e in modo continuo. Essi sono basati sulla ricezione di segnali in banda radio emessi da satelliti per le telecomunicazioni; l'utente a terra tramite uno strumento costituito da un'antenna ed un ricevitore, più o meno sofisticato e costoso in funzione dei livelli di accuratezza delle misure raggiungibili, è in grado di determinare le coordinate geocentriche di qualsiasi punto della superficie terrestre nel sistema di riferimento globale.

L'immensa quantità di informazioni con caratteristiche molto diverse, spesso asincrone e variamente distribuite geograficamente, che sono disponibili e necessarie alla geomatica richiede sistemi di acquisizione e di gestione dati particolarmente complessi e spesso dedicati. Il centro pulsante della geomatica è costituito dai Sistemi Informativi Geografici (GIS) per la gestione e la manipolazione dei dati. L'introduzione e la forte diffusione che hanno avuto i GIS dagli anni Novanta del secolo scorso e il notevole sviluppo delle reti neurali hanno aumentato enormemente la possibilità di elaborazione e di analisi dei dati raccolti negli archivi di pubbliche amministrazioni, enti e istituti di ricerca che si occupano dello studio e della

pianificazione del territorio e hanno dato un vigoroso impulso alla crescita e alla diffusione della geomatica.

Infine, il rapido sviluppo dei web GIS dalla fine del XX secolo ha dato alla geomatica un duttile strumento per mettere a disposizione dell'utente non esperto informazioni territoriali, visualizzate ad esempio su immagini telerilevate, per la divulgazione di dati geografici immagazzinati su macchine dedicate alla memorizzazione delle banche dati e le cui architetture di rete, anche molto complesse, sono trasparenti all'utente finale.

## **Geomatica nella vita quotidiana**

La geomatica svolge un ruolo fondamentale, anche se spesso oscuro, in moltissime attività della moderna vita quotidiana. La geomatica non può più essere considerata una disciplina per pochi addetti, come poteva essere negli scorsi decenni: è ormai divenuto un ambito di ricerca e di lavoro che investe molte professionalità e che viene declinato in molteplici applicazioni. I rapidi sviluppi tecnologici e la grande duttilità di applicabilità di questa disciplina rendono gli aspetti della formazione e dell'aggiornamento professionali fondamentali nei vari ambiti applicativi [Garnero, 2013].

Quasi ogni ambito della nostra vita di ogni giorno è influenzato da flussi di dati e di informazioni geografiche; questo succede perché oggi le tecnologie di comunicazione e telerilevamento sono incorporate nella vita quotidiana in modo naturale e vissute ormai anche distrattamente [Bilotta, 2012]. Le applicazioni più evidenti che si fondano su una base geomatica sono la visualizzazione di luoghi in Google Earth, l'analisi di percorsi su Google Maps, la definizione di itinerari sul navigatore dell'automobile, la ricerca attraverso il GPS dello smartphone dell'auto posteggiata in un grosso parcheggio o dello smartphone stesso smarrito. Questo dimostra l'effettiva utilità delle applicazioni basate sul posizionamento, spesso satellitare, nell'attuale vita di tutti i giorni.

OpenStreetMap è un progetto mondiale per la realizzazione di una banca dati geografica liberamente aggiornabile e utilizzabile per qualsiasi scopo o necessità. Nato nel 2004 in Inghilterra è cresciuto in maniera esponenziale e adesso conta quasi due milioni di contributori. È sempre più spesso utilizzato per applicazioni commerciali, di ricerca ed educative [Delucchi, 2013]. La recente filosofia partecipativa della creazione collettiva di banche dati geografiche, ormai definita VGI – Volunteered Geographic Information [Goodchild, 2007], si sta effettivamente diffondendo e aumentando il consenso sull'utilizzo [Schade et al., 2010] anche a sostegno delle attività di gestione delle crisi.

Molti sono i temi ed i problemi dell'urbanistica contemporanea ma diversi sono gli strumenti per cercare soluzioni. La complessità delle dinamiche urbane, la rapidità delle trasformazioni territoriali e la nuova dimensione dei fenomeni in atto richiedono capacità di comprensione e di governo dei processi. Le analisi di visibilità tramite GIS, ad esempio,

offrono la possibilità di determinare le aree visibili da un punto sulla base di un modello digitale del terreno e dell'impostazione di alcuni parametri relativi al cono visivo dell'osservatore; la classificazione della sensibilità visiva di un territorio offre diversi alla pianificazione, fin dalle fasi di progetto [Cassatella e Guerreschi, 2013].

Gli obiettivi energetici e ambientali fissati per il 2020 dall'Unione Europea ci ricordano come una delle grandi sfide che ci attendono nei prossimi anni sia il cambiamento del nostro attuale modello energetico. Le autorità stanno recependo queste strategie e pianificando uno sviluppo energetico sostenibile che non può più prescindere dall'utilizzo e dal supporto dei sistemi informativi in generale e di quelli geografici in particolare, ai fini di una corretta conoscenza, ad esempio, della potenzialità di sviluppo delle fonti rinnovabili per ciascun territorio o per pianificare correttamente la riduzione dei consumi del parco edilizio costruito [Caon, 2013].

Altro ambito critico in cui la geomatica ricopre un ruolo di primo piano è quello dell'infomobilità, o dell'Intelligent Transport System (ITS), avendo il compito di definire le procedure e le modalità di acquisizione del dato georeferenziato, di gestire primitive cartografiche (rappresentate soprattutto da grafi stradali), di consentire l'ottimizzazione della gestione di flotte del trasporto pubblico e privato e di localizzare con sufficiente precisione eventi che caratterizzano la mobilità in ambito cittadino, regionale e nazionale [Boccardo, 2013].

Infine si intende concludere con il ruolo della geomatica nel supporto alle attività di valutazione dei rischi naturali. La conoscenza dei possibili scenari di rischio sul territorio è un'informazione molto importante che consente di assumere le necessarie misure di salvaguardia al fine di governarlo in sicurezza. Oltre agli strumenti e alle tecniche geomatiche di analisi delle osservazioni, il cui utilizzo è onere degli addetti, è possibile realizzare con strumenti Open Source raccolte (*crowdsourcing*) di informazioni oltre che dal personale tecnico e dai professionisti coinvolti anche dai cittadini e dai diretti interessati [Cremonini e Pispico, 2013].

La geomatica quotidiana è molto diversa da quella di soli 20 anni or sono, non solo per i nuovi strumenti a disposizione. La loro potenza nel trattamento veloce di molti dati, combinata alla facilità d'uso, può portare l'utente a risultati completamente errati. Proprio per le numerose innovazioni tecnologiche che sono frutto dei nuovi principi di funzionamento di questi strumenti, è ancor più necessaria una conoscenza non superficiale delle basi su cui si fonda la geomatica. Una, forse la prima di tutte, è la conoscenza dei sistemi di riferimento spazio-temporali e come questi debbono essere correttamente utilizzati, soprattutto nelle applicazioni di monitoraggio [Manzino, 2013].

## 2. Monitoraggio con tecniche geomatiche

---

Il termine generale monitoraggio ha il significato di ammonire, avvisare, informare, consigliare. Il termine ha origine in ambiente industriale ma il suo significato nel tempo si è ampliato e diffuso in tutte le discipline, sia tecniche sia sociali, sempre con il significato generale di rilevazione nel tempo di dati significativi sul contesto interessato. Monitorare significa controllare attraverso misure l'evoluzione nel tempo di un fenomeno deformativo, attraverso punti di riferimento che si trovano all'interno o in prossimità di un'area. Il monitoraggio topografico viene basato sullo studio e l'analisi nel tempo delle variazioni angolari e spaziali dei punti caratteristici dell'oggetto indagato, materializzati da capisaldi.

La geomatica assume un ruolo importante nei processi di monitoraggio di strutture, infrastrutture e ambienti naturali. In questi particolari ambiti applicativi esiste però la necessità di interagire in modo completo con altri specialisti che partecipano al processo di monitoraggio nel suo complesso. Questo fatto implica la necessità per il geomatico di possedere, oltre a un'ottima conoscenza delle tecniche di misura, la necessaria flessibilità per adattare strumenti, tempi di esecuzione e validazione dei risultati in modo da soddisfare le specifiche richieste del monitoraggio.

### **Rilevamento metrico con tecniche geomatiche**

L'acquisizione della posizione, delle dimensioni e/o della forma di un oggetto costituisce un importante elemento di documentazione e analisi in ogni processo di conoscenza e conservazione del bene stesso. Ad esempio, la conoscenza delle dimensioni e della forma esatta di specifiche caratteristiche topografiche di un contesto geologico in evoluzione può aiutare i geologi applicati ad identificare la tipologia e l'entità del cinematismo; avere a disposizione un'acquisizione tridimensionale, chiara e precisa di una facciata di un edificio può essere di grande aiuto a un progettista per pianificare i lavori di restauro e consolidamento strutturale; determinando le entità dei danneggiamenti subiti da una scultura in pietra a causa degli agenti atmosferici è possibile aiutare un conservatore a determinare l'azione appropriata per la sua protezione e conservazione.

Tradizionalmente è pratica comune presentare i rilevamenti topografici sotto forma di piante, prospetti e sezioni bidimensionali su supporto cartaceo per l'uso diretto in cantiere. Tuttavia, con l'evoluzione di nuovi metodi di misurazione tridimensionale, supportati da avanzati software di gestione dati e adeguate competenze sviluppate dagli utenti, si è assistito negli ultimi anni ad una crescente domanda di informazioni digitali tridimensionali. Vi è una varietà di tecniche disponibili per ottenere informazioni tridimensionali da un rilevamento metrico. Queste tecniche possono essere classificate in vari modi, ma uno dei più utili è relativo

alla scala cui vengono utilizzate (correlata alle dimensioni dell'oggetto), e al numero di misurazioni necessarie per l'acquisizione (correlate alla complessità dell'oggetto). La Figura 2.1 riassume queste tecniche in termini di scala e complessità dell'oggetto.

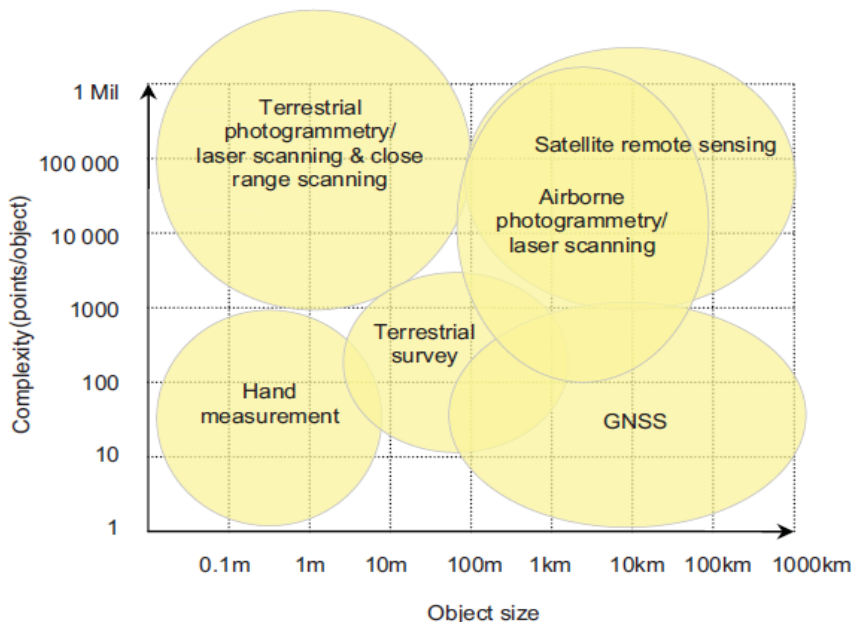


Figura 2.1: Tecniche di rilevamento tridimensionale classificate per scala di rappresentazione e complessità dell'oggetto [Boehler et al., 2001].

Le misure manuali sono in grado di fornire le dimensioni e la posizione di oggetti o scene di pochi metri di dimensione attraverso processi lenti e laboriosi, anche utilizzando distanziometri laser, e comunque di scarsa accuratezza o attendibilità.

Le tecniche di fotogrammetria di prossimità e scansione laser terrestre a scala ridotta sono utilizzate per fornire un buon livello di dettaglio per oggetti di dimensioni ridotte, e sono quindi adatte per oggetti piccoli e complessi. La tecnica fotogrammetrica così come quella di scansione laser possono essere effettuate anche da apparecchi aerei in modo da fornire dati di indagine su aree molto più estese rispetto ai sistemi terrestri. I sistemi di navigazione satellitare (GNSS), grazie alla peculiarità di un sistema di riferimento globale, possono essere utilizzati su aree di grandi dimensioni anche se il numero di punti, e quindi il livello di dettaglio, non può sicuramente essere paragonato a quello di tecniche fotogrammetriche o a scansione, aeree ma nemmeno satellitari. Nel mezzo vi sono tutte le tecniche di rilievo terrestre, come ad esempio la stazione totale, in grado di acquisire un discreto numero di punti su anche aree di dimensioni discretamente estese.

Inoltre, è doveroso annotare che difficilmente si farà affidamento ad una sola tecnica per fornire le informazioni richieste ma più probabilmente verranno utilizzate due o più metodologie per integrare, controllare o validare i risultati ottenuti. Ad esempio, spesso la tecnica GNSS viene utilizzata per controllare e validare la fotogrammetria aerea, mentre spesso

si utilizzano poche ma significative misure effettuate con stazione totale per controllare un rilievo basato principalmente su scansioni laser terrestri.

## **Finalità del monitoraggio geomatico**

La valutazione dei rischi (*risk assessment*) è il processo con cui vengono identificati, analizzati e valutati i rischi associati a specifici pericoli, in modo da determinare modi appropriati per eliminare o controllare i rischi stessi. Il processo di valutazione dei rischi può essere riassunto come segue:

- Identificazione e valutazione del rischio: attività per la determinazione e l'analisi del potenziale, dell'origine, delle caratteristiche e del comportamento del pericolo.
- Possibili interventi:
  - Riduzione: progettazione e realizzazione di interventi strutturali (opere) o non strutturali (legislazione) a riduzione del rischio.
  - Avvertimento tempestivo: fornitura di informazioni tempestive ed efficaci che permettano agli individui esposti al pericolo di adottare misure per evitare o ridurre il rischio e preparazione per una risposta efficace.
  - Preparazione al disastro e gestione dell'emergenza: attività e misure adottate in anticipo per garantire una risposta efficace all'impatto di un pericolo, comprese segnalazioni tempestive ed efficaci, modalità di evacuazione e pianificazione dell'emergenza.
- Recupero/Ricostruzione: decisioni e azioni intraprese nella fase post-disastro, al fine di ripristinare le condizioni di vita della popolazione colpita

Una corretta valutazione e gestione del rischio richiede informazioni aggiornate e costanti, la possibilità di ottenere una risposta rapida da dati precisi e la possibilità di verificare i dati per variare le valutazioni in un lasso di tempo comunque ristretto. Tutte queste esigenze possono essere efficacemente soddisfatte con l'installazione di un sistema di monitoraggio basato sulle tecniche geomatiche.

I sistemi di monitoraggio geomatico forniscono un controllo proattivo di una problematica legata ad eventuali movimenti o deformazioni dell'oggetto monitorato. Nell'ambito delle costruzioni, le potenzialità offerte da un piano di monitoraggio possono essere sfruttate per ridurre l'esposizione al rischio sia prima e durante la costruzione di un'opera (struttura e infrastruttura) sia per tutto il suo ciclo di vita. In ambito territoriale vengono spesso allestiti sistemi di monitoraggio collegati a sistemi di allerta per problematiche di rischio idrogeologico e franoso.

Per la prima volta in Italia con il D.M. del 14 gennaio 2008, note come nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC2008), viene introdotto a livello normativo il concetto "della conseguenza", in termini di effetti indotti, che un'opera in fase di realizzazione può produrre

nell'ambito territoriale in cui è inserita. Viene introdotto il "Metodo Osservazionale", che viene applicato nei casi in cui, a causa della particolare complessità della situazione geotecnica e dell'importanza dell'opera, dopo approfondite indagini preliminari, permangano documentate ragioni di incertezza risolvibili solo in fase costruttiva. L'applicazione del Metodo Osservazionale, così come riportato nel capitolo 6 – Progettazione geotecnica delle NTC 2008, è basata sui seguenti punti:

- devono essere stabiliti i limiti di accettabilità dei valori di alcune grandezze rappresentative del comportamento del complesso manufatto-terreno;
- si deve dimostrare che la soluzione prescelta è accettabile in rapporto a tali limiti;
- devono essere previste soluzioni alternative, congruenti con il progetto, e definiti i relativi oneri economici;
- deve essere istituito un adeguato sistema di monitoraggio in corso d'opera, con i relativi piani di controllo, tale da consentire tempestivamente l'adozione di una delle soluzioni alternative previste, qualora i limiti indicati siano raggiunti.

Il monitoraggio del complesso opera-terreno e degli interventi consiste nell'installazione di un'appropriata strumentazione e nella misura di grandezze fisiche significative – tra cui anche spostamenti - prima, durante e/o dopo la costruzione del manufatto. Il monitoraggio ha lo scopo di verificare la corrispondenza tra le ipotesi progettuali e i comportamenti osservati e di controllare la funzionalità dei manufatti nel tempo. Nell'ambito del metodo osservazionale, il monitoraggio ha lo scopo di confermare la validità della soluzione progettuale adottata o, in caso contrario, di individuare la più idonea tra le altre soluzioni previste in progetto. Inoltre, anche se sommariamente, vengono delineate le principali caratteristiche ed i principali scopi che una corretta campagna di monitoraggio deve possedere:

- esecuzione di misure ripetute nel tempo con strumenti adeguati;
- valido supporto alla progettazione, alla costruzione e alla gestione delle opere da realizzare;
- riduzione del rischio associato al raggiungimento della condizione di collasso (SLU) o alle limitazioni d'uso dell'opera (SLE).

Il monitoraggio di un pendio o di una frana interessa le diverse fasi che vanno dallo studio al progetto, alla realizzazione e gestione delle opere di stabilizzazione e al controllo della loro funzionalità e durabilità. Esso è riferito principalmente agli spostamenti di punti significativi del pendio, in superficie e/o in profondità, al controllo di eventuali manufatti presenti e alla misura delle pressioni interstiziali, da effettuare con periodicità e durata tali da consentire di definirne le variazioni periodiche e stagionali. Il controllo dell'efficacia degli interventi di stabilizzazione deve comprendere la definizione delle soglie di attenzione e di allarme e dei provvedimenti da assumere in caso del relativo superamento.

## **Problematiche comuni nel monitoraggio geomatico**

In ambito geomatico i dati significativi da rilevare sono le posizioni planimetriche, altimetriche o plano-altimetriche di punti su un'area di interesse, sia essa una porzione di territorio o un manufatto. La variazione della posizione dei punti rilevati sull'oggetto del monitoraggio ne comporta uno spostamento o una deformazione. Sebbene possa risultare chiara la differenza concettuale che sussiste tra spostamento e deformazione, capita spesso di trarre conclusioni errate, o quantomeno affrettate, nell'interpretazione dei dati di un monitoraggio con tecniche geomatiche. Innanzitutto occorre notare che la definizione di spostamento prende in considerazione il cambiamento della posizione di un punto nello spazio mentre quella di deformazione è associata al cambiamento della configurazione geometrica di un corpo continuo, che porta ad una variazione della sua forma o dimensioni a seguito dell'applicazione di una sollecitazione.

Si potrebbe quindi pensare che il risultato di un monitoraggio geomatico definisca l'eventuale deformazione dell'oggetto, o porzione di territorio, in quanto sicuramente riconducibile ad un corpo continuo; tuttavia, come detto, attraverso l'utilizzo delle tecniche geomatiche è possibile rilevare la posizione di punti discreti appartenenti ad un oggetto, o porzione di territorio, per cui nella maggior parte dei casi il risultato del monitoraggio è un campo di spostamenti associato ai punti rilevati. Il concetto di deformazione applicato al monitoraggio geomatico è quindi molto delicato poiché per arrivare alla definizione del campo deformativo dell'oggetto occorrerebbe conoscere in modo continuo la sua geometria ai due istanti temporali o la tipologia e l'entità della sollecitazione intercorsa.

I dispositivi di misurazione utilizzati per un monitoraggio geomatico dipendono dall'applicazione, dal metodo scelto e dalla frequenza richiesta ma hanno la caratteristica comune di poter misurare gli spostamenti di punti lungo una, due o tre dimensioni; le strumentazioni classiche di monitoraggio geomatica sono stazioni totali, livelli e ricevitori GNSS (Global Navigation Satellite Systems). Le applicazioni per cui può essere richiesto un monitoraggio geomatico sono le più varie ma si può considerare ricadano in due principali tipologie: strutturale (edifici, dighe, ponti, tunnel, strade, ferrovie, ecc.) e ambientale/territoriale (versanti instabili, attività estrattiva, discariche, subsidenza, linee di costa, aste fluviali, ecc). I metodi con cui può essere effettuato un monitoraggio di questo tipo sono sostanzialmente due: manuale, se le operazioni di misurazione vengono ripetute nel tempo da un operatore; automatico, nel caso sia allestito un sistema hardware e software in grado di gestire autonomamente la ripetizione delle misurazioni, ed eventualmente anche dell'interpretazione dei dati. Infine la frequenza, fortemente influenzata dall'applicazione e dalla problematica in oggetto, può essere continua o periodica; trattandosi comunque di misurazioni discrete nel tempo, il parametro solitamente utilizzato come discriminante è l'arco temporale del monitoraggio stesso.

## **Predisposizione di un sistema di monitoraggio**

È importante sottolineare che troppo spesso i termini dato e informazione sono utilizzati quali sinonimi, mentre in realtà è profonda la differenza del loro rispettivo significato. La sostanziale distinzione tra dato e informazione è paragonabile alla stessa che esiste tra un insieme apparentemente disordinato di lettere dell'alfabeto e una parola riconosciuta costituita dalle stesse lettere: il dato costituisce la base dell'informazione e in generale rappresenta la misura del mondo esterno o di una sua caratteristica specifica. Questa distinzione fondamentale, che troppo spesso, infatti, è sottovalutata o addirittura ignorata, deriva dal fatto che l'acquisizione di informazioni da parte di un soggetto passa attraverso un processo cognitivo basato sul rilevamento e sull'analisi di dati, mentre soltanto un sistema esperto (umano o non) è in grado di convertire un dato in informazione, cioè di leggerlo secondo determinate regole che lo rendano utile [Fea e Gomasca, 2008]. Nella predisposizione di un sistema di monitoraggio efficace occorre tenere bene presente questa distinzione per evitare di incorrere nell'errore dell'acquisizione di un numero significativo di dati che però non siano in grado di restituire un'informazione precisa sulla problematica in essere.

L'attività di ricerca applicata svolta in questi anni ha permesso di individuare aspetti tecnici e metodologici fondamentali da conoscere e considerare per una corretta progettazione dei sistemi di monitoraggio indipendentemente dalla tecnica geomatica utilizzata. Infatti, sebbene ogni tecnica o strumentazione abbia delle particolari e ben specifiche caratteristiche che la contraddistinguono rispetto alle altre, è comunque possibile ricondurre la fase di studio e progettazione del sistema di monitoraggio ad un'unica metodologia comune, schematizzabile come segue.

### **1. Individuazione del problema e definizione dell'area di studio**

Al momento non esistono, e forse non esisteranno mai, procedure univoche per lo studio di fenomeni dinamici con tecniche geomatiche in quanto ogni caso ha particolari caratteristiche e richiede specifiche accortezze che lo rendono differente da qualsiasi altro. Per questo motivo risulta di fondamentale importanza l'individuazione esatta della problematica che si intende monitorare. In funzione dei differenti ambiti applicativi vi è quindi la necessità di interagire in modo completo con altri specialisti che partecipano al processo di monitoraggio nel suo complesso. Questo implica la necessità per il geomatico di possedere, oltre a un'ottima conoscenza delle tecniche di misura, la necessaria flessibilità per adattare strumenti, tempi di esecuzione e validazione dei risultati in modo da soddisfare le richieste del monitoraggio.

In questa fase è inoltre necessario reperire tutte le informazioni possibili relativamente all'area di interesse tramite rilevamenti precedenti, documentazione storica, tecnica, video-fotografica, ecc. Individuata la problematica e raccolto tutto il materiale informativo possibile, in funzione delle conoscenze acquisite e di altre eventuali ipotesi ragionate, prima di procedere con qualsiasi altra valutazione si rende necessario definire e

circoscrivere l'area di studio, valutandone l'estensione, la morfologia e le caratteristiche proprie che possono influenzare le successive di progettazione ed esecuzione del monitoraggio.

## **2. Scelta della strumentazione e della metodologia**

Come detto la geomatica è una scienza che racchiude al suo interno varie discipline e tecniche di rilevamento. Ogni tecnica o strumentazione ha specifiche potenzialità e problematiche che la rendono particolarmente idonea per un'ampia, ma limitata, varietà di ambiti ed applicazioni (Figura 2.1). Una volta definite le condizioni al contorno del problema, tra cui finalità del monitoraggio, localizzazione ed estensione dell'area, prodotti e precisioni attese, altre criticità eventuali, è possibile scegliere la strumentazione più adatta anche in considerazione del budget economico a disposizione.

Si intende sottolineare che, a seguito dell'ampia attività di ricerca effettuata in questi anni, uno degli aspetti più rilevanti per la realizzazione di un sistema di monitoraggio realmente efficace sia l'adozione di un sistema integrato basato su differenti tecniche in grado di fungere da supporto ed integrazione tra loro. Il pericolo più frequente, in particolar modo nei monitoraggi di elevata precisione, è quello di fare troppo affidamento su un'unica tecnica di rilevamento con il rischio di raccogliere una grande quantità di dati che però a seguito dell'elaborazione non riescano a fornire un'informazione efficace a causa di discordanze rispetto ai risultati attesi.

Una volta scelta la strumentazione è necessario definire la metodologia di rilevamento (schema di rete, poligonali, misure da singola stazione) e di elaborazione delle osservazioni (compensazione geometrica o rigorosa, correzioni atmosferiche). Anche in questo caso, la ricerca condotta ha permesso di individuare nella metodologia di rilevamento ed elaborazione dei dati una delle tematiche maggiormente critiche soprattutto nei casi di monitoraggio di elevata precisione. Al fine di ottenere informazioni coerenti dalle osservazioni effettuate, il corretto progetto della rete, la monumentazione dei punti e l'adozione di opportuni standard di elaborazione ed analisi dei dati sono aspetti che risultano spesso essere predominanti rispetto all'accuratezza della strumentazione. Nel caso di utilizzo di strumentazione topografica tradizionale (stazione totale, livello e GNSS) è necessario un disegno della rete che garantisca una buona geometria al suolo; ad esempio, per rilievi periodici è opportuna una simulazione dello schema di rilievo ai fini dell'ottimizzazione.

Nella progettazione di una rete di monitoraggio i requisiti di accuratezza definiscono la strumentazione da utilizzarsi, il disegno della rete e gli schemi di rilievo. Inoltre, a parità di costo di rilievo, è ovviamente auspicabile ottenere le massime e più omogeneamente distribuite accuratezze e affidabilità delle stime. Rispetto a tale obiettivo è possibile effettuare ottimizzazioni dello schema di progettazione/rilievo, ovvero effettuare simulazioni di rete.

## **3. Individuazione dei “punti di monitoraggio” e loro materializzazione**

Circoscritta l'area di interesse e scelta la strumentazione e la metodologia per il rilevamento è possibile procedere con l'individuazione dei "punti di monitoraggio" ovvero di quei punti collocati all'interno della zona d'interesse reputati essere significativi ai fini della conoscenza dei cinematici (spostamenti o deformazioni) in atto. Per questo motivo, la scelta dei punti di monitoraggio risulta cruciale per la corretta interpretazione del fenomeno di interesse. Appare evidente come la metodologia di rilievo scelta influenzi il numero, la collocazione e la distribuzione dei punti e conseguentemente la loro materializzazione. Quasi ogni strumentazione geomatica necessita di specifiche materializzazioni dei punti di mira; come sottolineato precedentemente, se si intende operare mediante un sistema integrato di monitoraggio occorre predisporre le materializzazioni in modo che lo stesso punto di monitoraggio possa essere il punto di mira di più di una strumentazione. In questo modo, se lo schema di rete è stato ideato correttamente, sui punti di monitoraggio sarà possibile acquisire le stesse osservazioni derivanti da tecniche differenti ed indipendenti, grazie alle quali poter validare e/o supportare i risultati di ogni tecnica con l'altra.

#### **4. Individuazione dei "punti di controllo" e loro materializzazione**

Analogamente alla fase precedente, dovranno essere scelti i "punti di controllo" all'esterno della zona di monitoraggio e ritenuti stabili rispetto al fenomeno da controllare. La scelta dei punti di controllo è di fondamentale importanza per la corretta interpretazione delle osservazioni sui punti di monitoraggio. Attraverso l'analisi delle serie temporali sui punti di controllo è possibile trarre informazioni sulla ripetibilità delle osservazioni nel tempo e conseguentemente sulla stabilità del sistema di riferimento scelto (fase successiva); senza disporre di punti di controllo o serie temporali significative su di essi si corre il rischio di assoggettare ai punti di monitoraggio cinematici dovuti alla mancata stabilità del sistema di riferimento.

In uno schema di rete alcuni dei punti di controllo saranno utilizzati anche come punti di stazione per l'emanazione di nuove osservazioni sui punti di monitoraggio e sugli altri punti di controllo. Per questo motivo, anche maggiormente rispetto alla fase precedente, è indispensabile prevedere materializzazioni dei punti di controllo tramite centramenti forzati che garantiscano stabilità e ripetibilità di stazionamento di altissima precisione, oltre all'interscambio tra mire e strumentazioni.

#### **5. Scelta del sistema di riferimento**

La posizione è un concetto relativo: è cioè data rispetto ad altri punti. Il sistema di riferimento permette di definire attraverso le coordinate dei punti le informazioni della loro posizione (relativa) nello spazio. Ogni tecnica geomatica acquisisce la posizione di punti nello spazio in un suo specifico sistema di riferimento; per la maggior parte delle strumentazioni, il sistema di riferimento è intrinseco e locale ad esclusione della tecnica GNSS per cui è geocentrico, cartesiano o geografico (datum geodetico globale WGS84). Ai fini del monitoraggio è assolutamente indispensabile scegliere, o definire, un sistema di

riferimento unico ed invariante nel tempo rispetto al quale effettuare le analisi sulle osservazioni acquisite ed ottenere così le informazioni attese. Ad esclusione dei monitoraggi effettuati unicamente con GNSS, il sistema di riferimento è locale ed appositamente definito in funzione delle specificità del caso per assicurarne stabilità e ripetibilità nel tempo.

Per le sue caratteristiche, la strumentazione GNSS è spesso utilizzata in appoggio ai rilievi topografici classici per la georeferenziazione perché permette una “lettura” immediata dei dati e dei risultati del rilievo. Tuttavia, ai fini del monitoraggio, la georeferenziazione delle osservazioni è assolutamente sconsigliata poiché la trasformazione di coordinate, piane o geografiche, riferite a due diversi datum comporta necessariamente l'introduzione di alcuni errori che non è possibile trascurare. La strumentazione GNSS è quindi solitamente utilizzata per il controllo della stabilità del sistema di riferimento in quanto fornisce la posizione dei punti in un sistema di riferimento indipendente ed esterno all'area di interesse del fenomeno.

## **6. Esecuzione delle misure nel tempo**

Terminate le fasi progettuali dell'architettura generale del sistema di monitoraggio, la procedura metodologica prevede la parte operativa di esecuzione delle misurazioni. Il numero delle campagne di rilevamento nell'arco temporale del monitoraggio ne definisce la frequenza, fortemente influenzata dall'applicazione, dalle caratteristiche del fenomeno in oggetto e non per ultimo dal budget economico a disposizione. Nonostante il numero di misurazioni sia in ogni caso discreto, si parla di monitoraggio continuo o periodico, a seconda che le osservazioni siano in numero rilevante o limitato rispetto all'arco temporale complessivo del monitoraggio. Tuttavia, operando con sistemi di monitoraggio integrati, non sono rari i casi in cui le misurazioni in continuo fatte con alcune tecniche siano appunto integrate o validate con campagne di rilievo periodiche effettuate con altre tecniche o metodologie di rilievo.

## **7. Trattamento dei dati**

Nella fase di trattamento dei dati ricadono tutte quelle operazioni funzionali all'estrazione di contenuto informativo dalle osservazioni grezze acquisite. Ogni tecnica e metodologia di rilevamento prevede processi e modalità di elaborazione differenti, spesso relazioni anche con la tipologia di informazione da ottenere.

La misura di una grandezza fisica non può prescindere dalla considerazione delle caratteristiche dello strumento con cui la si effettua, delle sue interazioni con l'ambiente e con la definizione (talvolta soltanto implicita) di un modello della grandezza stessa. Accanto alle fluttuazioni accidentali, esistono anche le cosiddette cause sistematiche di errore, la cui natura emerge chiaramente considerando il modello usato per descrivere il fenomeno. La teoria degli errori è la base per il trattamento statistico dei dati rilevati.

In topografia raramente si misura direttamente la quantità che si vuole determinare. Tramite la propagazione dell'errore medio e della varianza (matrice di varianza e covarianza) è possibile derivare le caratteristiche di aleatorietà della grandezza misurata indirettamente, una volta noti i parametri caratteristici delle quantità misurate direttamente. Il principio dei minimi quadrati è sfruttato per la compensazione di osservazioni indirette nei casi di sistemi di equazioni lineari, o linearizzate, sovradeterminati per i quali non vi è un'unica soluzione ma si è interessati a ricercarne la migliore (a minore varianza). Altre tipologie di trattamento dei dati possono servire per eliminare, o ridurre, gli effetti di errori sistematici. Per monitoraggi di altissima precisione con stazione totale, ad esempio, non si può prescindere dal calcolo delle correzioni di rifrazione atmosferica da apportare alle osservazioni grezze di distanza e angoli zenitali.

## **8. Analisi ed interpretazione**

A seguito dell'elaborazione dei dati risiede la fase più importante e delicata di tutto il processo: i sistemi di monitoraggio hanno lo scopo di fornire informazioni per la conoscenza ed il controllo della problematica legata al fenomeno in oggetto. L'estrazione del contenuto informativo dai dati del monitoraggio avviene appunto tramite l'analisi delle serie temporali elaborate e la creazione di prodotti (grafici e tabellari) funzionali all'interpretazione del fenomeno di interesse, anche da parte degli altri soggetti tecnici coinvolti.

Per sistemi di monitoraggio integrato in questa fase si procede anche al confronto dei risultati ottenuti con tutte le tecniche coinvolte attraverso un processo di omogeneizzazione al duplice scopo di validare reciprocamente le singole tecniche e supportare le interpretazioni sulle caratteristiche del fenomeno di interesse. Parte cruciale della fase di interpretazione dei risultati è l'analisi di significatività in relazione alle accuratezze e alle precisioni dei rilievi effettuati.

I risultati del monitoraggio geomatico sono spesso utilizzati in un successivo processo di valutazione dei rischi con cui vengono identificati, analizzati e valutati i rischi associati alla specifica problematica, determinando modi appropriati per eliminare o controllare i rischi annessi, ad esempio attraverso la creazione di sistemi di allarme in tempo reale.

### 3. Sistemi terrestri a scansione laser

La scansione laser è un metodo di (tele)rilevamento geomatico grazie al quale una superficie viene campionata, o acquisita, tramite un elevato numero di punti misurati sfruttando l'emissione di luce laser. I laser scanner sono in grado di acquisire dati sulla forma degli oggetti, o degli ambienti, ed eventualmente anche sul loro aspetto (riflettanza e colore). I dati raccolti possono poi essere usati per realizzare elaborati grafici bidimensionali classici o modelli tridimensionali utili per un'ampia varietà di applicazioni. Il grandissimo vantaggio della scansione laser è la possibilità di registrare un elevato numero di punti, con elevata precisione, in un tempo relativamente breve. Questa caratteristica dei sistemi a scansione laser ha completamente rivoluzionato la classica metodologia del rilievo topografico: non devono più essere scelti a priori i punti caratteristici dell'oggetto da rilevare ma si effettuano acquisizioni automatiche e indistinte di punti, demandando alla successiva fase di elaborazione la scelta dei dati significativi.

I vantaggi portati dai metodi di scansione 3D non sono semplicemente legati all'incremento di efficienza rispetto ai metodi tradizionali. I laser scanner costituiscono oggi un potente kit di strumenti in grado di raggiungere obiettivi di misura precedentemente impensabili e di organizzare solidi database per una gestione efficiente delle informazioni acquisite. Il progresso tecnologico dei sistemi laser scanning degli ultimi anni ha portato ad un aumento significativo della velocità di scansione e della qualità, abbinato ad una riduzione del costo dell'hardware e conseguentemente del lavoro, rendendo l'utilizzo di questa tecnologia sempre più frequente per un elevatissimo numero e tipologia di applicazioni [Blais, 2004].

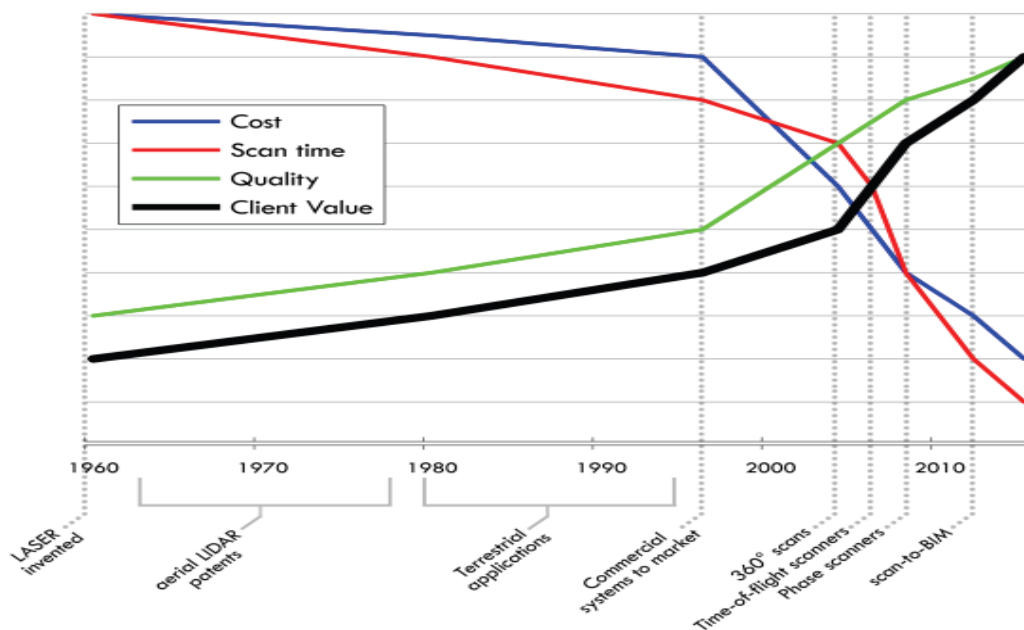


Figura 3.1: Sviluppo dei sistemi a scansione laser.

## Rilevamento 3D con laser scanner

Sebbene l'utilizzo di uno strumento a scansione laser possa sembrare immediato e totalmente automatizzato, il processo di rilevamento tridimensionale richiede comunque un'approfondita conoscenza sia dell'apparecchiatura sia del processo di scansione. Il processo completo di scansione laser che verrà affrontato in questo capitolo si può suddividere nelle seguenti attività.

### 1. Pianificazione del rilievo

Al momento non esiste una procedura standard per la pianificazione di un rilievo laser scanning. Tuttavia, nella fase preliminare si dovrebbero analizzare tutti gli aspetti che potrebbero avere influenza sulle successive fasi di acquisizione, trattamento dei dati e restituzione degli elaborati.

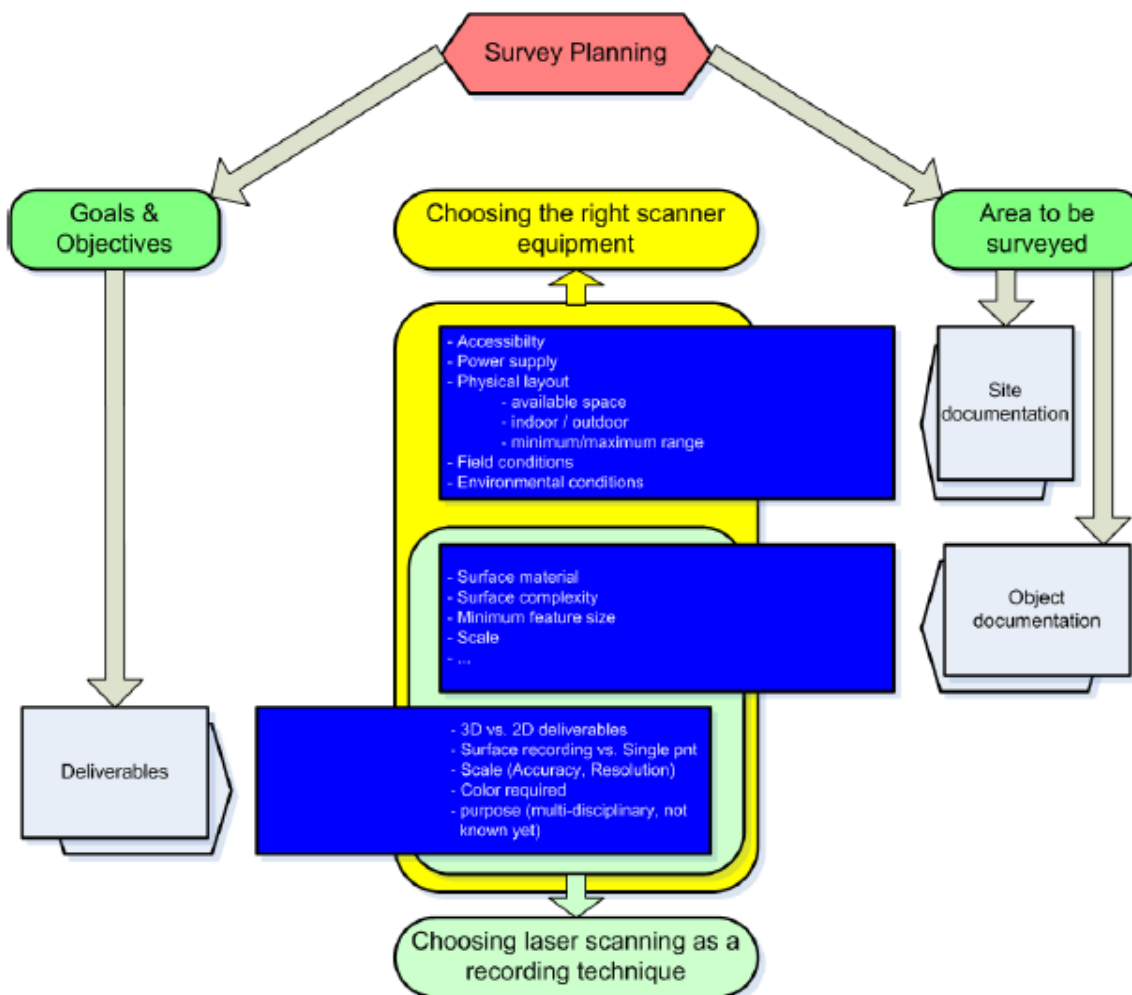


Figura 3.2: Diagramma di flusso per la pianificazione del rilievo 3D [3D RiskMapping].

Il primo e fondamentale aspetto da considerare sono gli obiettivi e i risultati attesi dal rilevamento. In stretta relazione con la motivazione del rilievo, è necessario definire o

analizzare gli elaborati richiesti: particolarmente importante è il livello di dettaglio richiesto per gli elaborati, perché determina la risoluzione prevista e l'accuratezza che a sua volta permette di identificare la tipologia di strumentazione più adatta [Barber et al., 2003].

Inoltre è essenziale raccogliere quante più informazioni possibili sull'oggetto da rilevare e sul contesto in cui è inserito al fine di comprendere meglio la complessità e il tempo necessario per l'acquisizione. Le possibili posizioni di stazione dello scanner determinano le distanze, minima e massima, cui lo strumento deve essere in grado di acquisire e, indirettamente, anche la tecnica di registrazione da utilizzare.

Acquisite tutte le informazioni precedenti ed effettuata la scelta della strumentazione e della tecnica di registrazione delle scansioni è possibile scegliere le posizioni di stazione e dei target [Kopacik e Korbasova, 2004]. Le posizioni ottimali di stazione devono garantire la massima copertura e accuratezza di rilevamento, riducendo al minimo il numero di posizioni. In funzione delle posizioni di scansione devono essere scelte le posizioni e la configurazione geometrica dei target per la registrazione, mentre la loro tipologia deriva direttamente dalla scelta dello strumento.

## **2. Acquisizione dei dati**

Effettuate tutte le scelte che riguardano la fase di pianificazione possono iniziare le procedure di acquisizione dei dati. Per ogni stazionamento la prima operazione da effettuare è la messa in stazione del laser scanner. In realtà nella procedura di rilievo laser scanning questa operazione, intesa come rettifica dell'asse primario dello strumento lungo la verticale passante per il punto a terra materializzato, non è sempre strettamente necessaria: è infatti richiesta esclusivamente per la modalità di registrazione diretta delle scansioni. Successivamente si procede con la scelta dell'area di acquisizione e della risoluzione angolare di scansione, che insieme determinano il tempo di acquisizione per il singolo stazionamento e la dimensione, in termini di numero di punti e memoria su disco, della scansione. In certi casi, i dati possono essere filtrati già durante la fase di scansione utilizzando filtri primari basati sulla distanza di acquisizione, sulla riflettività del segnale di ritorno o su entrambi i parametri.

Definiti i parametri di acquisizione si dà inizio alla scansione dell'ambiente circostante e, attraverso un processo completamente automatico, si raccolgono i dati tridimensionali tramite nuvola di punti. Successivamente, se necessario, dovranno essere acquisite in modo accurato le posizioni dei target visibili dal punto di stazione per la registrazione delle scansioni. Infine è di grandissima importanza controllare la completezza delle scansioni effettuate prima di procedere al successivo stazionamento in quanto una mancanza di dati potrebbe comportare una perdita di tempo considerevole nel colmarla con scansioni a posteriori.

## **3. Pre-trattamento dei dati**

Concluso il rilievo sul campo, i dati vengono scaricati su computer e analizzati confrontandoli con lo schema di rilievo ideato e le note prese in fase di acquisizione per

verificarne la correttezza e la completezza. Al momento non esistono standard generali per la memorizzazione dei dati prodotti da sistemi scanner laser; di conseguenza, i produttori e i consumatori di tali dati si basano su formati proprietari o ad-hoc per memorizzare e scambiare dati. Tuttavia, sembra che nei prossimi anni il formato E57, sviluppato da una sottocommissione della ASTM (American Society for Testing and Materials) E57, possa diventare lo standard per la memorizzazione di nuvole di punti, immagini e metadati prodotti dai sistemi di imaging 3D, come i laser scanner.

In alcuni casi, prima della fase di registrazione è necessario “pulire” le scansioni dal “rumore” ovvero da tutti i dati non necessari ai fini del rilievo; eventuali dati rumorosi non trattati o filtrati potrebbero influenzare (negativamente) anche significativamente la precisione di registrazione.

#### 4. Registrazione delle scansioni

Nella maggior parte dei casi, l'oggetto da rilevare è troppo grande per essere scansionato da una sola posizione e pertanto sono necessarie più posizioni di scansione. Da ciascuna posizione di scansione, le nuvole di punti sono acquisite nel sistema di coordinate dello scanner. Per allineare tra loro le differenti posizioni di scansione, è necessario conoscere la posizione esatta e l'orientamento reciproco dei sistemi di coordinate dello scanner secondo un sistema di riferimento unico per il sito (locale o globale che sia).

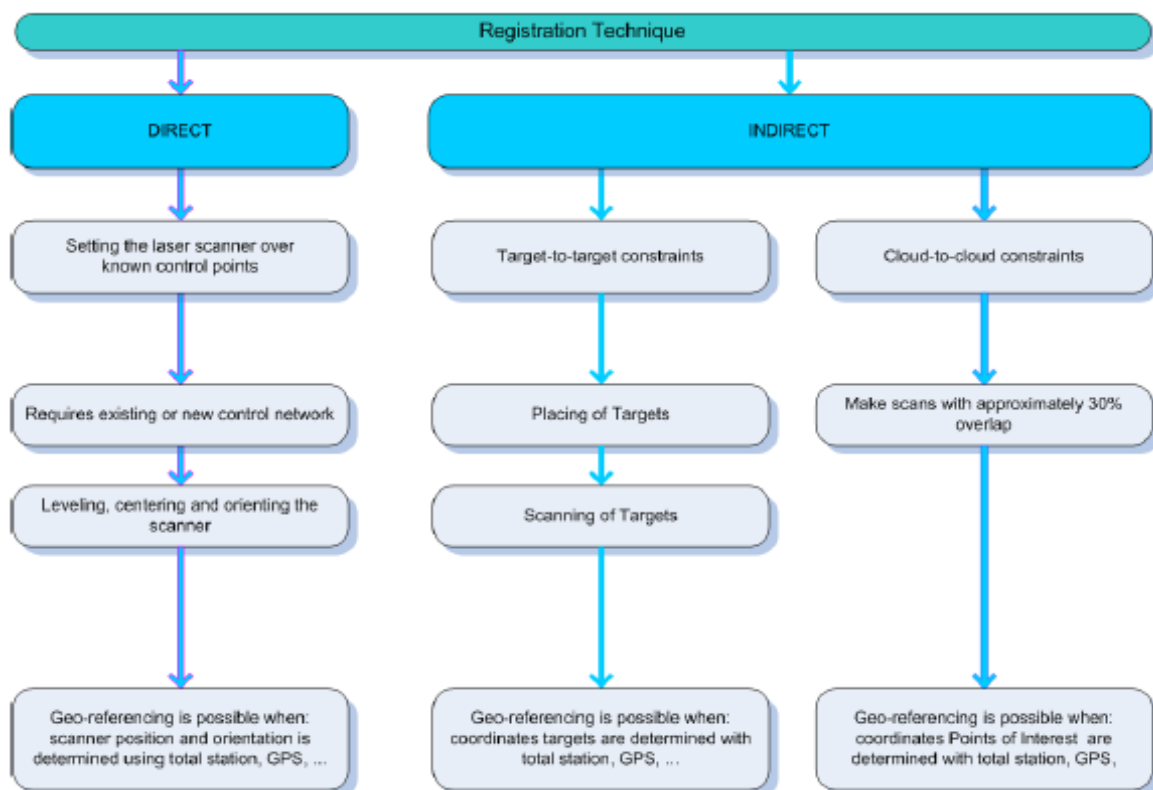


Figura 3.3: Tecniche di registrazione di scansioni laser [3D RiskMapping].

Le tecniche di registrazione delle scansioni laser scanner si suddividono in due categorie: tecniche dirette e tecniche indirette.

Si parla di **registrazione indiretta** quando per allineare le scansioni si ricorre all'utilizzo di target (artificiali o naturali) posizionati o riconosciuti all'interno della scena acquisita. Per operare la georeferenziazione delle scansioni con queste tecniche devono essere note o misurate, tramite altri metodi di rilevamento, le posizioni dei target nel sistema di riferimento scelto in modo da operare una trasformazione di coordinate per punti doppi. Per eseguire una registrazione indiretta è necessario riconoscere almeno tre target per ogni coppia di scansioni; è comunque consigliato disporre sempre di più di tre target in modo che gli errori di registrazione possano essere minimizzati eseguendo un'ottimizzazione ai minimi quadrati.

Un metodo di registrazione indiretta è anche quello basato su riconoscimento automatico di punti omologhi tramite algoritmi iterativi (ICP – Iterative Closest Point). Questa tecnica richiede la selezione manuale di almeno 3 punti omologhi tra le due nuvole di punti; l'algoritmo ICP verifica iterativamente le distanze tra tutti i punti delle due nuvole di punti e stima la trasformazione per allineare le due scansioni con il minimo valore di deviazione standard possibile.

La **registrazione diretta** tra due scansioni avviene invece calcolando la trasformazione di coordinate tramite la conoscenza della posizione (relativa o assoluta) e dell'orientamento dello scanner. Questa metodologia può essere applicata quando il laser scanner possiede le funzionalità di una stazione totale, ovvero di un piombo laser per il centramento su un punto a terra materializzato e un compensatore biassiale di precisione per un'accurata definizione della verticale strumentale. L'orientamento può così essere determinato mediante la scansione di un solo target posto nella successiva posizione di scansione. Questa tecnica riduce il numero di target da posizionare ed evita pertanto i requisiti esigenti sulla configurazione geometrica di dislocazione dei target; inoltre, le scansioni non hanno bisogno di sovrapposizione. Pertanto, fatte queste considerazioni, questa tecnica di rilievo e registrazione risulta spesso essere, nel complesso, più veloce ed efficiente rispetto all'utilizzo di tecniche indirette. La georeferenziazione, qualora richiesta, può essere effettuata mediante la misura con altre tecniche di rilevamento delle posizioni di scansione materializzate a terra.

## **5. Elaborazione dei dati**

L'elaborazione delle nuvole di punti è il processo di trasformazione del modello tridimensionale ottenuto dalla registrazione delle nuvola di punti nei prodotti finali richiesti o attesi. I risultati finali possono essere di moltissimi tipi: dalla nuvola di punti filtrata ed allineata, a rappresentazioni bidimensionali classiche (piante, prospetti, sezioni), a modelli 3D con texture per animazioni e walkthrough. Il processo di elaborazione richiede la parte predominante del tempo complessivo del processo ed avviene principalmente in modo manuale. Dalle figure sotto riportate si evince facilmente il ridotto grado di automazione e

conseguente aumento delle tempistiche nel processo di modellazione rispetto a quello di acquisizione.

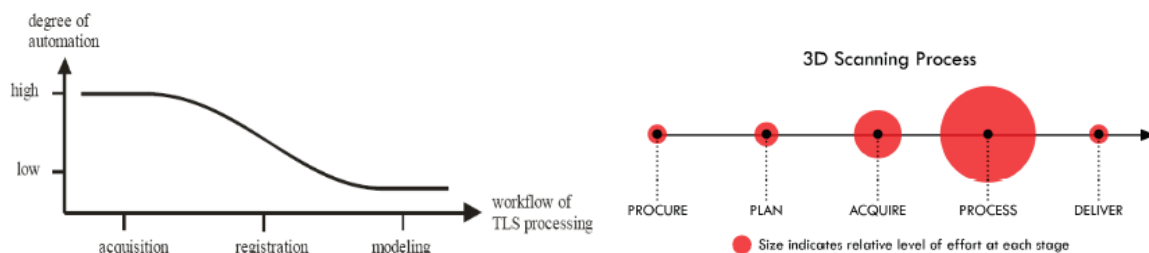


Figura 3.4: Grado di automazione e tempistiche delle fasi del processo di rilievo laser scanning.

In generale, l'elaborazione delle nuvole di punti per la realizzazione dei prodotti richiesti può seguire due strade: i prodotti possono essere estratti direttamente dal modello a nuvola di punti, senza ulteriore trasformazione, o dalla creazione di un modello 3D a superfici. La scelta del metodo più efficiente da adottare dipende sostanzialmente dalla tipologia e dal numero di prodotti finali richiesti. Si sottolinea che il modello a superfici aggiunge sicuramente valore e comprensione al modello a nuvola di punti ma esso rimane e rimarrà in ogni caso il risultato più fedele possibile alla realtà misurata.

La generazione del modello a superfici (mesh) dalle nuvole di punti avviene tramite un processo di triangolazione dei punti acquisiti o ricampionati. Sebbene la generazione delle mesh sia un processo basato su algoritmi automatici, la procedura prevede una fase preliminare di filtraggio e pulizia dei dati acquisiti, ed eventuale ricampionamento, finalizzata all'ottimizzazione delle nuvole di punti in cui l'esperienza dell'operatore risulta fondamentale. Anche le successive fasi di chiusura delle lacune ed ottimizzazione del modello a mesh ottenuto, sebbene eseguite tramite algoritmi automatici, sono governate dall'operatore.

Ulteriori procedure di elaborazione che non verranno affrontate riguardano l'applicazione di texture ai modelli 3D e la modellazione solida per la creazione di BIM (Building Information Modelling).

## 6. Validazione

La qualità del rilievo inizia con una piena comprensione delle specifiche di progetto. Questa comprensione permette una scelta corretta dello scanner, della risoluzione di scansione, del metodo di registrazione e così via. Il processo di verifica della qualità di un rilievo laser scanning necessita tuttavia di un'attenta analisi di tutte le fasi del processo di misurazione e di elaborazione. La fase di acquisizione è soggetta ad errori di quattro tipologie: errori strumentali (divergenza del raggio, mixed-edge, accuratezza), errori relativi alla superficie di scansione (angolo di incidenza e riflettività), errori dovuti alle condizioni ambientali (temperatura, umidità, vibrazioni), errori metodologici dovuti all'inesperienza dell'operatore. Oltre a questi fattori, in fase di validazione è necessario controllare la sufficiente copertura dell'area soggetta a rilievo, la risoluzione spaziale

effettiva dei punti rilevati, l'acquisizione di fotografie ad alta risoluzione, la corretta acquisizione dei target ed eventuali altri oggetti supplementari utili per verifiche in ulteriori fasi di lavorazione.

Il diagramma di flusso riportato di seguito (Figura 3.5) fornisce una panoramica di garanzia della qualità per un rilievo eseguito mediante laser scanner.

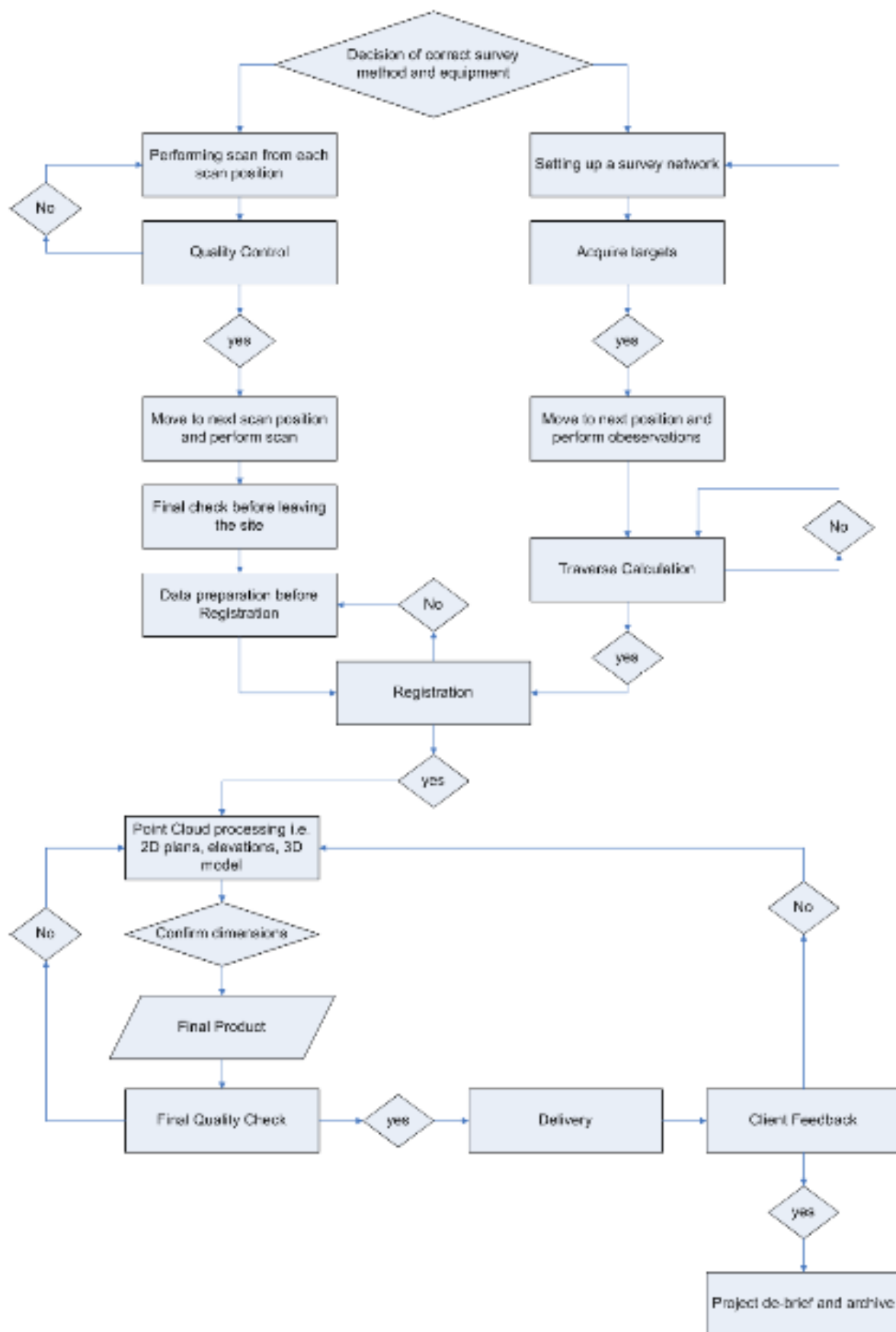


Figura 3.5: Diagramma di flusso per il controllo della qualità di rilievo [3D RiskMapping].

## Tecnologie e campi applicativi

La prima classificazione che può essere fatta della tecnologia laser scanner corrente è nelle due categorie: statica e dinamica. Quando lo scanner è mantenuto in una posizione fissa durante l'acquisizione dei dati, si definisce scansione statica. I vantaggi sono l'elevata precisione e l'elevata densità delle nuvole di punti. Tutte le scansioni statiche possono essere definite terrestri, anche se non tutte le scansioni terrestri possono essere classificate statiche. Nei casi di scansione dinamica, lo scanner è montato su una piattaforma mobile; questi sistemi richiedono l'integrazione di sistemi di posizionamento aggiuntivi come INS e GPS che rendono il sistema più complesso e chiaramente più costoso.

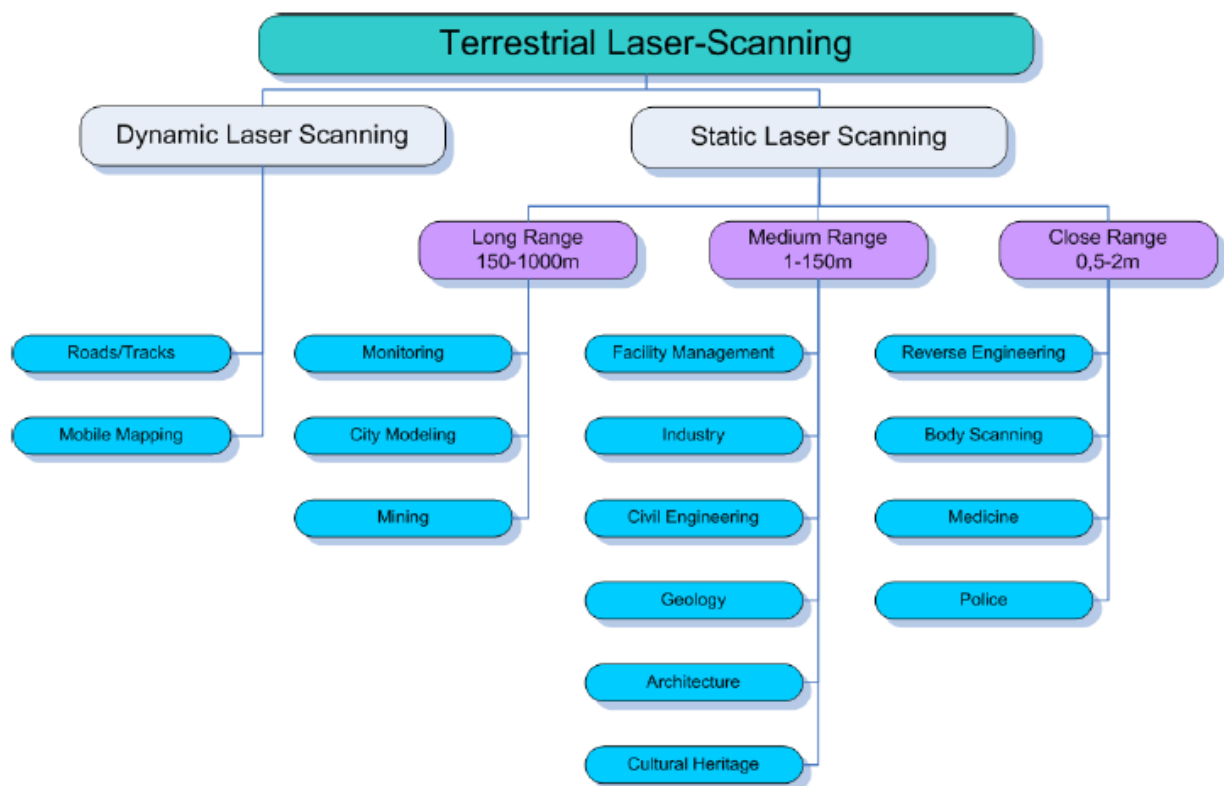


Figura 3.6: Applicazioni per laser scanner terrestri [3D RiskMapping].

Come facilmente ipotizzabile valutando anche la varietà degli ambiti applicativi in cui gli strumenti a scansione possono efficacemente operare, non esiste una sola tipologia di laser scanner. Le strumentazioni sono quindi classificate in funzione del principio di misura utilizzato:

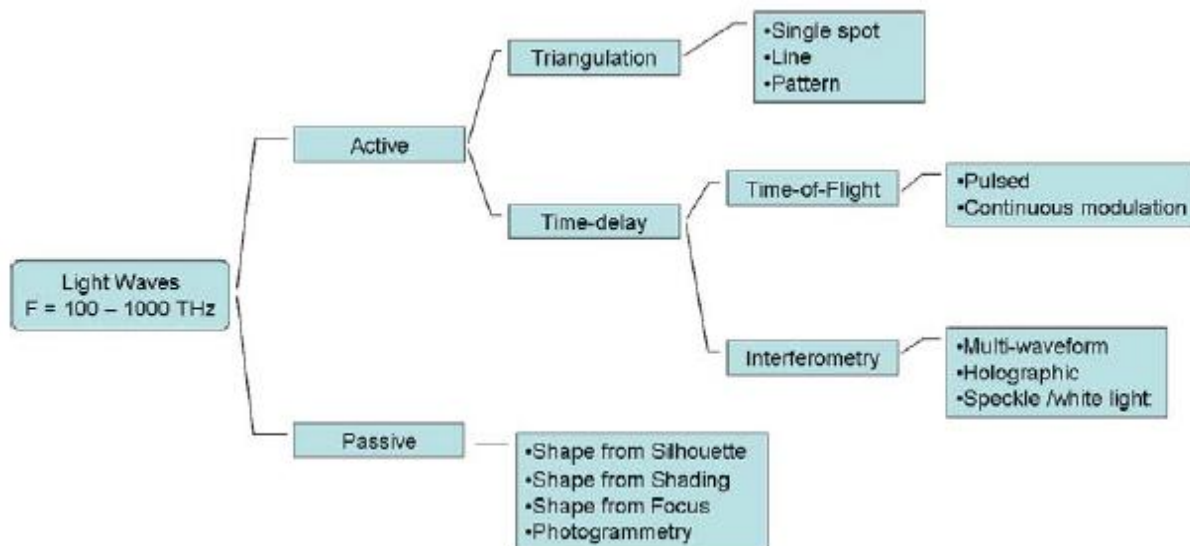


Figura 3.7: Classificazione generale dei metodi di misura basati su fonti luminose [3D RiskMapping].

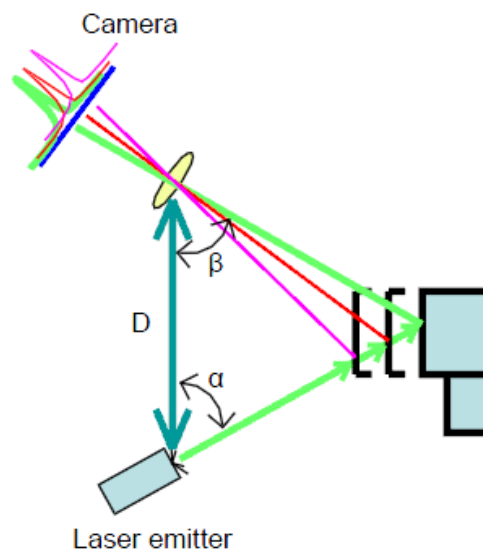
Nella presente trattazione ci si soffermerà, anche se molto brevemente, solamente sui sistemi attivi ovvero quei sistemi che emettono una radiazione e, analizzando il segnale riflesso dall'oggetto che deve essere rilevato, ne determinano la sua forma, dimensione e posizione nello spazio.

I principali vantaggi di questi sistemi sono:

- Non richiedono illuminazione ambientale, perché generano loro stessi radiazione;
- Forniscono misurazioni ad alta densità in modo molto automatizzato;
- Sono utilizzabili su superfici planari;
- Hanno un tempo di acquisizione relativamente veloce (fino a 1 Mpts/s).

Tuttavia, alcuni sistemi attivi sono comunque influenzati da fonti di luce esterna, dalla riflettività, dal colore e dalla rugosità delle superfici. Le differenze tra sistemi attivi di scansione riguardano sostanzialmente le modalità con cui lo strumento riceve e/o analizza il segnale riflesso.

La prima tipologia di strumenti utilizzano il principio trigonometrico dell'intersezione in avanti per rilevare le geometrie degli oggetti e per questo motivo vengono definiti **laser scanner a triangolazione**. Un emettitore laser proietta un pattern sull'oggetto da acquisire mentre una telecamera rileva la posizione e la forma della sua proiezione; l'emettitore laser e la fotocamera sono posti ad una distanza nota, creando un triangolo con la proiezione del pattern sull'oggetto. L'angolo della telecamera viene determinato osservando la posizione del pattern laser nel suo campo visivo.



*Figura 3.8: Principio di misura dei laser scanner triangolatori [3D RiskMapping].*

Nella maggior parte dei casi il pattern laser emesso dallo strumento è una linea, e non un singolo punto come avviene invece per le altre tipologie; in questo modo l'oggetto da rilevare viene letteralmente "spazzato" dalla linea laser per acquisirne la geometria. L'angolo dell'emettitore laser cambia mentre il pattern passa lungo l'oggetto. A causa delle limitazioni fisiche della lunghezza della base (distanza tra emettitore e telecamera) e del campo di vista limitato della telecamera, i triangolatori vengono utilizzati in applicazioni che richiedono generalmente un intervallo operativo inferiore al metro. Rispetto agli scanner di portata media e lunga (da centinaia a migliaia di metri), basati su principi di misura differenti, gli scanner a triangolazione hanno accuratèzze molto più elevate, nell'ordine di alcuni micron.

L'altra tipologia di strumenti che verrà brevemente descritta acquisisce la posizione dei punti nello spazio in coordinate polari e sono definiti **laser scanner distanziometrici**. Noti gli angoli (azimutale e zenitale) di emissione del raggio laser, questi scanner determinano la distanza in modo indiretto attraverso l'analisi di ciò che avviene nel lasso di tempo che intercorre tra l'emissione e la ricezione del segnale.

I **laser scanner a impulsi** vengono definiti anche **a tempo di volo** perché determinano la misura della distanza tra lo strumento e l'oggetto da rilevare calcolando il tempo intercorso tra l'emissione e la ricezione dell'onda elettromagnetica. Il calcolo è fatto sull'ipotesi che le onde viaggino attraverso un mezzo (aria) a velocità finita e costante inferiore, di un certo fattore di correzione (indice di rifrazione), rispetto alla velocità  $c$  (nota) di propagazione nel vuoto.

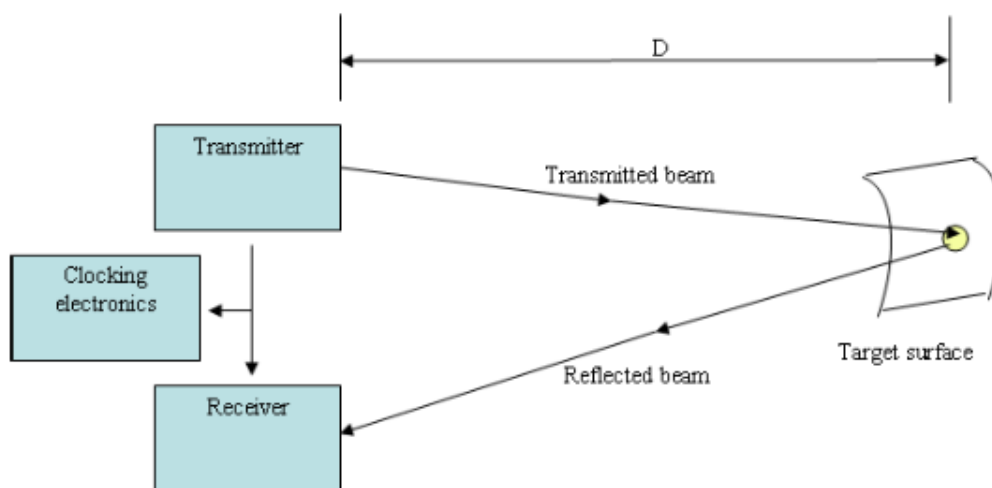


Figura 3.9: Principio di misura dei laser scanner a impulsi [3D RiskMapping].

Come risulta chiaro dal proprio nome, questi scanner non utilizzano fasci di onde continui ma fanno uso di impulsi laser capaci di misurare da 2.000 ~ 50.000 punti al secondo. La frequenza massima di ripetizione è dettata dal fatto che il trasmettitore non può inviare un altro impulso finché l'eco del precedente è non stato ricevuto. Questa limitazione influisce chiaramente anche sulla portata massima, la quale dipende dalla durata dell'impulso e dalla frequenza. Inoltre il sistema di misura del tempo di volo caratterizza fortemente anche l'accuratezza di questi strumenti, tanto da rendere gli errori quasi indipendenti dalla distanza di acquisizione. Il vantaggio principale di utilizzare laser scanner ad impulsi è la possibilità di emettere onde elettromagnetiche ad elevata brillantezza (quantità di energia emessa per unità di angolo solido e unità di superficie della sorgente); questa caratteristica permette di effettuare misure di alta precisione anche a lunghissime distanze (diverse centinaia di metri), semplicemente riducendo la frequenza di scansione. Lo svantaggio principale risiede invece nel rilevare con estrema esattezza il tempo di arrivo del segnale riflesso causa della natura mutevole della soglia ottica e dell'attenuazione atmosferica.

L'altra tipologia di strumenti distanziometrici, per la determinazione della distanza evitano l'utilizzo di orologi di elevatissime prestazioni utilizzando una modulazione della potenza del fascio laser e sono perciò definiti **laser scanner a differenza di fase**. La luce (incoerente) emessa viene modulata in ampiezza e inviata verso la superficie; la riflessione dispersa viene raccolta e analizzata da un circuito di misura della differenza di fase con la forma dell'onda inviata, determinando così un ritardo di tempo, similmente alla tipologia precedente, convertito poi in distanza secondo la medesima relazione.

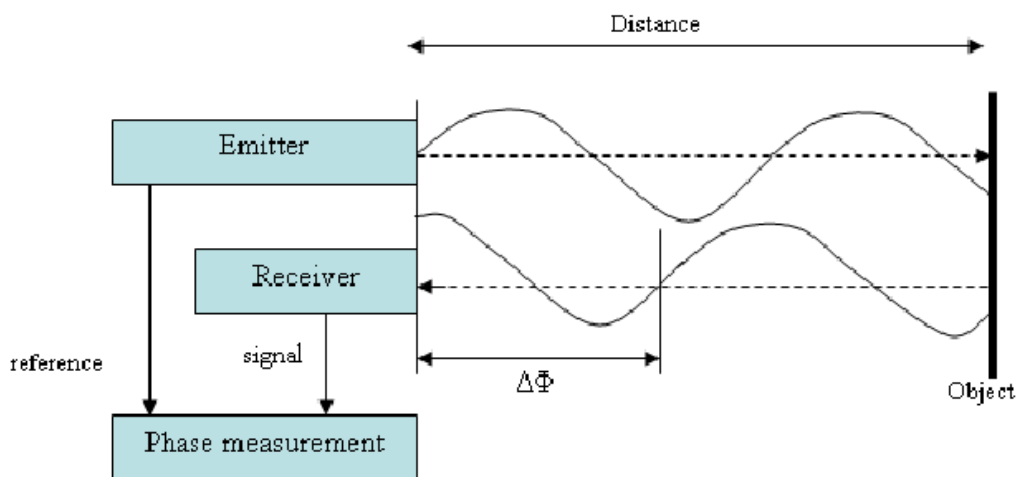


Figura 3.10: Principio di misura dei laser scanner a differenza di fase [3D RiskMapping].

Analogamente ai sistemi a tempo di volo, anche i laser scanner a differenza di fase hanno una portata massima definita intervallo di ambiguità; per questi sistemi il *range* massimo è limitato a quello che causa un ritardo di fase nella sinusoide di un ciclo completo. La risoluzione di discriminazione dello sfasamento e la frequenza di misurazione determinano l'accuratezza di misura della distanza; tuttavia, un'elevata frequenza di misurazione determina un ridotto intervallo di ambiguità. Per eludere questo inconveniente, si possono utilizzare onde elettromagnetiche di frequenze differenti: un'onda a bassa frequenza (lunghezza d'onda elevata) per effettuare una misurazione "sommatoria" della distanza che verrà poi definita con maggiore accuratezza utilizzando un'onda ad alta frequenza. Le nuove generazioni di scanner utilizzano due o anche tre onde di differenti lunghezze d'onda; la lunghezza d'onda più lunga definisce la distanza massima d'acquisizione e la lunghezza d'onda più corta definisce l'accuratezza ottenibile.

Le strumentazioni a triangolazione hanno accuratèzze decisamente superiori a quelle degli scanner distanziometrici. Tuttavia, proprio a causa del principio di misurazione, la loro portata è appositamente limitata per garantire elevate accuratèzze; di conseguenza, il campo di impiego è ristretto ad oggetti o porzioni di superficie di ridotte dimensioni pena un forte decremento dell'efficienza di rilevamento in termini di tempo.

Tra le due tipologie di laser scanner distanziometrici esistono invece leggerissime differenze: gli strumenti a differenza di fase, rispetto agli scanner a tempo di volo, hanno velocità di scansione e risoluzioni maggiori, a discapito di precisioni teoriche (del principio di misura) leggermente inferiori. Tuttavia, se si analizzano i dati tecnici dei modelli delle due differenti tipologie, si può facilmente notare che il valore (numerico) di accuratèzza dichiarata per gli scanner a differenza di fase è superiore a quello degli scanner ad impulsi; questa apparente contraddizione è spiegabile considerando l'incremento di accuratèzza nella misura della distanza con il principio della differenza di fase utilizzando la metodologia delle frequenze multiple. Nonostante questo espediente per aumentare allo stesso tempo accuratèzza e portata, le portate massime dei distanziometri a differenza di fase risultano comunque decisamente inferiori (circa 150 m) rispetto a quelle degli scanner a tempo di volo, soprattutto se confrontate con i modelli a lunghissima portata in grado di raggiungere anche alcuni chilometri.

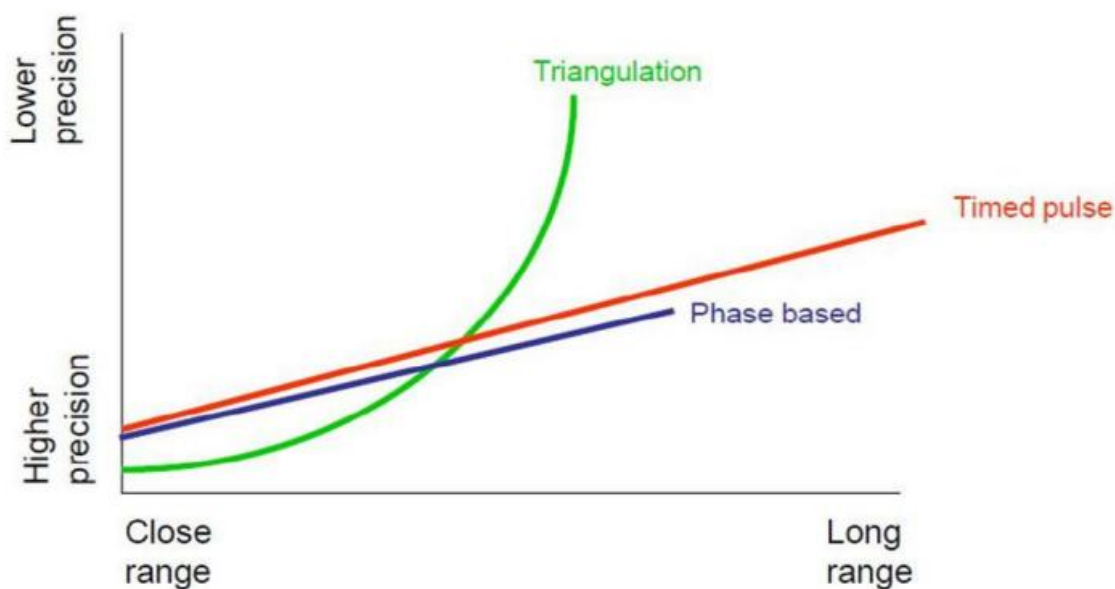


Figura 3.11: Variazione delle prestazioni (precisione) delle tre tipologie di laser scanner trattati in funzione della distanza di acquisizione.

## **Problematiche generali nel monitoraggio con laser scanner**

Come già precedentemente annunciato, nel rilevamento geomatico i dati significativi da acquisire sono le posizioni plano-altimetriche di un numero significativo di punti su un'area di interesse, sia essa una porzione di territorio o un manufatto, che ne possano descrivere, in modo esaustivo rispetto alla finalità, la forma, la dimensione e il posizionamento nello spazio. Gli strumenti a scansione laser hanno comportato una rivoluzione dei classici metodi di rilievo topografico; la filosofia della scelta di un numero discreto di punti caratteristici da rilevare autonomamente sull'oggetto è stata completamente ribaltata dalla possibilità, offerta dai laser scanner, di acquisizione automatica di un elevatissimo numero di punti, eventualmente da selezionare successivamente in fase di elaborazione. Inoltre, il velocissimo progresso tecnologico di questi sistemi ha reso l'utilizzo della tecnologia a scansione sempre più frequente per un elevatissimo numero e tipologia di applicazioni di rilevamento, grazie all'aumento considerevole della velocità di scansione e della qualità, alla riduzione del costo dell'hardware e conseguentemente del lavoro.

Tuttavia, i sistemi di monitoraggio geomatico devono essere in grado di garantire un controllo proattivo di una problematica legata ad eventuali movimenti o deformazioni dell'oggetto monitorato, analizzando la variazione della posizione di punti caratteristici dell'oggetto. Le tecniche di misurazione metrica utilizzate per scopi di monitoraggio geomatico dipendono dall'applicazione, dal metodo scelto e dalla frequenza richiesta ma hanno la caratteristica comune di poter misurare gli spostamenti di punti lungo una, due o tre dimensioni. L'attività di ricerca svolta in questi anni nel campo della geomatica applicata ha permesso di individuare tutti gli aspetti tecnici e metodologici fondamentali da considerare per la corretta progettazione dei sistemi di monitoraggio, indipendentemente dalla tecnica di misurazione utilizzata.

Lo scopo principale della ricerca intrapresa è stato tuttavia rivolto alla valutazione delle potenzialità e dei limiti della tecnologia laser scanning per finalità di monitoraggio geomatico. Per annoverare il laser scanning terrestre tra la strumentazione geomatica di monitoraggio, al pari delle tecniche storicamente riconosciute tali, è stato reputato fondamentale analizzare la possibilità di calcolare, tramite i risultati delle scansioni, spostamenti o deformazioni agenti sull'oggetto monitorato con buona accuratezza e indipendenza, relativamente ai differenti casi studio affrontati.

In riferimento a quanto descritto nel precedente capitolo in merito alla "Predisposizione di un sistema di monitoraggio", la fase di studio e progettazione è riconducibile ad un'unica metodologia, indipendentemente dalla tecnica utilizzata, in quanto determinata sulla base delle finalità e non dei metodi. Analizzando quindi la procedura proposta, lo step "Individuazione dei punti di monitoraggio e loro materializzazione" decade quasi completamente in quanto la strumentazione laser scanning è specificatamente ideata per l'acquisizione indistinta di un

elevato numero di punti all'interno di un'area di interesse. L'elevata risoluzione spaziale di acquisizione degli strumenti oggi disponibili sul mercato permette una descrizione morfometrica (quasi) spazialmente continua degli oggetti rilevati. Questa caratteristica ha incentivato la grandissima diffusione della tecnologia a scansione per le finalità di rilevamento geometrico di aree, edifici e altri manufatti, rendendo però l'utilizzo a scopo di monitoraggio quantomeno problematico. Infatti, effettuando due scansioni della stessa area di interesse a due differenti istanti temporali non si avrebbe la garanzia di acquisire i medesimi punti e poter quindi effettuare un confronto diretto e puntuale delle loro coordinate. Per ovviare a questo problema, si potrebbe ipotizzare di posizionare all'interno dell'area oggetto di studio dei target facilmente riconoscibili nelle nuvole di punti acquisite; questa soluzione permetterebbe un controllo preciso e puntuale solo sui target installati, in un certo senso sminuendo le potenzialità della tecnologia laser scanning, definibile *area-based*, in confronto con le altre tecniche geomatiche sicuramente *point-based*.

In molte applicazioni di monitoraggio, soprattutto strutturale, le precisioni richieste sono molto elevate, nell'ordine di qualche millimetro al massimo. Questo aspetto ha disincentivato, almeno inizialmente, l'utilizzo della tecnologia laser scanning per scopi di monitoraggio poiché le accuratezze di misura non erano all'altezza di quelle raggiungibili con le metodologie topografiche classiche. Conseguentemente al successivo sviluppo tecnologico e al rapido incremento delle prestazioni di questi sistemi, l'interesse della comunità scientifica è stato fortemente stimolato all'utilizzo della tecnologia a scansione per applicazioni di monitoraggio delle deformazioni, incentivato soprattutto dalla possibilità di incrementare considerevolmente il numero di punti di indagine. Tuttavia, le prestazioni strumentali non sono l'unico e, forse, nemmeno il predominante fattore che determina l'accuratezza di una misurazione; in un rilevamento topografico classico, la metodologia di acquisizione delle osservazioni e la strategia di compensazione sono probabilmente gli aspetti di maggiore influenza sulla qualità dei dati risultanti. Nel rilevamento laser scanning, sebbene possano essere adottate differenti metodologie di rilievo, allineamento e trattamento dei dati, non vi sono possibilità di compensazione delle osservazioni, motivo per cui il grado di incertezza (o accuratezza) del rilievo sarà difficilmente quantificabile e, probabilmente, superiore a quello di un rilevamento topografico compensato.

Nelle applicazioni di monitoraggio tramite laser scanning la fase di trattamento/elaborazione dei dati acquisiti è sicuramente la più delicata di tutto il processo. Massima attenzione deve essere prestata alla problematica della registrazione delle scansioni in un unico sistema di riferimento: la precisione dell'allineamento ha infatti influenza sulla qualità di qualsiasi analisi successiva. Inoltre, nonostante la strumentazione laser scanning permetta di acquisire superfici ad elevate risoluzioni, non è possibile effettuare un confronto diretto tra le coordinate dei punti acquisiti, come avviene invece per le altre tecniche di monitoraggio. È quindi assolutamente necessario elaborare le nuvole di punti acquisite per ottenere prodotti utilizzabili; l'approccio più comune è la creazione di DTM o modelli a superfici dai quali è

possibile ricavare differenti tipologie di analisi (geometriche, volumetriche. ecc.), tramite procedure ed algoritmi spesso già implementati nei software di elaborazione. Tramite la generazione del modello a superfici, è possibile fare analisi spazialmente continue su forma e dimensioni dell'oggetto acquisito, permettendo di determinare in alcuni casi anche le reali deformazioni subite. Nonostante la creazione delle mesh generi grandi possibilità di indagine ed analisi, è necessario sottolineare che la rappresentazione più fedele (accurata) della realtà è il dato metrico direttamente acquisito con la strumentazione a disposizione; ogni ulteriore passaggio di elaborazione (meshing e post-processing) è frutto dell'utilizzo di algoritmi ed interpretazioni, spesso anche personali, che introducono necessariamente un'ulteriore fonte di incertezza nel dato acquisito.

I sistemi di monitoraggio hanno lo scopo di fornire informazioni per la conoscenza ed il controllo della problematica legata al fenomeno in osservazione; la fase più delicata è quindi rappresentata dall'analisi dei risultati per l'estrazione e l'interpretazione del contenuto informativo dai dati di monitoraggio. I prodotti risultanti dai confronti con tecnologia laser scanning sono spesso molto scenografici e ricchi di contenuto informativo, grazie all'elevata densità di punti rilevata. Tuttavia, le "classiche" e coloratissime mappe di spostamento o deformazione, generate tramite algoritmi automatici di verifica, devono essere attentamente studiate ed analizzate se non si vuole rischiare di giungere ad interpretazioni errate o fuorvianti. La maggior parte degli strumenti commerciali permette il calcolo delle distanze (spostamenti) tra i modelli a due differenti epoche lungo direzioni fissate (assi x, y e z) o lungo la direzione normale alla superficie triangolare analizzata. Soprattutto nei casi in cui l'obiettivo è di ottenere informazioni sugli spostamenti dei punti rilevati, se non si è a conoscenza della direzione (almeno prevalente) del movimento, effettuando le analisi con questo tipo di strumenti è facile incorrere in interpretazioni errate del fenomeno indagato.

Nel seguito verranno dettagliatamente esaminate problematiche e potenzialità dell'utilizzo della tecnologia laser scanning per l'analisi multi-temporale in tre differenti ambiti applicativi a differenti scale operative: nel contesto ambientale del monitoraggio di versanti instabili tramite scansioni a lunghissima portata; nel contesto architettonico del controllo geometrico strutturale di edifici storici mediante laser scanning *mid-range*; nel contesto storico-artistico per l'analisi dei danneggiamenti subiti da opere scultoree mediante dati ad altissima risoluzione acquisiti con strumenti triangolatori a breve portata.



## 4. Indagini in ambito territoriale: dissesto di versanti instabili

---

Il dissesto idrogeologico è l'insieme di quei processi morfologici dall'azione altamente distruttiva sul territorio poiché, in alcuni casi, avvengono in tempi notevolmente rapidi. Nella letteratura tecnica e scientifica e nei testi legislativi generalmente si utilizza il termine di dissesto idrogeologico sebbene questo implichi necessariamente il coinvolgimento nel fenomeno delle acque, superficiali o sotterranee. Nell'ambito del dissesto di versanti quindi il termine più corretto da utilizzare sarebbe invece dissesto geologico-idraulico in quanto in molti casi l'agente morfogenetico è esclusivamente la gravità [APAT, 39/2006].

I principali fenomeni naturali che causano nel territorio italiano i fenomeni di dissesto geologico-idraulico sui versanti sono classificabili in funzione degli agenti morfogenetici esogeni dai quali prendono origine, ossia: forza di gravità, acque di dilavamento e neve. I fenomeni di dissesto geologico-idraulico sui versanti sono comunque strettamente interdipendenti con quelli che determinano il dissesto idraulico. I fenomeni che avvengono sui versanti, infatti, possono avere ripercussioni dirette sulla dinamica dei corsi d'acqua dello stesso bacino idrografico e viceversa.

I fenomeni di dissesto geologico-idraulico sono causati da processi fisici che dipendono dalle caratteristiche naturali (essenzialmente geologiche, morfologiche, pedologiche, climatiche e vegetazionali) dell'ambiente in cui si verificano. Tuttavia, molteplici attività umane possono interagire con questi processi naturali e condizionarne l'evoluzione, producendo un'intensificazione più o meno marcata degli stessi, in relazione al tipo di intervento realizzato. Negli ultimi decenni, le profonde modificazioni socio-economiche registrate nel nostro Paese hanno determinato un forte incremento della pressione antropica sull'ambiente. In molti casi queste attività antropiche sono state condotte in modo incontrollato e sconsiderato, causando un diffuso degrado ambientale e paesaggistico e predisponendo vaste aree ai fenomeni di erosione e dissesto geologico-idraulico.

Il problema della fragilità del nostro territorio e dell'esposizione al rischio di frane e alluvioni riguarda molte aree della nostra Penisola: il rapporto ANCE/CRESME del 2013 spiega che l'82% del territorio nazionale è a rischio idrogeologico e che dal 2001 al 2013 questo dato è cresciuto del 5.1%. L'attenzione dello Stato italiano verso questo enorme problema non è stata però costante e decisa. I fondi erogati dal 1991 al 2010 dallo Stato, secondo Confartigianato su dati del Ministero dell'Ambiente e ANBI, per la prevenzione sono stati 8,4 miliardi di Euro, a discapito di un costo per interventi di riparazione di 22 miliardi nello stesso periodo. A luglio 2014, il governo Renzi ha presentato una struttura di missione contro il dissesto idrogeologico coordinata da Erasmo D'Angelis con l'obiettivo di creare un

programma nazionale di manutenzione e prevenzione e sbloccare tutte le risorse già stanziare che Stato ed enti locali non sono riusciti ad utilizzare.

È evidente l'assoluta necessità di maggiori investimenti in termini di prevenzione, attraverso cui affermare una nuova cultura dell'impiego del suolo che metta al primo posto la sicurezza della collettività e ponga fine da un lato a usi speculativi e abusivi del territorio, dall'altro al suo completo abbandono. In un contesto in cui sono sempre più evidenti gli effetti dei cambiamenti climatici in atto, che comportano fenomeni meteorologici estremi caratterizzati da piogge intense concentrate in periodi sempre più brevi, la gestione irrazionale del territorio porta a conseguenze disastrose.

La lotta al (o il controllo del) rischio idrogeologico viene individuata in due momenti fondamentali: la previsione e la prevenzione [Gisotti, 2012]. La previsione consiste nelle attività dirette allo studio e alla determinazione delle cause e dei meccanismi degli eventi calamitosi, alla previsione degli eventi stessi sia come area soggetta al probabile evento che come momento dell'evento stesso; le citate attività permettono di redigere le mappe di rischio del territorio individuato. La previsione si basa sul supporto conoscitivo fornito dalla ricerca scientifica e tecnologica e dalla gestione delle reti di monitoraggio che consentono di controllare con continuità gli eventi possibili, nonché dalle banche dati inerenti agli eventi calamitosi. La prevenzione, invece, discende dalla previsione poiché, una volta individuato il rischio, si passa all'adozione di interventi per la sua attenuazione (non essendo possibile eliminare completamente il rischio), per cui la prevenzione interviene a vari livelli, sia con misure non strutturali (normative, di pianificazione, informative, ...) che strutturali (opere e manufatti).

## **Monitoraggio di versanti instabili: stato dell'arte**

La tematica dei versanti instabili ha un forte impatto sulla vita sociale a causa del gran numero di eventi franosi che si sviluppano soprattutto nelle zone di montagna e dal rischio associato per la comunità a causa della presenza di strade, insediamenti umani, attività turistiche e commerciali. Tra le attività di previsione e prevenzione del dissesto geologico-idraulico un ruolo importante è giocato dagli interventi (non strutturali) di pianificazione, creazione e gestione di Sistemi Informativi Territoriali (SIT). Le operazioni di raccolta e verifica delle segnalazioni di dissesto idrogeologico possono comprendere azioni di progetto a differenti livelli: dalle segnalazioni dei piccoli segni premonitori, al rilievo e monitoraggio in continuo del dissesto. È da sottolineare come i sistemi informativi per il monitoraggio e il rilievo in continuo del dissesto, sul medio e lungo periodo, possano servire non solo per l'aggiornamento delle delineazioni spaziali della cartografia del dissesto, ma anche per l'attribuzione dello stato di attività dei fenomeni franosi e quindi per valutazioni più affidabili e precise della pericolosità geomorfologica al fine di indirizzare correttamente la pianificazione degli interventi di manutenzione del territorio. Inoltre, come già ampiamente discusso, un

sistema di monitoraggio complesso può avere sia funzioni di controllo sia di allertamento nell'ambito di un Sistema di Supporto alle Decisioni (DSS).

Il monitoraggio costituisce uno strumento conoscitivo, volto all'acquisizione di informazioni quantitative sull'andamento nel tempo di variabili, assunte quali rappresentative per caratterizzare l'evoluzione di un dato sistema [CESI RICERCA, 2006]. Le grandezze fisiche da controllare in un versante instabile sono riconducibili a due principali categorie:

- Cinematiche: misura della posizione spaziale di punti caratteristici superficiali e profondi; si eseguono misure di distanza tra un punto fisso ed uno mobile (spostamento) o di deformazione come dislocazione relativa tra due punti.
- Evolutive: quelle che influenzano l'evoluzione del fenomeno nel tempo: variazioni idrogeologiche (livelli di falda e pressioni interstiziali), parametri meteorologici (piovosità, altezza della neve, temperatura) e parametri geofisici (vibrazioni trasmesse al terreno).

È utile demarcare la distinzione tra il monitoraggio geotecnico, considerata una tecnica tradizionale in questo ambito, e il monitoraggio topografico per rilievi superficiali tramite tecniche di misurazione a distanza. La strumentazione geotecnica è in grado di rilevare grandezze come i livelli idrici e le pressioni interstiziali con piezometri, rotazioni, spostamenti e deformazioni (anche di profondità) con inclinometri, estensimetri e deformometri, forze o carichi applicati a strutture o al terreno stesso. Il monitoraggio topografico, invece, permette la determinazione degli spostamenti superficiali consentendo di avere indicazioni sull'esistenza di movimenti in atto nel sottosuolo. Le misure di spostamento sono tutte basate sulla misura della posizione relativa del punto da considerare rispetto ad un riferimento assunto stabile. Lo spostamento del punto nel tempo si ricava dalle variazioni della sua posizione relativa al riferimento.

Le tecniche geomatiche danno un grande contributo alla conoscenza sia della forma della superficie sia della cinematica delle frane, fornendo dati utilizzabili da geologi, geomorfologi e geotecnici per l'interpretazione del fenomeno [Rabatel et al., 2008]. In molti casi, una stretta collaborazione tra i professionisti di altre discipline coinvolti è la strategia migliore per affrontare questo complesso compito [Arosio et al., 2009]. Nel monitoraggio di versanti instabili possono essere utilizzate un'ampia varietà di tecniche geomatiche, dalle più note e consolidate a quelle più innovative, come il Radar ad Apertura Sintetica (SAR - Synthetic Aperture Radar) [Metternicht et al., 2005], l'interferometria [Luzi et al., 2006], il Laser Scanning Aviotrasportato (ALS - Airborne Laser Scanning) [McKean e Roering 2004] e le immagini satellitari ad alta risoluzione [Kliparchuk e Collins, 2011]. Tutte queste tecniche assicurano alcuni aspetti di forza e alcune criticità nelle applicazioni di monitoraggio, in funzione delle caratteristiche specifiche del fenomeno considerato.

Le due metodologie di monitoraggio di versanti instabili tradizionalmente utilizzate sono costituite da rilievi periodici o semi-continui con Sistemi Globali di Navigazione Satellitare (GNSS - Global Navigation Satellite Systems) o Stazioni Totali Automatizzate (ATS -

Automated Total Station) (Blikra, 2006; Brückl et al., 2006; Delacourt et al., 2009; Gaffet et al., 2010; Lingua et al., 2008; Nordvik e Nyrnes, 2009; Pieraccini et al., 2006) perché garantiscono elevate accuratezze nella misura della posizione dei singoli punti. È prassi comune che questi due metodi siano utilizzati in modo integrato, sebbene con numerose problematiche [Castagnetti et al., 2013]; tuttavia, generalmente, non consentono una descrizione completa dell'area investigata in quanto, per evidenti ragioni pratiche ed economiche, il numero dei punti di misura è limitato e la loro posizione è scelta con accortezza perché possano essere significativi dei cinematismi ricercati e al tempo stesso accessibili per la materializzazione.

Negli ultimi dieci anni, i progressi nelle tecniche spaziali Interferometriche Radar ad Apertura Sintetica (InSAR) hanno permesso osservazioni di fenomeni franosi attivi in lento e lentissimo movimenti (Castaneda et al., 2009; Catani et al., 2005; Henderson et al., 2011; Lauknes et al., 2010; Strozzi et al., 2005; Wasowski e Ferretti, 2007). Allo stesso tempo, l'aumento della diffusione dei sistemi Laser Scanner Terrestri (TLS) a lunga portata ha portato la comunità scientifica ad esplorare la possibilità di utilizzare in modo differenziale scansioni multi-temporali per calcolare gli spostamenti in vari tipi di frane.

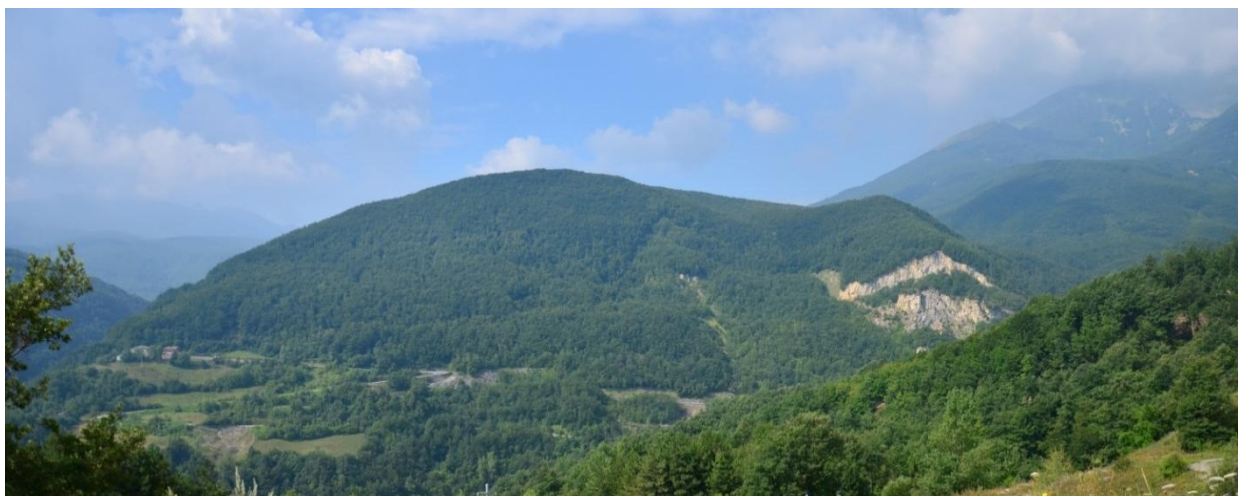
I Modelli Digitali del Terreno (DTM – Digital Terrain Model) ad alta risoluzione ottenuti da scansioni aeree con telemetri laser (ALS) sono oramai strumenti comuni l'estrazione di importanti informazioni a supporto della conoscenza delle caratteristiche dei fenomeni franosi e per l'analisi dei volumi a seguito di un evento [McKean e Roering 2004; Glenn et al., 2006; Corsini et al., 2007; Van Den Eeckhaut et al., 2007; Corsini et al., 2009; Roering et al., 2009; Bull et al., 2010; DeLong et al., 2011]. Analogamente, sono molteplici le applicazioni in cui i Laser Scanner Terrestri (TLS – Terrestrial Laser Scanning) sono stati utilizzati per mappare le caratteristiche geomorfologiche delle frane (Hunter et al., 2003; Bitelli et al., 2004; Abellan et al., 2006; Glenn et al., 2006; Travelletti et al., 2008; Oppikofer et al., 2009; Abellan et al., 2010) e per ricostruire modelli di fratturazione in pareti rocciose (Abellán et al., 2006; Dunning et al., 2009; Jaboyedoff et al., 2009); sono inoltre state condotte alcune esperienze di analisi differenziali tramite rilievi laser scanning multi-temporali a media e breve portata per calcolare gli spostamenti (Scaioni et al., 2004; Teza et al., 2007; Monserrat e Crosetto, 2008; Oppikofer et al., 2009; Prokop e Panholzer, 2009; Abellan et al., 2011; Denora et al., 2011) o anche il campo delle deformazioni (Teza et al., 2008) su versanti instabili.

Sebbene questi strumenti siano caratterizzati da precisioni strumentali inferiori rispetto alle stazioni totali, hanno il vantaggio di fornire grandi quantità di dati in tempi molto brevi e quindi consentono una descrizione dettagliata della superficie investigata [Prokop e Panholzer, 2009]. Lo sviluppo tecnologico ha reso i laser scanner sempre più efficienti dal punto di vista della frequenza di scansione, della capacità di portata e anche della possibilità di registrare segnali retrodiffusi multipli, caratteristica spesso utilizzata a supporto del filtraggio della vegetazione [Elseberg et al., 2011; Guarnieri et al., 2012; Mallet e Bretar, 2009].

Attualmente, il ricorso alla strumentazione laser scanning terrestre può ormai considerarsi un approccio standard allo studio della morfologia e della cinematica di un versante. Il TLS è ora utilizzato anche per l'analisi geomeccanica di ammassi rocciosi di difficile accesso; tale analisi, di rilevante importanza per la valutazione delle condizioni di stabilità di un versante in roccia, permette di ottenere le caratteristiche spaziali delle famiglie di superfici di discontinuità, grazie a procedure automatizzate [Slob et al., 2005]. Tuttavia, per distanze operative superiori a 1 km, e movimenti del corpo franoso nell'ordine di pochi centimetri all'anno, l'utilizzo del laser scanner a scopo differenziale (monitoraggio) è ancora lontano dall'essere una procedura di routine. Di conseguenza, e con riferimento ad un caso reale di fenomeno attivo con movimento lento in roccia, è stata condotta un'intensa attività di ricerca finalizzata a: integrare i rilievi laser scanning aviotrasportati e terrestri a lungo raggio per ricavare un DTM della zona ad alta risoluzione e supportare la mappatura del fenomeno, effettuare analisi differenziali da scansioni laser a lunghissima portata da posizione non fissa, e sfruttare i prodotti ottenuti per migliorare il piano di monitoraggio e la conoscenza delle caratteristiche della frana.

### **Caso studio: la frana di Col Piagneto (Reggio Emilia)**

L'esperienza di ricerca condotta tratta lo studio e il confronto multi-temporale di dati laser scanning ottenuti da piattaforma aerea (ALS) e terrestre (TLS) a lunghissima portata per l'analisi di un comparto attivo di frana rocciosa che minaccia la Strada Statale SS63 dell'Appennino tosco-emiliano. Il crollo di una porzione della frana nel 1974 ha innescato una rapida perdita di detriti rocciosi che hanno distrutto un tratto di strada di circa 150 metri. Dopo l'abbandono di quel tratto di strada in favore di una variante, nel 2008 una nuova colata di terra, a poche centinaia di metri dalla zona del primo crollo, ha nuovamente compromesso la viabilità costringendo le autorità a riaprire il vecchio tracciato della SS63 a condizione dell'attuazione di un sistema di monitoraggio in continuo.



*Figura 4.1: Frana di Col Piagneto nel comune di Collagna, in provincia di Reggio Emilia.*

## Generalità e inquadramento della problematica

La frana di Col Piagneto si trova nell'Appennino settentrionale (comune di Collagna, provincia di Reggio Emilia), ad una quota compresa tra 800 e 1000 m, nel bacino superiore del fiume Secchia. Il versante in studio è caratterizzato dalla presenza di tre formazioni geologiche, appartenenti a tre differenti unità strutturali caratterizzate da un assetto a franapoggio e che costituiscono il fianco di una piega. È composta da due principali sotto-unità, G1 a nord e G2 a sud, oltre ad una porzione di dimensioni inferiori denominata G3 (Figura 4.2). I settori G1 e G2 formano delle pareti rocciose pressoché verticali che coinvolgono più di due milioni di metri cubi di rocce calcaree sovrapposte a scisti argillosi e arenari. Il rischio è principalmente legato alla caduta di massi, che potrebbero staccarsi dalla parte frontale maggiormente instabile del settore G2 e potenzialmente raggiungere la SS63 che scorre al termine del pendio mentre, a lungo termine, l'evoluzione della frana potrebbe comportare il coinvolgimento diretto del tracciato stradale. Il settore G3 interessa invece alcune migliaia di metri cubi di argilla e blocchi derivanti dalla caduta dei scisti argillosi. Il rischio è legato alla possibile ulteriore riattivazione rapida del fenomeno, con gravi danni alla SS63 come avvenuto nel 2008, e ad un'evoluzione prolungata del fenomeno che rende la manutenzione annuale della strada piuttosto costosa.

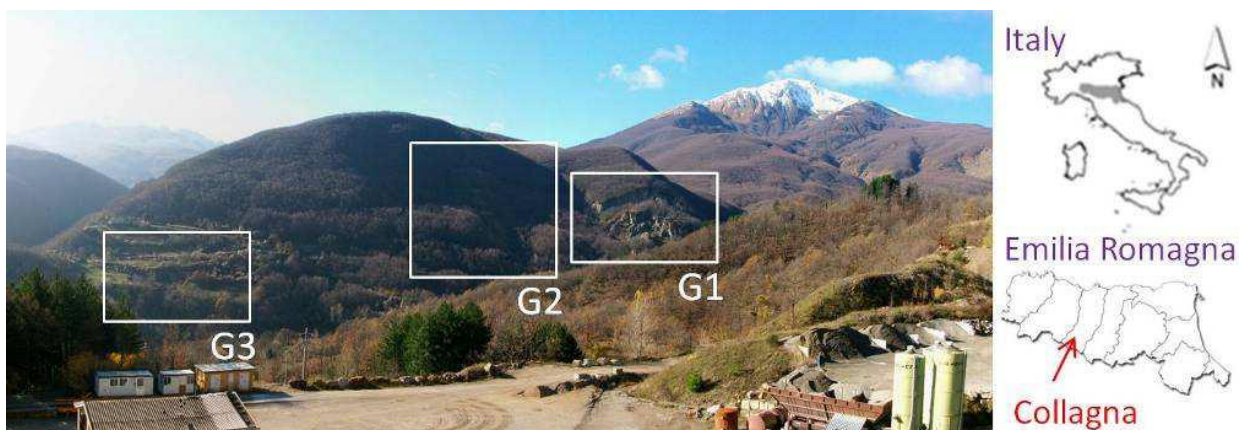


Figura 4.2: Inquadramento della frana di Col Piagneto, in cui sono evidenziate le tre unità strutturali.

## Prime evidenze ed evoluzione del fenomeno

In passato l'area oggetto di studio è stata coinvolta da fenomeni di instabilità. Viene ricordato l'episodio della primavera del 1898, quando una frana nel versante destro del torrente Biola, versante Colle Ceredo, provocò la chiusura della Strada Statale 63 (Almagià, 1907). Altri episodi sono quelli del 11 settembre 1972 (Moratti e Pellegrini, 1977) e 3 maggio 1974, quando il crollo di massi e detriti lungo il versante, in corrispondenza del tratto di strada compreso tra i due tornanti prima del ponte, in direzione Collagna, coinvolse la sede stradale. Le cause d'innescio in ogni episodio sono generalmente legate ad abbondanti precipitazioni. L'attività di studio geologico-tecnico e di monitoraggio topografico del versante entro il quale si sviluppa la frana di Col Piagneto (Collagna) è iniziata in conseguenza agli eventi idropluviometrici del 4 e 5 dicembre 2008 che hanno comportato una parziale riattivazione parossistica di un fenomeno

di dissesto di scivolamento in terra che ha provocato l'interruzione della Strada Statale 63 in località Piagneto di Collagna (Figura 4.3). I dati di documenti e analisi storiche insieme ai sopralluoghi hanno poi evidenziato uno stato di complessivo dissesto del versante, soggetto a un quadro complesso e composito, ove coesistono - e sono inter-correlati tra loro - fenomeni di scivolamento di terra, di espansione laterale di roccia e di crollo di roccia.



*Figura 4.3: Danni alla SS63 causati dal fenomeno di dissesto di scivolamento in terra del 2008.*

Al fine di attenuare il rischio associato è stato installato nel versante un sistema di monitoraggio geotecnico e uno topografico in continuo. Il sistema di monitoraggio topografico è composto da una Stazione Totale Automatizzata (modello Leica TM30), in grado di effettuare misure con prisma fino a 3 km con accuratezza di 0.5" di grado sessagesimale. La stazione totale è monumentata con pilastro in cemento armato vicino a Cava Riva Rossa, a circa 1.2 km di distanza e in posizione frontale rispetto al versante di frana. La stazione totale e le apparecchiature di controllo (modem, PC industriali, ecc) sono all'interno di una struttura in legno, ideata appositamente per proteggere i sistemi. Da settembre 2009, la stazione totale misura 36 prismi (30 in frana e 6 all'esterno per controllo) ogni 4 ore; il sistema di monitoraggio è completamente automatizzato e può essere controllato a distanza. Nei monitoraggi di altissima precisione, aspetti come il controllo della stabilità del sistema di riferimento e il computo delle correzioni atmosferiche da apportare alle osservazioni sono fondamentali e imprescindibili per la corretta interpretazione dei dati [Bertacchini et al., 2011; Castagnetti et al., 2013].

Già a seguito del primo anno di monitoraggio si è evidenziato come il regime delle precipitazioni stagionali (circa 1800 mm) possa essere il meccanismo di guida principale della frana. È infatti possibile registrare con cadenza annuale un'accelerazione autunnale dei movimenti seguiti da un periodo di decelerazione che si estende per tutta la primavera, evidenziando inoltre che lo scioglimento lento della neve in quei mesi non provochi incrementi

negli spostamenti dei prismi nei settori G1 e G2. In generale i dati del monitoraggio mostrano come nei settori G1 e G2, i prismi più a valle siano caratterizzati da maggiori spostamenti rispetto a quelli di monte, indicando come la parte media della frana avanzi maggiormente rispetto alla zona di coronamento. L'entità degli spostamenti è comunque ridotta: circa 10 cm all'anno nei settori G1 e G2 e addirittura meno nel settore G3. Infine, è interessante evidenziare come la direzione prevalente del movimento nei tre settori sia pressoché costante e coerente con la direzione di massima pendenza del versante.

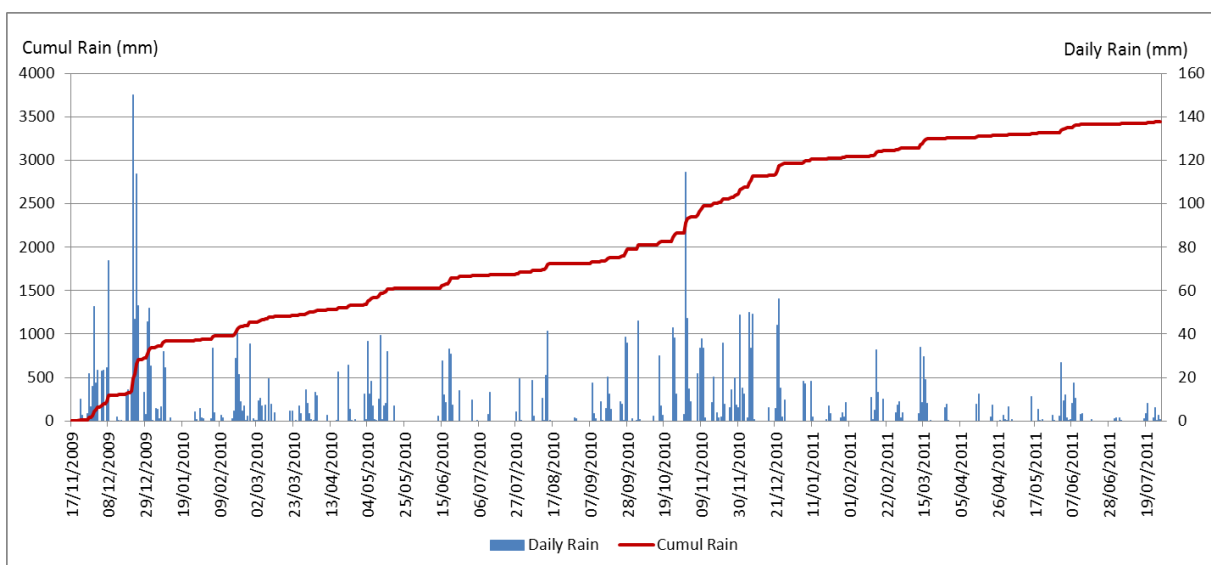
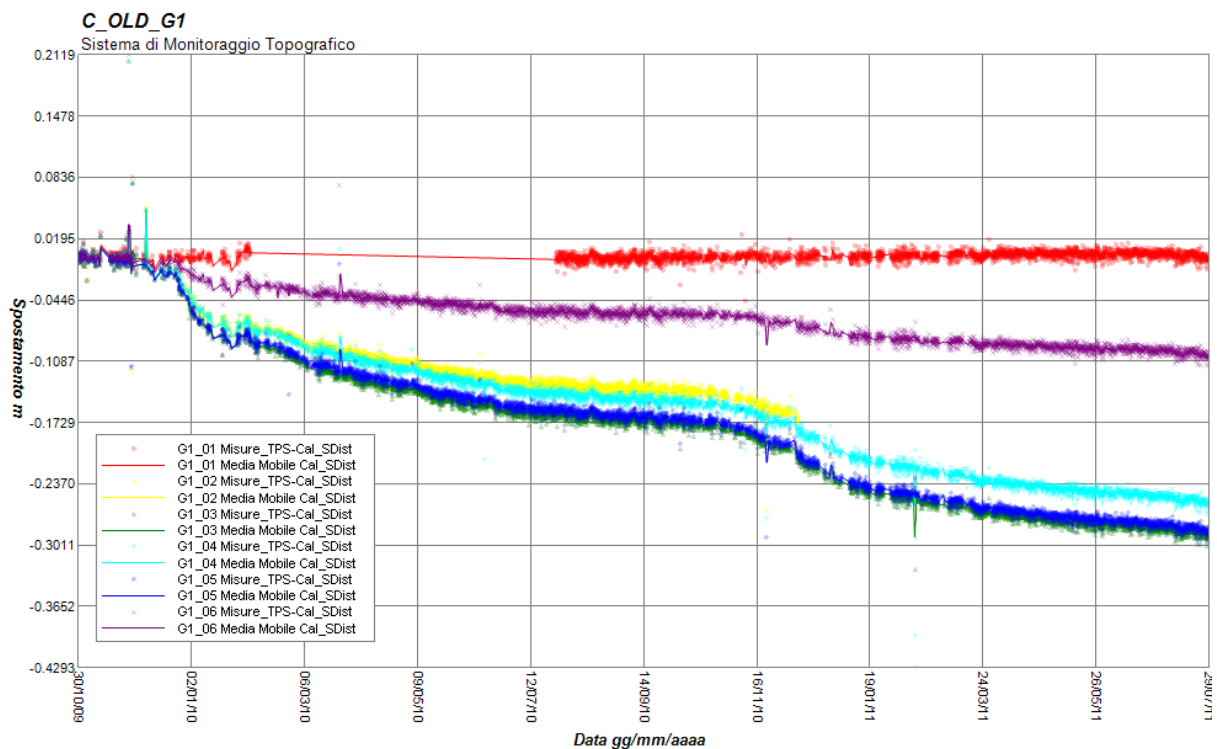


Figura 4.4: Serie temporali dei prismi di monitoraggio del settore G1 messi in relazione con gli accumuli di pioggia registrati.

## Scopo e modalità di esecuzione delle misure

L'attività di monitoraggio topografico e caratterizzazione geologica e geotecnica è stata studiata perché fosse funzionale all'analisi dei movimenti in atto nelle diverse porzioni del versante, in funzione della forzante climatica o di altri fattori predisponenti od innescanti. Questo ha consentito la definizione e la mappatura delle caratteristiche geo-cinematiche dei vari movimenti gravitativi nel versante, e l'interpretazione dei loro meccanismi di movimento ed attuale evoluzione, garantendo, altresì, un controllo in tempo reale dell'evolversi del fenomeno che ha permesso di meglio definire scenari di pericolosità per i diversi processi-fenomeni, e di rischio per le infrastrutture viarie nel versante. Le tecniche di monitoraggio geomatico implementate sono:

- monitoraggio topografico in continuo mediante Stazione Totale Automatizzata (ATS);
- rilievi periodici mediante Laser Scanner Terrestre (TLS) a lunghissima portata per analisi differenziali multi-temporali;
- rilievo lidar aviotrasportato (ALS) a supporto della caratterizzazione geo-morfologica del versante.

In data 20 aprile 2010 è stato eseguito un **rilievo laser scanner da piattaforma aerea** (ALS) con sensore *Leica ALS-60* e camera metrica *RCD 105* con obiettivo calibrato da 100 mm per la produzione di ortofoto. La nuvola di punti, acquisita con densità di circa 5 punti/mq, e le ortofoto, di risoluzione 50 cm/pixel, sono state successivamente processate dal gruppo CNR-IRPI di Torino così da essere georeferenziate nel sistema di riferimento UTM ETRF2000. Al fine di perfezionare la georeferenziazione e validare la qualità del rilievo LiDAR e aereofotogrammetrico sono stati misurati circa 30 punti di controllo a terra (GCP – Ground Control Point) con rilievo GPS statico-rapido (circa 20 minuti a punto): l'accuratezza del rilievo è stata stimata in circa 25 cm in planimetria e circa 10 cm in quota. La nuvola di punti è stata elaborata e filtrata con algoritmi di tipo Ground, Low Vegetation, High Vegetation, Building e Model Keypoint per la rimozione della vegetazione ed eventuali manufatti. Il DTM con risoluzione spaziale di 50 cm derivato dal rilievo LiDAR permette di avere una chiara visione d'insieme del versante e, attraverso particolari visualizzazioni (*shaded relief* e colori reali), di apprezzare le principali unità geo-morfologiche di origine gravitativa (Figura 4.5).



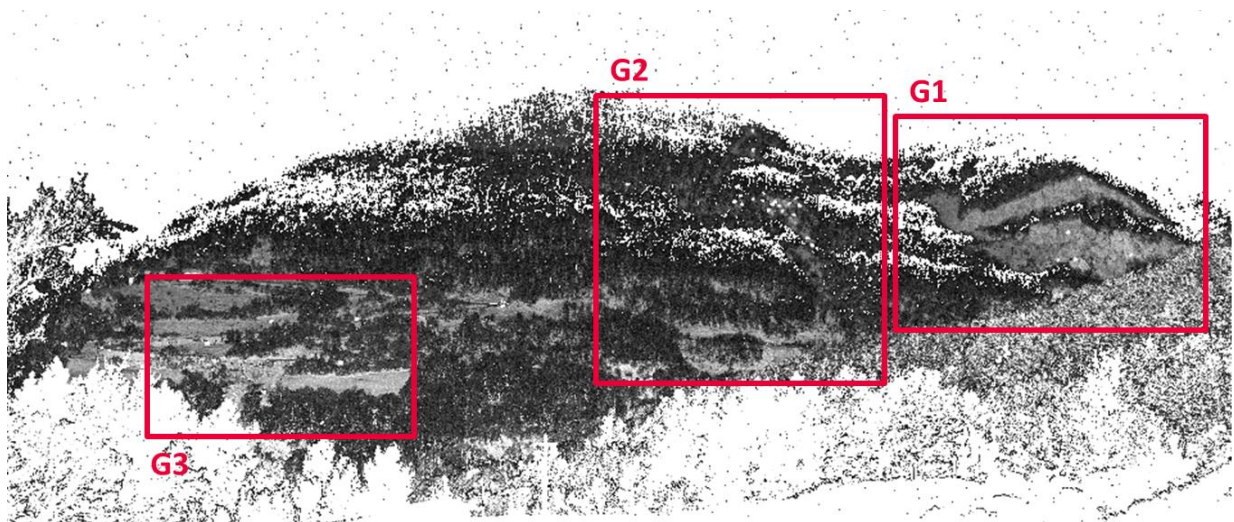
Figura 4.5: Modello Digitale del Terreno (DTM) foto-texturizzato con le ortoimmagini, ottenuto dai dati del rilievo Laser Scanning Aviotrasportato (ALS).

Le campagne di **rilievo laser scanning terrestre a lunghissima portata** sono state eseguite con cadenza all'incirca semestrale da Aprile 2010 ad Aprile 2012 utilizzando due modelli differenti di laser scanner dello stesso produttore: *Riegl LPM-321* e *Riegl LMS-Z620*. Vengono fornite nel seguito due brevi annotazioni sulle caratteristiche generali degli strumenti utilizzati, demandando alle singole schede tecniche ulteriori dati e precisazioni.

- Il profilometro laser *LPM-321* a “tempo di volo” è in grado di misurare distanze in automatico fino a 6000 m, inviando da 10 a 1000 impulsi al secondo. Grazie al processore in grado di registrare gli echi multipli di ritorno, il distanziometro è in grado di fornire tre differenti tipologie di misura: *first pulse*, *last pulse* e *strongest pulse*. La portata massima è comunque influenzata dal *rate* di misura, dalla riflettività del materiale e dalle condizioni atmosferiche. Il passo angolare minimo di scansione è  $0.018^\circ$  sessadecimali con divergenza del raggio laser di circa 0.8 mrad.
- Il sistema *LMS-Z620* associa le caratteristiche di un sensore ad alta precisione con la possibilità di acquisire a grandi distanze (fino 2000 m). La portata massima è comunque influenzata dal *rate* di misura, dalla riflettività del materiale e dalle condizioni atmosferiche. Il distanziometro ha una velocità di acquisizione fino a 8000 punti al secondo con buone accuratezze ma non è in grado di registrare echi multipli. Il passo angolare minimo di scansione è di  $0.004^\circ$  sessadecimali con divergenza del raggio laser di circa 0.15 mrad. È inoltre dotato di sensore inclinometrico.

Le scansioni sono sempre state effettuate nei pressi della stazione master del sistema di monitoraggio vicino a Cava Riva Rossa, inizialmente da treppiede e successivamente da un pilastro in alluminio appositamente installato. La scelta della posizione di scansione è dovuta alla volontà di acquisire da un'unica stazione e frontalmente l'intero versante, in particolare le pareti rocciose dei settori G1 e G2. Ogni campagna di rilievo TLS è stata impostata per

acquisire la geometria dell'intero versante alla massima risoluzione angolare di scansione, corrispondente alla distanza media di interesse ad una risoluzione spaziale di circa 35-40 cm per il modello Riegl LPM-321 e 6-10 cm per LMS-Z620. Considerando le caratteristiche tecniche strumentali, ad una distanza di circa 1.2 km, il modello Riegl LPM-321 (meno accurato) dovrebbe assicurare un'accuratezza relativa di circa 10 cm al livello di confidenza del 95% ( $2\sigma$ ). Di seguito si riporta una tabella riassuntiva con i dati più significativi delle cinque campagne di rilievo TLS a lunghissima portata effettuate.



*Figura 4.6: Nuvola di punti del rilievo Laser Scanning Terrestre (TLS)*

*Tabella 4.1: Campagne di rilievo Laser Scanning Terrestre effettuate a scopo di monitoraggio.*

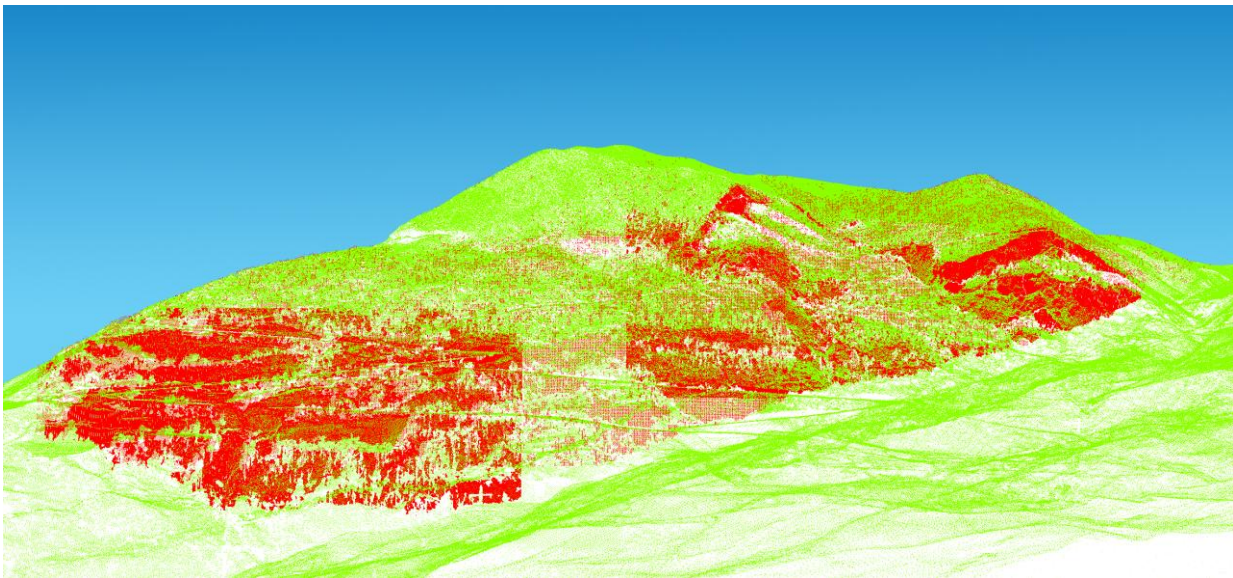
Data rilievo	26/04/2010	17/11/2010	18/04/2011	15/12/2011	01/04/2012
Modello TLS	LPM-321	LPM-321	LMS-Z620	LPM-321	LMS-Z620
Stazionamento	Treppiede	Treppiede	Pilastrino	Pilastrino	Pilastrino
Distanza media	1200 m	1200 m	1200 m	1200 m	1200 m
Risoluzione	35-40 cm	35-40 cm	6-10 cm	35-40 cm	6-10 cm
Accuratezza	10 cm	10 cm	6 cm	10 cm	6 cm
Impronta laser	95 cm	95 cm	18 cm	95 cm	18 cm

Come accennato ed evidenziato dalla Tabella 4.1, dalla campagna di rilievo del 18 Aprile 2011 le scansioni sono state effettuate posizionando lo strumento su un pilastrino in metallo appositamente installato nei pressi della stazione master del sistema di monitoraggio. Il pilastrino cavo di 15 cm di diametro è stato infilato e cementato nel terreno per circa la metà della sua lunghezza; il controllo della stabilità è affidato a rilievi periodici con tecnica GNSS in modalità statica (precisione superiore al centimetro). La scelta di vincolare la posizione di scansione è derivata dalle grosse difficoltà di allineamento riscontrate a seguito delle prime due campagne di rilievo TLS, delle quali verrà ampiamente discusso in seguito.

## Elaborazione delle misure

### *Integrazione dei rilievi aereo e terrestre*

La prima elaborazione effettuata sui dati laser scanning è stata indirizzata all'integrazione della nuvola di punti acquisita da piattaforma aerea (ALS) con la prima scansione terrestre (TLS) a lunghissima portata realizzata pochi giorni dopo il rilievo aviotrasportato. La procedura di integrazione ha sostanzialmente determinato la georeferenziazione della nuvola di punti rilevata da terra nel sistema di riferimento cartografico scelto per la restituzione del volo LiDAR (UTM ETRF2000) ed è stata effettuata in due fasi successive: una pre-registrazione delle nuvole di punti mediante la selezione manuale di almeno 3 punti omologhi seguita dall'affinamento dei risultati dell'allineamento mediante l'applicazione dell'algoritmo automatico Iterative Closest Point (ICP) (Besl e McKay, 1992; Chen e Medioni, 1992; Zhang, 1994). L'algoritmo cerca di minimizzare la distanza tra le nuvole di punti parzialmente sovrapposte: dopo ogni iterazione, l'algoritmo moltiplica la matrice di trasformazione della scansione da allineare con la matrice di trasformazione incrementale, migliorando l'allineamento della scansione “mobile” rispetto a quella di “riferimento”. La matrice incrementale è calcolata utilizzando una tecnica ai minimi quadrati lineare che converge al minimo errore quadratico medio (Sgrenzaroli e Wolfart, 2002). Questa procedura ha permesso di ottenere un errore finale medio inferiore a 20 cm.



*Figura 4.7: Integrazione delle nuvole di punti dei rilievi ALS e TLS di Aprile 2010.*

L'integrazione dei rilievi aereo e terrestre ha permesso di ottenere, dopo le operazioni di filtraggio, il Modello Digitale del Terreno (DTM) ad alta risoluzione utilizzato per la mappatura e la caratterizzazione dei fenomeni geo-meccanici della frana da parte di geologi applicati. Per il filtraggio della vegetazione, la capacità del modello Riegl LPM-321 di registrare echi multipli si è rivelata di buona utilità per eliminare in automatico buona parte della vegetazione presente sul versante [Elseberg et al., 2011; Guarnieri et al., 2012; Mallet e Bretar, 2009]. Oltre

all'utilizzo dell'ultimo segnale di ritorno allo strumento (*last pulse*), per eliminare completamente la vegetazione è stata analizzata anche la risposta radiometrica del segnale [Alba e Scaioni 2010] e operato tramite metodi di filtraggio manuale. Nelle immagini riportate di seguito (Figura 4.8) è possibile apprezzare la maggiore definizione del DTM integrato rispetto a quello ottenuto dal solo LiDAR aereo, soprattutto nella porzioni verticali del corpo di frana in cui le irregolarità degli ammassi rocciosi sono immediatamente percepibili e nettamente definite.

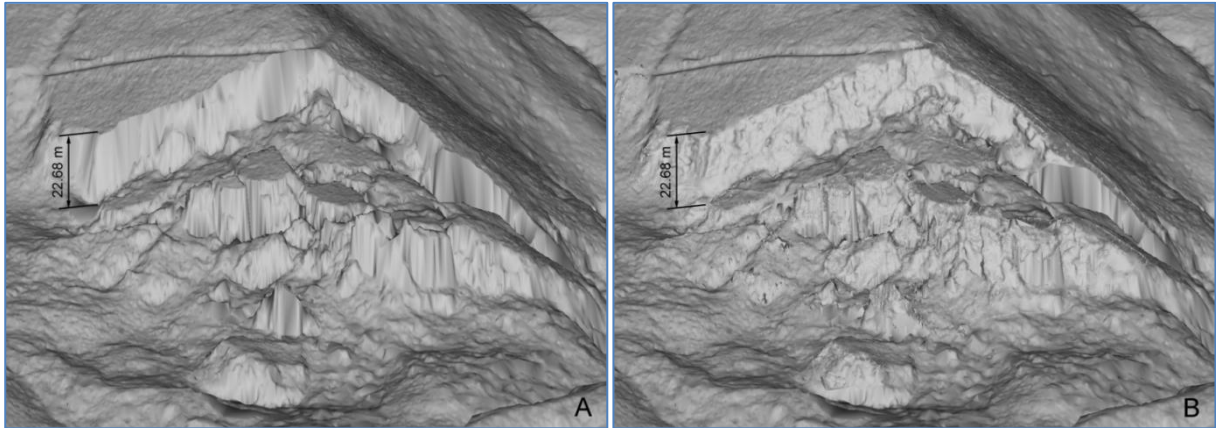


Figura 4.8: A. DTM ottenuto dal rilievo ALS; B. DTM ottenuto dall'integrazione dei rilievi ALS e TLS.

#### ***Allineamento delle campagne terrestri di rilievo***

A causa della limitata entità di movimento previsto del fenomeno franoso, dell'ordine di pochi centimetri all'anno, tra successive campagne TLS, il prerequisite fondamentale per l'ottenimento di risultati significativi dall'analisi differenziale delle scansioni laser è la precisa registrazione delle nuvole di punti in un unico sistema di riferimento invariante nel tempo. Il flusso metodologico generale adottato per l'analisi differenziale è presentato in Figura 4.9. La maggior parte delle fasi di elaborazione sono state eseguite utilizzando algoritmi implementati nel pacchetto software JRC 3D Reconstructor v. 2.7.1. Per il calcolo dei parametri della trasformazione di Helmert (Watson, 2006) da utilizzare per l'allineamento in un unico sistema di riferimento delle scansioni acquisite in diversi istanti temporali, per ambiti applicativi simili a questo è solitamente utilizzato l'approccio della registrazione indiretta (Alba e Scaioni, 2007), spesso tramite l'identificazione manuale, o eventualmente l'utilizzo di algoritmi automatici (ICP), per la ricerca di punti omologhi sulle differenti acquisizioni.

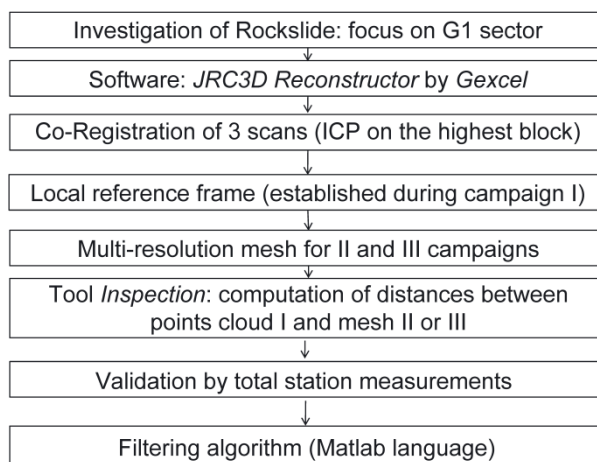


Figura 4.9: Procedura seguita per il confronto multi-temporale tra le scansioni TLS.

La strategia per l'allineamento indiretto delle scansioni adottata inizialmente ha previsto l'installazione di alcuni pannelli quadrati (52 cm di lato) altamente riflettenti posizionati in zone ritenute stabili esternamente alla zona interessata dal fenomeno franoso, da utilizzare come target per l'identificazione manuale di punti omologhi tra le successive epoche di indagine. Tuttavia, ad una distanza media di 1.2 km, la risoluzione angolare dello scanner laser e la divergenza del fascio laser hanno reso impossibile l'identificazione della posizione dei target senza ambiguità spaziale, poiché possono essere acquisiti solo pochi punti laser su ogni pannello riflettente (Figura 4.10). Gli approfondimenti sulle criticità incontrate nella procedura di allineamento delle scansioni saranno trattati in seguito.

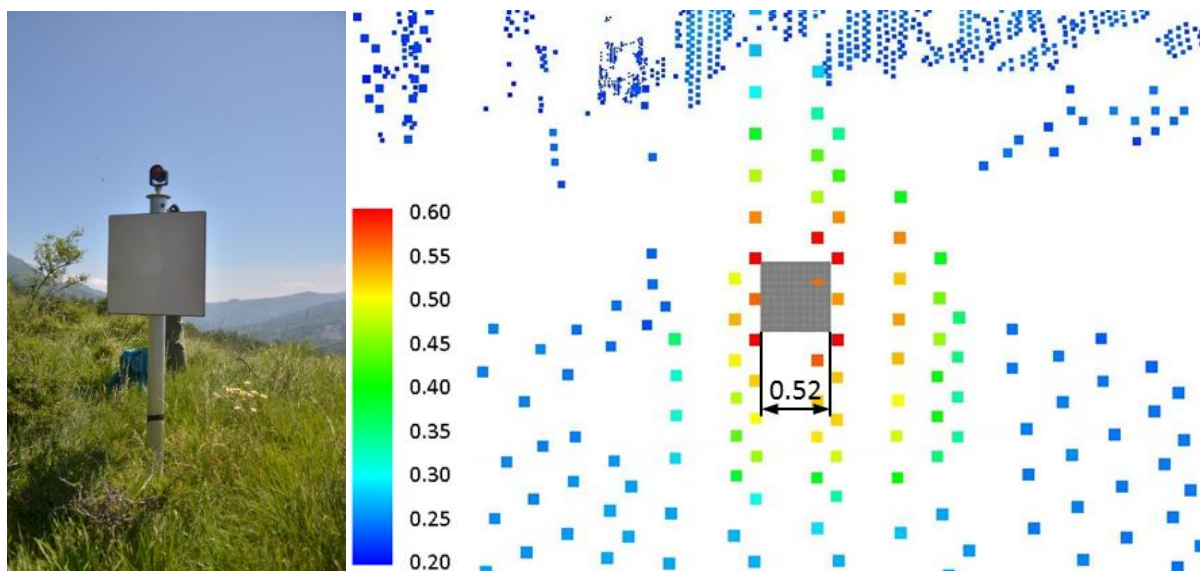


Figura 4.10: Target posizionato per l'allineamento indiretto delle scansioni. L'immagine a destra chiarisce le difficoltà nel riconoscimento del target a causa dell'elevata risoluzione spaziale.

Individuate a seguito della seconda acquisizione TLS le difficoltà citate nel processo di registrazione indiretta, a Marzo 2011 è stato installato in località Cava Riva Rossa un pilastro

in metallo per il centramento forzato della strumentazione laser scanning con l'obiettivo di facilitare l'allineamento delle scansioni tramite metodo diretto, aumentandone al contempo la precisione. La stabilità nel tempo della posizione del pilastrino è valutata tramite misure periodiche con strumentazione GNSS in modalità statica. L'orientamento planimetrico degli assi dei sistemi di riferimento in cui vengono acquisite le nuvole di punti è determinato con una procedura definita *backsighting* (Lichti e Gordon, 2004), che prevede l'allineamento dell'asse delle ordinate del sistema di riferimento dello strumento nella direzione materializzata tramite la scansione di un target solo (in questo caso il più vicino al punto di presa, posizionato a circa 280 m). Utilizzando il target più vicino al punto di stazione è possibile ottenere una migliore risoluzione e accuratezza di acquisizione, determinando così una maggior precisione di individuazione del centro del target e quindi di allineamento generale delle scansioni.

Tabella 4.2: Errori di allineamento tra le scansioni TLS.

Campagna TLS	Riferimento	Metodo di allineamento	Precisione
26/04/2010	18/04/2011	Indiretto (ICP)	3 cm ( $\sigma^2$ )
17/11/2010	18/04/2011	Indiretto (ICP)	4 cm ( $\sigma^2$ )
18/04/2011	18/04/2011	/	/
15/12/2011	18/04/2011	Diretto	3 cm
01/04/2012	18/04/2011	Diretto	2 cm

### Calcolo degli spostamenti

L'obiettivo è quello di sviluppare una metodologia in grado di fornire prodotti numerici e grafici utili all'interpretazione geo-morfologica dei fenomeni franosi in corso e al controllo di eventuali macro-cambiamenti di forma della superficie (crolli) in possibile evoluzione. Dopo aver allineato tutte le scansioni in un unico sistema di riferimento locale, è possibile confrontare tra loro le nuvole di punti acquisite ad ogni campagna di rilievo o i relativi Modelli Digitali del Terreno (DTM) generati per triangolazione.

A differenza di altre esperienze reperibili in bibliografia [Fiani e Siani, 2005; Abellan et al., 2009; Ujike e Takagi 2004; Hesse e Stramm, 2004], esclusivamente la nuvola di punti relativa alla prima campagna di rilievo TLS è stata triangolata con approccio Delaunay 2.5D (Delaunay, 1934). Questo algoritmo richiede la scelta di un punto di vista specifico per la creazione di superfici da quella particolare prospettiva. Il processo crea dietro alla nuvola di punti un piano perpendicolare alla linea di vista su cui vengono proiettati i punti acquisiti, che vengono triangolati tramite una maglia bidimensionale utilizzando l'algoritmo di Delaunay in 2D; i vertici della mesh, corrispondenti ai punti acquisiti, vengono poi riposizionati nelle loro posizioni 3D originali. Questo algoritmo di triangolazione è molto basilare rispetto ad altri [Carr et al., 2001] ma, in questo caso, è risultato particolarmente efficiente in quanto,

utilizzando tutti i punti acquisiti, permette di ottenere mesh senza lacune ideali per il confronto diretto di modelli distinti lungo la direzione di acquisizione.

Il confronto multi-temporale è stato effettuato mediante lo strumento di ispezione implementato nel software JRC 3D Reconstructor. Questo algoritmo automatico permette il confronto di un modello a superfici (relativo alla prima campagna di rilievo TLS) con una nuvola di punti (una per ogni campagna TLS) calcolando la distanza per ogni punto appartenente alla nuvola di punti dalla superficie di riferimento lungo la direzione normale al piano infinitesimo generato intorno al punto stesso [Cardaci et al., 2011]. Considerati i lenti movimenti dei fenomeni franosi (pochi centimetri all'anno) e le prestazioni degli strumenti utilizzati alla distanza operativa media di 1200 m, è stato reputato significativo effettuare i confronti multi-temporale su archi di tempo superiori all'anno. Sono di seguito riportati i risultati delle analisi relative alle elaborazioni tra la campagna di riferimento di Aprile 2010 e le successive di Aprile 2011, Aprile 2012.

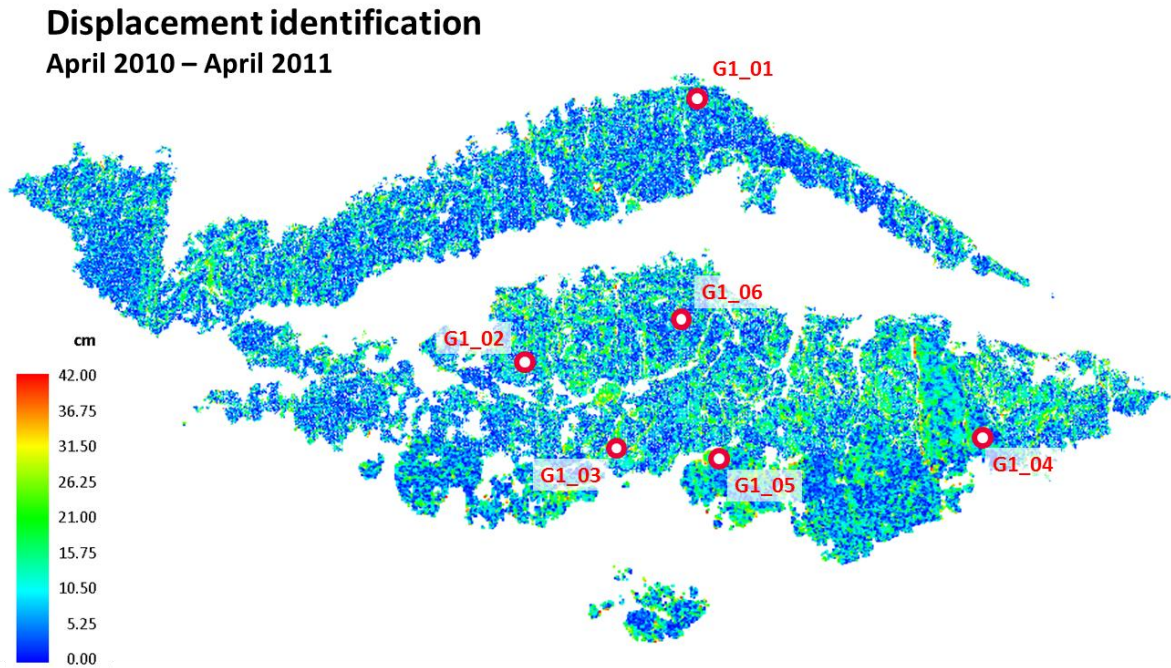


Figura 4.11: Mappa di spostamento ottenuta dal confronto multi-temporale tra le scansioni di Aprile 2010 e Aprile 2011.

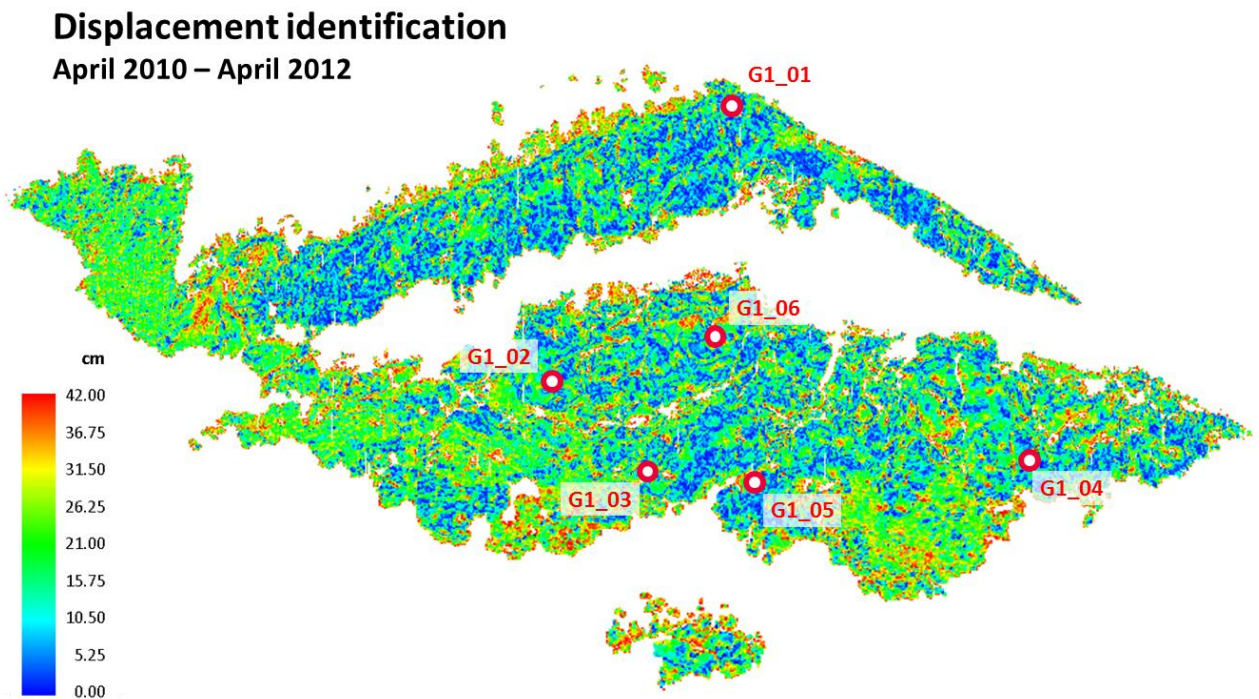


Figura 4.12: Mappa di spostamento ottenuta dal confronto multi-temporale tra le scansioni di Aprile 2010 e Aprile 2012.

## **Validazione e interpretazione dei risultati**

### ***Analisi delle caratteristiche della frana basata sul DTM ad altissima risoluzione***

Per la costruzione di un DTM completo ed accurato la soluzione dell'integrazione tra le due tipologie di scansioni laser, aerea e terrestre, sembra essere la scelta migliore, in particolare in casi come questo in cui l'area dei rilevamenti è molto vasta e morfologicamente eterogenea. Questa soluzione è comunque non banale e frutto di un complesso processo di verifica per la conferma dei limiti precedentemente indicati per ogni tecnologia. Il Modello Digitale del Terreno ad altissima risoluzione ottenuto per integrazione delle nuvole di punti ALS e TLS di Aprile 2010 è stato un valido supporto per la quantificazione in ambiente GIS delle variazioni di pendenza legate all'evoluzione dei fenomeni franosi in atto. Inoltre è stato possibile effettuare una precisa mappatura delle caratteristiche dei depositi franosi fino ad ora irrealizzabile con la documentazione esistente: la mappa suddivide schematicamente il corpo di frana in singoli elementi dinamici con evoluzione rotazionale e/o traslazionale che permette di sostenere le ricostruzioni cronologiche relative agli eventi franosi gravitazionali.

### ***Analisi degli spostamenti e validazione***

I confronti multi-temporali calcolati tra le campagne TLS effettuate nei mesi di Aprile, sono stati validati dal confronto con i dati del sistema di monitoraggio con Stazione Totale Automatizzata (ATS). La validazione effettuata è determinata dal confronto “diretto” tra i valori di spostamento sui prismi installati, in termini di distanza inclinata, misurati con ATS e quelli ottenuti dai confronti multi-temporali con TLS. Questo tipo di confronto è reso possibile dal fatto che le posizioni di misura con ATS e TLS sono molto vicine per cui la direzione di vista sostanzialmente coincide, il monitoraggio topografico ha coperto l'intero arco temporale delle acquisizioni laser scanning e i movimenti del corpo di frana sono di tipo rotazionale e/o traslazionale nella direzione della linea di vista.

Tuttavia, il confronto tra le due tecniche, a scopo di validazione, non ha coinvolto le misure grezze ottenute con le due strumentazioni: le misure di distanza inclinata della ATS sono state corrette per gli effetti di rifrazione atmosferica con il modello rigoroso di Barrel-Sears (Bertacchini et al., 2011; Marini e Murray, 1973; Rüeger, 1990), mentre le distanze rilevate con gli strumenti a scansione sono state corrette con un semplice modello geometrico impostabile tramite il software di acquisizione dello strumento stesso. La verifica periodica della stabilità del sistema di monitoraggio topografico mediante misure GNSS e la correzione degli effetti atmosferici ha permesso di stimare intorno ai 4 cm la precisione assoluta delle misure con ATS. L'accuratezza delle acquisizioni laser scanning è invece stata cautelativamente stimata, sulla base dei dati tecnici, in circa 10 cm al livello di confidenza  $2\sigma$ .

L'ultima considerazione riguarda i valori di spostamento rilevati con tecnica laser scanning, associati ai prismi da monitoraggio, da confrontare con i valori ATS. Infatti, a causa delle “ridotte” prestazioni strumentali alle distanze operative coinvolte, la posizione dei prismi

non è identificabile univocamente sulle scansioni ma è solamente ipotizzabile sulle base degli alti valori di riflettività dei punti acquisiti in zona. Per il confronto tra le tecniche, è quindi stato reputato corretto assumere come valore di spostamento associato ad ogni prisma il valore medio calcolato sui punti nel raggio di alcuni decimetri (50 cm) rispetto alla posizione del prisma, nota dalle misure ATS. Questa assunzione è possibile in quanto, trattandosi di pareti di roccia, gli spostamenti in ogni area geo-dinamica sono ipotizzabili uniformi, a meno di crolli localizzati. In altre parole, si è ipotizzato che la media dei valori di spostamento associati ai punti caratterizzati da alta riflettività intorno ad ogni prisma potesse essere confrontato direttamente con i valori di spostamento derivanti dalle misure con ATS sul singolo prisma. I risultati della validazione sono elencati nella Tabella 4.3: le differenze tra ATS e TLS risultano in ogni caso inferiori a 5 cm, valore decisamente inferiore all'accuratezza stimata per le acquisizioni TLS (10 cm) e simile al valore di accuratezza stimato per ATS (4 cm).

*Tabella 4.3: Validazione del confronto multi-temporale ottenuto dalle scansioni laser scanning (TLS) sulla base dei dati del monitoraggio topografico con Stazione Totale Automatizzata (ATS).*

2010-11	ID Prisma	TLS [m]	ATS [m]	$\Delta(\text{TLS-ATS})$ [m]
	G1_01	0.028	0.002	0.026
	G1_02	0.048	/	/
	G1_03	0.111	0.141	0.030
	G1_04	0.105	0.128	0.023
	G1_05	0.097	0.142	0.045
	G1_06	0.030	0.053	0.023
2010-12	Prism ID	TLS [m]	ATS [m]	$\Delta(\text{TLS-ATS})$ [m]
	G1_01	0.044	0.012	0.032
	G1_02	0.106	/	/
	G1_03	0.176	0.203	0.027
	G1_04	0.171	0.187	0.016
	G1_05	0.162	0.203	0.041
	G1_06	0.061	0.079	0.018

Sebbene il procedimento di validazione possa essere considerato accettabile su base numerica (le differenze tra le due tecniche sono molto ridotte), non va certo sottovalutato che i valori di spostamento calcolati tramite TLS potrebbero essere affetti da errori in alcuni casi più grandi del modulo stesso. Questo indica, soprattutto per il primo anno, che i confronti tra le campagne di rilievo laser scanning dovrebbero essere utilizzati prevalentemente per l'interpretazione semi-quantitativa dei lenti cinematismi in atto sulle differenti aree geodinamiche delle pareti rocciose. Tuttavia, va sottolineato che il confronto diretto tra ATS e TLS deve necessariamente essere effettuato tramite la media di valori di alcuni punti intorno ai singoli prismi ma, i risultati potrebbero avere un grado variabile di precisione nelle diverse aree della zona esaminata.

### ***Interpretazione dei risultati***

Le mappe di spostamento ottenute dalle analisi multi-temporali delle scansioni laser a lunghissima distanza mostrano un elevato grado di variabilità dei valori di spostamento calcolati su piccole aree adiacenti. Al fine di migliorare la leggibilità dei risultati, è stato studiato ed elaborato un specifico algoritmo di filtraggio, implementato in Matlab, per mediare i valori di spostamento su base spaziale, in modo da “lisciare” i valori all’interno di ogni specifico blocco di roccia. Inizialmente è stato sperimentato un algoritmo di semplice media mobile, il quale è risultato però inadatto ed insoddisfacente in quanto i valori anomali (*outliers*) influenzavano fortemente il valore di spostamento finale. La soluzione a questo problema è quindi stata individuata nello sviluppare uno specifico algoritmo che applicasse un filtro basato su: classificazione dei punti in classi di valore di spostamento (3 classi); valutazione della frequenza relativa dei punti in ogni classe per un’area di ricerca a raggio variabile (definito poi di 25 cm); attribuzione al punto indagato del valore di spostamento medio dei punti della classe con la più alta frequenza relativa nell’area di ricerca. Inoltre, al fine di tenere conto delle differenti aree geo-dinamiche naturali, ogni blocco di roccia è stato delimitato e trattato separatamente con l’algoritmo di filtraggio. L’efficacia della procedura di filtraggio è mostrata nelle successive immagini, in cui si riportano le mappe di spostamento prima e dopo l’applicazione dell’algoritmo implementato.

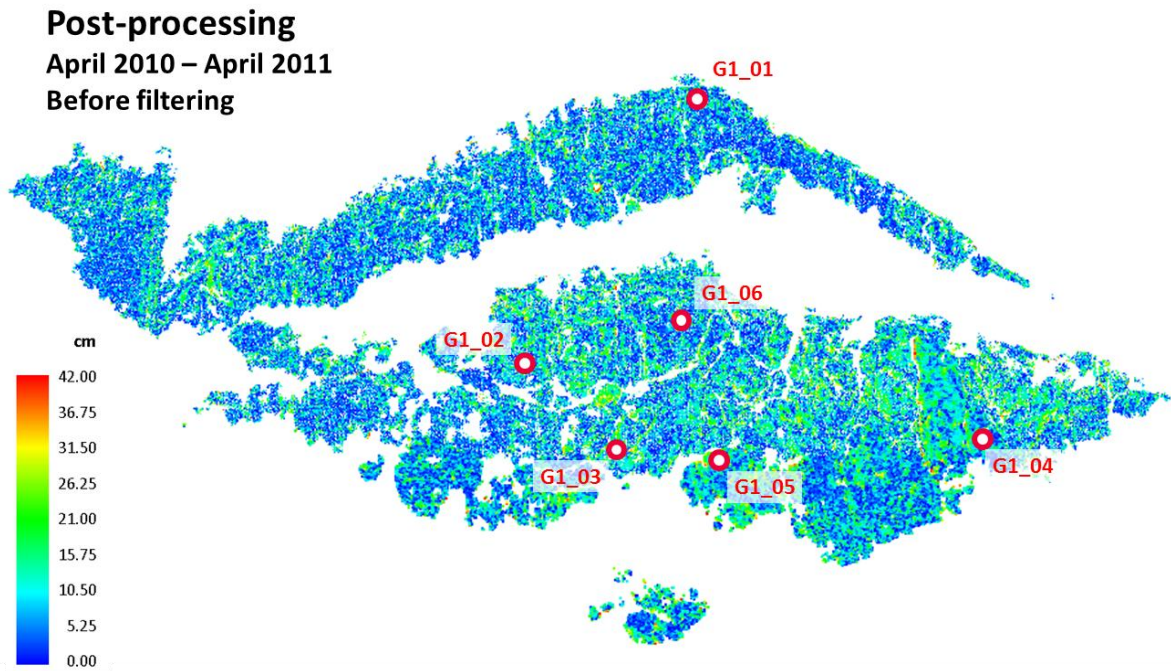


Figura 4.13: Mappa di spostamento ottenuta dal confronto multi-temporale tra le scansioni di Aprile 2010 e Aprile 2011, prima dell'applicazione del filtro in Matlab.

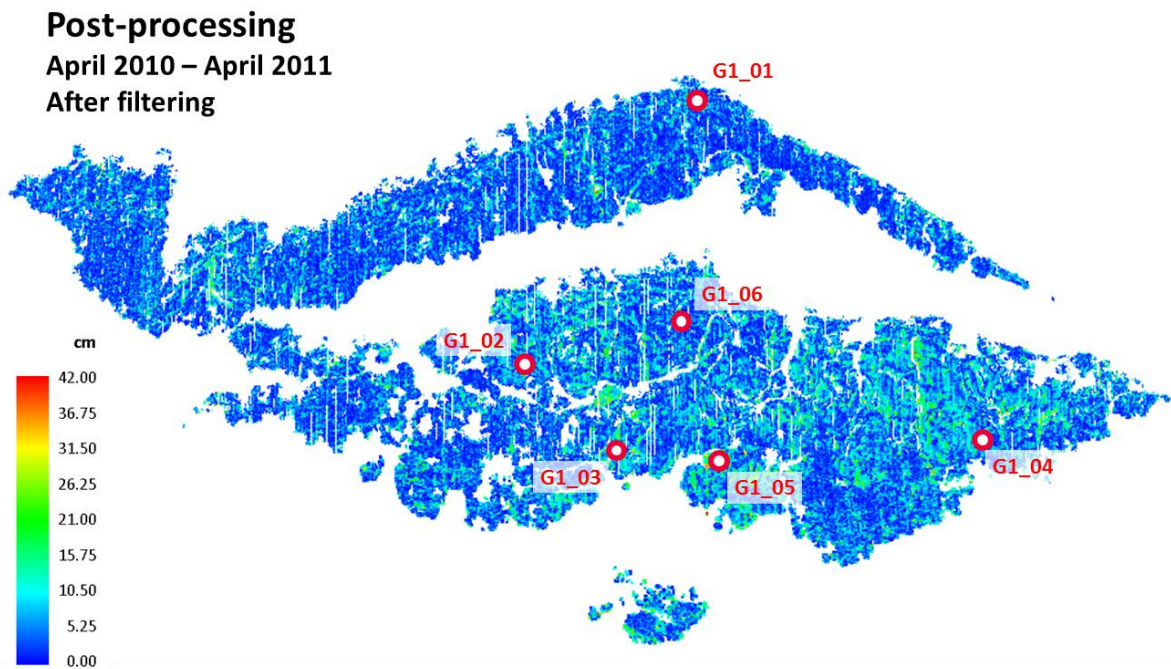


Figura 4.14: Mappa di spostamento ottenuta dal confronto multi-temporale tra le scansioni di Aprile 2010 e Aprile 2011, dopo dell'applicazione del filtro in Matlab.

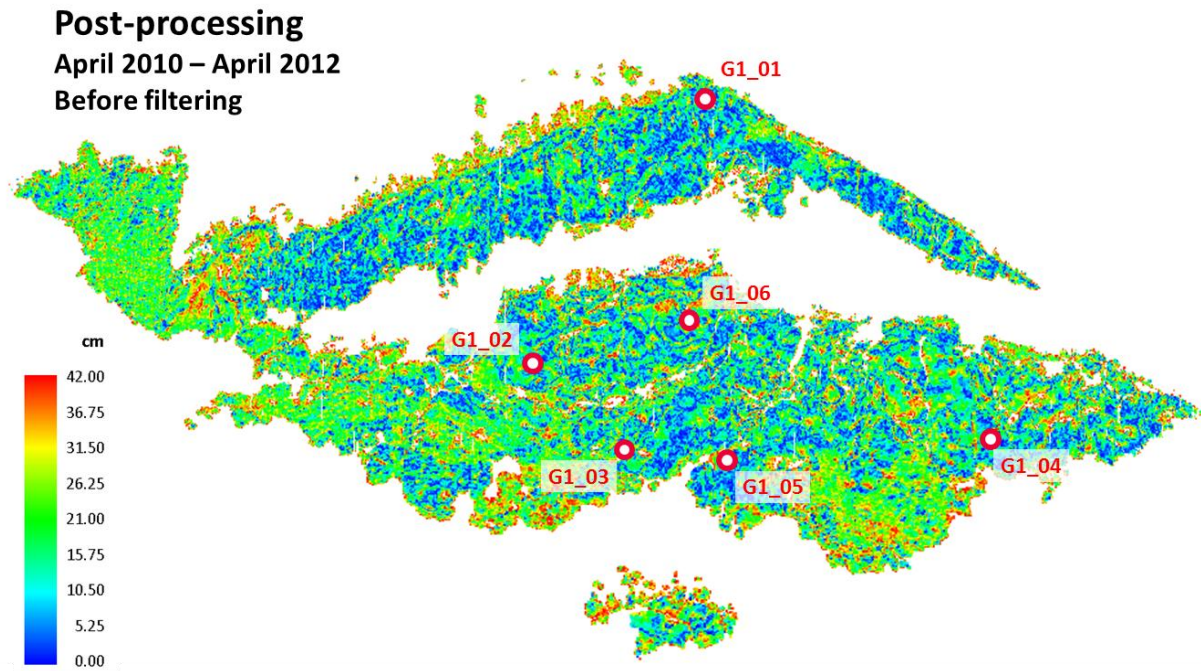


Figura 4.15: Mappa di spostamento ottenuta dal confronto multi-temporale tra le scansioni di Aprile 2010 e Aprile 2012, prima dell'applicazione del filtro in Matlab.

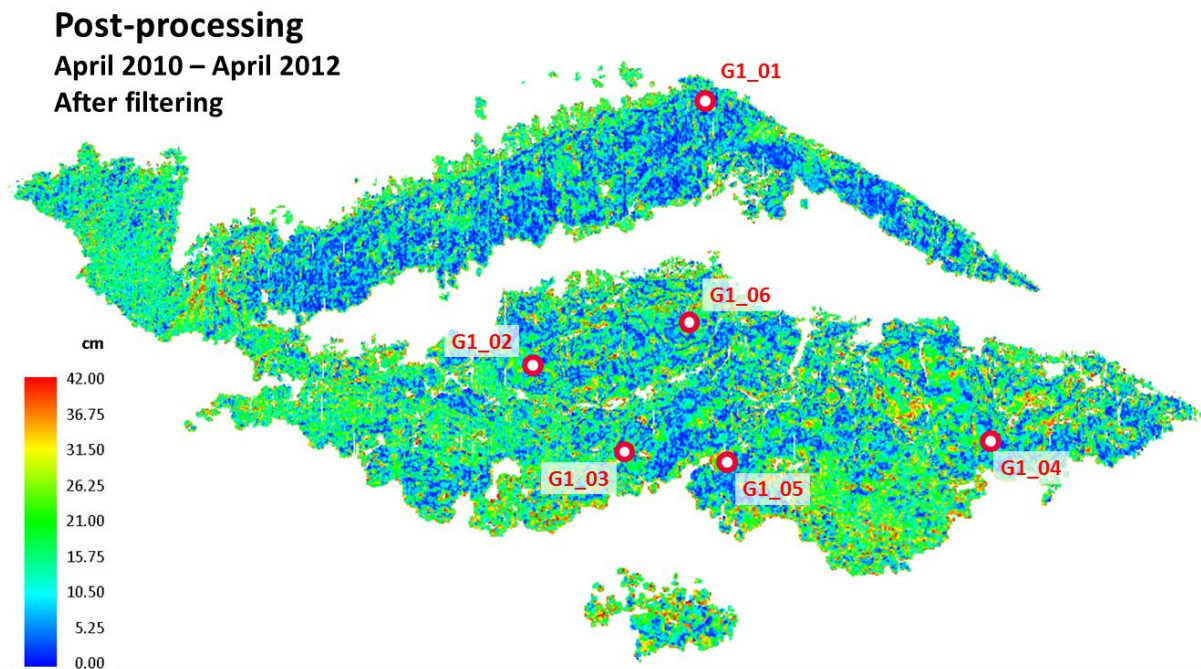


Figura 4.16: Mappa di spostamento ottenuta dal confronto multi-temporale tra le scansioni di Aprile 2010 e Aprile 2012, dopo dell'applicazione del filtro in Matlab.

## **Rilevamento a lunghissima portata: problematiche e potenzialità**

Nonostante complessivamente siano stati ottenuti ottimi risultati, nel corso dell'esperienza sono stati incontrati alcuni problemi. La necessità di affrontare e risolvere queste difficoltà, tra cui metodi di filtraggio della vegetazione, elevata distanza operativa di rilevamento e scarsa riflettività dei materiali, tecniche di allineamento finalizzate ai confronti multi-temporali, georeferenziazione per integrazione con rilievo da piattaforma aviotrasportata ed altro ancora, ha permesso di migliorare sempre più il sistema di monitoraggio inizialmente ideato e prendere coscienza delle reali potenzialità dei sistemi a scansione laser per il monitoraggio di versanti instabili.

### ***Analisi delle problematiche***

La presenza di vegetazione sul versante è un aspetto molto critico nelle applicazioni di monitoraggio con tecniche laser scanning [Montserrat e Crosetto, 2008; Abellán et al., 2009, 2011], perché la crescita della flora può drasticamente cambiare la forma delle superfici che vengono rilevate. Di conseguenza, il problema del filtraggio della vegetazione è uno degli aspetti fondamentali da considerare per realizzare analisi multi-temporali significative. In letteratura una vasta gamma di soluzioni sono state proposte per problematiche di generazione di DTM da dati rilevati da piattaforma aviotrasportata (ALS) [Vosselman e Maas, 2001; Forlani e Nardinocchi, 2007]. Ad oggi, gli obiettivi della ricerca scientifica puntano verso una completa automazione del processo di filtraggio, anche se questo non è un compito semplice e di solito richiede un parte di processamento finale.

Nel presente caso di studio sono stati testati svariati metodi di filtraggio per la rimozione della vegetazione acquisita con le scansioni laser terrestri. Oltre all'utilizzo, qualora possibile, dell'ultimo segnale (*last pulse*) di ritorno allo strumento di acquisizione, sono stati effettuati tentativi di rimozione della vegetazione in funzione della risposta radiometrica (riflettività e RGB) dei punti rilevati. Tuttavia, la presenza di vegetazione a basso fusto, le grandi distanze in gioco e la bassa riflettività dei materiali oggetto del rilevamento, anche a causa dell'elevato contenuto di acqua in alcuni periodi dell'anno, hanno reso le operazioni di filtraggio automatico o semi-automatico non completamente soddisfacenti e autonome per la rimozione completa della vegetazione. In alternativa al filtraggio manuale, che su ampie zone di territorio è un procedimento molto lungo e dispendioso, è stato sperimentato l'utilizzo di una procedura iterativa semi-automatica basata su un filtro cosiddetto *2.5D raster*, prevedendo infine il confronto con il DTM ottenuto dalle scansioni aeree già filtrate con particolari e specifici algoritmi. Il metodo di filtraggio della vegetazione *2.5D raster* prevede l'iterazione del processo di *meshing* dei punti rilevati, riducendo progressivamente la dimensione delle maglie, e conseguente eliminazione dei punti posizionati al di sopra della mesh. Il procedimento permette ad ogni iterazione di affinare il risultato del filtraggio, dalla vegetazione ad alto fusto (utilizzando maglie di grandi dimensioni) fino a piccoli arbusti (utilizzando maglie di

dimensioni sempre inferiori). Come facile immaginare, i risultati migliori sono stati ottenuti su porzioni di territorio prevalentemente pianeggianti in cui la vegetazione cresce in direzione verticale; su pareti rocciose caratterizzate dalla presenza di piccoli e sporadici arbusti che si accrescono anche orizzontalmente, il filtraggio manuale rimane l'unica soluzione possibile.

A seguito delle problematiche di rimozione della vegetazione, nei casi di rilevamento laser scanning a scopo di monitoraggio, l'aspetto di fondamentale importanza da risolvere per una corretta interpretazione dei risultati è l'allineamento delle acquisizioni in un unico sistema di riferimento locale utilizzabile per i confronti multi-temporali. Ogni campagna di rilievo, infatti, fornisce una nuvola di punti in un proprio sistema di riferimento. La registrazione in un unico sistema di riferimento delle nuvole di punti rilevate alle differenti epoche deve essere eseguita calcolando i parametri di rototraslazione della trasformazione Helmert (Watson, 2006). Come già indicato precedentemente, esistono due differenti approcci (Alba e Scaioni, 2007): la registrazione diretta, che prevede il posizionamento dello strumento su un punto noto e l'orientamento diretto verso un secondo punto di coordinate note, e la registrazione indiretta, che necessita il riconoscimento, manuale o automatico, di punti omologhi su scansioni differenti.

Nel presente caso di studio, la strategia di allineamento scelta inizialmente era basata sul riconoscimento manuale di alcuni target riflettenti posti in zone esterne al corpo di frana indagato e ritenute stabili. La stabilità di questi riflettori era comunque costantemente monitorata attraverso misurazioni con Stazione Totale Automatizzata e, periodicamente, anche con tecniche GNSS. La scelta del metodo indiretto tramite target per la registrazione delle scansioni era apparsa l'unica soluzione possibile in quanto non era possibile individuare nelle vicinanze aree stabili sufficientemente estese su cui utilizzare algoritmi automatici di ricerca di punti omologhi (ICP) e le caratteristiche dello strumento inizialmente individuato per le scansioni sembravano non permettessero un adeguato allineamento tramite metodologia diretta poiché sprovvisto di inclinometro.

Sebbene fosse stata scelta la metodologia con le minori criticità, già a seguito delle prime due campagne di rilievo sono state incontrate notevoli difficoltà nel processo di allineamento. Infatti, a causa delle grandi distanze in gioco (oltre 1 km), e considerando i valori di risoluzione spaziale (circa 30 cm) e divergenza del fascio laser (circa 80 cm), non è stato possibile identificare senza ambiguità e sufficiente precisione almeno tre coppie di punti omologhi sulle scansioni per calcolare i parametri di rototraslazione, nemmeno utilizzando i pannelli riflettenti di forma quadrata e grandezza 52 cm specificatamente installati. Sebbene siano stati compiuti molteplici tentativi, tutti i risultati ottenuti dalla registrazione indiretta tramite target non potevano essere considerati soddisfacenti in relazione all'entità dei movimenti che ci si prefiggeva di individuare. Tenendo conto della presenza dei prismi di monitoraggio, installati all'interno del corpo di frana, è stato effettuato come secondo tentativo quello di sfruttare la conoscenza della loro posizione (misurata con ATS) per il processo di allineamento delle

scansioni laser. Ovviamente, con questo tentativo non si sperava di riuscire a riconoscere il diametro del prisma (troppo piccolo per le distanze in gioco) ma la loro posizione sfruttando l'elevata riflettività del segnale registrato. Purtroppo anche questo tentativo è risultato inadeguato a causa delle stesse problematiche citate per i target.

Effettuati tutti i tentativi possibili per la registrazione manuale tramite punti omologhi, l'approccio scelto per risolvere il problema dell'allineamento tra le prime due campagne TLS è stato necessariamente l'individuazione di aree stabili su cui operare attraverso l'algoritmo automatico ICP. Come detto, non potendo identificare aree stabili esterne al versante in frana, si è ricorso all'analisi delle serie temporali dei prismi di monitoraggio topografico misurate con ATS. Focalizzando l'attenzione su prismi installati nel settore indagato del corpo di frana, è risultato evidente come in relazione alle caratteristiche geomorfologiche la scarpata superiore fosse sostanzialmente stabile rispetto al comparto restante poiché fino a quel momento non erano stati registrati spostamenti significativi. Il prisma installato sulla scarpata principale può essere considerato stabile per tutto il periodo di monitoraggio: la regressione lineare della serie temporale mostra infatti uno spostamento medio di circa 2 cm in tre anni, valore inferiore all'accuratezza del metodo. Tutti gli altri prismi installati sullo stesso settore registrano spostamenti dai 15 ai 35 cm in tre anni, con i valori maggiori per quelli posizionati nella parte inferiore. Grazie all'ipotesi di stabilità della parte superiore del corpo di frana, validata dai dati ATS, i punti della nuvola appartenenti a quel blocco sono stati utilizzati per l'allineamento delle due scansioni tramite l'algoritmo ICP implementato nel software JRC 3D Reconstructor; la qualità del processo di registrazione è rappresentato dallo scarto quadratico medio delle distanze relative tra le coppie di punti utilizzati per l'allineamento.

Per cercare di far fronte a tutte queste difficoltà nel processo di registrazione, a Marzo 2011 prima di effettuare la terza campagna di rilievo (Aprile 2011) è stato installato in località Cava Riva Rossa un pilastrino in metallo per il centramento forzato della strumentazione laser scanning al fine di utilizzare il metodo diretto per la registrazione delle scansioni. La misura periodica delle coordinate del pilastrino tramite strumentazione GNSS in modalità statica permette di monitorarne la stabilità nel tempo. Il centramento forzato dello strumento garantisce la stessa origine dei sistemi di riferimento delle scansioni effettuate alle differenti epoche. L'orientamento planimetrico viene definito con una procedura definita *backsighting* che permette l'allineamento dell'asse delle ordinate nella direzione materializzata dalla scansione di un riflettore (Lichti e Gordon, 2004; Scaioni, 2005). L'ultimo grado di libertà viene vincolato rendendo verticale l'asse principale dello strumento livellandolo ed attivando il sensore inclinometrico, se disponibile. Operando sul target più vicino al punto di presa dello strumento (circa 280 m) è possibile ottenere una migliore risoluzione e accuratezza di acquisizione, che conseguentemente determinano una maggior precisione nell'individuazione del centro del target e quindi nella fase di allineamento.

Il sistema di riferimento scelto per le analisi multi-temporali non è quello della prima scansione (Aprile 2010) ma quello della terza (Aprile 2011), corrispondente alla prima acquisizione dal pilastrino a centramento forzato. Questa scelta è chiaramente legata a quella dell'utilizzo del metodo diretto per l'allineamento delle scansioni, che ha garantito maggiore ripetibilità e precisione rispetto al metodo indiretto preferito inizialmente. Si precisa inoltre che, indipendentemente dal sistema di riferimento in cui sono state eseguite le analisi, la scansione di riferimento per il calcolo degli spostamenti è la prima (Aprile 2010).

### ***Valutazione delle potenzialità***

A seguito dell'esperienza svolta, la tecnologia laser scanning ha dimostrato di essere un potente strumento per l'analisi dei movimenti di un corpo di frana, nonostante la lenta cinematica del fenomeno e le grandi distanze operative di acquisizione. Il DTM ad alta risoluzione ottenuto dall'integrazione delle nuvole di punti ALS e TLS si è rivelato uno strumento di supporto ideale per la mappatura dettagliata delle caratteristiche della frana e la suddivisione in elementi dinamici del complesso fenomeno franoso, consentendo inoltre di formulare un'ipotesi della cronologia degli eventi che hanno portato il corpo di frana all'attuale stato di evoluzione e attività. Le analisi multi-temporali da scansioni TLS hanno prodotto ottimi risultati, nonostante le criticità del caso di studio. Lo sviluppo di una metodologia di elaborazione dei dati specifica, basata sull'integrazione e validazione dei dati TLS con quelli ATS, ha permesso di ottenere stime delle entità di spostamento in modo quasi spazialmente continuo su tutto il corpo di frana indagato. I risultati ottenuti si sono rivelati assolutamente in linea con i dati ATS e con la distribuzione prevista dei movimenti sul versante, nonostante le precisioni del metodo fossero in alcuni casi inferiori al modulo dello spostamento calcolato. I dati laser scanning sono inoltre stati utili per l'integrazione dei dati di monitoraggio puntuali ottenuti con ATS in sistemi GIS e per evidenziare processi secondari come le inclinazioni degli specifici elementi di frana.

Dal punto di vista tecnico, i lenti cinematismi del comparto di frana e le acquisizioni a lunghissima portata hanno enfatizzato la problematica dell'allineamento delle scansioni per l'analisi differenziale dei dati acquisiti a differenti istanti temporali. La metodologia indiretta, inizialmente individuata, si è rivelata inappropriata per la quantificazione di spostamenti di piccola entità perché non in grado di raggiungere risultati di allineamento sufficientemente precisi. Nonostante, il metodo diretto si sia rivelato particolarmente efficiente in questo caso, preme sottolineare l'importanza del sistema di monitoraggio con ATS a supporto delle indagini TLS; in assenza di dati puntuali, ma accurati, non sarebbe stato possibile allineare con precisione le prime campagne di rilevamento, costringendo a rinunciare alla prima analisi multi-temporale.

In conclusione, si ritiene corretto definire il sistema laser scanning come un importante strumento di supporto all'individuazione di movimenti su versanti instabili, piuttosto che un vero e proprio sistema di monitoraggio indipendente. Infatti, per proprie caratteristiche, non

permette la misurazione ripetuta degli stessi punti e quindi difficilmente è possibile associare un esatto valore di spostamento ad ogni singolo punto acquisito, se non tramite elaborazioni ed interpolazioni che in qualche modo modificano il valore dell'osservazione grezza registrata.



## 5. Indagini in ambito architettonico: assetto geometrico di edifici storici

---

Il controllo periodico delle costruzioni rappresenta il principale strumento per una consapevole conservazione, in quanto consente di programmare la manutenzione ed attuare in tempo gli interventi di riparazione, quando realmente necessari, in caso di danno strutturale, e di consolidamento, finalizzato alla prevenzione. Per impostare un programma di monitoraggio è necessario eseguire preventivamente una accurata analisi del funzionamento strutturale, e quindi una interpretazione dei dissesti in atto, in modo da definire i parametri più significativi che, misurati in continuo o con scadenze temporali adeguate, consentono di certificarne il buon comportamento ovvero di valutare eventuali evoluzioni pericolose per la stabilità di insieme o di singole parti dell'edificio.

Il monitoraggio visivo, inteso come controllo periodico dell'insorgenza di stati fessurativi, fenomeni di degrado, trasformazioni nella struttura e nell'ambiente circostante, rappresenta il punto di partenza di tale attività. Informazioni aggiuntive possono essere acquisite attraverso il monitoraggio strumentale di alcuni parametri ritenuti significativi (movimento delle lesioni, spostamenti assoluti o relativi di punti della costruzione, rotazione di pareti o altri elementi). Il movimento delle lesioni può essere controllato pressoché in continuo e a distanza; occorre tuttavia considerare che, in relazione alla tipologia di dissesto, le soglie di pericolosità di tali spostamenti relativi possono essere anche molto diverse. Il controllo geometrico della costruzione può essere eseguito mediante procedure di rilievo topografico, fotogrammetrico, o utilizzando tecniche innovative quali i laser scanner terrestri; in questa tipologia di applicazioni, tale metodologia non risulta certamente esclusiva e, anzi, deve essere attentamente valutato il grado di precisione fornito in relazione alle soglie di movimento ritenute significative.

Il progetto di monitoraggio richiede una preliminare interpretazione del meccanismo di dissesto, che può spesso essere eseguita grazie alla meccanica dell'equilibrio delle murature considerate come corpo rigido; ciò permette di individuare una serie di punti notevoli da controllare. In alcuni casi, quando l'eventuale dissesto è ben compreso e possono essere definite soglie di sicurezza, il monitoraggio può rappresentare un'alternativa all'intervento, a vantaggio della conservazione. Le proprietà dinamiche della struttura (frequenze e forme proprie di vibrazione) sono anch'esse parametri significativi del comportamento di una costruzione. In presenza di dissesti o trasformazioni della costruzione e del suo uso, queste grandezze subiscono delle alterazioni. Allo stato attuale delle conoscenze, l'identificazione del danno sulla base di una variazione delle proprietà dinamiche è molto difficile; inoltre, è noto che le costruzioni in muratura sono caratterizzate da un comportamento fortemente non lineare e ciò rende problematico il ricorso a parametri rappresentativi di un comportamento lineare equivalente. Tuttavia, il controllo di alcuni parametri della risposta dinamica, o eccitata

artificialmente o mediante vibrazioni ambientali, può, in alcuni casi, rappresentare uno dei possibili elementi per l'identificazione di un cambiamento manifestatosi nella costruzione. La scelta dei parametri e l'interpretazione delle misure dinamiche vanno giustificate in relazione alla tipologia di dissesto ed agli scopi delle indagini.

Il monitoraggio rappresenta oggi una delle maggiori sfide del settore topografico, dal momento che necessita di alta precisione e massima affidabilità degli strumenti di analisi e calcolo. Il monitoraggio strutturale rappresenta il metodo più moderno per evitare i numerosi incidenti e disastri derivanti da:

- invecchiamento fisiologico dei manufatti;
- eventi naturali quali frane, sismi, subsidenza, cedimenti del terreno;
- cattivi criteri di costruzione.

La necessità di monitorare gli edifici e le opere infrastrutturali in genere, sta diventando sempre più importante; il monitoraggio consente la misurazione, periodica o continua, del comportamento degli elementi delle strutture civili. Il monitoraggio diventa indispensabile, per la salvaguardia della pubblica incolumità, quando non vi sono risorse economiche per la messa in sicurezza degli edifici, o quando per motivi di tutela del patrimonio storico-artistico non sono possibili interventi massicci necessari per la messa in sicurezza dei monumenti. Tramite il monitoraggio, infatti, è possibile verificare il reale comportamento delle strutture e attivare, in modo automatico, eventuali allarmi al superamento delle soglie di tolleranza. Inoltre quando vi sono interventi di recupero, restauro o adeguamento degli edifici, l'esatta diagnosi, confermata dal monitoraggio, consente di adottare gli interventi più idonei per la soluzione delle problematiche in atto. In sintesi il controllo strutturale dovrebbe avvenire:

1. possibilmente in fase progettuale o almeno esecutiva
2. dopo la costruzione in fase di collaudo
3. in fase di esercizio per strutture importanti e/o a rischio

Nel tempo si controlla l'evoluzione degli *spostamenti* o delle *deformazioni*. Si controllano gli *spostamenti* quando si deve monitorare una struttura *rigida*, mentre si controllano le *deformazioni* quando la struttura è *elastica o deformabile* con legge non lineare o casuale.

## **Rilevamento architettonico e strutturale: stato dell'arte**

Il monitoraggio topografico di grandi strutture, in particolare torri, ponti o dighe, è un tema di ampia rilevanza, dal momento che tali oggetti potrebbero causare un danno immenso in caso di malfunzionamento [Schneider, 2006]. In questo settore le strumentazioni e le tecniche di misurazione sono storicamente basate sull'accurato controllo della posizione di punti discreti, individuati essere rappresentativi del comportamento dell'intera struttura. Fino a pochi anni fa, i laser scanner non erano mai stati impiegati per misurazioni di elevata precisione nel campo dell'ingegneria civile, ad esempio per il monitoraggio delle deformazioni, in quanto le

prestazioni non permettevano di soddisfare i requisiti di precisione di tali applicazioni. Lo sviluppo tecnologico degli ultimi anni, ha permesso invece di utilizzare anche ad uso diagnostico la tecnologia laser scanning che, al pari delle tecniche fotogrammetriche [Maas e Hampel, 2006], consente l'acquisizione della geometria di superfici anche complesse con discrete accuratèzze e soprattutto in tempi molto brevi.

L'uso diagnostico del laser scanner, soprattutto nell'ambito strutturale, risulta particolarmente efficace quando è necessario effettuare analisi sulla geometria di oggetti o strutture, a partire dalla nuvola di punti, per estrarre parametri ed informazioni utili ai fini della valutazione della stabilità o dell'assetto geometrico. Tuttavia, i laser scanner sono ancora oggi scarsamente utilizzati con finalità di monitoraggio strutturale di alta precisione, dal momento che per la maggior parte delle applicazioni la loro accuratezza (almeno qualche millimetro per singola acquisizione) non è sufficiente. Nel contesto architettonico e strutturale (ingegneria civile) vi sono ormai una moltitudine di esperienze, reperibili in letteratura, di utilizzo della strumentazione laser scanner a supporto di indagini geometriche e analisi strutturali ma pochissime con finalità di monitoraggio.

Le prime esperienze volte a valutare le possibilità di utilizzo della tecnologia laser scanner per il monitoraggio delle deformazioni hanno riguardato test di carico di travi, in diversi materiali, in laboratorio [Gordon et al., 2003 e 2004; Cridland, 2004; Roberts e Hirst, 2005]. Negli anni successivi l'interesse dei ricercatori è aumentato ed ha portato ad esperienze maggiormente significative, la maggior parte delle quali riguardante l'analisi delle deformazioni di oggetti o strutture soggette a carichi o pressioni particolarmente elevate: in galleria [Lindenbergh et al., 2005; van Gosliga et al., 2006], su grandi dighe [Grimm-Pitzinger e Rudig, 2005; Zogg e Schulz, 2007; Alba et al., 2006; Schneider, 2006; González-Aguilera et al., 2008], su pareti di chiuse [Schäfer et al., 2004; Hesse e Stramm, 2004; Lindenbergh e Pfeifer, 2005; Tsakiri et al., 2006].

Come si può notare da questa breve ma esaustiva analisi dello stato dell'arte sull'utilizzo della strumentazione laser scanner per il monitoraggio delle deformazioni, ad oggi, non vi sono esperienze significative di monitoraggio strutturale di edifici. Tuttavia, è possibile reperibile in bibliografia un elevato numero di esperienze di utilizzo dei dati laser scanning per la conoscenza geometrica di edifici [Castagnetti e Cielo, 2009; Bertacchini et al., 2008], soprattutto storici o religiosi, da cui avanzare ipotesi o analisi strutturali [Pesci et al., 2011; Bertacchini et al., 2009; Bertacchini et al., 2010; Castagnetti et al., 2011], sulla vulnerabilità statica e dinamica (sismica). Il contributo scientifico e metodologico del settore della geomatica è infatti particolarmente evidente nella fase di conoscenza geometrica del manufatto. A questo scopo metodologie di rilevamento quasi spazialmente continuo (elevatissime risoluzioni), come il laser scanning, hanno rivoluzionato le classiche tecniche di rilievo topografico, permettendo di acquisire grandi moli di dati in tempi brevi.

Il settore dell’analisi strutturale è uno delle macro-aree fondamentali dell’ingegneria civile e non può certo essere schematizzato o riassunto nemmeno nei suoi temi principali. Limitandosi allo specifico problema della valutazione del rischio sismico degli edifici storico artistici costituenti il patrimonio culturale, l’attuale normativa vigente, cioè la Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri del 9 febbraio 2011 “Linee guida per la Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale, con riferimento alle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti del 14 gennaio 2008” regola diversi aspetti. La precisa e accurata conoscenza di una costruzione storica costituisce un presupposto fondamentale al fine di ottenere un’attendibile valutazione del suo comportamento strutturale. Il percorso di conoscenza del manufatto deve essere sviluppato con la finalità di approfondire differenti aspetti (identificazione della costruzione; rilievo geometrico; analisi storica degli eventi e degli interventi subiti; rilievo materico costruttivo e lo stato di conservazione; caratterizzazione meccanica dei materiali) al fine di ottenere un livello di conoscenza adeguato per l’applicazione di modelli di vulnerabilità.

Per queste ragioni, generalmente, lo strumento di analisi che appare più indicato è l’analisi limite nella quale, puntando sull’individuazione dei più probabili meccanismi di collasso della struttura, si può prescindere dalla caratterizzazione meccanica dei materiali costituenti. Questo tipo di analisi valuta la capacità di spostamento ultimo del sistema dopo l’attivazione di un meccanismo e assegna, incrementalmente al cinematismo, configurazioni variate in spostamenti finiti di entità crescente. Un’alternativa all’analisi limite è rappresentata dall’analisi elastica, attraverso il metodo degli elementi finiti (FEM), utilizzata con maggiore confidenza in presenza di strutture flessibili e geometricamente ben modellabili, come per esempio le torri, i campanili o le altre strutture a prevalente sviluppo verticale. La modellazione elastica di queste opere, infatti, agevolata dalla regolarità strutturale, consente sia di analizzare il comportamento flessionale in presenza di azioni orizzontali che di valutare l’importanza dell’interazione terreno-struttura.

## **Caso studio: la Torre Garisenda di Bologna**

L’esperienza di ricerca condotta tratta lo studio dell’assetto geometrico e il confronto multi-temporale di dati laser scanning acquisiti con strumentazione distanziometrica a media portata (entro i 100 m) per l’analisi della Torre Garisenda di Bologna. La Torre degli Asinelli e la Torre Garisenda rappresentano due esempi di strutture di interesse storico divenute il simbolo di Bologna. Oggi la torre Garisenda misura circa quarantotto metri d’altezza ed è caratterizzata da un elevato strapiombo (oltre 3 m) in direzione Est. La struttura della torre, oltre all’evidente strapiombo, presenta un fenomeno di “spanciamento” nella fascia selenitica di rivestimento alla base, particolarmente accentuato proprio sul lato Est.



*Figura 5.1: Vista delle due Torri di Bologna, divenute simbolo della città.*

### **Generalità e inquadramento della problematica**

La valutazione del comportamento strutturale di una costruzione storica deve necessariamente prendere avvio dalla conoscenza della storia costruttiva, analizzando le trasformazioni subite nel tempo, gli eventi eccezionali che l'hanno colpita ed eventualmente danneggiata e i relativi interventi pregressi di restauro e consolidamento. Le cronache affermano che la torre Garisenda fu costruita tra il 1109 e il 1110, come la vicina Asinelli da nobili famiglie ghibelline. La prima destinazione sarebbe stata decisa per scopi militari ma, avendo ceduto la fondazione, l'uso fu mutato. Proprio a causa della pendenza sempre più "importante" e quindi troppo pericolosa, tra il 1351 e il 1360 fu mozzata: ecco perché è conosciuta anche come torre mozza. Dopo alterne vicende, nel XV secolo la torre fu acquistata dalla Società dei Drappieri, che avevano la loro sede proprio di fronte (Palazzo degli Strazzaroli) e che nella piazza antistante tenevano mercato. Alla base della torre vennero poi costruiti altri edifici a servizio dei venditori e anche una chiesetta intitolata a Santa Maria delle Grazie (tutti abbattuti nel tardo Ottocento). Nel 1804, durante il periodo napoleonico, le corporazioni furono soppresse e la proprietà della torre venne acquisita dalla famiglia Ranuzzi. Il rivestimento in bugne di selenite alla base della torre risale alla fine del XIX secolo. Per vie ereditarie pervenne poi ai Malvezzi Campeggi, che un secolo dopo, il 27 agosto 1904, la vendettero al barone comm. Raimondo Franchetti. Il nuovo proprietario, con atto di grande magnanimità la donò al Comune di Bologna, che si impegnò a curarne la manutenzione.

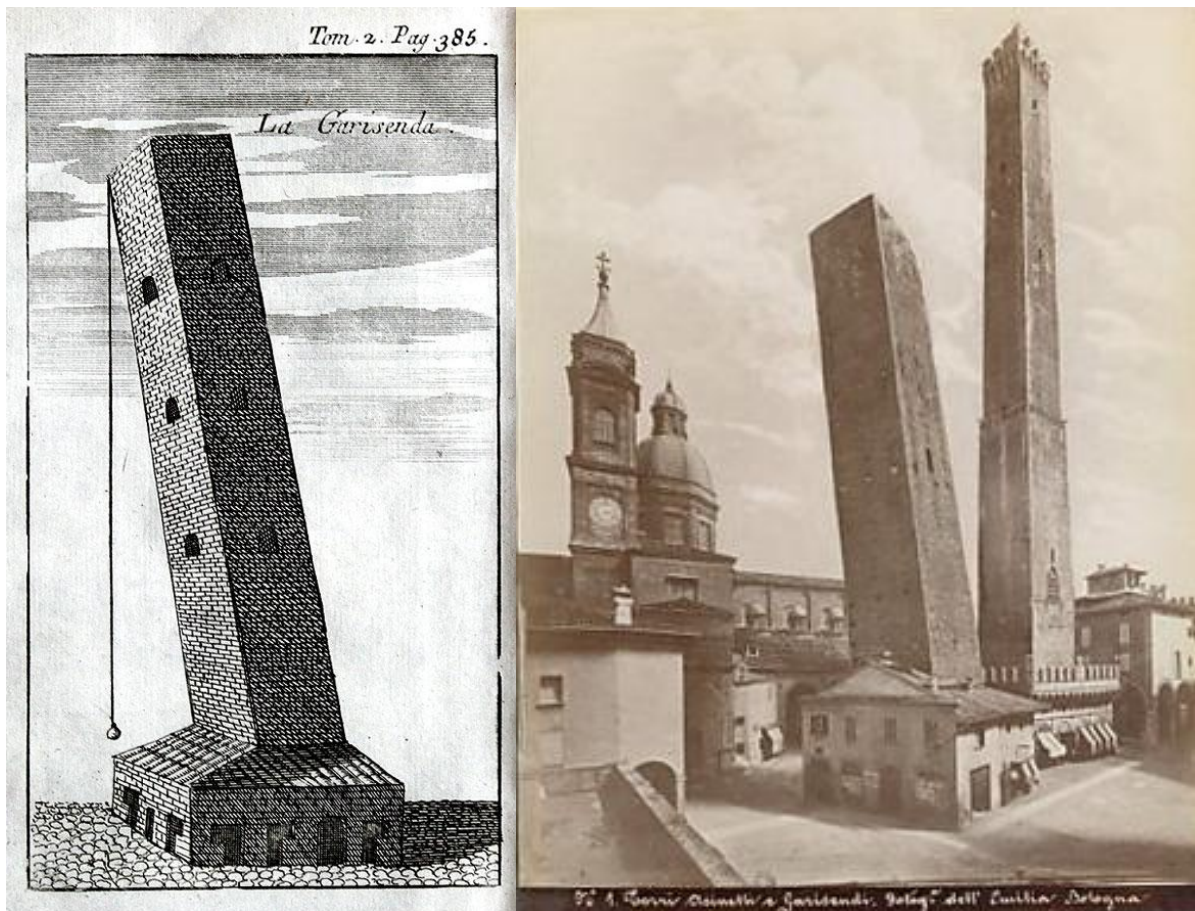


Figura 5.2: Rappresentazioni storiche che testimoniano la forte pendenza della torre Garisenda.

### Prime evidenze ed evoluzione del fenomeno

Le strutture a prevalente sviluppo verticale costituiscono una tipologia costruttiva particolarmente delicata e, per questo, richiedente in genere un'attenta analisi strutturale e, nel caso, un appropriato monitoraggio nel tempo. Le torri degli Asinelli e Garisenda rappresentano due esempi concreti di questa problematica: la torre Garisenda presenta un fortissimo strapiombo che, sebbene sia presente fin dai primi anni successivi alla costruzione, è motivo di preoccupazione e pericolo. Non è invece stato possibile reperire ulteriori informazioni storiche riguardo il ricoprimento in selenite nella fascia inferiore della torre, in ogni caso decisamente più recente rispetto al periodo di costruzione della torre. Tuttavia, l'anomalo spanciamento apprezzabile visivamente sul lato Est, di massima pendenza della torre, rappresenta anch'esso una fonte di preoccupazione sebbene si tratti di un semplice rivestimento delle pareti murarie.



*Figura 5.3: A sinistra, iscrizione sul lato Est in cui Dante ricorda la torre Garisenda nel canto XXXI dell'Inferno della Divina Commedia (vv. 136–141). A destra, fascia di ricoprimento selenitico alla base della struttura.*

Per l'analisi di queste due fonti di preoccupazione (strapiombo della struttura e spanciamento della fascia di ricoprimento) è risultato fondamentale mettere a punto una metodologia di rilievo che permettesse un'accurata determinazione della geometria della struttura, sia nella sua interezza sia nelle sue particolarità. La scelta tecnologica per il rilievo è ricaduta sul laser scanner terrestre perché in grado di ottenere una descrizione morfometrica della struttura completa, accurata e ad alta risoluzione (centrimetrica). Inoltre, è possibile estrarre le informazioni di interesse per l'analisi geometrico strutturale direttamente dal modello tridimensionale.

### **Scopo e modalità di esecuzione delle misure**

La fase di acquisizione delle scansioni per l'analisi geometrica della struttura è stata condotta nel mese di Luglio 2009 con il laser scanner terrestre ad impulsi modello *ScanStation 2* di *Leica Geosystems* (Figura 5.4), in grado di acquisire fino a 50000 punti al secondo con portata massima di 300 m. Una delle caratteristiche peculiari dello strumento è il compensatore biassiale di alta precisione e risoluzione di cui è dotato e che consente la correzione dell'effetto di non esatta verticalità dell'asse primario sulle letture angolari. Le scansioni sono state effettuate da tre posizioni (Figura 5.4) che permettessero di realizzare una parziale sovrapposizione delle pareti della Torre in modo da ottenere, a seguito dell'allineamento, il modello tridimensionale completo. A differenza del rilievo della Torre degli Asinelli, per cui è stato necessario eseguire un'accurata analisi delle posizioni di presa, sulla base della geometria dell'opera e dell'accessibilità dei luoghi e degli edifici adiacenti, il rilievo della Garisenda non ha previsto stazioni in quota, in quanto l'obiettivo peculiare del caso di studio è rappresentato dall'analisi del comportamento assunto dalla fascia inferiore della struttura in gesso selenitico. La risoluzione di acquisizione è stata quindi scelta in modo da ottenere una densità omogenea e sufficientemente significativa (mediamente 1 cm circa) nei primi quattro metri di altezza della Torre.



Figura 5.4: Leica ScanStation 2 e posizioni di scansione della campagna di Luglio 2009.

Il secondo rilievo 3D della struttura è stato realizzato a Dicembre 2014 utilizzando il modello successivo di laser scanner del rilievo precedente: *ScanStation C10* di *Leica Geosystems* (Figura 5.5). Le prestazioni strumentali del nuovo modello sono del tutto identiche al precedente; la sostanziale differenza è rappresentata dalla maggiore portabilità del sistema, che non necessita più di pesanti batterie esterne e collegamento diretto con PC portatile per l'acquisizione. Per il secondo rilievo le scansioni sono state effettuate da quattro posizioni (Figura 5.5) frontali e distanti dai 7 ai 15 metri dalle pareti della struttura. Avendo come principale obiettivo del rilievo il confronto multi-temporale delle acquisizioni sulla fascia di ricoprimento inferiore, analogamente al primo rilievo, le acquisizioni non hanno previsto stazioni in quota e la risoluzione di scansione è stata scelta in modo da ottenere una densità omogenea di circa 8 mm nei primi metri di altezza della struttura.

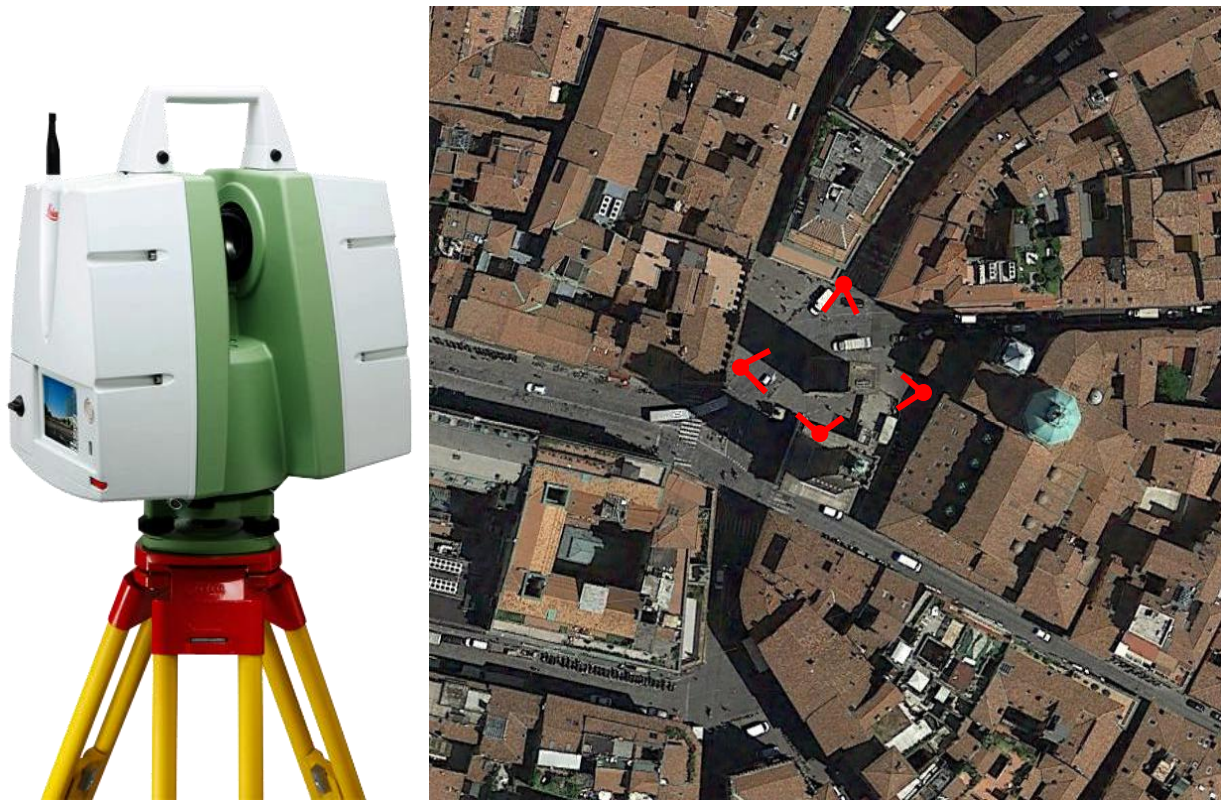


Figura 5.5: Leica ScanStation C10 e posizioni di scansione della campagna di Dicembre 2014.

### Elaborazione delle misure

La generazione del modello tridimensionale a partire dalle singole nuvole di punti rappresenta la fase più importante e delicata dell'intero processo di acquisizione laser scanning. Le nuvole di punti relative ai due rilievi eseguiti (2009 e 2014) sono state elaborate con il software professionale *JRC 3D Reconstructor* (Gexcel), utilizzando la medesima procedura.

Per ogni campagna di rilevamento, ogni nuvola di punti è stata inizialmente analizzata ed elaborata per il filtraggio automatico e manuale dei dati acquisiti, tra cui rumore e *outliers*, elementi estranei all'oggetto del rilievo (passanti, automobili, vegetazione, ecc.) e punti misurati con minore accuratezza. La fase successiva ha permesso l'allineamento delle singole nuvole di punti per la creazione del modello 3D complessivo. Le nuvole di punti sono state inizialmente pre-processate e pre-allineate mediante individuazione di almeno tre punti omologhi su ogni coppia di scansioni. Successivamente, la registrazione delle scansioni è stata perfezionata utilizzando l'algoritmo Iterative Closest Point (ICP) del software, il quale ha permesso di raggiungere precisioni (intese come deviazioni standard) di circa 3 mm, valore ritenuto più che accettabile anche in relazione alla risoluzione spaziale delle scansioni. I modelli 3D complessivi della torre Garisenda alle due differenti epoche di misurazione sono costituiti da oltre 12 milioni di punti e sono inquadrati nel sistema di riferimento relativo ad una delle scansioni effettuate.

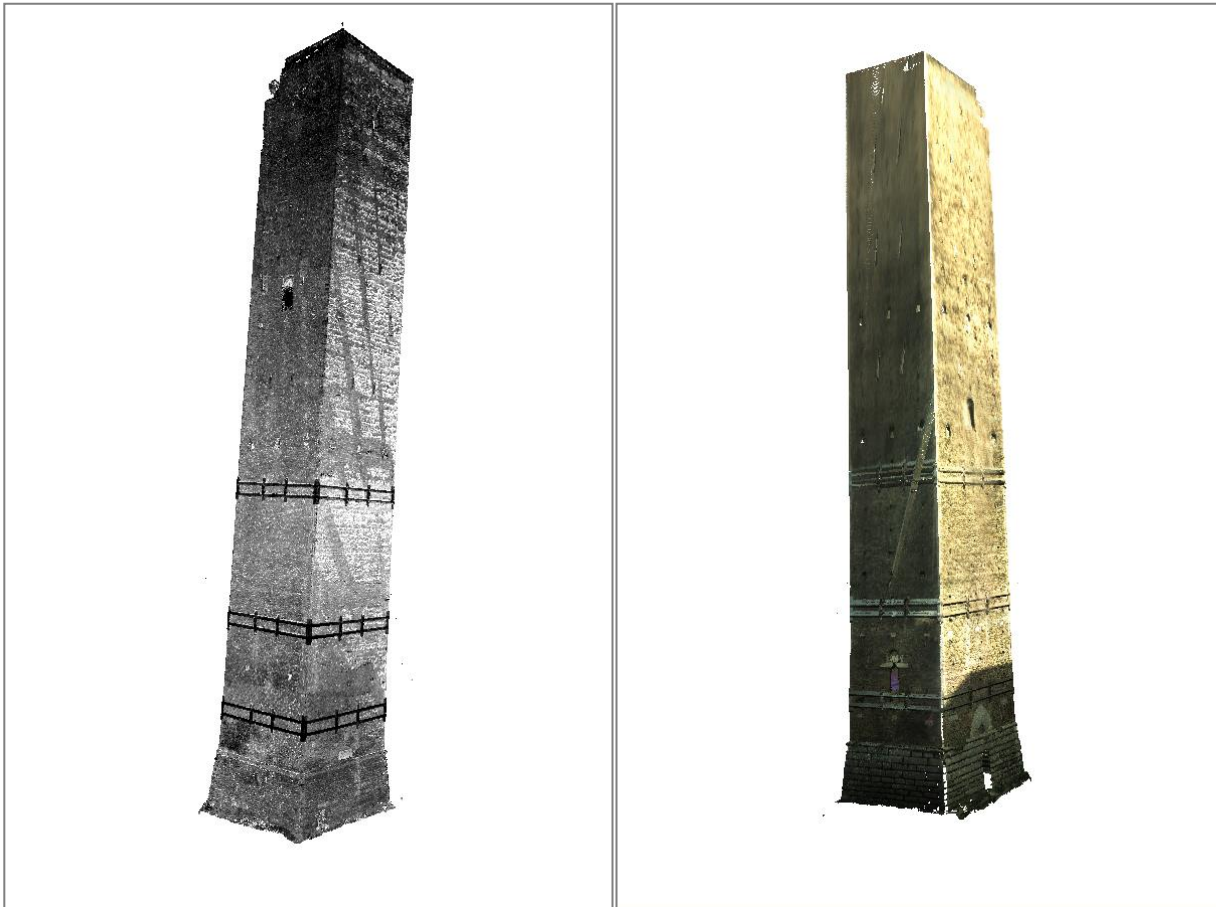


Figura 5.6: Modello 3D a nuvola di punti della torre Garisenda, in falsi colori (a sinistra) e a colori reali (a destra).

Ottenuti i modelli tridimensionali a nuvola di punti della torre alle due epoche, per poterne effettuare un confronto significativo se ne rende necessario l'allineamento nel medesimo sistema di riferimento. Non avendo potuto predisporre fin dal primo rilievo né sistemi di riposizionamento della strumentazione né sistemi di mire o target in posizioni fisse e stabili rispetto all'ipotetico movimento da indagare, è necessario individuare una metodologia differente, basata sui soli dati laser scanning acquisiti, alternativa a quelle classiche del monitoraggio. La miglior soluzione individuata è basata sull'individuazione di un sistema di riferimento relativo univocamente determinabile a tutte le epoche di acquisizione. È stato infatti ritenuto che gli spigoli della catena di contenimento inferiore in corrispondenza della facciata Est potessero essere considerati solidali alla struttura e privi di movimenti relativi significativi (sicuramente inferiori alla precisione di acquisizione), pertanto utilizzabili per la definizione del sistema di riferimento per le analisi geometriche. Tuttavia, non riuscendo ad individuare con sufficiente (millimetrica) precisione i medesimi punti scelti per la definizione del sistema di riferimento sulle scansioni delle due epoche, è stato necessario affinare l'allineamento utilizzando l'algoritmo automatico ICP sulla porzione di struttura nell'intorno delle prime catene di contenimento. Il risultato dell'allineamento ha raggiunto il valore di 3 mm, al pari di quello ottenuto per la registrazione delle scansioni di ogni campagna di misura.

Infine, per valutare il comportamento geometrico della fascia selenitica nell'arco temporale dei 5 anni tra la prima e la seconda acquisizione, si è resa necessaria la generazione del Modello Digitale a Superfici (DSM) a maglie triangolari (*mesh*) della porzione di base struttura. Questo passaggio di elaborazione è stato eseguito con il software commerciale Rapidform XOR, poiché permette la scelta tra vari algoritmi di triangolazione. Le nuvole di punti sono state sottoposte all'algoritmo di *Mesh Construction*, impostando quale accuratezza dello scanner un valore dell'ordine di grandezza di 3 mm. Il prodotto ottenuto da ogni nuvola di punti è un modello a *mesh* che presenta alcune difettologie, tra cui le più evidenti sono le lacune dovute a mancanze eccessive di dati. Si è comunque scelto di non spingere la procedura di modellazione 3D oltre questo primo risultato in quanto ogni ulteriore passaggio avrebbe richiesto l'utilizzo di algoritmi di elaborazione ed interpretazioni, anche personali, del dato acquisito che avrebbero introdotto ulteriore incertezza rispetto al dato metrico direttamente acquisito dalla strumentazione.

### **Analisi geometriche e variazioni di assetto**

A partire dai modelli digitali della torre alle due epoche è stato possibile le informazioni di interesse relative alle caratteristiche geometriche. In prima analisi lo studio è stato volto all'estrazione di informazioni inerenti la struttura considerata nel suo complesso (principalmente altezza e strapiombo). Successivamente le analisi sono state specificatamente rivolte ad indagare il comportamento della fascia selenitica alla base della torre, cercando di valutare l'eventuale variazione dell'effetto di "spanciamento" particolarmente visibile ed apprezzabile sul lato Est.

#### ***Analisi geometriche sulla struttura***

Nel caso di strutture snelle come le torri un dato significativo e particolarmente importante è il valore dello strapiombo, in relazione con l'altezza complessiva e le dimensioni della sezione orizzontale. L'analisi della geometria e la valutazione dell'inclinazione sono state eseguite tramite la generazione di sezioni dal modello 3D della prima campagna di misura e la successiva elaborazione in ambiente CAD. Il software *JRC 3D Reconstructor*, effettuando in background un processo di *meshing* automatico e locale, permette l'estrazione di sezioni (polilinee) direttamente esportabili in formato DXF dal modello a nuvola di punti.

L'altezza della Torre è stata determinata direttamente dal modello digitale 3D a nuvola di punti come lunghezza del segmento congiungente il baricentro della sezione di base (in corrispondenza della soglia della porta sul lato Ovest) e quello della sezione di sommità. Questa scelta è dovuta al fatto che, l'elevata pendenza della struttura e la mancata orizzontalità del basamento avrebbero reso la determinazione dell'altezza della torre di difficile interpretazione se effettuata in modi diversi. Con il metodo seguito, invece, è stato calcolato il valore più attendibile: il risultato di 47.77 m è da considerarsi l'effettiva altezza della torre, determinata come lunghezza del segmento dell'asse baricentrico medio.

L'analisi di verticalità della torre è stata eseguita generando delle sezioni inclinate (25) ad intervalli di quota regolari (di circa 2 m), dalla base alla sommità. La doppia simmetria della struttura ha permesso di definire il baricentro geometrico di ogni sezione nello spazio 3D. Il piano utilizzato per sezionare il modello della struttura è ortogonale alla direzione dell'asse baricentrico medio precedentemente determinato. La scelta di utilizzare delle sezioni inclinate, in luogo a sezioni orizzontali, trova giustificazione nell'elevato valore di inclinazione della Torre. Rispetto alla direzione verticale, infatti, l'asse baricentrico medio risulta inclinato verso Est di  $3.97^\circ$ , determinando un fuori piombo complessivo di 3.27 m (Figura 5.7). Il valore di strapiombo è effettivamente molto elevato soprattutto se considerato in relazione alle dimensioni trasversali della torre (circa 7 m di lato). Inoltre, dall'analisi effettuata non si registra nessuna particolare curvatura dell'asse baricentrico, che risulta quindi sostanzialmente rettilineo, a dimostrazione che la pendenza della torre è pressoché costante (flessioni) e non subisce nemmeno variazioni planimetriche (torsioni). Una ricostruzione più accurata dell'eventuale curvatura dell'asse baricentrico può essere effettuata attraverso la definizione di sezioni ad un passo più ravvicinato senza complicare la procedura di analisi.

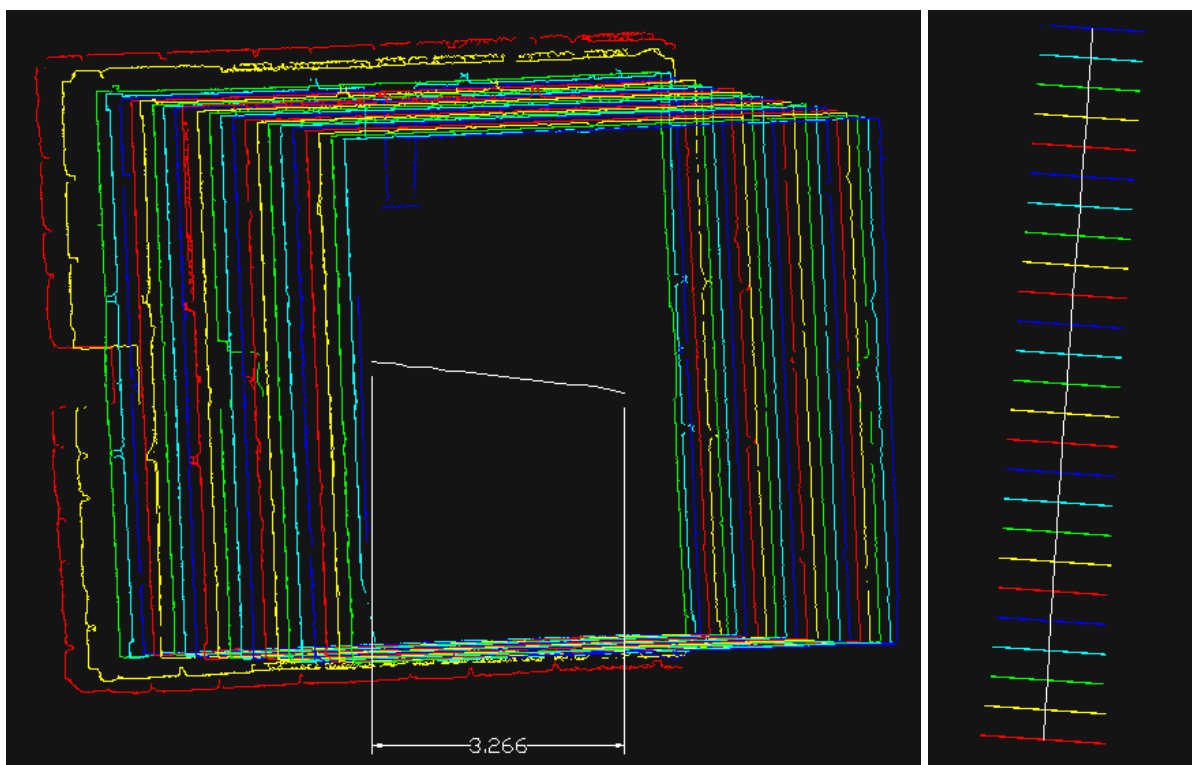


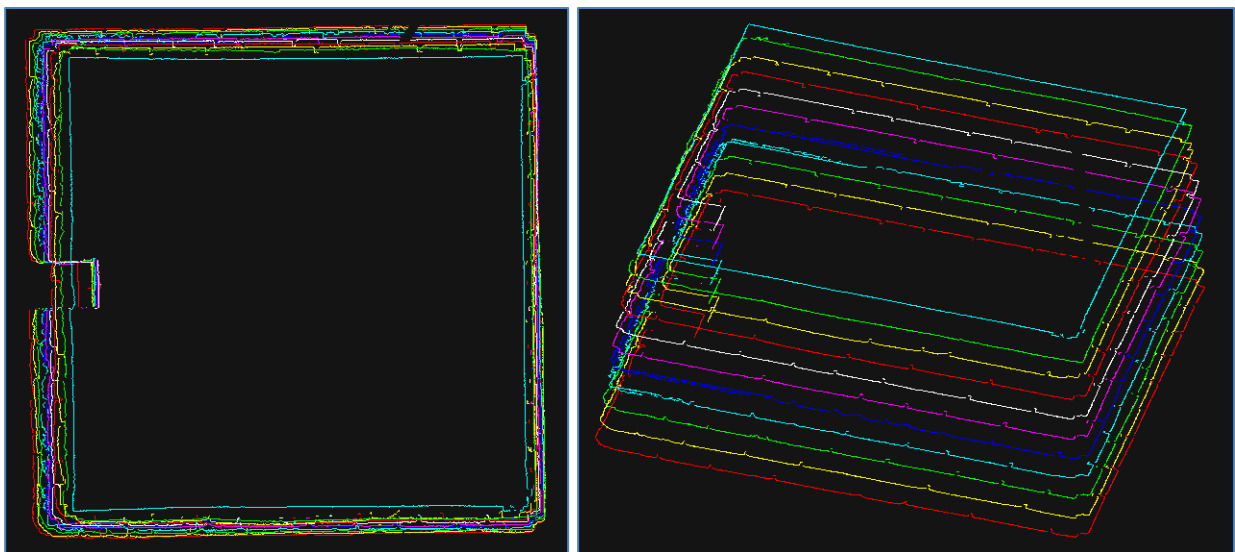
Figura 5.7: Rappresentazioni bidimensionali del fuori piombo complessivo della torre Garisenda.

In rapporto ai brevi tempi di rilievo (20% del totale) ed elaborazione (80% del totale), tale metodo di indagine e restituzione delle caratteristiche geometriche permette un'analisi accurata della quota e dell'inclinazione (accuratezza centimetrica) di strutture caratterizzate da un'altezza elevata e quindi non rilevabili con altre tecniche in modo semplice. Le valutazioni strutturali, fatte in base ad analisi di questo tipo sul modello tridimensionale, sono numerose. Oltre all'analisi di strapiombo, che diventa interessante in strutture tipo le torri, possono essere

estratte altre considerazioni. Un tale studio può risultare necessario a seguito di indicazioni degli ingegneri strutturalisti per indagini più approfondite (modellazione agli elementi finiti, ecc.) [Castagnetti et al., 2011].

### ***Comportamento della fascia di ricoprimento***

Per valutare il comportamento geometrico della fascia selenitica, corrispondente ai primi 3.5 m circa di altezza della struttura, i modello 3D acquisiti alle due differenti epoche sono stati sezionati tramite il medesimo piano inclinato (ortogonale all'asse medio) ogni 35 cm, dimensione all'incirca corrispondente all'interesse verticale di posizionamento dei blocchi di ricoprimento. Le sezioni generate, esportate in ambiente CAD come polilinee 3D (Figura 5.8), enfatizzano un comportamento singolare assunto dal lato Est della struttura. Nei lati Nord, Sud e Ovest, le sezioni evidenziano un'inclinazione sostanzialmente omogenea e costante delle rispettive pareti verso l'interno della Torre, procedendo dal basso verso l'alto. Per quanto riguarda il lato Est, invece, non può essere fatta la stessa osservazione: l'inclinazione media appare decisamente inferiore e non sembra nemmeno essere omogenea su tutta l'estensione della facciata.



*Figura 5.8: Rappresentazione tramite sezioni ortogonali all'asse baricentrico delle anomalie presenti sulla fascia di ricoprimento della torre Garisenda.*

Per meglio indagare il presunto effetto geometricamente anomalo di “spanciamento” della fascia inferiore della Torre è stato deciso di calcolare per ogni lato della torre le distanze relative tra la nuvola di punti di ogni parete, alle due epoche di analisi, e il proprio piano di *best fit*, calcolato al primo istante temporale, assunto come riferimento. L'algoritmo di *inspection* (verifica) utilizzato è quello implementato in *CloudCompare v. 2.5.4.1*, software *open source* con buone basi scientifiche che permette di ottenere analisi statistiche sulle mappe di spostamento calcolate. Per poter effettuare un confronto significativo ed immediato (Figura 5.9), i punti appartenenti alla fascia selenitica delle quattro facciate della Torre sono stati

colorati secondo la medesima scala cromatica, variante tra il blu e il rosso per distanze comprese tra  $-7$  e  $+7$  cm da ciascun piano di riferimento. Il colore verde evidenzia quindi i punti che si trovano lungo il piano medio della parete, il blu quelli retrostanti e il rosso quelli antistanti che indicano quindi i fenomeni di spanciamento. Si riporta nel seguito il confronto dell'analisi relativa ad ogni lato della torre alle due differenti epoche di misura.

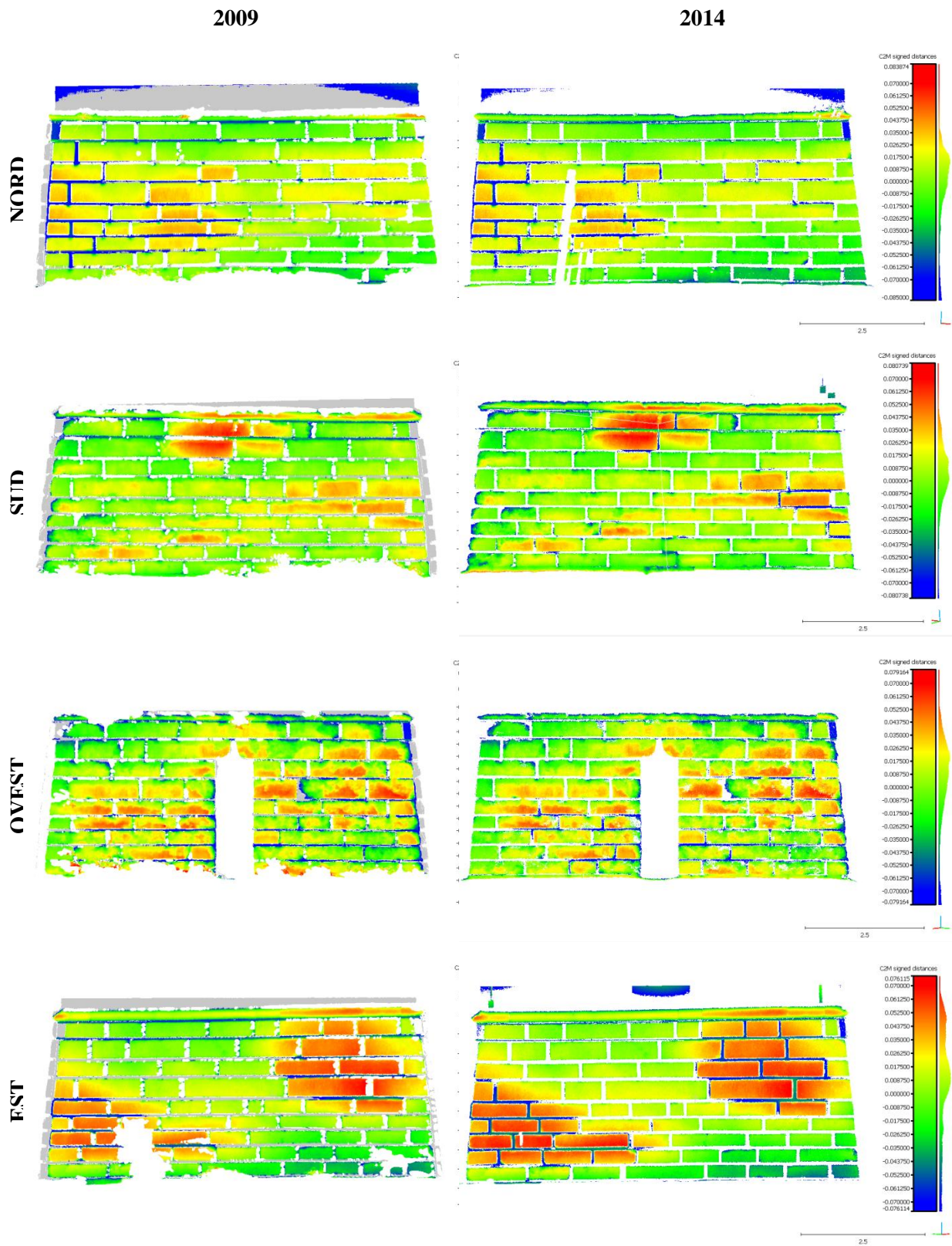
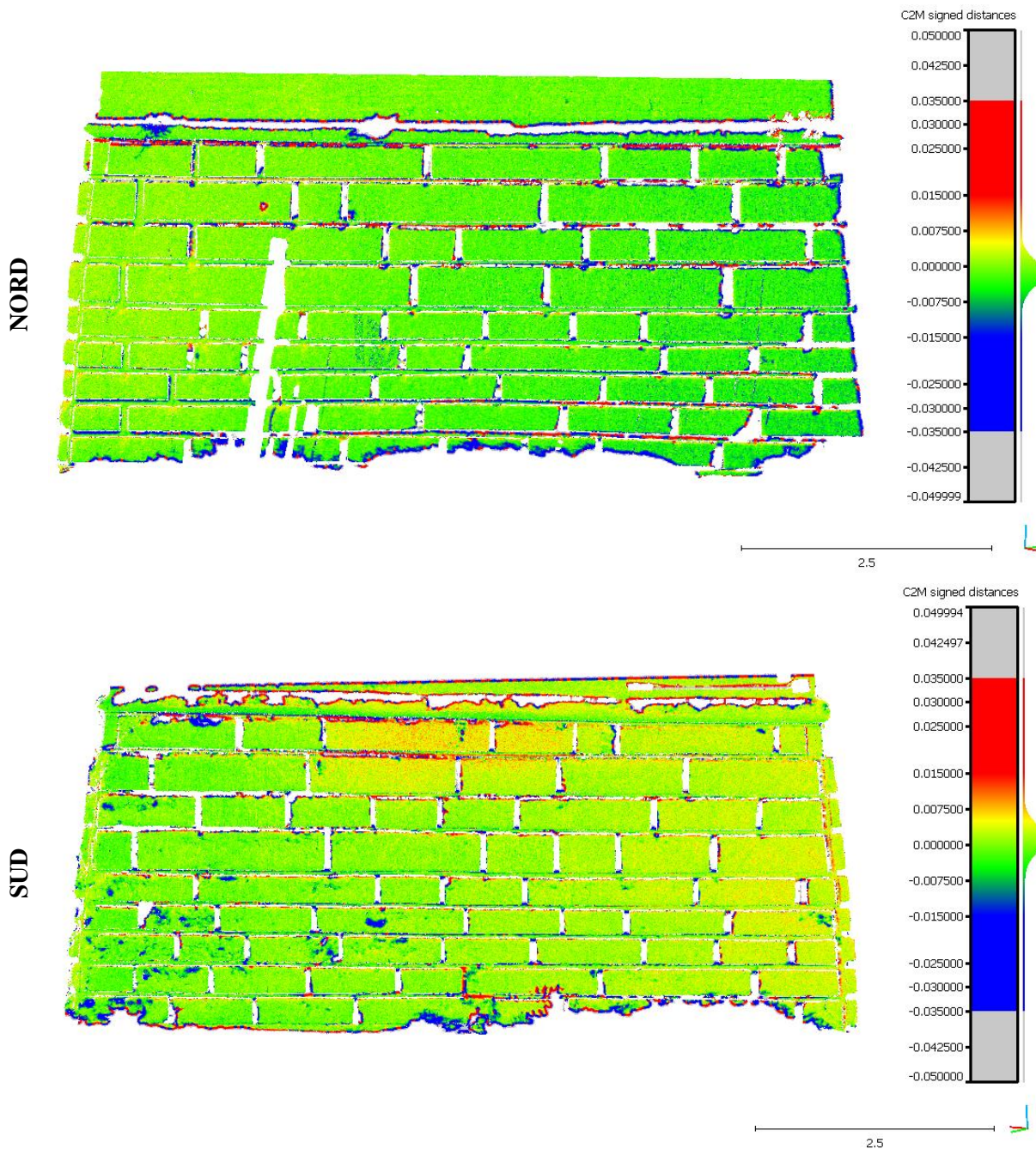


Figura 5.9: Analisi geometrica del fenomeno di “spanciamento” sulla fascia di ricoprimento selenitico. La colorazione, dal blu (-7 cm) al rosso (+7 cm), indica le distanze dei punti acquisiti dal piano di best fit della parete, calcolato dalle nuvole di punti della campagna del 2009.

### Valutazione delle deformazioni

Dall'analisi effettuata tramite il piano medio della parete non è possibile apprezzare differenze sostanziali tra le colorazioni delle nuvole di punti dei quattro lati della torre ai due istanti temporali. Nel tentativo quindi di individuare con maggiore precisione eventuali differenze tra i due modelli 3D è stato necessario analizzare le scansioni più recenti in riferimento a quelle di Luglio 2009, utilizzate come riferimento. I risultati delle analisi effettuate sulle quattro facciate della torre tramite il software *CloudCompare* sono riportati di seguito.



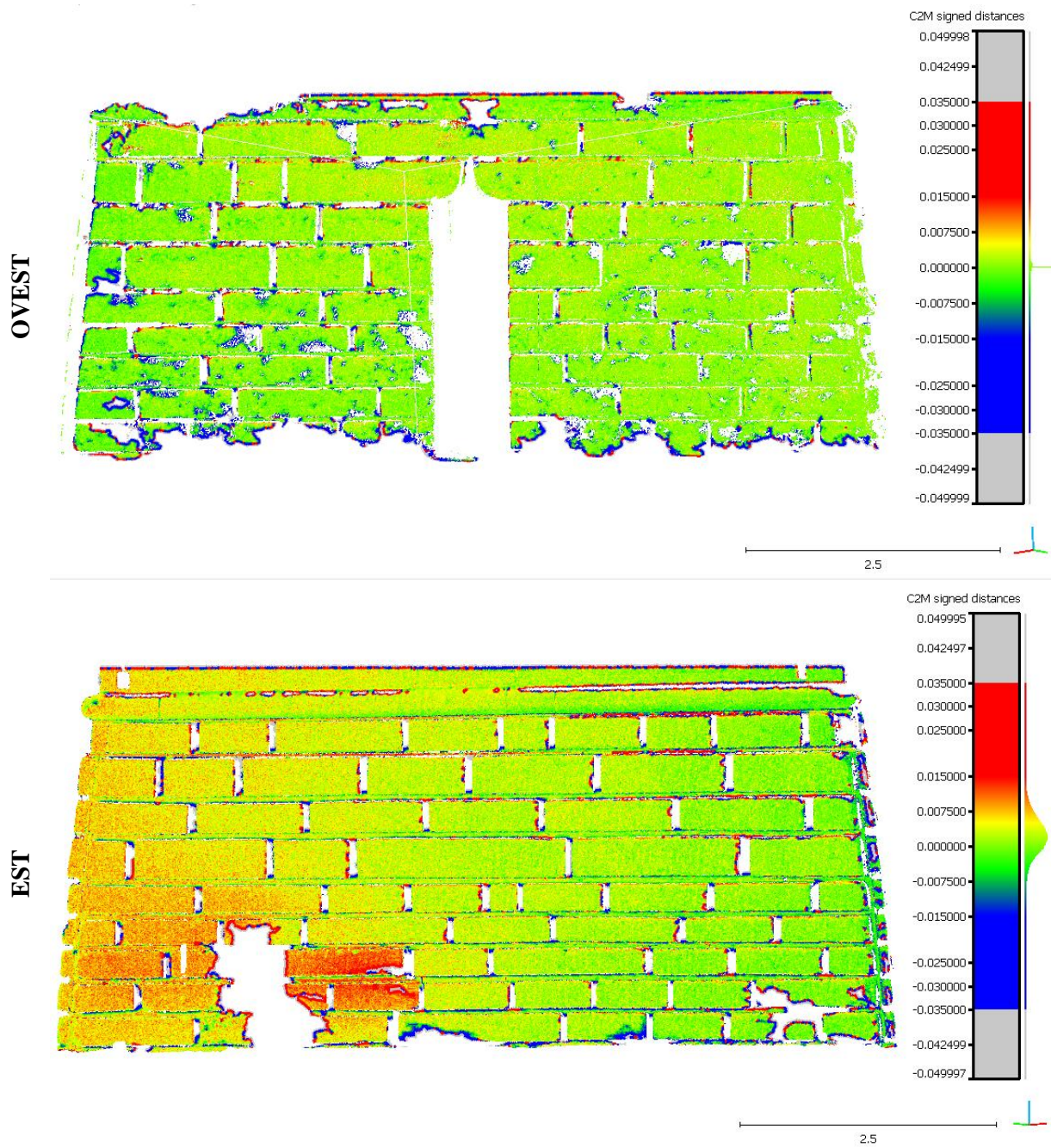


Figura 5.10: Confronto tra le campagne del 2009 e del 2014 del fenomeno di “spanciamento” sulla fascia di ricoprimento selenitico. La colorazione, dal blu (-3.5 cm) al rosso (+3.5 cm), indica le distanze relative tra i due modelli 3D.

## Validazione e interpretazione dei risultati

L'approccio adottato per lo studio di una struttura a prevalente sviluppo verticale ha permesso di estrarre interessanti informazioni relativamente alla geometria strutturale (altezza e strapiombo) e a peculiari comportamenti di specifiche parti della struttura (rivestimento alla base). Tale possibilità consegue all'ottenimento di modello 3D complessivo ed accurato della struttura; occorre rimarcare come, in fase di elaborazione e, in misura ancora maggiore, di analisi è richiesta un'accurata definizione degli obiettivi da conseguire e delle scelte da adottare. I risultati ottenuti dal rilievo sono stati confrontati con quelli pubblicati da Cavani all'inizio del secolo scorso [1912; 1913; 1917; 1919]. Dal confronto su circa un secolo di storia emerge una variazione media dello strapiombo di circa 1.3 mm/anno: entità relativamente piccola ma non trascurabile soprattutto se rapportato all'altezza della torre e al già consistente valore assoluto. Il confronto tra i risultati dell'analisi geometrica sull'intera struttura alle due epoche non permette di evidenziare variazioni significative della pendenza, se rapportate all'accuratezza del metodo di rilevamento e di indagine adottato.

L'analisi effettuata sul rivestimento selenitico ha confermato invece un'evidente fenomeno di spanciamento sul lato Est, assolutamente non così evidente sulle altre facciate. Sul lato Est si registrano infatti scostamenti rispetto al piano medio con valori massimi nell'ordine di 7-8 cm su ampie zone (superiori al singolo blocco di rivestimento), localizzate in particolare in corrispondenza dello angolo inferiore verso Sud e della parte alta verso Nord. Il confronto multi-temporale eseguito sui quattro prospetti per l'individuazione di eventuali deformazioni sull'arco temporale di 5 anni conferma e valida l'analisi precedente: è infatti possibile affermare che sulla parete Est sia presente un fenomeno di spanciamento in, seppur lenta, evoluzione. Nonostante i risultati numerici siano al limite della significatività del metodo (precauzionalmente considerata centimetrica), il fenomeno di rigonfiamento è chiaramente in aumento nella porzione Sud del prospetto Est, proprio nella direzione di pendenza della Torre. Analizzando poi il prospetto Sud, sebbene la differenza di colorazione sia veramente bassa, si registra una tendenza di aumento dello spanciamento anche nella porzione Est del prospetto Sud, a conferma che lo spigolo di Sud-Est della torre è quello maggiormente sollecitato probabilmente a causa della forte pendenza della struttura in quella direzione.

Sebbene l'anomalia del lato Est della fascia selenitica della Torre non si sia incrementata significativamente nell'arco di tempo di cinque anni, dimostra comunque una situazione potenzialmente critica che deve essere controllata nel tempo mediante un monitoraggio che può e deve poter essere perfezionato anche tramite l'utilizzo integrato di strumentazioni differenti. In quest'ottica, è stato ipotizzato di posizionare solidalmente alla struttura dei *marker* appositamente ideati per poter effettuare dei controlli puntuali con un grado di precisione e accuratezza decisamente superiore a quello ottenibile da semplici scansioni delle facciate.

## **Rilevamento a media portata: potenzialità e problematiche**

L'analisi strutturale delle costruzioni storiche in muratura deve, in genere, affrontare difficoltà peculiari quali, ad esempio, l'incerta caratterizzazione delle proprietà meccaniche del solido murario, le scarse conoscenze sulla configurazione originale della struttura (trasformazioni nel tempo), la presenza di fasi costruttive eterogenee o di interventi pregressi di restauro e consolidamento che possono aver modificato il comportamento strutturale originario. A queste problematiche si aggiungono quelle specifiche di una struttura a torre: il peso proprio, spesso già ai limiti, ma soprattutto la presenza di eventuali fuori piombo. L'evento sismico, in casi come questi, rappresenta in genere lo scenario di carico più gravoso per la costruzione. In quest'ottica appare quindi corretto riferirsi alle "Linee guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale" che sottolinea l'importanza della conoscenza della costruzione al fine di ottenere un'attendibile valutazione del suo comportamento strutturale. Tuttavia, per le numerose e varie problematiche annunciate, per condurre una precisa ed accurata analisi strutturale, dovrebbero essere condotte oltre al rilievo geometrico, tradizionale e/o laser scanning, indagini geologico-geotecniche sulle caratteristiche meccaniche dei terreni di fondazione per stimare le condizioni di vincolo da essi fornite alla costruzione, verifiche ed indagini sulla caratterizzazione della tessitura muraria mediante l'utilizzo della tecnica radar penetrante (GPR), stime sperimentale delle caratteristiche meccaniche, mediante carotaggio continuo con estrazione di campioni nel rispetto del monumento.

### ***Valutazione delle potenzialità***

Allo stato attuale, appare evidente come la tecnologia laser scanning permetta di ottenere il miglior compromesso per il rilievo geometrico di strutture complesse, in termini di completezza (elevata risoluzione), accuratezza (centimetrica) e tempistica.

Le difficoltà del rilievo geometrico sono legate all'accessibilità di alcuni spazi, quali sottotetti, volumi tra false volte o controsoffitti e coperture, oppure all'eccessiva altezza degli elementi, come nel caso di campanili, torri, volte in una navata; la strumentazione laser scanner consente invece un rapido rilievo e una restituzione accurata anche nel caso di elementi complessi, eventualmente integrabili con informazioni derivate da altre tecniche di indagine diretta (endoscopia) o indiretta (termografia, georadar, ecc.) per gli spazi non accessibili (tecniche "non topografiche").

Al fine di una corretta analisi strutturale dovrà essere rilevato e rappresentato l'eventuale quadro fessurativo, in modo tale da consentire l'individuazione delle cause e delle possibili evoluzioni delle problematiche strutturali dell'organismo. Le potenzialità della tecnica laser scanning appaiono in questo caso evidenti: l'analisi quali-quantitativa del quadro fessurativo può essere condotta direttamente dal modello tridimensionale, eventualmente con l'aiuto delle informazioni radiometriche (riflettanza e RGB) acquisite contestualmente a quelle metriche. Le lesioni potranno essere classificate secondo la loro geometria (estensione, ampiezza) ed il loro

cinematismo (distacco, rotazione, scorrimento, spostamento fuori dal piano). In maniera simile le deformazioni andranno classificate secondo la loro natura (evidenti fuori piombo, abbassamenti, rigonfiamenti, spancamenti, depressioni nelle volte, ecc.) ed associate, se possibile, ai rispettivi meccanismi di danno.

Il monitoraggio strutturale attraverso tecnologia a scansione laser risulta essere molto più veloce rispetto ai metodi classici, praticamente automatico e spazialmente continuo, ma non è assolutamente corretto affermare che solo per questi motivi sia più preciso ed accurato. Il progetto di monitoraggio richiede una preliminare interpretazione del meccanismo di dissesto, che può spesso essere eseguita grazie alla meccanica dell’equilibrio delle murature considerate come corpo rigido; ciò permette di individuare una serie di punti notevoli da controllare. Risulta allora strategico il progetto della posizione dei punti da monitorare e dei punti di stazione da cui effettuare le misure. In alcuni casi, quando l’eventuale dissesto è ben compreso e possono essere definite soglie di sicurezza, il monitoraggio può rappresentare un’alternativa all’intervento, a vantaggio della conservazione. Ulteriore considerazione che avvalora ancor più l’importanza delle tecniche di rilevamento metrico: se ben comprese e rese affidabili, esse possono garantire la “non necessità” dell’intervento sull’edificio bene culturale.

### ***Analisi delle problematiche***

Nonostante il rilievo geometrico serva a definire la geometria del modello da utilizzare per le analisi strutturali, compresi i vincoli ed i carichi agenti, risulta evidente la mancanza di software specifici in grado di utilizzare a pieno l’elevato numero di informazioni risultanti da un rilievo laser scanning ad elevata risoluzione. La rappresentazione dei risultati del rilievo è quasi sempre effettuata attraverso piante, alzati e sezioni, come è sempre stato fatto, oltre che con particolari costruttivi di dettaglio. La restituzione tridimensionale del rilievo è utile ai fini della modellazione strutturale ma al momento inutilizzabile in modo diretto con i software di calcolo. Al lato pratico, il rischio è quindi quello di acquisire un elevato numero di informazioni geometriche inutilizzabili per la simulazione del comportamento strutturale.

Una problematica particolarmente evidente nel caso di rilievi di strutture a prevalente sviluppo verticale, come torri e campanili, è legata agli elevati angoli di incidenza del raggio laser qualora non sia possibile effettuare acquisizioni da stazioni in quota, ad esempio da edifici adiacenti. Questa tipologia costruttiva costituisce un insieme rilevante del patrimonio costruito in Italia, spesso collocato in contesto urbano, per cui le distanze di acquisizione sono spesso brevi (15-30 m) e determinano angoli di incidenza anche prossimi ai 70°, che influiscono negativamente sulla risoluzione e sull’accuratezza delle misure effettuate sulla parte sommitale della struttura. Inoltre, il comportamento strutturale di questa tipologia di strutture è fortemente dipendente dalla presenza nella parte sommitale di elementi architettonici snelli (guglie, vele campanarie, merlature, ecc.) o comunque vulnerabili (celle campanarie), difficilmente rilevabili da sole stazioni a terra.

Tuttavia, considerata la minor complessità geometrica e costruttiva di questa tipologia di strutture, il loro comportamento statico e dinamico può essere in genere studiato con un'adeguata precisione, attraverso modelli strutturali semplificati. La relativa chiarezza dello schema strutturale e del comportamento di questa tipologia strutturale consente, in molte situazioni reali, di ricondurre la struttura a modelli semplici e limitare ad alcuni casi tipici i meccanismi di danno e collasso.



## 6. Indagini in ambito artistico: danneggiamento di opere scultoree

---

L'opera d'arte non è un'entità fissa e immutabile nel tempo: il modificarsi delle funzioni con cui nacque, il sorgere di nuove esigenze, gli interventi dell'uomo, l'azione degli agenti esterni hanno operato nel tempo su di essa una serie di alterazioni; l'opera giunta sino a noi si presenta pertanto come il risultato complesso e stratificato delle vicende cui è stata sottoposta nel corso della sua storia. Un problema particolare è costituito dalla conservazione delle sculture all'aperto, minate dai danni provocati dall'inquinamento e dagli agenti atmosferici, e per le quali, proprio per non alterare l'originaria unità architettura-scultura, si tende a un'azione preventiva di consolidamento e manutenzione in loco, rifiutando, se non in casi disperati, l'asportazione delle sculture originali, sostituendole magari con copie.

Negli ultimi anni il campo dei Beni Culturali ha suscitato grande interesse da parte della comunità scientifica: l'UNESCO, fra le maggiori autorità del settore, pone sempre maggiore attenzione sulle tematiche della documentazione digitale al fine di garantirne la trasmissione alle generazioni future [Guidelines for the preservation of digital heritage, 2003]. La documentazione, intesa come sistematica attività di registrazione e gestione delle informazioni, vuol dire conoscere per conservare e valorizzare, rendendo i beni culturali maggiormente fruibili per la popolazione e creando un sistema di coscienze che ne impedisca irrimediabili perdite: è impensabile qualsiasi attività di gestione del patrimonio che non si basi su una solida base di conoscenze; assicura inoltre una migliore progettazione per gli interventi di gestione di recupero, monitorando costantemente i cambiamenti nel corso del tempo, talvolta anticipando avvenimenti catastrofici e inaspettati che portano a perdite irrimediabili del patrimonio culturale.

Le nuove tecnologie afferenti alla geomatica e all'informativa offrono oggi notevoli potenzialità applicative per la documentazione dei Beni Culturali, sia per quanto riguarda le fasi di acquisizione del dato, sia per tutte le fasi di rappresentazione, diffusione e comunicazione multimediale. Le tecnologie digitali, infatti, offrono la possibilità di ottenere prodotti innovativi non solo dalle attività di rilievo, ma anche nella rappresentazione e nella visualizzazione, raggiungendo livelli di descrizione morfometrica estremamente accurata di siti, strutture o singoli oggetti. Tra queste nuove discipline si inserisce proprio il Restauro Virtuale; con questa espressione si identificano le metodologie integrate di *Computer Graphic*, sia bidimensionale sia tridimensionale, finalizzate alla restituzione di un bene artistico, archeologico o architettonico nella sua completa, o quasi, integrità [Limoncelli, 2011]. Il Restauro Virtuale rappresenta oggi una valida opportunità di analisi per archeologi, restauratori e storici dell'arte. Molte opere, infatti, non possono essere sottoposte a restauro, a volte per mancanza di soluzioni tecniche adeguate, a volte a causa di cattivi interventi precedenti, altre volte ancora per carenza

di precise documentazioni che consentano di comprendere come l’opera possa essere ricostruita, in altri casi ancora per impossibilità fisica dell’intervento. In digitale è attualmente possibile disporre della massima libertà d’intervento per creare ipotesi di restauro per dipinti, affreschi, mosaici ma anche per architetture e oggetti tridimensionali. Attraverso elaborazioni digitali effettuate con programmi di *computer graphic* è possibile ottenere delle ricostruzioni virtuali a video o in stampa.

Parallelamente si sono modificate le metodologie legate alla diffusione e alla fruizione della conoscenza scientifica vedendo ormai nel web il mezzo più idoneo, non solo per gli addetti ai lavori, ma per ogni utenza. Siti e portali web sono oggi il maggior veicolo per la diffusione delle conoscenze tramite applicazioni multimediali interattive, immediatamente accessibili da tutto il mondo e con bassissimi costi di gestione e distribuzione, capaci di raggiungere ampie fasce di pubblico senza limiti spazio-temporali. Il web si pone dunque come strumento di enorme capacità per la divulgazione della conoscenza, dello scambio della ricerca, nella didattica, nell’informazione dedicata. La disponibilità on-line di banche dati tematiche aggiornate e di facile reperibilità costituiscono inoltre un supporto irrinunciabile per le attività di pianificazione per interventi di programmazione territoriale, di conservazione e gestione del patrimonio culturale.

### **Documentazione 3D a scopo conservativo: stato dell’arte**

La conservazione del patrimonio culturale mediante archiviazione digitale è diventato un obiettivo globale e una sfida per i ricercatori scientifici. Il rilievo digitale e la creazione di modelli tridimensionali di oggetti, opere e scene complesse ha ricevuto negli ultimi anni un forte interesse da parte della comunità scientifica e del settore commerciale. Si assiste sempre più a restituzioni virtuali dell’ambiente che ci circonda, con ambientazione e visualizzazioni 3D prodotte per varie applicazioni quali la documentazione, la conservazione, il restauro virtuale, la simulazione, la didattica, l’animazione, la cartografia, la gestione territoriale, il monitoraggio.

Nel campo dei Beni Culturali, la documentazione geometrica di un oggetto o di un sito può essere definita come l’azione di acquisizione, elaborazione, presentazione e memorizzazione dei dati necessari per la determinazione, in un dato momento, della posizione, della forma e delle dimensioni dell’oggetto o del sito rilevato nello spazio tridimensionale [UNESCO, 1972]. Scopo della documentazione 3D attraverso tecnologie digitali è quindi quello di memorizzare lo stato attuale dei beni architettonici, archeologici, artistici, così come sono stati modellati nel corso del tempo e costituisce il necessario background per gli studi sul loro passato, sul loro futuro e la loro conservazione. Inoltre, il rilevamento 3D permette di disporre di modelli digitali del patrimonio culturale, in caso di perdite o danneggiamenti [Gruen et al., 2004].

## **Tecniche di documentazione 3D**

Anche in questo settore, il rilievo metrico richiede un approccio sistematico: l'impiego di attrezzature sofisticate non mette al riparo da errori se non è accompagnato da una metodologia corretta. A tal fine, diverse soluzioni tecnologiche e diversi metodi di rilevamento 3D sono state testate e sviluppate per varie tipologie di oggetti [Pavlidis, 2007]. La creazione di modelli 3D di oggetti o luoghi può essere affrontata seguendo diverse metodologie e approcci, che possono essere generalmente raggruppati in due grandi famiglie. I metodi *reality-based* rilevano e restituiscono, attraverso sensori attivi o passivi, la realtà. Queste metodologie, a contatto o non, misurano e modellano gli artefatti reali riproducendo un modello 3D virtuale e digitale che tende ad essere un calco della realtà o una sua schematizzazione in rapporto ad una determinata finalità e quindi secondo specifici parametri. I metodi di computer grafica, invece, generano modelli tridimensionali, attraverso software dedicati, a partire da una semplice idea e senza impiegare alcuna misurazione rilevata.

I sistemi *reality-based* si dividono in due grandi categorie: a contatto e senza contatto. I sistemi a contatto, non distruttivi, hanno bisogno di un'ingombrante parte meccanica e di tastatori che li rendono inadatti all'utilizzo su opere d'arte, su oggetti di elevate dimensioni o su superfici non rigide. Necessitano, inoltre, di lunghi tempi di lavoro per ottenere elevate precisioni e accuratezze di misura. Queste problematiche sono spesso compensate dall'utilizzo di sistemi senza contatto. Tra questi, i sistemi ad onde elettromagnetiche nel campo del visibile, risultano molto accurati e si possono classificare, a loro volta, in due grandi famiglie.

I sistemi basati su sensori passivi (metodi *image-based*) sfruttano la luce presente nell'ambiente per acquisire immagini da elaborare successivamente per derivarne informazioni 3D della scena osservata. Tra queste tecniche, la fotogrammetria è quella più conosciuta ed utilizzata, ed ha come principale obiettivo la precisione e l'affidabilità dei risultati [Remondino e Al-Hakim, 2006]. Recentemente, la fotogrammetria ha ricevuto nuovo impulso grazie all'adozione di tecniche della *computer vision* per l'elaborazione delle immagini con lo scopo primario dell'automazione dell'intero processo di restituzione (2D o 3D), riducendo però l'accuratezza dei risultati ottenuti [van den Heuvel, 1998; El-Hakim, 2001; Al Khalil e Grussenmeyer, 2002; Zhang et al., 2002; Remondino e Roditakis, 2003]. Al momento il principale vantaggio dei sistemi passivi, e delle relative tecniche di elaborazione, risiede nel basso costo e nella trasportabilità dei sensori. Inoltre, l'automazione del processo fotogrammetrico dovuto all'introduzione di algoritmi della *computer vision*, sia nella fase di orientamento [Barazzetti et al., 2010; Pierrot-Desilligny e Clery, 2011] che in quella di correlazione automatica [Remondino et al., 2008; Vu et al., 2009; Furukawa e Ponce, 2010; Pierrot-Desilligny et al., 2011], ha ampliato considerevolmente l'utilizzo di questa tecnica nonostante per l'ottenimento di risultati affidabili sia richiesta una grande esperienza nell'acquisizione e nel processamento delle immagini.

Le tecniche basate su sensori attivi (metodi *range-based*) impiegano invece sistemi che emettono un segnale elettromagnetico che viene registrato dallo strumento al fine di derivare la misura di distanza (*range*). Questa tipologia di strumenti, tra cui rientrano ad esempio i laser scanner, le stazioni totali, i GNSS, sono generalmente progettati per uno specifico campo di utilizzo e pertanto lavorano efficacemente in un determinato raggio d'impiego. Nel campo architettonico e dei Beni Culturali, i laser scanner hanno riscontrato grande successo e hanno notevolmente aumentato la facilità con la quale possono essere acquisiti dati morfometrici relativi a oggetti piccoli o strutture ampie. Essi richiedono tuttavia una certa esperienza basata sulla conoscenza delle prestazioni di ciascuna tecnologia applicata al campo operativo desiderato. Inoltre, l'elevato numero di informazioni non strutturate richiede lunghi tempi di editing per l'estrazione degli elementi geometrici più significativi o la creazione di un modello geometrico poligonale. Moltissimi sistemi acquisiscono esclusivamente l'informazione geometrica 3D pertanto, la generazione di modelli 3D realistici è spesso supportata dall'applicazione di texture ottenute da fotocamere digitali ad alta risoluzione esterne [Beraldin et al., 2002; Guidi et al., 2003]. D'altra parte, per gli oggetti di dimensioni piccole e medie (fino alle dimensioni di un essere umano o una statua) i sistemi *range-based* possono fornire dati accurati e completi con un elevato grado di automazione [Beraldin et al., 1999].

Generalmente un processo che conduce dal rilievo alla modellazione 3D viene però attuato combinando diverse tecniche, cercando di sfruttare i vantaggi e sopperire agli eventuali limiti di ciascuna tecnica. In molte applicazioni, non esiste infatti un unico metodo di modellazione che soddisfa tutti i requisiti di progetto. Diverse tentativi di integrazione tra sensori sono stati effettuati da El-Hakim e Beraldin [1994 e 1995]. Le tecniche fotogrammetriche e laser scanning sono state combinate in particolare per oggetti architettonici complessi o di grandi dimensioni, per i quali nessuna tecnica singolarmente può efficacemente e rapidamente fornire un modello completo e dettagliato. Di solito le forme di base, come ad esempio le superfici piane, sono efficacemente determinate con metodi basati su immagini, mentre per i piccoli dettagli si utilizzano solitamente sensori attivi [Flack et al., 2001; Sequeira et al., 2001; Bernardini et al., 2002; Borg e Cannataci 2002; El-Hakim et al., 2004; Beraldin et al., 2005]. La scelta della tecnica migliore o della metodologia d'integrazione dipende da molti fattori: scopo del rilievo, dettaglio geometrico richiesto, tipo di oggetto, materiale, esperienza, budget, ecc. Identificare il migliore approccio è la prima e fondamentale fase per riuscire a raggiungere obiettivi prefissati. Il confronto tra i metodi *range-based* e quelli *image-based* sono riportati in Böhler e Marbs [2004], Kadobayashi et al. [2004], Böhler [2005] e Remondino et al. [2005].

### **Finalità della documentazione 3D**

I modelli tridimensionali per le applicazioni ai Beni Culturali hanno l'obiettivo principale di fornire agli operatori del settore nuovi mezzi di conoscenza essendo rappresentazioni digitali fedeli e misurabili dell'oggetto reale. Le recenti tecnologie per l'acquisizione digitale hanno aperto prospettive innovative nel campo della conservazione, della riproduzione, dello studio e

della fruizione di opere scultoree, architettoniche ed archeologiche. I primi esempi di applicazione delle tecnologie di scansione tridimensionale ai Beni Culturali sono state sperimentate dal *National Research Council* del Canada estendendosi, negli ultimi anni, all'intero panorama internazionale. La stessa Italia, grazie alla ricchezza del suo patrimonio storico artistico, ha avviato una serie di interessanti applicazioni. Nel settore dei Beni Culturali, i modelli 3D offrono un ampio ventaglio di utilizzi.

### ***Creazione di archivi digitali***

I modelli 3D costituiscono un'importante ed innovativa risorsa nella creazione di archivi digitali nei campi della catalogazione e della classificazione [Kuzminskya e Gardinerb, 2012]. La catalogazione del patrimonio storico e artistico, disciplinata dall'art. 17 del Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio (D.Lgs. 42/2004), è da considerarsi fondamentale per la generale attività di tutela, sia sotto il profilo della conoscenza delle opere e della programmazione degli interventi finalizzati alla conservazione delle stesse, sia perché le conoscenze sistematicamente organizzate offrono un valido supporto all'azione preventiva ed efficace contro le azioni criminose che colpiscono le testimonianze artistiche e culturali del nostro paese.

Ai fini della gestione, valorizzazione e, in particolare, della tutela dei Beni Culturali, il sistematico rilevamento dei beni di notevole interesse storico-artistico ai fini della catalogazione è pertanto indispensabile; in questa ottica, gli evidenti limiti dei metodi tradizionali di documentazione sono pienamente superabili con l'introduzione di accurati modelli tridimensionali [Pieraccini et al., 2001]. Nonostante siano stati compiuti diversi tentativi di individuare standard digitali per l'archiviazione digitale di oggetti tridimensionali nel campo del patrimonio culturale, le metodologie e gli strumenti individuati sono stati spesso vaghi e non consistenti, solitamente tipologicamente eterogenei tra loro, talvolta riferiti a problematiche bidimensionali già superate, e spesso incapaci di restituire il valore aggiunto della tridimensionalità rispetto al disegno su supporto cartaceo.

Spesso, la semplice catalogazione non è sufficiente ad assistere gli studi, le analisi e le interpretazioni del bene da parte dei tecnici incaricati. La classificazione semantica è il processo di segmentazione caratterizzato dall'individuazione dei singoli elementi di un modello 3D e della loro terminologia, dall'identificazione delle relazioni tra loro esistenti e dalla definizione dei volumi che essi occupano che nasce per rispondere alle esigenze pratiche di gestione del bene catalogato. In questo modo, la creazione di modelli digitali di manufatti diviene un vero e proprio sistema conoscitivo in grado di organizzare un modello semantico al quale può essere riferito il sistema di gestione e richiamo delle informazioni. Uno dei vantaggi più evidenti di un meccanismo di modellazione semantica è la possibilità della generazione di un meccanismo a multi-risoluzione basato su caratteristiche semantiche architettoniche, e quindi la possibilità di creare modelli a differente risoluzione, mantenendone chiara la leggibilità come elementi tipologicamente codificati [Gaiani et al., 2011].

### ***Copie fisiche***

La disponibilità di un modello digitale 3D rende possibile, con le attuali tecnologie per il reverse engineering e prototipazione rapida [Gaubatz, 1996; Willis et al., 2007], di realizzarne anche riproduzioni materiche in diversi materiali (materiali plastici, resine, materiali lapidei, gesso, ecc.). Queste tecnologie sono assolutamente non distruttive e permettono di ottenere un’elevata precisione di riproduzione. La possibilità di poter riprodurre rapidamente un’opera qualsiasi facilita notevolmente la produzione di copie da sostituire all’originale (in caso di restauro, esposizione ad agenti inquinanti e così via.). Tale tecnica è destinata a sostituire, nel futuro, l’impiego dei calchi in gesso per i suoi evidenti vantaggi:

- maggiore accuratezza;
- indeformabilità;
- possibilità di generare copie in qualsiasi scala di riproduzione e materiale;
- il rilevamento senza contatto rappresenta una tecnica non distruttiva e non invasiva;
- la copia non presenta linee di saldatura.

Si ricorda, inoltre, che le attuali disposizioni legislative dell’art. 107 del Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio recita: “[...] È di regola vietata la riproduzione di beni culturali che consista nel trarre calchi dagli originali di sculture e di opere a rilievo in genere, di qualunque materiale tali beni siano fatti. Sono ordinariamente consentiti, previa autorizzazione del soprintendente, i calchi da copie degli originali già esistenti. Le modalità per la realizzazione dei calchi sono disciplinate con decreto ministeriale”. In tale normativa si fa poi specifico riferimento a procedure di replica con metodologie non a contatto quali fotogrammetria, olografia laser, scanner tridimensionali.

### ***Ricostruzione virtuale***

Un’ulteriore utile impiego dei modelli 3d consiste nel ricostruire e simulare virtualmente l’aspetto originale di opere d’arte ormai parzialmente perdute, smembrate o distrutte [Alparone et al., 1999; Barni et al., 1999]. I modelli 3D ottenuti per scansione digitale possono essere utilizzati per studiare le ipotesi ricostruttive esistenti in letteratura e per produrne di nuove con l’obiettivo di riportare virtualmente l’opera nella sua originale struttura. Il settore del *Computer Aided Restoration* fornisce strumenti di supporto al restauro di opere d’arte attraverso l’impiego di mezzi informatici [Scopigno, 2005] per ripristinare virtualmente le parti danneggiate di un’opera sfruttando le caratteristiche geometrico dimensionali delle porzioni meglio conservate [Fantini et al., 2008]. Essenzialmente è possibile distinguere due principali modalità d’uso dei modelli digitali 3D nel supporto al restauro: come *strumento di indagine*, ossia come strumento diretto di lavoro nelle fasi di indagine e studio; come *strumento di documentazione/presentazione*, ossia come media ottimale per referenziare spazialmente e presentare ogni altro tipo di informazione [Manferdini e Garagnani, 2011].

### ***Monitoraggio***

Il patrimonio artistico necessita di un continuo monitoraggio del proprio stato di conservazione, in particolare di quelle opere esposte continuamente, ed inevitabilmente

danneggiate, ad agenti atmosferici ed inquinanti. Gli archivi digitali sono per loro natura durevoli ed inalterabili, e quindi possono essere utilizzati come riferimento per il monitoraggio dei fenomeni di degrado o delle operazioni di restauro sulle opere. I modelli 3D ad alta risoluzione delle opere possono essere efficacemente sfruttati per lo studio delle caratteristiche dimensionali, strutturali e di conservazione [Beraldin et al., 1999] per la protezione del bene stesso. A tal proposito, acquisizioni digitali molto accurate, fatte con una certa cadenza temporale, possono mettere in risalto microdeformazioni, microspaccature, usure ed alterazioni dell'opera, tramite il confronto con modelli precedentemente acquisiti e memorizzati [Dalton-Taggart, 2012], rendendo possibili opportuni interventi da parte dei restauratori per evitare danni irreversibili. In eventuale caso di danno, le opere d'arte potrebbero inoltre essere ripristinate alla loro condizione preesistente prevedendo un confronto con il modello digitale acquisito prima dell'evento.

### ***Creazione di ambienti virtuali***

Molte opere si trovano, oggi, in contesti architettonici molto diversi dai luoghi dove erano originariamente collocate. È possibile ricreare tali luoghi come ambienti virtuali tramite la *computer graphics* così da poter collocare i modelli digitali tridimensionali delle opere d'arte nel loro contesto originario. Si vengono così a creare dei musei e degli ambienti virtuali in cui si realizzano visite interattive che consentono agli utenti di apprezzare le opere così come sono state pensate, volute e realizzate originariamente. Al contrario, è possibile effettuare sperimentazioni di ricostruzione differente rispetto a quella suggerita dall'analisi storica, prevedendo ad esempio colori, collocazioni o funzionalità diverse da quelle verosimili. Inoltre, gli ambienti virtuali culturali sono già particolarmente sfruttati da chi si occupa di didattica e comunicazione culturale: l'unicità dell'esperienza virtuale condivisa con altri utenti espande il valore cognitivo delle informazioni simulate rendendo l'apprendimento di informazioni culturali un qualcosa che i partecipanti all'esperienza di simulazione apprezzano con maggior intensità e coinvolgimento emotivo [Lercari, 2011].

### ***Fruizione remota***

La fruizione del patrimonio culturale è, oggi, limitata dalla disponibilità del manufatto [Terashima et al., 1999; Abrardo et al., 1996; Counsell et al., 1999; Ronchi, 1997]. Spesso le opere d'arte sono poste in luoghi chiusi al pubblico, o inaccessibili, oppure non visibili perché temporaneamente in fase di restauro. Per ovviare a questi problemi si sono diffusi recentemente i collegamenti remoti tramite infrastruttura internet o strumenti immersivi così da allargare l'accessibilità alle opere e favorirne la comprensione storica e artistica grazie, soprattutto, alle possibili associazioni con altre opere o con documenti significativi [Bruno et al., 2010]. A seconda dei gradi di fruizione si parla di realtà virtuale e realtà aumentata. La realtà virtuale (VR – *Virtual Reality*) è la simulazione di uno spazio tridimensionale reale o immaginario, generato con tecnologie digitali, percepito con mezzi visivi (o più genericamente sensoriali), che fornisce l'illusione di essere vero. La realtà aumentata (AR – *Augmented Reality*) è la

sovrapposizione dell’informazione virtuale alla realtà o alla rappresentazione del reale (video, foto), tale da avere l’impressione che la prima esista veramente [Sylaiou et al., 2009].

## **Caso studio: l’apparato scultoreo della Torre Ghirlandina di Modena**

L’esperienza di ricerca condotta tratta il confronto multi-temporale di scansioni laser ottenute con sensori a triangolazione a brevissime portate (inferiori a 0.50 m) per l’analisi del danneggiamento subito da una scultura lapidea dell’apparato scultoreo-decorativo esterno della Torre Civica di Modena, detta Ghirlandina. A seguito dello sciame sismico che a Maggio 2012 ha colpito la pianura emiliana, sebbene la struttura della torre non abbia riportato danni o lesioni, è stato possibile riscontrare danneggiamenti su alcuni elementi dell’apparato scultoreo decorativo. Disponendo del preziosissimo archivio digitale creato a Settembre 2011, è stato effettuato un secondo rilievo di una scultura angolare, visivamente danneggiata, allo scopo di aggiornare i dati dell’archivio e quantificare con precisione l’entità dei danni provocati dal sisma su quella scultura.



*Figura 6.1: Vista del Duomo e della torre Civica, detta Ghirlandina, di Modena da Piazza Grande.*

### **Generalità e inquadramento della problematica**

La torre Ghirlandina, così chiamata per il doppio giro di ringhiere che la incoronano come ghirlande, è alta circa 86 metri e costituisce il simbolo della città di Modena. Essa unisce

armoniosamente in sé gli stili di due epoche diverse: la parte a base quadrata è coeva del Duomo e segue i canoni architettonici romanici, mentre la parte a base ottagonale e la piramide che costituisce la cuspide sono più tarde e risentono di un gusto più chiaramente gotico. La Ghirlandina, insieme al Duomo e a Piazza Grande, è tutelata dall'UNESCO come patrimonio artistico dell'umanità.

Le decorazioni che costituiscono l'apparato scultoreo esterno della Ghirlandina sono presenti esclusivamente nella parte a sezione quadrata, su tutte e quattro le facciate, ad eccezione del lato sud del primo pseudopiano dove vi sono gli arconi che collegano Duomo e Ghirlandina. Dei 17 litotipi presenti sulla torre, solo 6 sono stati utilizzati per eseguire le decorazioni. Per le sculture figurate, sono stati utilizzati principalmente la pietra di Vicenza e la pietra di Aurisina, nella variante del granitello; i rilievi angolari sono scolpiti su blocchi unici lavorati su due facce costituiti per la maggior parte di granitello [Pedrazzi, 2008]. La scultura indagata si trova sull'angolo sud-ovest della prima cornice marcapiano, a circa 9 metri di altezza, e rappresenta "Sansone che smascella il leone", secondo l'iconografia consueta che lo rappresenta a cavallo dell'animale mentre con le mani ne apre le fauci; l'eroe biblico, che porta la canonica lunga capigliatura, baffi e una corta barba sotto il mento ha lo sguardo fisso rivolto verso l'alto.



*Figura 6.2: Fotografie della formella angolare di "Sansone che smascella il leone" prima e dopo l'evento sismico che ne ha causato il danneggiamento.*

### **Prime evidenze ed evoluzione del fenomeno**

Preliminarmente alle operazioni di restauro della torre, durato da Novembre 2008 a Settembre 2011, contestualmente alla mappatura dei litotipi, era stato effettuato il rilevamento dei fenomeni di degrado che interessavano le sculture evidenziando differenti tipologie e gradi di intensità anche a causa dei numerosi litotipi utilizzati per eseguire le decorazioni. Una delle tipologie di degrado individuate riguarda anche l'utilizzo delle resine: durante i restauri completati nei primi anni '70 quasi tutti i giunti tra le lastre erano stati stuccati utilizzando

resine epossidiche caricate con polvere di marmo, biancone e ammonitico veronese. I recenti lavori di restauro, oltre a restituire il monumento all'originario splendore, hanno contribuito a migliorare sensibilmente la risposta sismica della Ghirlandina. Due nuove cerchiature in acciaio sono state sistemate alla base del sesto piano e all'interno della balconata a 60 m di altezza ed esercitano un'azione antisismica fondamentale per la stabilità della torre.

I forti eventi sismici che hanno colpito la pianura emiliana nel Maggio 2012 hanno tuttavia prodotto danni anche al patrimonio artistico di Modena. Speciali attenzioni sono state subito rivolte alla torre Ghirlandina soprattutto a causa della sensibile inclinazione che caratterizza da sempre il monumento simbolo della città. I dati del monitoraggio continuo effettuato con il pendolo presente all'interno della torre e le altre strumentazioni installate hanno dimostrato che la torre ha retto bene agli eventi sismici. I sopralluoghi effettuati all'interno non hanno evidenziato particolari situazioni critiche. L'unico danno prodotto dal terremoto ha coinvolto la scultura angolare di Sansone posta all'angolo sud-ovest, di fronte alla Porta della Pescheria. La scultura si è spezzata lungo la diagonale con distacco di piccoli frammenti nella parte piana del blocco, ma si presenta integra nella parte plastica in rilievo. Un'analoga frattura preesistente sulla scultura era stata risarcita con resina epossidica durante i lavori di restauro degli anni '70. La causa della fratturazione è stato probabilmente il movimento oscillatorio della torre contro i contrafforti di congiunzione con la cattedrale.



Figura 6.3: Danni causati degli eventi sismici di Maggio 2012 sulla Chiesa del Voto, in centro storico a Modena.

## Scopo e modalità di esecuzione delle misure

### *Rilevamento 3D per la documentazione e la conservazione*

Contestualmente alle fasi finali degli interventi di consolidamento e valorizzazione della torre, nel settembre 2011, è stato eseguito il rilievo metrico tridimensionale degli elementi scultorei decorativi restaurati con sistemi a scansione laser basati sul principio della triangolazione (Boehler et al., 2001). Come noto, questa tipologia di strumentazione consente di ottenere precisioni molto elevate (sub-millimetriche) a scapito di portate limitate (generalmente

inferiori al metro) e tempi di acquisizione mediamente elevati, risultando quindi particolarmente idoneo al rilievo di soli oggetti di piccole dimensioni per i quali i dettagli sono di fondamentale importanza. Grazie al rilievo 3D ad altissima risoluzione è stato creato un importante archivio metrico digitale dell'apparato scultoreo decorativo della torre Ghirlandina, facilmente fruibile, che ha posto le basi per interessanti studi ed utilizzi futuri a scopo di musealizzazione, ricerca e didattica. Oltre alla riproduzione materica non invasiva, i dati metrici raccolti possono essere utilizzati per lo studio approfondito degli elementi acquisiti (analisi del degrado, delle tecniche costruttive, delle caratteristiche materiche, radiometriche e geometriche, ecc.), oltre alla ricostruzione virtuale delle loro parti mancanti e/o rovinate. In vista della generazione futura di un ambiente virtuale tridimensionale e fotorealistico dell'intero complesso monumentale del sito UNESCO di Modena, sono in fase di studio l'individuazione di percorsi turistici tematici e il *rendering* di antiche fasi costruttive volti alla fruizione e alla divulgazione delle opere.

L'esecuzione del rilievo 3D dell'apparato scultoreo decorativo della Torre Ghirlandina a scopo documentativo e conservativo è stata realizzata nel mese di settembre 2011, precisamente dal 30 agosto al 20 settembre 2011, durante le ultimissime fasi di restauro. Il rilievo ha interessato quattro diverse tipologie scultoree, facenti parte dell'interessante e raffinato apparato decorativo esterno della Torre Civica [Cadignani, 2009; Cadignani, 2010], per un totale di 130 elementi suddivisi come segue:

- 19 sculture angolari poste su ciascun prospetto in corrispondenza dei primi tre ordini;
- 92 mensole originali degli archetti pensili posti in prossimità dei primi cinque ordini;
- 4 bassorilievi romani di reimpiego posti sulle facciate Est e Sud;
- 7 capitelli delle bifore del quarto ordine;
- 8 capitelli delle trifore del quinto ordine.

Al fine di conseguire un'accuratezza idonea a elaborare file numerici adatti per un'eventuale fase successiva di prototipazione degli elementi scultorei, la strumentazione utilizzata (Figura 6.4) è risultata costituita dal braccio articolato a 7 assi *Romer CMM Infinite 2.0*, e dal sensore laser a triangolazione *ScanWorks Perceptron*, caratterizzati dalle seguenti principali specifiche tecniche:

- campo di misura su diametro sferico di 2.5 m;
- precisione nominale pari a 0.07 mm.



*Figura 6.4: Strumentazione laser scanner a triangolazione con braccio articolato a 7 assi Romer CMM Infinite 2.0 e sensore ScanWorks Perceptron.*

La possibilità di usufruire dell'impalcatura metallica del ponteggio, utilizzata per i lavori di restauro, ha permesso di raggiungere agevolmente le altezze necessarie, fino a 60 m, per il rilievo di ogni elemento scultoreo. Tuttavia, il contemporaneo svolgimento di differenti attività ha richiesto un'adeguata collaborazione tra i professionisti coinvolti e un'attenta programmazione dei lavori principalmente finalizzata alla riduzione delle vibrazioni dovute a diversi fattori, tra cui movimenti del montacarichi, spostamenti di operatori sull'impalcatura e presenza di vento. Allo scopo di ridurre il più possibile tali vibrazioni durante le attività di rilievo, la strumentazione è stata utilizzata ancorata ad una piastra metallica e resa solidale ai montanti dell'impalcatura tramite l'utilizzo di passerelle issate sugli stessi. Tali particolari condizioni di lavoro (Figura 6.5) non hanno permesso di raggiungere l'accuratezza massima nominale della strumentazione adottata, ma hanno comunque consentito una restituzione finale degli elementi con una risoluzione dell'ordine di grandezza di 0.1 mm e quindi del tutto idonea per gli scopi previsti dal rilievo.



*Figura 6.5: Fasi del rilevamento con laser scanner a triangolazione per la documentazione 3D dell'apparato scultoreo decorativo della torre Ghirlandina, Settembre 2011.*

### ***Rilevamento 3D per l'analisi del danneggiamento***

A seguito dei ripetuti eventi sismici che hanno colpito la pianura emiliana a Maggio e Giugno 2012, sebbene la struttura della Torre non abbia riportato danni o lesioni, sono stati registrati danneggiamenti su alcuni elementi dell'apparato scultoreo decorativo esterno. In particolare la scultura angolare della prima cornice marcapiano posta a sud-ovest raffigurante "Sansone che smascella il leone" ha riportato una frattura diagonale con distacco di piccoli frammenti nella parte piana del blocco. Disponendo del preziosissimo archivio digitale dei modelli 3D dell'apparato scultoreo, è stato effettuato un secondo rilievo della scultura angolare, visivamente danneggiata, allo scopo di aggiornare i dati dell'archivio e quantificare con precisione l'entità dei danni provocati dal sisma su quella scultura, per eventualmente studiarne la migliore metodologia di restauro.

Il rilievo metrico tridimensionale della scultura danneggiata dal sisma è stato realizzato a Maggio 2014, grazie all'autorizzazione del Comune di Modena e alla presenza dell'Arch. Rossella Cadignani, responsabile dell'edilizia storica del Comune e direttrice di tutti i lavori di restauro eseguiti sulla Torre. Per questo secondo rilevamento è stata utilizzata la strumentazione a triangolazione *Range7* di *Konica Minolta*, caratterizzata dalle seguenti principali specifiche tecniche:

- distanza di acquisizione da 0.45 a 0.75 m;
- accuratezza nominale pari a 0.04 mm.

A differenza della strumentazione utilizzata per il primo rilievo, costituita da un braccio articolato con sensore laser all'estremità, questa è costituita da una testa di misura da posizionare su un treppiede o uno stativo. Inoltre, non disponendo dell'impalcatura metallica, per raggiungere l'altezza idonea (circa 9 m) per il rilievo a brevissima distanza (circa 0.50 m), è stato reso disponibile un cestello elevatore solitamente utilizzato per ispezioni visive o fotografiche, caratterizzato da ridottissimo spazio di movimento ed elevate vibrazioni. Nel tentativo di ridurre al massimo le vibrazioni, che avrebbero influito negativamente sulla qualità dei dati acquisiti, il cestello è stato posizionato contro la struttura della torre e in diverse posizioni per permettere l'acquisizione completa della scultura. Considerate le precarie condizioni di lavoro e l'incertezza sulla qualità delle acquisizioni 3D, dovuta alle possibili vibrazioni del cestello, è stato effettuato anche un rilievo fotogrammetrico con fotocamera reflex *Canon EOS 5D Mark II* e obiettivi calibrati per l'ottenimento del modello 3D dall'elaborazione con algoritmi automatici di *Structure-from-Motion* [Toschi et al., 2013].



Figura 6.6: Fasi del rilevamento con laser scanner a triangolazione *Range7* di *Konica Minolta* per la quantificazione del danneggiamento subito dalla formella angolare, Maggio 2014.

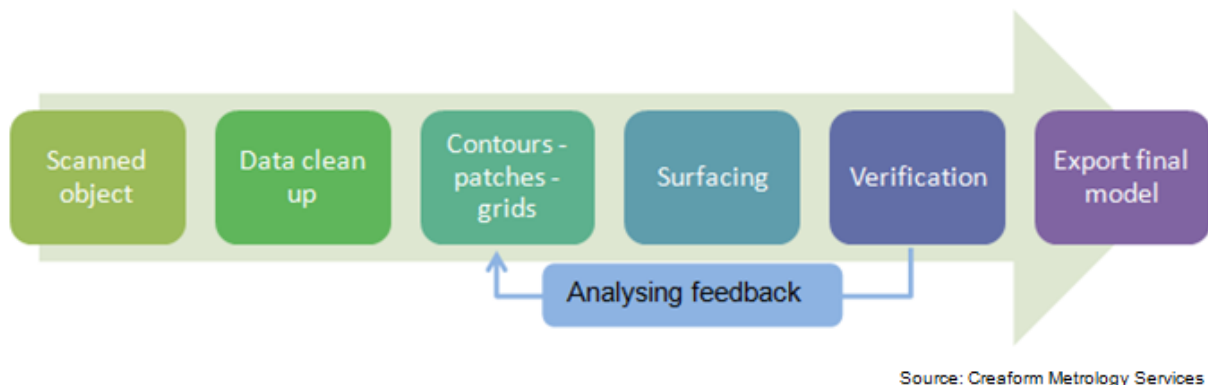
### Elaborazione delle misure

Il risultato della fase di acquisizione di ciascun elemento scultoreo è un insieme di nuvole di punti, di numero variabile in funzione della dimensione e complessità dell'oggetto da rilevare. Al termine di una prima fase di elaborazione, per ogni elemento scultoreo è stata ottenuta un'unica nuvola di punti costituita dai 400mila agli oltre 11 milioni di punti, principalmente in funzione della dimensione dell'elemento. Allo scopo di rappresentare geometricamente ciascun elemento acquisito è necessario generare, a partire dalla nuvola di punti, il modello tridimensionale a superfici tramite la descrizione della superficie dell'oggetto

mediante un congruo numero di superfici piane triangolari (*mesh*). Si descrivono nel seguito le operazioni di elaborazione dei dati acquisiti facendo distinzione tra la procedura utilizzata per la creazione dei modelli 3D a scopo documentativo e conservativo e quella seguita per l'analisi metrica del danneggiamento sulla scultura angolare.

### ***Creazione dei modelli 3D per l'archiviazione digitale***

Per la creazione dell'importante archivio metrico digitale dell'apparato scultoreo decorativo della torre Ghirlandina, i dati acquisiti dalla strumentazione a triangolazione sottoforma di nuvola di punti sono stati elaborati per la generazione di modelli tridimensionali a superfici che fossero idonei per un'eventuale fase successiva di prototipazione. La procedura di elaborazione è stata lunga e laboriosa poiché, sebbene vengano utilizzati software in cui sono implementati algoritmi automatici, l'esperienza dell'operatore rimane un elemento essenziale che contraddistingue tutto il processo. La gestione delle nuvole di punti acquisite e la verifica delle stesse sono state condotte contestualmente alla fase di acquisizione di ciascun elemento tramite il software proprietario dello strumento utilizzato (*3D Reshaper*), installato sul PC portatile a lui collegato. In questo modo, già dalla fase di rilievo è possibile controllare e gestire in tempo reale l'acquisizione delle singole nuvole di punti e verificare che esse "descrivano" in modo completo e corretto l'intera superficie dell'elemento.



*Figura 6.7: Workflow di elaborazione per la creazione di modelli 3D da dati laser scanner ad altissima risoluzione [Creaform teaching manual].*

I successivi step di elaborazione sono stati eseguiti con il software commerciale *Rapidform XOR*, specificatamente ideato per il trattamento di dati ad altissima risoluzione. La fase di post-elaborazione ha richiesto un'operazione preliminare di pulizia, filtraggio e allineamento delle varie nuvole acquisite per ogni elemento scultoreo. Infatti, nonostante le nuvole di punti acquisite per la digitalizzazione di ciascun elemento fossero inquadrare nello stesso sistema di riferimento, le particolari condizioni di lavoro hanno reso necessaria una fase di *refinement* dell'allineamento reciproco, realizzata utilizzando l'algoritmo di ICP (*Iterative Closest Point*). In questo modo, le singole scansioni filtrate ed allineate sono state combinate in un'unica

nuvola di punti, eliminando le zone di sovrapposizione e il rumore ad esse associato (Figura 6.8).

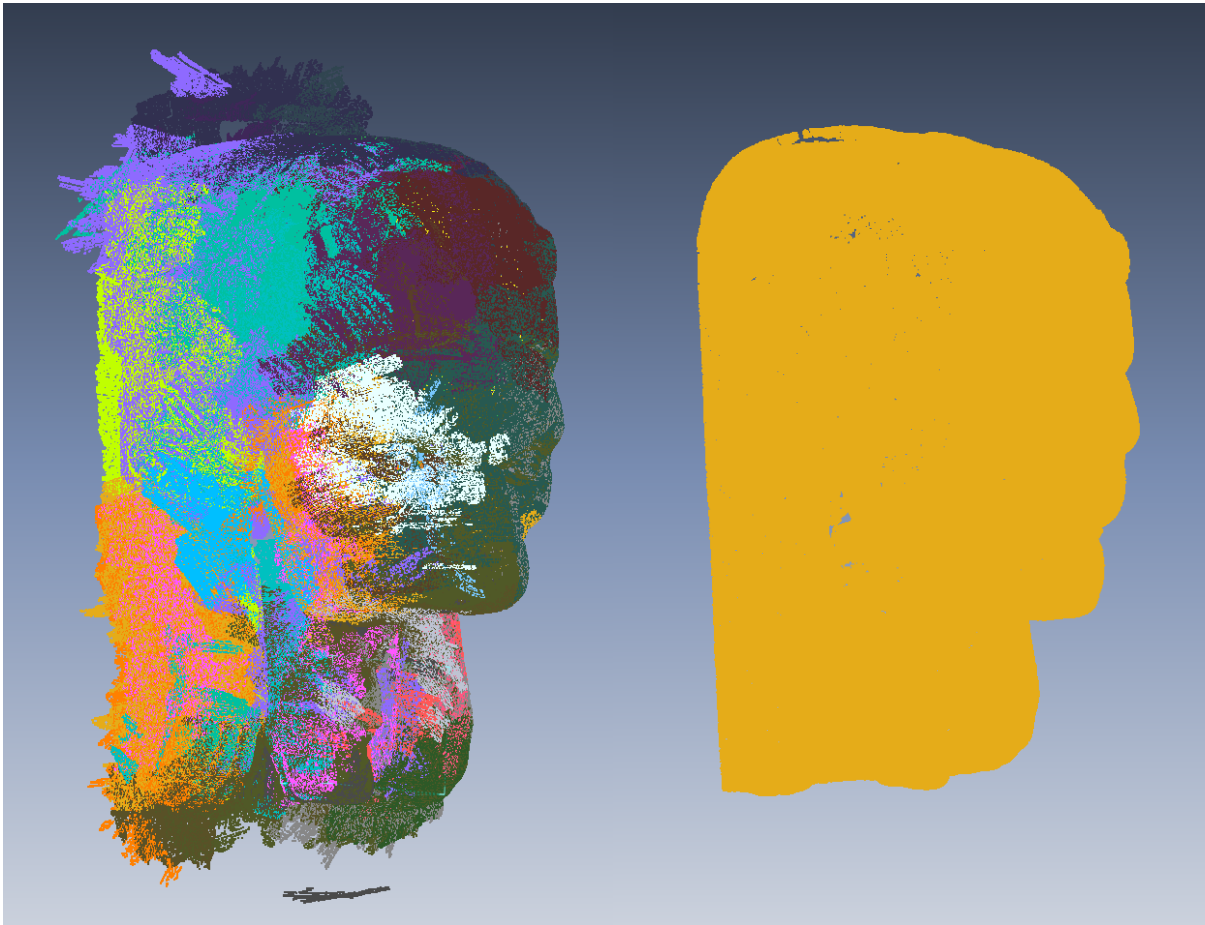


Figura 6.8: Fase di elaborazione in cui le singole nuvole acquisite vengono filtrate, allineate ed unificate per creare un'unica point cloud su cui effettuare la triangolazione.

La nuvola di punti ottenuta è stata quindi sottoposta all'algoritmo di *Mesh Construction*, grazie al quale la superficie dell'elemento viene descritta e discretizzata tramite un congruo numero di superfici piane triangolari. In questa fase, è stata impostata quale accuratezza dello scanner un valore dell'ordine di grandezza di 0.1 mm, leggermente variabile in funzione della qualità del dato acquisito per il singolo elemento scultoreo. Il modello a *mesh* così generato presenta tuttavia ancora varie difettologie, per eliminare le quali è risultata necessaria un'attenta e laboriosa fase finale di editing e post-elaborazione, articolata nei seguenti principali passaggi:

- chiusura delle lacune con algoritmi basati sulla curvatura delle superfici adiacenti;
- individuazione e correzione dei difetti, quali *Non-Manifold Poly-Faces*, *Crossing Poly-Faces*, *Redundant Poly-Faces* e *Reversed Poly-Faces*;
- verifica delle normali;
- eventuale applicazione di *smoothing* delle superfici, impostando una tolleranza massima ammissibile di circa 0.07 mm.

Dopo quest'ultima fase di eliminazione delle difettologie residue, sono stati ottenuti i modelli 3D degli elementi sotto forma di file numerici in formato .STL, adatto per essere letto dalle macchine a controllo numerico per la prototipazione rapida. Infine, per conferire un aspetto fotorealistico ad alcuni dei modelli tridimensionali generati e completare così gli stessi con informazioni di tipo radiometrico (RGB) ad integrazione di quelle geometriche, è stato applicato un tessuto (*texture*) prelevato da immagini fotografiche ad alta risoluzione acquisite contestualmente al rilievo.



*Figura 6.9: Creazione del modello a mesh tramite triangolazione della nuvola di punti ottenuta.*

### ***Modellazione 3D per il confronto multi-temporale***

La procedura di modellazione 3D per il confronto multi-temporale al fine della quantificazione del danneggiamento intervenuto sulla scultura angolare di Sansone ha seguito solamente le prime fasi dell'iter descritto precedentemente. Questa scelta è dettata dalla considerazione che la rappresentazione più fedele (ovvero più accurata) della realtà è il dato metrico direttamente acquisito con la strumentazione a disposizione (in questo caso laser scanner a triangolazione); ogni passaggio della procedura di elaborazione, meshing e post-processing, è frutto dell'utilizzo di algoritmi di elaborazione ed interpretazioni, anche personali, del dato acquisito che introducono necessariamente un'ulteriore fonte di incertezza. Tuttavia, per poter confrontare in modo diretto le due acquisizioni alle differenti epoche della scultura indagata, è stato necessario procedere alla triangolazione delle nuvole di punti per l'ottenimento del modello 3D a superfici. Ciò che non è stato eseguito è la fase di post-processing per l'eliminazione delle difettologie, tra tutte le lacune.

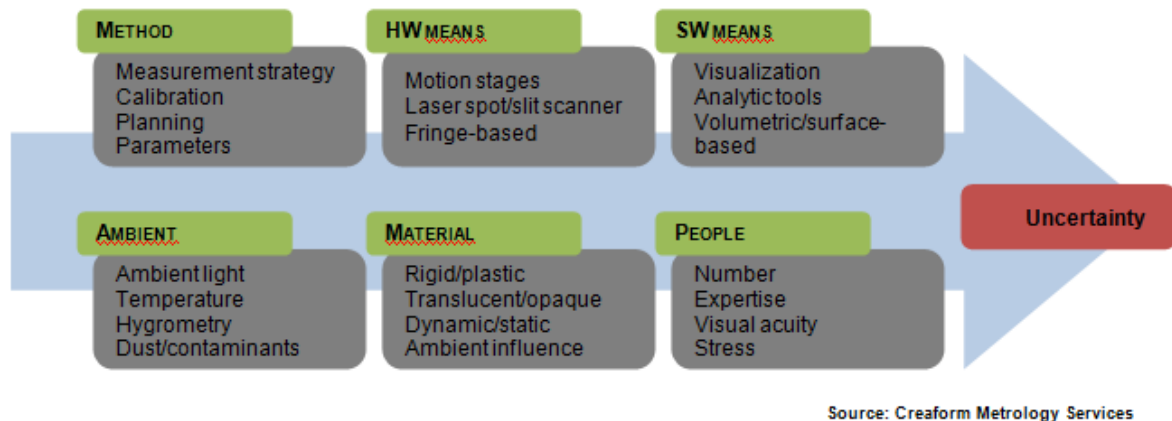


Figura 6.10: Fattori che influenzano l'incertezza di misurazione lungo tutto il processo di acquisizione e trattamento dei dati [Creaform teaching manual].

Inoltre, vale la pena sottolineare che la procedura di modellazione effettuata sui dati acquisiti dal *Range7* ha seguito un percorso differente rispetto a quella effettuata sui dati del *ScanWorks Perception*, in quanto il risultato di ogni acquisizione era già costituito da una superficie triangolata di ottima qualità. A differenza di quanto descritto precedentemente, quindi, i dati acquisiti con il *Range7* e già triangolati dal software proprietario con eccellente accuratezza sono stati sottoposti ad un processo di *refinement* dell'allineamento mediante l'algoritmo di ICP (*Iterative Closest Point*) e di unificazione (*merging*) ad un'unica superficie a mesh.

### Quantificazione del danneggiamento

L'obiettivo del confronto tra i due modelli 3D rilevati è quello di individuare la tipologia e la causa del danneggiamento subito dalla scultura a seguito degli eventi sismici, quantificandone con precisione l'entità e cercando di fornire adeguate indicazioni per un eventuale ripristino della condizione iniziale tramite prodotti efficacemente utilizzabili dai restauratori. I modelli 3D ad alta risoluzione delle opere vengono ormai efficacemente sfruttati per lo studio delle caratteristiche dimensionali, strutturali e di conservazione [Beraldin et al., 1999] o per ricostruzioni virtuali delle porzioni deteriorate o mancanti sulla base di conoscenze pregresse e analisi storiche [Scopigno e Cignoni, 2004]. Tuttavia, ad oggi, dalle ricerche bibliografiche effettuate non risultano esperienze significative di confronto multi-temporale di modelli 3D ad altissima risoluzione per la quantificazione metrica dei danneggiamenti subiti da opere scultoree, a meno di un'esperienza professionale di Dalton-Taggart [2012] e un brevissimo e confuso accenno nel contributo di Shih et al. [2015]. In entrambe le esperienze si fa riferimento ad analisi su sculture deteriorate dagli agenti atmosferici confrontando acquisizioni con laser scanner distanziometrici nell'arco temporale di un anno.

L'esperienza condotta sulla scultura angolare della torre Ghirlandina di Modena sembra dunque elevarsi rispetto all'attuale stato dell'arte in questo settore soprattutto grazie all'utilizzo

di tecnologie maggiormente performanti che hanno permesso la quantificazione del danneggiamento con un ridottissimo margine di incertezza. La procedura seguita per l'analisi del danneggiamento può essere equiparata a quella solitamente utilizzata in ambito metrologico e meccanico per il *Quality Control* o il *Reverse Engineering*. La differenza risiede sostanzialmente nel confronto di modelli *free-form* invece che di modelli CAD per cui, non essendo note a priori le caratteristiche geometrico dimensionali dell'oggetto, l'analisi avviene utilizzando come riferimento un modello, anch'esso *free-form*, riferito ad uno stato di fatto precedente l'evento di cui si vogliono individuare gli effetti.

Anche in questo caso risulta di fondamentale importanza ai fini della corretta interpretazione dei risultati la fase di allineamento dei due modelli 3D. A differenza delle altre esperienze condotte e precedentemente discusse, le difficoltà incontrate non hanno riguardato la scelta della metodologia di allineamento più corretta quanto invece l'individuazione delle porzioni inalterate su cui operare l'allineamento. In questo contesto, infatti, la problematica dell'allineamento dei modelli 3D nello stesso sistema di riferimento per effettuarne un confronto diretto nasce dalla mancata predisposizione iniziale di un adeguato sistema che permettesse la ripetibilità delle misure. Tuttavia, considerando lo scopo documentativo e di conservazione del primo rilevamento, la posizione e il numero di elementi acquisiti e l'importanza storico artistica della superficie lapidea del monumento, non era possibile installare *marker*, o altri sistemi fissi di riposizionamento, nell'ottica di un possibile utilizzo dei dati a scopo di monitoraggio. Con queste condizioni, l'unica strategia percorribile per ottenere elevate precisioni di allineamento tra i due modelli è stata l'utilizzo di algoritmi automatici su porzioni del modello della scultura ipotizzate invariate o indeformate rispetto al primo istante temporale di rilevamento. Allo scopo di individuare la soluzione ottimale di registrazione sono stati effettuati diversi tentativi, che verranno brevemente descritti.

*Tabella 6.1: Riassunto dei tre tentativi di allineamento e loro risultati in termini di errore massimo in valore assoluto e deviazione standard.*

	Area allineamento	Sovrapposizione [%]	Massimo [mm]	Dev. Std. [mm]
Tentativo 1	Modello intero	100.0	1.078	0.284
Tentativo 2	Cornice esterna	17.2	0.621	0.144
Tentativo 3	Parte sinistra	54.3	0.415	0.108

Il primo tentativo ha visto l'utilizzo degli algoritmi automatici di allineamento sull'intero modello 3D della scultura. Come prevedibile, il risultato dell'allineamento non si è rivelato soddisfacente, non solo in termini di errore (deviazione standard pari a 0.284 mm su circa 3.9 milioni di vertici), ma proprio perché sono state considerate come indeformate anche zone in cui, invece, il danneggiamento è stato visivamente apprezzabile.

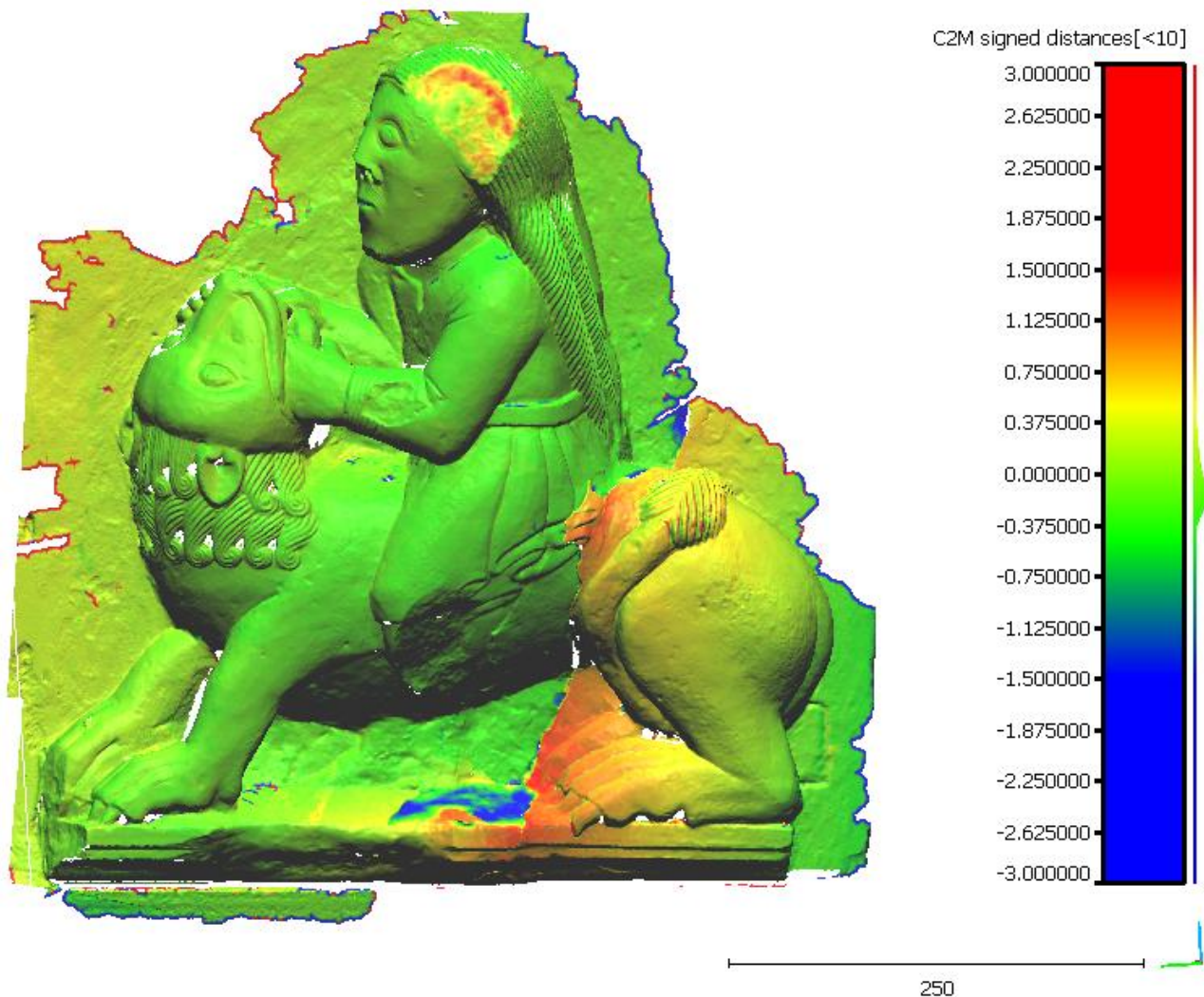
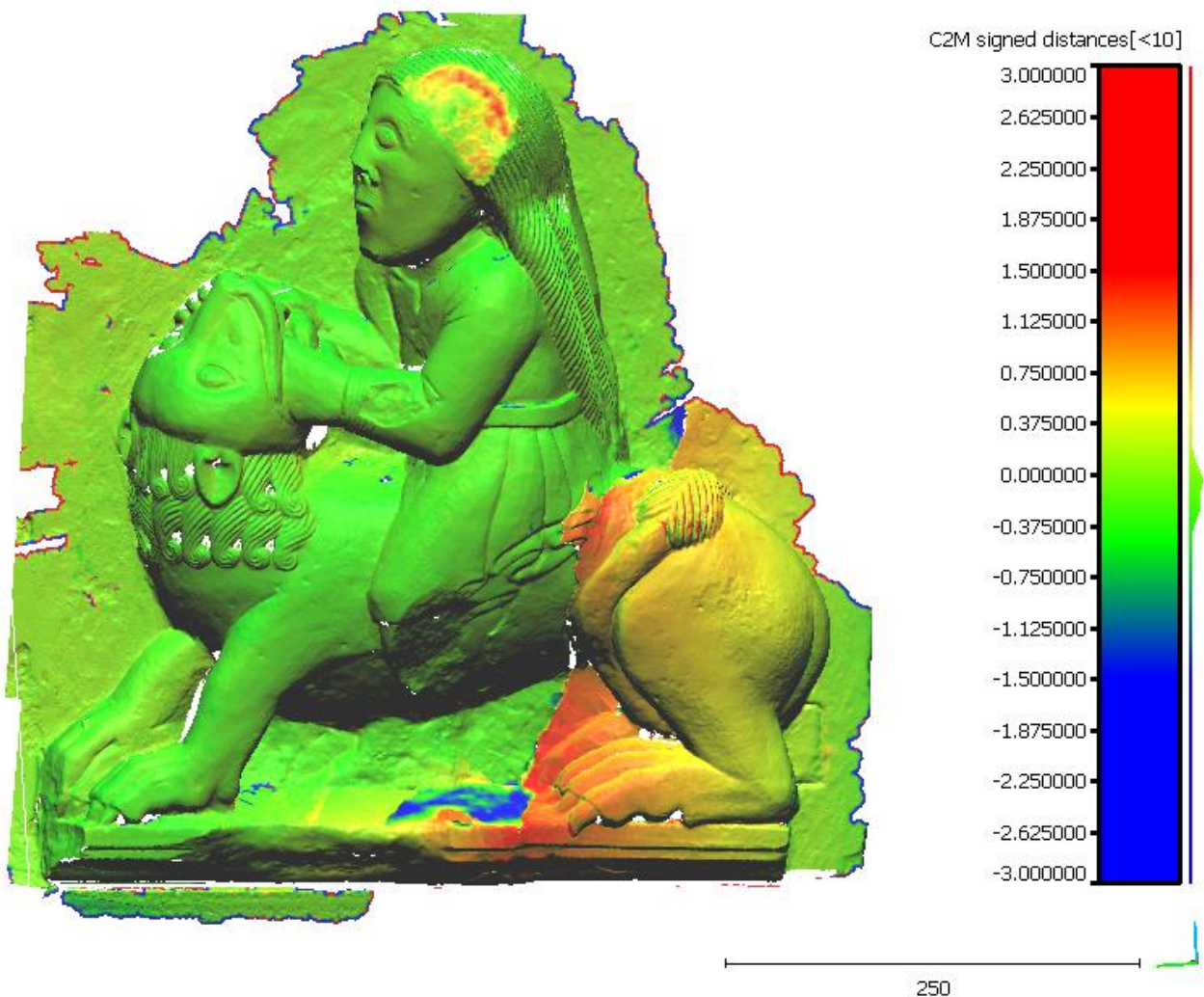


Figura 6.11: Risultato del confronto multi-temporale tra i due modelli 3D a seguito del primo tentativo di allineamento (modello intero).

Alla luce del primo tentativo, con il secondo si è cercato di escludere le porzioni di modello deformate, utilizzando esclusivamente i dati acquisiti sulla parte piana del blocco lapideo ed escludendo completamente quelli sulla scultura. Tuttavia, anche questa soluzione non ha portato ai risultati sperati (deviazione standard pari a 0.144 mm su circa 670 mila vertici) in quanto: il primo rilevamento era stato limitato quasi esclusivamente alla parte plastica in rilievo, determinando così una ridotta percentuale di sovrapposizione tra i due modelli, e comunque non poteva essere escluso completamente l'interessamento degli effetti del sisma sul blocco piano, considerando il fenomeno di distacco di detriti proprio dalla porzione posteriore.



*Figura 6.12: Risultato del confronto multi-temporale tra i due modelli 3D a seguito del secondo tentativo di allineamento (cornice esterna).*

Il risultato migliore (deviazione standard pari a 0.108 mm su circa 2.1 milioni di vertici) è stato quindi ottenuto utilizzando per il *matching* la porzione di scultura e blocco più lontana dalla linea diagonale di fratturazione. A supporto dell'individuazione dell'estensione dell'area da considerare per l'applicazione degli algoritmi automatici di allineamento sono state utilizzate le informazioni sulle direzioni normali alle *mesh* costituenti i due modelli 3D. La particolare colorazione ha permesso così di individuare con metodo e precisione l'area di influenza del danneggiamento, da escludere per l'allineamento automatico tra le superfici, ottenendo dal confronto risultati di notevole rilevanza ed interesse.

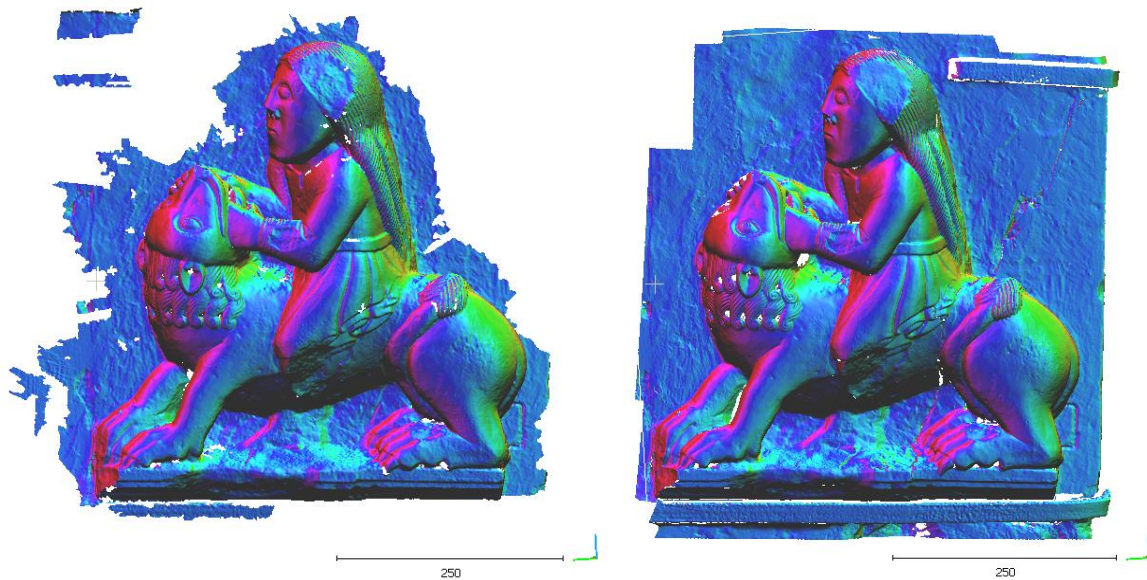
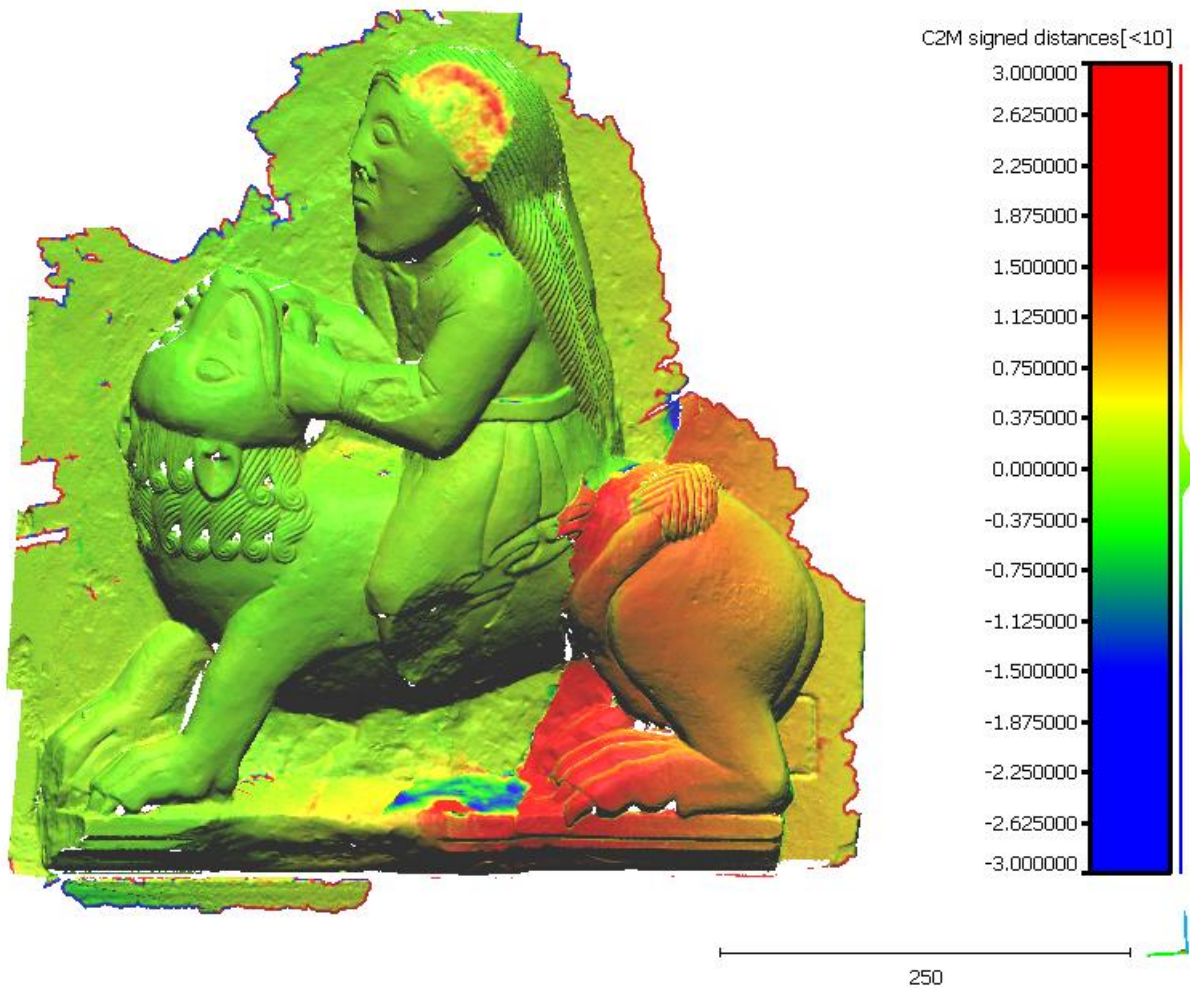


Figura 6.13: Modelli 3D con colorazione in funzione delle inclinazioni delle normali.



Figura 6.14: Terzo tentativo di allineamento (porzione di sinistra).



*Figura 6.15: Risultato del confronto multi-temporale tra i due modelli 3D a seguito del terzo tentativo di allineamento (porzione di sinistra).*

### **Interpretazione dei risultati e utilizzi**

Il risultato del confronto tra i modelli 3D ad altissima risoluzione ottenuti dalle acquisizioni con strumentazione laser scanner a triangolazione evidenzia a pieno la potenzialità della metodologia per l'ottenimento di informazioni, precise ed accurate, sugli effetti del danneggiamento subito dall'elemento scultoreo. Analizzando infatti la mappa degli spostamenti, la particolare colorazione mostra nitidamente come la linea diagonale di fratturazione divida la figura scultorea essenzialmente in due parti: quella di sinistra rimasta sostanzialmente inalterata e quella di destra che ha subito invece un danneggiamento significativo. A differenza di quanto inizialmente ipotizzato, come semplice evento di riapertura di una fratturazione preesistente, l'analisi svolta ha permesso di determinare con evidenza un movimento rotazionale della parte destra della scultura con perno sull'estremità destra del blocco piano.

Oltre al sistematismo rotazionale l'analisi svolta evidenzia una perdita di materiale (in blu) nella parte superiore centrale della mensola su cui poggia l'elemento scultoreo, oltre a un' apparente deformazione (in rosso) sul capo di Sansone. Questo aspetto di apparente "rigonfiamento" nel tempo della scultura, inizialmente difficilmente giustificabile dal punto di vista fisico, è stato spiegato approfondendo le indagini e venendo a conoscenza di un ulteriore intervento di restauro in quella zona successivo al primo rilevamento svolto ma comunque precedente allo smontaggio del ponteggio.

L'interessante risultato ottenuto è stato portato all'attenzione del responsabile degli interventi di restauro effettuati sulla torre Ghirlandina per fornire utili informazioni a supporto dell'eventuale ripristino della scultura alla situazione iniziale o del consolidamento/preservazione dello stato attuale avendo però piena consapevolezza dei meccanismi che hanno provocato il danneggiamento.

## **Rilevamento a breve portata: potenzialità e problematiche**

Nonostante il risultato ottenuto dal confronto dei due modelli 3D ad altissima risoluzione sia di enorme valore conoscitivo, l'esperienza svolta ha comunque evidenziato alcune problematiche. A differenza dei casi precedentemente descritti, le questioni maggiormente spinose non riguardano tanto la metodologia di indagine e confronto quanto più aspetti operativi di rilievo ed utilizzo dei risultati.

### ***Valutazione delle potenzialità***

L'elevatissima accuratezza di questa tipologia di strumentazione permetterebbe di effettuare acquisizioni periodiche tali da mettere in risalto microdeformazioni, microspaccature, usure ed alterazioni dell'opera, tramite "semplici" confronti diretti, rendendo possibili opportuni interventi da parte dei restauratori per evitare danni irreversibili. In eventuale caso di danno, le opere d'arte potrebbero inoltre essere ripristinate alla loro condizione preesistente prevedendo un confronto con il modello digitale acquisito prima dell'evento. A seguito dell'esperienza svolta, la tecnologia laser scanning a triangolazione ha dimostrato pienamente le potenzialità ipotizzate, classificandosi come metodologia indipendente per la precisa analisi quantitativa dei danneggiamenti, o deterioramenti, intervenuti su elementi scultorei, probabilmente anche se di ridotta entità e su brevi archi temporali. Nonostante in questo settore non esistano esperienze paragonabili in bibliografia, la scelta di utilizzo di una metodologia di indagine simile a quella del settore meccanico e metrologico ha permesso di raggiungere risultati di notevole rilevanza.

### ***Analisi delle problematiche***

Sebbene le potenzialità della tecnologia in questo settore siano veramente elevatissime, l'altra faccia della medaglia è rappresentata dalle difficoltà nella predisposizione di un sistema di riferimento indipendente che permetta la ripetibilità delle acquisizioni ed il confronto diretto dei modelli 3D. Questo aspetto è legato a molteplici fattori, alcuni dei quali toccati con mano nell'esperienza svolta. Spesso il primo elemento di vincolo è rappresentato proprio dal bene oggetto dei rilevamenti: il valore storico artistico del bene non permette l'installazione di riferimenti fissi su cui calibrare le misurazioni come avviene in ambito meccanico. Inoltre sembra essere prassi comune effettuare operazioni di conoscenza e conservazione solo a seguito di danni intercorsi.

Infine, un ultimo, ma non sicuramente per importanza, fattore limitante è il costo di questa tipologia di indagini in un settore, quello dei Beni Culturali, che almeno in Italia sta soffrendo di un prolungato periodo di difficoltà economica.



## 7. Conclusioni

---

L'attività di ricerca è nata nell'ambito delle più avanzate tecnologie della geomatica applicata e si è soffermata sulla definizione del corretto approccio metodologico per la documentazione geometrica attraverso la tecnica laser scanning. In particolare, è stato approfondito lo studio per la progettazione di analisi multi-temporali sfruttando questa metodologia, ponendo grande attenzione alla determinazione di tutti gli aspetti tecnici e metodologici fondamentali da conoscere e considerare in relazione a diversi contesti e ambiti applicativi.

### **Monitoraggio di versanti instabili**

La tecnologia laser scanning è efficacemente utilizzabile a sostegno della documentazione geomorfologica dei versanti instabili, perché è in grado di rivelare anche da elevate distanze caratteristiche e dettagli utili per migliorare la conoscenza del fenomeno e definirne il potenziale pericolo. In contesti territoriali, il rilievo laser scanning può essere eseguito sia da piattaforma aerea sia terrestre. Il rilevamento aereo (ALS) segue procedure consolidate e permette di creare modelli digitali del terreno (DTM) di grandi aree, preferibilmente pianeggianti, con risoluzioni massime di alcuni decimetri. Il rilevamento da piattaforma terrestre (TLS) permette invece di indagare superfici di estensione inferiore ma con risoluzioni decisamente superiori (fino a pochi centimetri) anche a grandi distanze; inoltre, grazie alla possibilità di scelta della migliore direzione di acquisizione, l'acquisizione laser scanning terrestre è ormai comunemente utilizzata per il rilievo morfometrico di dettaglio su pareti fortemente scoscese [Corsini et al., 2013], per le quali la tecnica ALS non può certamente assicurare un buon livello di dettaglio a causa della direzione di acquisizione nadirale.

Il vantaggio principale della tecnica a scansione laser rispetto alle altre tecniche geodetiche (o geomatiche), come i sistemi GNSS o stazione totale, consiste nel fornire una descrizione geometrica quasi spazialmente continua del fenomeno indagato in tempi relativamente brevi. Tuttavia, l'altra faccia della medaglia è rappresentata dall'impossibilità di identificare con esattezza caratteristiche puntuali dell'oggetto del rilevamento, determinando problematiche nell'accurata determinazione di eventuali spostamenti in atto. Nonostante ciò, la tecnologia laser scanning terrestre è già ampiamente utilizzata per il monitoraggio di frane e versanti, sebbene nella maggior parte dei casi le problematiche di analisi ed interpretazione dei risultati vengano completamente sottovalutate o addirittura non considerate. L'esperienza di ricerca condotta ha permesso di affrontare tutte le problematiche tecniche e logistiche per lo studio dei cambiamenti geomorfologici di un comparto attivo di frana rocciosa, tramite confronti multi-

temporali di dati laser scanning ottenuti da piattaforma terrestre a lunghissima portata (oltre 1 km) [Corsini et al., 2013].

Una delle problematiche fondamentali da considerare per realizzare analisi multi-temporali significative da dati laser scanning è il filtraggio della vegetazione. La presenza di vegetazione sul versante è un aspetto molto critico in quanto la crescita della flora può drasticamente cambiare la forma delle superfici rilevate e portare ad esempio a interpretazioni geometriche o volumetriche errate. Ad oggi, gli obiettivi della ricerca scientifica puntano verso una completa automazione del processo di filtraggio, anche se questo non è un compito semplice e di solito richiede nel finale una parte di processamento e controllo manuale. In letteratura sono state proposte una vasta gamma di soluzioni a problematiche di filtraggio della vegetazione per la corretta generazione di DTM da dati rilevati da piattaforma aviotrasportata e terrestre. Nel presente caso di studio sono stati testati svariati metodi di filtraggio per la rimozione della vegetazione presente nelle scansioni laser terrestri; oltre all'analisi del segnale di ritorno (*last pulse*), sono state effettuati tentativi di rimozione automatica basati sulla risposta radiometrica (riflettività e RGB) dei punti rilevati. Risultando non completamente soddisfacenti questi tentativi, in alternativa al filtraggio manuale, che su ampie zone di territorio è un procedimento molto lungo e dispendioso, è stato sperimentato l'utilizzo di una procedura iterativa semi-automatica, definita *2.5D raster*, basata sul confronto tra nuvola di punti e DTM sempre più dettagliati ed accurati. Questo metodo si è rivelato particolarmente efficiente sulle porzioni di territorio prevalentemente pianeggianti in cui la vegetazione cresce verticalmente mentre sulle pareti rocciose caratterizzate dalla presenza di piccoli e sporadici arbusti che si accrescono anche orizzontalmente il filtraggio manuale rimane l'unica soluzione possibile.

Oltre alle metodologie di rimozione della vegetazione, nelle attività di “monitoraggio” tramite tecnologia laser scanning la principale, e fondamentale, problematica da risolvere per una corretta interpretazione dei risultati è l'allineamento delle nuvole di punti in un unico sistema di riferimento locale utilizzabile per i confronti multi-temporali. L'affidabilità dei risultati finali, infatti, è strettamente dipendente dalla metodologia e dalla precisione di allineamento delle scansioni effettuate ai differenti istanti temporali di indagine [Bertacchini et al., 2012]. Sulla base dell'esperienza condotta è possibile affermare che una soluzione efficace a questo problema è stata individuata nella strategia diretta di allineamento delle scansioni. L'installazione di una postazione fissa e stabile (monumentazione a centramento forzato) garantisce il preciso riposizionamento dello strumento ad ogni campagna di rilevamento; l'orientamento del sistema di riferimento avviene fissando la direzione di acquisizione di un solo target (o riflettore) ad ogni campagna. Nonostante l'apparente semplificazione del metodo di allineamento, è necessario conoscere e considerare tutti gli aspetti tecnici e logistici del caso; attraverso il metodo diretto è infatti possibile garantire risultati affidabili solo se lo strumento è dotato di un compensatore biassiale di verticalità (o quantomeno di un inclinometro) che garantisca la coincidenza dell'asse primario con la direzione verticale correggendo anche i piccoli errori di mancata verticalità che comportano errori nella definizione degli angoli zenitali

e azimutali. Inoltre, questa strategia di allineamento non è in grado di fornire indicazioni significative sulla qualità e precisione del metodo, come invece possono fare i metodi indiretti [Rivola et al., 2011].

I metodi indiretti di allineamento richiedono l'identificazione, manuale o automatica, di almeno tre punti omologhi per ciascuna coppia di scansioni da allineare. L'operazione di riconoscimento manuale può essere efficacemente aiutata tramite l'installazione di target (o riflettori), con distribuzione omogenea, in aree esterne al corpo di frana indagato ritenute stabili. Questa necessità comporta spesso difficoltà nel trovare un numero sufficiente di punti, in posizioni stabili, visibili rispetto alla morfologia locale dell'area. Inoltre, sebbene l'individuazione della posizione del target rispetto alla scena acquisita sia agevolata (e a volte praticamente automatica) grazie all'elevata riflettività, deve comunque essere posta grande attenzione all'esatta identificazione delle coordinate del centro del bersaglio, da utilizzare per l'allineamento. Sebbene i tentativi siano stati molteplici, le particolari condizioni dell'esperienza condotta, l'installazione di pannelli riflettenti non ha permesso di ottenere risultati di allineamento soddisfacenti in relazione all'entità dei movimenti che ci si prefiggeva di individuare.

Un ultimo metodo di allineamento è quello basato sul riconoscimento automatico dei punti omologhi tramite algoritmi di *surface matching*. Sebbene questa metodologia conduca spesso ad ottimi risultati, se utilizzata per l'allineamento di scansioni di epoche temporali differenti, deve necessariamente essere effettuata su aree esterne al fenomeno indagato che sia possibile ritenere stabili. Questo approccio è apparentemente più facile perché l'indagine è più veloce ma l'interpretazione dei risultati potrebbe diventare complicata, o addirittura errata, se non supportata da una tecnica di rilevamento indipendente che validi l'ipotesi di stabilità delle aree su cui viene calcolato l'allineamento. Nel caso trattato, è stato possibile utilizzare l'algoritmo automatico ICP in soccorso alle altre tecniche di allineamento poiché l'ipotesi di stabilità dell'area su cui è stato applicato era assicurata dalla lunga serie temporale dei dati di monitoraggio con stazione totale automatizzata.

Effettuato l'allineamento delle varie scansioni nell'unico sistema di riferimento è possibile procedere con l'analisi multi-temporale dei dati. Le strategie di confronto perseguibili sono varie; è possibile confrontare tra loro le nuvole di punti acquisite ad ogni campagna di rilievo o i relativi DTM generati per triangolazione. Considerate le particolari condizioni del caso studio trattato è stato scelto di triangolare esclusivamente la nuvola di punti relativa alla prima campagna di rilievo e utilizzarla come riferimento per il confronto diretto con le altre nuvole di punti. L'approccio di triangolazione *Delaunay 2.5D* multi-risoluzione è risultato particolarmente efficiente in quanto, la mesh, creata sfruttando un punto di vista specifico ed utilizzando tutti i punti acquisiti, non presenta lacune e diviene quindi ideale per il confronto diretto lungo la direzione di vista, in questo caso scelta coincidente a quella di acquisizione [Castagnetti et al., 2014].

A seguito dell'esperienza svolta, la tecnologia laser scanning ha dimostrato di essere un potente strumento per l'analisi dei movimenti di un corpo di frana, nonostante la lenta cinematica del fenomeno e le grandi distanze operative di acquisizione. Le analisi multi-temporali da scansioni TLS hanno prodotto ottimi risultati, nonostante le criticità del caso di studio. Lo sviluppo di una metodologia di elaborazione dei dati specifica, basata sull'integrazione e validazione dei dati TLS con quelli ATS, ha permesso di ottenere stime delle entità di spostamento in modo quasi spazialmente continuo su tutto il corpo di frana indagato. I risultati ottenuti si sono rivelati assolutamente in linea con i dati ATS e con la distribuzione prevista dei movimenti sul versante, nonostante le precisioni del metodo fossero in alcuni casi inferiori al modulo dello spostamento calcolato. I dati laser scanning sono inoltre stati utili per l'integrazione dei dati di monitoraggio puntuali ottenuti con ATS in sistemi GIS e per evidenziare processi secondari come le inclinazioni degli specifici elementi di frana.

In conclusione, si ritiene corretto definire il sistema laser scanning come un importante strumento di supporto all'individuazione di movimenti su versanti instabili, piuttosto che un vero e proprio sistema di monitoraggio indipendente. Infatti, per proprie caratteristiche, non permette la misurazione ripetuta degli stessi punti e quindi difficilmente è possibile associare un esatto valore di spostamento ad ogni singolo punto acquisito, se non tramite elaborazioni ed interpolazioni che in qualche modo modificano il valore dell'osservazione grezza registrata.

## **Monitoraggio di strutture storiche**

Il rilevamento metrico tridimensionale in ambito architettonico è stato indubbiamente rivoluzionato con l'avvento della tecnologia laser scanning; la possibilità di acquisire tridimensionalmente un elevato numero di punti, in tempi brevi e con buona precisione, ha sensibilmente incrementato l'efficienza della fase di rilievo rispetto ai metodi tradizionali, contribuendo l'affermarsi di questa tecnologia per il rilevamento nel settore architettonico e strutturale. I dati spaziali raccolti possono poi essere utilizzati per realizzare i classici elaborati grafici bidimensionali o, sulla base dei modelli tridimensionali derivati, realizzare un'ampia varietà di analisi per svariate applicazioni. I laser scanner costituiscono a tutti gli effetti un kit di strumenti in grado di raggiungere obiettivi di misura precedentemente impensabili e organizzare solidi database di dati geospaziali per una gestione efficiente delle informazioni acquisite.

Il grande contributo tecnico e metodologico del rilevamento laser scanning riguarda in particolare il processo di dettagliata conoscenza geometrica dei manufatti rilevati, e non solo di restituzione bi o tri-dimensionale quali-quantitativa per finalità geometrica ed estetica [Castagnetti et al., 2011]. Il modello tridimensionale di una struttura o di un manufatto, anche nella sua fase più grezza (nuvola di punti), rappresenta un'enorme fonte di informazioni e offre potenzialità notevolmente superiori a semplici elaborati bidimensionali classici. L'elevata risoluzione di acquisizione permette di analizzare in dettaglio singoli elementi architettonici

costitutivi e costruttivi, anomalie geometriche, eventuali testimonianze di fessurazioni e deformazioni critiche per avanzare ipotesi sull'effettiva stabilità della struttura o sulla presenza di eventuali carichi aggiuntivi che incrementano le sollecitazioni imposte. Le possibilità in tal senso sono molteplici e prevedono approcci di analisi critica più o meno complesse nei confronti della struttura stessa e delle sue geometrie. Le informazioni estraibili dai dati laser scanning diventano fondamentali per valutare interventi di consolidamento e messa in sicurezza che si potrebbero rendere necessari per la struttura; ciò conferma anche la grande utilità del metodo come strumento di diagnostica ai fini di un'analisi strutturale.

È quindi evidente che il risultato di un rilievo laser scanning di un manufatto sia un modello 3D sufficientemente completo e accurato per essere utilizzato come base per indagini geometriche, permettendo di estrarre importanti informazioni relative alla struttura e al suo stato. Tuttavia, l'esperienza di ricerca condotta in questi anni permette di affermare con assoluta certezza come non sia possibile effettuare una corretta ed esaustiva interpretazione dei dati raccolti senza un confronto con la storia costruttiva della struttura o con un rilevamento precedente. Anche in ambito scientifico, accade spesso di imbattersi in "analisi delle deformazioni" derivate dal confronto tra una scansione laser che rappresenta lo stato di fatto della struttura al momento dell'acquisizione e un'ipotetica condizione geometrica ideale di quel particolare costruttivo. Le analisi effettuate sui dati di un unico istante temporale conducono all'individuazione di eventuali anomalie geometriche sulle strutture, quali fuori piombi, variazioni di spessori in murature e solai, particolari geometrie di volte, ecc., e non ad analisi delle deformazioni, non potendo conoscere con certezza uno stato di fatto preesistente. Soprattutto nel contesto dell'edilizia storica, in cui difficilmente si possono ricondurre le attuali condizioni di conservazione del bene a situazioni geometriche ideali, non è possibile fare analisi di spostamenti o deformazioni se non sulla base di una precisa conoscenza di un precedente assetto geometrico della struttura.

L'esperienza di ricerca condotta in ambito architettonico è stata indirizzata a cercare di chiarire le reali potenzialità di utilizzo di scansioni laser *mid-range* effettuate con strumenti distanziometrici per il confronto multi-temporale finalizzato alla valutazione dell'eventuale variazione di assetto geometrico su particolari edifici storici, quali le torri. Anche in questo caso si ritiene maggiormente opportuno parlare di confronti multi-temporali e non di vero e proprio monitoraggio delle deformazioni in quanto le particolari condizioni operative non hanno permesso la predisposizione di una metodologia di indagine specificatamente ideata per questo scopo. La peculiarità di un edificio di particolare interesse storico artistico inserito in pieno contesto urbano ha determinato l'esigenza di effettuare le campagne di rilievo senza la predisposizione di sistemi di riposizionamento strumentale e di materializzazione di punti di controllo esterni al corpo indagato.

In questo particolare caso, la problematica principale ha riguardato l'individuazione di un sistema di riferimento relativo, univocamente determinabile a tutte le epoche di acquisizione; la

manca di dati su aree sufficientemente estese all'esterno della struttura indagata ha ulteriormente complicato la procedura di allineamento. L'unica soluzione praticabile per permettere di realizzare il confronto multi-temporale tra le scansioni ha richiesto di effettuare ipotesi di stabilità su porzioni della struttura stessa. Ammettendo l'assenza di movimento, è stato possibile utilizzare il metodo dell'allineamento indiretto, sfruttando poi l'algoritmo automatico ICP per raggiungere precisioni di registrazione soddisfacenti in relazione all'entità dei cinematismi che ci si prefiggeva di indagare. È stato ritenuto che la fascia orizzontale nelle vicinanze della catena di contenimento inferiore potesse essere considerata priva di movimenti relativi significativi (almeno inferiori alla precisione di acquisizione), pertanto utilizzabile per l'allineamento dei modelli alle due epoche. Il risultato dell'allineamento tra le due epoche, al pari di quello ottenuto per la registrazione delle scansioni di ogni campagna di misura e dell'accuratezza di misura dell'elettrodistanziometro dello strumento, è stato considerato nella definizione dell'incertezza dei risultati del confronto (circa 1 cm).

Nel rilevamento tramite laser scanner, non potendo effettuare compensazioni sulle osservazioni acquisite, le prestazioni strumentali (accuratezza e *range noise*) determinano il grado di incertezza delle elaborazioni (allineamento) e conseguentemente dei risultati e delle analisi. Operando tramite metodologie di acquisizione (centramento forzato dello strumento e materializzazione di punti fissi) e di allineamento (tramite punti esterni all'oggetto indagato) più opportune alla finalità del confronto multi-temporale, sarebbero stati sicuramente ottenuti risultati di maggiore significatività, perché non influenzati da ipotesi di stabilità su porzioni della struttura, ma si ritiene comunque non avrebbero avuto un grado di incertezza sensibilmente superiore. In definitiva, nonostante la completa assenza delle condizioni basilari per la definizione di un sistema di monitoraggio, l'esperienza condotta ha comunque portato a discreti risultati, sebbene al limite della significatività del metodo. L'analisi del fenomeno di spanciamiento della fascia selenitica effettuata congiuntamente su tutti i lati della torre ha infatti permesso di giungere ad importanti considerazioni, soprattutto se relazionati alla direzione di pendenza della struttura. Sebbene i fenomeni di rigonfiamento siano limitati a poche aree e l'entità di incremento sia ridotta, i risultati dimostrano comunque una situazione potenzialmente critica che deve essere controllata nel tempo mediante un monitoraggio che può e deve poter essere perfezionato anche tramite l'utilizzo integrato di strumentazioni differenti.

Risulta allora strategico il progetto della posizione dei punti da monitorare e dei punti di stazione da cui effettuare le misure. In alcuni casi, quando l'eventuale dissesto è ben compreso e possono essere definite soglie di sicurezza, il monitoraggio può rappresentare un'alternativa all'intervento, a vantaggio della conservazione. Ulteriore considerazione che avvalorava ancor più l'importanza delle tecniche di rilevamento metrico: se ben comprese e rese affidabili, esse possono garantire la "non necessità" dell'intervento sull'edificio bene culturale. Sicuramente, in questo senso, la caratteristica della tecnologia a scansione, di poter acquisire geometrie complesse con elevate risoluzioni, aumenta significativamente il livello di conoscenza della

struttura e di comprensione dei cinematismi in atto, qualora supportata da altre consolidate tecniche di monitoraggio.

A seguito dell'esperienza svolta è possibile affermare che, in ambito architettonico, un progetto di monitoraggio non possa prescindere da una preliminare interpretazione del meccanismo di dissesto, che permetta di individuare una serie di punti notevoli da controllare tramite strumentazioni classiche ed affidabili. Sotto particolari precauzioni di utilizzo, la tecnica laser scanning può fornire un valido supporto all'interpretazione (quasi) spazialmente continua del comportamento dinamico del fenomeno, nei casi in cui questo non sia descritto in modo sufficientemente dettagliato dalla strumentazione classica puntuale.

Allo stato attuale della tecnologia e della ricerca, si ritiene di poter affermare che, difficilmente, la strumentazione laser scanning possa essere efficacemente utilizzata per problematiche di monitoraggio strutturale in modo completamente indipendente da altre tecniche topografiche classiche. L'eccezione potrebbe essere rappresentata da megastrutture quali dighe, ponti o tunnel soggette ad elevati carichi e sollecitazioni; tuttavia, considerata la grande rilevanza di questo tipo di strutture, è probabilmente esclusa qualsiasi possibilità di "controllo" tramite un'unica metodologia. Come dimostrato anche dalle esperienze reperibili in bibliografia, le potenzialità della tecnologia laser scanner possono essere efficacemente sfruttate a supporto del monitoraggio topografico classico, soprattutto per strutture di ingegneria civile in cui, potendo ricondurre a superfici matematiche gli elementi costitutivi, è possibile ridurre il rumore legato alle acquisizioni [Lindenbergh and Pfeifer, 2005].

## **Monitoraggio di sculture**

Le nuove tecnologie afferenti alla geomatica e all'informativa offrono oggi notevoli potenzialità applicative per la documentazione dei Beni Culturali, sia per quanto riguarda le fasi di acquisizione del dato, sia per tutte le fasi di rappresentazione, diffusione e comunicazione multimediale. La conservazione del patrimonio culturale mediante archiviazione digitale è diventato un obiettivo globale e una sfida per i ricercatori scientifici. Il rilievo digitale e la creazione di modelli tridimensionali di oggetti, opere e scene complesse ha ricevuto negli ultimi anni un forte interesse sia da parte della comunità scientifica sia del settore commerciale. Anche in questo settore, il rilievo metrico richiede un approccio sistematico: diverse soluzioni tecnologiche e diversi metodi di rilevamento 3D sono stati testati e sviluppati per varie tipologie di oggetti. Le tecniche *reality-based* (di rilevamento geometrico) maggiormente utilizzate a questo scopo sono la fotogrammetria (*image-based*) e la scansione laser o a luce strutturata (*range-based*).

Il percorso di ricerca intrapreso ha permesso di evidenziare potenzialità e problematiche di entrambi questi sistemi di acquisizione metrica [Toschi et al., 2013]. La fotogrammetria ha recentemente ricevuto nuovo impulso grazie all'implementazione di tecniche della *computer*

*vision* (in particolare algoritmi *Structure-from-Motion*) per l'elaborazione delle immagini con lo scopo primario dell'automazione del processo di restituzione tridimensionale, a leggero discapito dell'accuratezza dei risultati ottenibili. Il principale vantaggio dei sistemi passivi, e delle relative tecniche di elaborazione, risiede nell'elevata qualità dell'informazione radiometrica associata ai modelli 3D e nel basso costo e trasportabilità dei sensori. Nonostante, l'adozione di algoritmi automatici nel processo di elaborazione abbia ampliato considerevolmente l'utilizzo di questa tecnica, l'ottenimento di risultati affidabili è largamente subordinato all'esperienza sia nella fase di acquisizione sia di processamento delle immagini. Nel campo dei Beni Culturali, la strumentazione *range-based* ha riscontrato grande successo fin dall'inizio, aumentando notevolmente la facilità di acquisizione di dati morfometrici relativi a oggetti di varie forme e dimensioni. Essi richiedono tuttavia una certa esperienza di utilizzo, basata sulla conoscenza delle prestazioni di ciascuna tecnologia applicata al particolare campo operativo. L'elevato numero di informazioni richiede spesso tempi di editing maggiori di quelli di acquisizione, ad esempio per la creazione dei modelli geometrici poligonali. Il principale svantaggio è sicuramente rappresentato dal costo dell'hardware e, in buona parte, del software. Inoltre, sebbene molti sistemi acquisiscano oggi anche l'informazione radiometrica RGB grazie a fotocamere interne, la qualità della rappresentazione è sicuramente inferiore rispetto ad acquisizioni con tecniche fotogrammetriche.

Generalmente un processo che conduce dal rilievo alla modellazione 3D viene però attuato combinando diverse tecniche, cercando di sfruttare i vantaggi e sopperire agli eventuali limiti di ciascuna tecnica. In molte applicazioni, non esiste infatti un unico metodo di modellazione che soddisfa tutti i requisiti di progetto. La scelta della tecnica migliore o della metodologia d'integrazione dipende da molti fattori: scopo del rilievo, dettaglio geometrico richiesto, tipo di oggetto, materiale, esperienza, budget, ecc. Identificare il migliore approccio è la prima e fondamentale fase per riuscire a raggiungere obiettivi prefissati.

Appurate le enormi potenzialità della tecnologia laser scanner a triangolazione (*close range*) per l'accurata e dettagliata descrizione morfometrica dello stato di conservazione di paramenti scultorei decorativi, l'esperienza di ricerca condotta ha permesso di valutare la fattibilità dell'utilizzo di questa strumentazione per l'analisi del danneggiamento subito da una scultura lapidea, tramite confronto multi-temporale di scansioni. Almeno in linea teorica, l'elevatissima accuratezza (poche decine di micron) dei sistemi di misura a triangolazione permette di effettuare acquisizioni periodiche tali da mettere in risalto microdeformazioni, microspaccature, usure ed alterazioni dell'opera, tramite "semplici" confronti diretti, rendendo possibili opportuni interventi di conservazione e tutela da parte dei restauratori per evitare danni irreversibili. Inoltre, in eventuale caso di danno, le opere d'arte potrebbero essere ripristinate alla loro condizione preesistente prevedendo un confronto con il modello digitale acquisito prima dell'evento. Sebbene le potenzialità della tecnologia in questo settore siano veramente elevatissime, esistono difficoltà sia operative sia organizzative sia ne limitano le possibilità di impiego: mancanza di lungimiranza da parte degli enti preposti per la predisposizione di un

piano di controllo e conservazione dei beni, difficoltà di accesso ai luoghi di conservazione dei beni e conseguenti difficoltà e problematiche operative di acquisizione, elevato costo della strumentazione ed elevata competenza tecnica richiesta nell'esecuzione dei rilievi. A parziale testimonianza di queste difficoltà vi è la totale assenza di significative esperienze anche in ambito scientifico di confronto multi-temporale tra modelli 3D ad altissima risoluzione per la quantificazione metrica dei danneggiamenti subiti da opere scultoree.

Nonostante i risultati dell'esperienza di ricerca condotta in questo ambito operativo siano di enorme valore conoscitivo e conservativo, durante lo svolgimento delle attività si sono evidenziate problematiche contingenti da affrontare e tentare di risolvere. In questo caso, le questioni maggiormente spinose non hanno riguardato tanto la metodologia di indagine e confronto quanto più aspetti operativi di rilievo ed utilizzo dei risultati e delle informazioni estratte. Il primo elemento di vincolo è rappresentato proprio dall'oggetto dei rilevamenti: il bene culturale. Proprio per il valore storico, artistico e culturale del bene stesso, spesso, non è permesso toccarlo né tantomeno spostarlo dalla propria collocazione per consentirne un rilevamento agevole e completo. Inoltre, sembra essere prassi comune effettuare precise ed accurate operazioni di rilevamento tridimensionale per la conoscenza e la conservazione del bene solo a seguito di danneggiamenti intercorsi; risultano cioè rari i casi in cui queste attività vengono svolte al vero scopo di conservazione e tutela. Operando secondo questa erronea strategia, difficilmente gli enti preposti alla conservazione del patrimonio culturale decideranno di pianificare rilevamenti periodici per il controllo dello stato di conservazione dei beni a rischio; questo determina l'impossibilità della predisposizione di adeguati accorgimenti, come ad esempio l'installazione di riferimenti fissi, per assicurare la ripetibilità dei rilevamenti nel tempo e il conseguente confronto diretto tra le acquisizioni. Un ulteriore fattore limitante è legato alle condizioni operative di rilievo. Come detto, spesso, non è possibile spostare il bene oggetto dei rilevamenti presso un laboratorio in cui è possibile operare secondo le migliori condizioni ambientali possibili; al contrario, nella maggior parte dei casi, si deve operare in ambienti o luoghi soggetti a problematiche quali vibrazioni, polverosità, luce solare, ecc., che mettono a dura prova le seppur elevate prestazioni strumentali.

A seguito dell'esperienza svolta, la tecnologia laser scanning a triangolazione ha dimostrato pienamente le potenzialità ipotizzate, classificandosi come metodologia indipendente per la precisa analisi quantitativa dei danneggiamenti, o deterioramenti, intervenuti su elementi scultorei, probabilmente anche se di ridotta entità e su brevi archi temporali. Nonostante in questo settore non esistano esperienze paragonabili in bibliografia, la scelta di utilizzo di una metodologia di indagine simile a quella del settore meccanico e metrologico ha permesso di raggiungere risultati di notevole rilevanza. Grazie a particolari accorgimenti in fase di acquisizione, è stato possibile ottenere elevate accuratezze sebbene i rilievi siano stati effettuati prima da ponteggio e, successivamente, addirittura da piattaforma mobile. L'interessante risultato ottenuto dal confronto è stato sottoposto ai responsabili degli interventi di restauro per cercare di fornire loro utili informazioni a supporto dell'eventuale

ripristino della scultura alla situazione iniziale o del consolidamento/preservazione dello stato attuale avendo però piena consapevolezza dei meccanismi che hanno provocato il danneggiamento. Proprio in questa fase, però, si è riscontrata una difficoltà di reale utilizzo delle informazioni tridimensionali trasmesse da parte dei tecnici addetti al restauro, per i quali la documentazione fotografica rimane ancora il miglior metodo di indagine.

## 8. Discussione

---

La comprensione dei fenomeni che avvengono sul territorio, inteso in senso esteso, rappresenta la base necessaria per intervenire nel “governo dei processi”. La tecnologia laser scanning sembra poter essere, in molti casi, la soluzione ottimale a questa problematica: l'acquisizione automatica di un numero elevatissimo di punti nello spazio tridimensionale, in tempi relativamente brevi, permette certamente una dettagliata rappresentazione della realtà.

È tuttavia doveroso sottolineare e ricordare che troppo spesso i termini dato e informazione sono utilizzati quali sinonimi, mentre in realtà è profonda la differenza del loro rispettivo significato. Il dato costituisce la base dell'informazione e, in generale, rappresenta la misura del mondo esterno o di una sua caratteristica specifica. Questa distinzione fondamentale che, troppo spesso, viene sottovalutata o addirittura ignorata, deriva dal fatto che l'acquisizione di informazioni da parte di un soggetto passa attraverso un processo cognitivo basato sul rilevamento e sull'analisi di dati; soltanto un sistema esperto (umano o non) è in grado di convertire un dato in informazione, cioè di leggerlo secondo determinate regole che lo rendano utile.

L'elevata densità di acquisizione, abbinata alle potenzialità di elaborazione software, permette di ottenere dalle acquisizioni laser prodotti ed analisi di elevatissimo contenuto informativo, che necessitano però di una corretta interpretazione da parte di un operatore esperto e qualificato. L'essenza della geomatica risiede proprio nella gestione del contenuto informativo dei dati territoriali e ambientali utilizzando le scienze informatiche, tramite la sistematica e rigorosa elaborazione dei dati acquisiti attraverso strumenti tecnici avanzati (hardware), metodi, modelli e algoritmi (software), verso una sempre più sofisticata automatizzazione. La strumentazione laser scanning rappresenta quindi un efficiente metodo per la raccolta di dati spaziali che devono necessariamente essere elaborati tramite software specifici ed analizzati da operatori esperti al fine di convertirli in informazioni utili per la conoscenza e comprensione della realtà rilevata.

Nel processo di conoscenza e comprensione di un fenomeno in evoluzione, non è sufficiente effettuare la misurazione delle coordinate spaziali dei punti ad un unico istante temporale. I sistemi di monitoraggio geomatico devono infatti essere in grado di garantire un controllo proattivo di una problematica legata ad eventuali movimenti o deformazioni dell'oggetto monitorato, analizzando la variazione della posizione di punti caratteristici dell'oggetto nel tempo. In generale, sebbene le misurazioni vengano comunque effettuate in modo discreto, si possono intraprendere attività di monitoraggio in continuo o in campagne periodiche, a seconda che le osservazioni siano acquisite in numero rilevante o limitato rispetto all'arco temporale complessivo del monitoraggio. Il rilevamento laser scanning, invece, anche se effettuato per finalità di monitoraggio o controllo delle deformazioni, sarà quasi certamente

sempre previsto tramite campagne periodiche. Rispetto alle classiche metodologie di monitoraggio geomatico, la tecnica a scansione presenta aspetti peculiari che ne rendono sconsigliabile l'utilizzo in modo continuo, in particolare l'impossibilità di scegliere i punti esatti da rilevare. Le tecniche di misurazione metrica utilizzate per scopi di monitoraggio devono essere capaci di quantificare le eventuali variazioni angolari e spaziali (ovvero gli spostamenti) dei punti rilevati in una, due o tre dimensioni.



















I sistemi di monitoraggio hanno cioè lo scopo di fornire informazioni per la conoscenza ed il controllo della problematica legata al fenomeno in osservazione; la fase più delicata del processo di conoscenza è quindi rappresentata dall'analisi dei risultati per l'estrazione e l'interpretazione del contenuto informativo dai dati di monitoraggio acquisiti tramite i sensori. I prodotti risultanti dai confronti tra acquisizioni effettuati con tecnologia laser scanning ad epoche differenti sono spesso costituiti da mappe di spostamento o deformazione, molto scenografiche e ricche di contenuto informativo, principalmente grazie all'elevata densità di punti rilevata. Tuttavia, nonostante questi elaborati contengano effettivamente un elevato livello di informazione, per una corretta interpretazione dei risultati deve essere prestata particolare attenzione alla metodologia di elaborazione ed analisi utilizzata. Come visto, la caratteristica di indistinta acquisizione di punti sull'oggetto del rilevamento, tipica degli strumenti a scansione, determina l'impossibilità del confronto diretto e puntuale tra le coordinate dei punti acquisiti. Per poter quindi operare un confronto tra scansioni laser acquisite a differenti epoche si rende necessario effettuare specifiche elaborazioni sui dati rilevati.

Ogni passaggio di elaborazione (*meshing*, *post-processing*, verifica) a partire dai dati grezzi acquisiti è frutto dell'utilizzo di algoritmi ed interpretazioni, spesso anche personali, che introducono ulteriori fonti di incertezza nel dato acquisito, che rimane la rappresentazione più fedele (accurata) della realtà. Il valore di incertezza legato all'intero processo di acquisizione ed elaborazione dati è il primo e fondamentale parametro da considerare nell'interpretazione dei risultati estratti dalle acquisizioni laser scanning. Inoltre, nella maggior parte delle applicazioni gli elaborati sono costituiti da mappe di spostamento, o deformazione, generate tramite algoritmi automatici di verifica che, quasi sempre, permettono il calcolo delle distanze tra i modelli 3D solamente lungo direzioni fissate o, in alternativa, lungo la direzione normale alla singola superficie triangolare analizzata. Nei casi in cui non sia nota, o quantomeno ipotizzabile, la direzione del movimento, l'analisi affrettata dei risultati potrebbe portare ad interpretazione errate del reale cinematismo in atto. Esclusivamente la piena consapevolezza delle potenzialità e delle problematiche, sia tecniche sia operative, in fase di acquisizione, elaborazione ed interpretazione permette di estrarre dai dati laser scanning utili e significative informazioni per la corretta comprensione del fenomeno indagato.

Innanzitutto, l'attività di ricerca nel campo della geomatica applicata ha permesso di individuare tutti gli aspetti tecnici e metodologici fondamentali da considerare per la corretta progettazione e realizzazione di sistema di monitoraggio, indipendentemente dalla tecnica di

misurazione utilizzata e dall'ambito applicativo preso in esame. Successivamente, la linea di ricerca è stata rivolta alla valutazione delle potenzialità e dei limiti della tecnologia laser scanning per finalità di monitoraggio geomatico. Il principale criterio che si è scelto di analizzare per poter annoverare il laser scanner terrestre tra la strumentazione geomatica di monitoraggio è stato la possibilità di calcolare, tramite i prodotti delle scansioni, spostamenti o deformazioni agenti sull'oggetto monitorato con buona accuratezza ed indipendenza. Con la tabella seguente si è cercato di racchiudere le risposte alla domanda che ha guidato l'intero percorso di ricerca relativamente ai differenti casi di studio affrontati: la tecnologia laser scanning costituisce realmente un sistema di monitoraggio geomatico?

*Tabella 8.1: Valutazione qualitativa delle potenzialità della tecnologia laser scanning terrestre per il monitoraggio geomatico nei tre settori indagati.*

	Versanti instabili	Edifici storici	Sculture danneggiate
Accuratezza rispetto ai movimenti attesi			
Grado di indipendenza della metodologia			
Apporto di informazione			
Integrazione con altre tecnologie			
Grado di innovazione			
Analisi costi-benefici			

Analizzando la tabella secondo i parametri di valutazione (per righe), e non per i diversi ambiti applicativi (per colonne), i due aspetti di maggior evidenza sono, da una parte, l'elevato apporto di informazione al processo di conoscenza e comprensione del fenomeno in evoluzione e, dall'altra, il ridotto grado di indipendenza per l'estrazione di queste informazioni. All'apparenza questi due aspetti potrebbero anche quasi sembrare in discordanza tra loro: la tecnica laser scanning è in grado di fornire molte informazioni sul processo cinematico in atto ma non in modo indipendente. In realtà, questi due aspetti enfatizzano le enormi potenzialità documentative della tecnologia a scansione sottolineando però le difficoltà di estrazione ed interpretazione dei risultati a causa dell'impossibilità del confronto diretto e puntuale tra coordinate.

Considerazioni discordanti sembrano esservi anche valutando il grado di accuratezza rispetto ai movimenti attesi del fenomeno indagato. In realtà queste discrepanze sono frutto dell'utilizzo di tecnologie che permettano un rilevamento efficiente in funzione delle differenti scale di intervento: le elevatissime accuratezze degli strumenti a triangolazione (poche decine di micron) non possono certo essere confrontate con quelle decisamente inferiori (fino ad alcuni

centimetri) degli scanner distanziometrici che, però, permettono di rilevare aree decisamente più estese. Ciò che al momento accomuna tutte le tecniche di rilevamento a scansione e, in linea generale, determina una minore accuratezza è l'impossibilità di effettuare una compensazione delle osservazioni. Nel settore geomatico, le prestazioni strumentali non sono l'unico e, forse, nemmeno il predominante fattore che determina l'accuratezza di una misurazione; in un rilevamento topografico classico, la metodologia di acquisizione delle osservazioni e la strategia di compensazione sono probabilmente gli aspetti di maggiore influenza sulla qualità dei dati risultanti. Nel rilevamento laser scanning, sebbene possano essere adottate differenti metodologie di rilievo, allineamento e trattamento dei dati, non vi sono possibilità di compensazione delle osservazioni, motivo per cui il grado di incertezza (o accuratezza) del rilievo sarà difficilmente quantificabile e, probabilmente, superiore a quello di un rilevamento topografico di pari prestazioni strumentali ma compensato.

Giudizi indubbiamente positivi derivano invece dalla valutazione della possibilità di integrazione con altre tecnologie, in particolare con tecniche topografiche classiche, e dal grado di innovazione portato dall'utilizzo delle scansioni per la conoscenza e comprensione dei fenomeni cinematici indagati. Sebbene si stia valutando la medesima metodologia di indagine, l'analisi costi-benefici ha portato a risultati sensibilmente differenti nei tre ambiti considerati. In questo caso, però, difficilmente si riuscirà mai ad esprimere un giudizio complessivo perché fortemente variabile in funzione della reale utilità dei prodotti ottenibili. Tuttavia, grazie al costante sviluppo tecnologico e la conseguente riduzione dei costi della strumentazione, la speranza è quella di permettere l'utilizzo efficace di questa tecnologia per un numero sempre maggiore di applicazioni.

Nei tre capitoli in cui sono stati esposti i casi di studio, la valutazione delle potenzialità di utilizzo della strumentazione a scansione laser per finalità di monitoraggio è stata principalmente effettuata sulla base delle evidenze relative alla particolare tipologia di scanner utilizzato in quel preciso ambito applicativo. Tuttavia, sebbene esistano differenti tipologie di strumentazioni a scansione laser e ognuna abbia prestazioni che ne rendono l'utilizzo efficace solo in un limitato *range* di applicazioni, a seguito dell'esperienza di ricerca applicata condotta si ritiene di poter esprimere anche un giudizio generale sull'effettiva possibilità di utilizzare la strumentazione laser scanner terrestre per applicazioni di monitoraggio. Allo stato attuale della tecnologia e della ricerca e, indipendentemente dall'ambito applicativo e dalla tipologia di strumentazione utilizzata, si ritiene di poter affermare che:

***Il laser scanning terrestre non può essere considerata una vera e propria tecnica di monitoraggio geomatico ma solo una valida metodologia d'indagine per analisi a elevata risoluzione spaziale.***

## Bibliografia

---

Abellán A, Vilaplana JM, Martínez J. 2006. Application of a long-range terrestrial laser scanner to a detailed rockfall study at Vall de Nùria (Eastern Pyrenees, Spain). *Engineering Geology* **88**: 136-148. DOI: 10.1016/j.enggeo.2006.09.012.

Abellán A, Jaboyedoff M, Oppikofer T, Vilaplana JM. 2009. Detection of millimetric deformation using a terrestrial laser scanner: experiment and application to a rockfall event. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **9**: 365-472. doi: 10.5194/nhess-9-365-2009.

Abellán A, Calveta J, Vilaplana JM, Blanchard J. 2010. Detection and spatial prediction of rockfalls by means of terrestrial laser scanner monitoring. *Geomorphology* **119**: 162-171. DOI: 10.1016/j.geomorph.2010.03.016.

Abellán A, Vilaplana JM, Calvet J, García-Sellès D, Asensio E. 2011. Rockfall monitoring by Terrestrial Laser Scanning - case study of the basaltic rock face at Castellfollit de la Roca (Catalonia, Spain). *Natural Hazards Earth System Sciences* **11**: 829-841. DOI: 10.5194/nhess-11-829-2011.

Abrardo A, Alparone L, Cappellini V. 1996. Art-Works image processing and transmission. *Supplement ZAMM* **76** (3): 55–58.

Alba M, Fregonese L, Prandi F, Scaioni M, Valgoi P. 2006. Structural monitoring of a large dam by terrestrial laser scanning. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **36**(5): 6 pp.

Alba M e Scaioni M. 2007. Comparison of Techniques for Terrestrial Laser Scanning Data Georeferencing Applied to 3-D Modelling of Cultural Heritage. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **36**: on CD-ROM.

Alba M e Scaioni M. 2010. Automatic detection of changes and deformations in rock faces by terrestrial laser Scanning. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII, Part 5, Commission V Symposium, Newcastle upon Tyne, UK: 11-16.

Al Khalil O e Grussenmeyer P. 2002. Single image and topology approaches for modelling buildings. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **34**(5): 131–136.

Almagià R. 1097. Elenco dei principali scritti riguardanti le frane dell' Appennino. *Studi geografici sopra le frane in Italia*, 1: 323-325; 2: 409-410.

Alparone L, Barni M, Cappellini V. 1999. Restauro elettronico di palinsesti antichi mediante ricostruzione morfologica. In: Regni M., Tordella P.G. (Eds.), *Conservazione dei*

Materiali Librari Archivistici e Grafici, Collana "Documenti" della Soprintendenza per i Beni Culturali della Regione Autonoma Valle d'Aosta, vol II, Allemandi, Torino, 1999.

Arosio D, Longoni L, Papini M, Scaioni M, Zanzi L, Alba M. 2009. Towards rockfall forecasting through observing deformations and listening to microseismic emissions. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **9**: 1119-1131. doi:10.5194/nhess-9-1119-2009.

Barazzetti L, Scaioni M, Remondino F. 2010. Orientation and 3D modeling from markerless terrestrial images: combining accuracy with automation. *The Photogrammetric Record*, **25**(132): 356-381.

Barni M, Bartolini F, Cappellini V. 1999. Image processing tools for the enhancement of the aspect of ancient painting reproductions. *Proceeding of the 2nd International Congress on Science and Technology for the safeguard of cultural heritage in the Mediterranean basin*, Paris, 5–6 July, 1999.

Barber D, Mills J, Bryan P. 2003. Towards a standard specification for terrestrial laser scanning of cultural heritage. *Proceedings of the XXth ISPRS Congress on Geo-Imagery Bridging Continents*, Vol XXXV, Part B5.

Barni M, Bartolini F, Cappellini V. 1999. Image processing tools for the enhancement of the aspect of ancient painting reproductions. *Proceeding of the 2nd International Congress on Science and Technology for the safeguard of cultural heritage in the Mediterranean basin*, Paris, 5–6 July, 1999.

Beraldin JA, Blais F, Cournoyer L, Rioux M, El-Hakim SF, Rodella R, Bernier F, Harrison N. 1999. Digital 3D imaging system for rapid response on remote sites. *IEEE Proceedings of Second 3-D Digital Imaging and Modeling Conference*, Ottawa, Canada, 4th to 8th October 1999. 546 pages: 34–43.

Beraldin JA, Picard M, El-Hakim SF, Godin G, Latouche C, Valzano V, Bandiera A. 2002. Exploring a Byzantine crypt through a high-resolution texture mapped 3D model: combining range data and photogrammetry. *Proceedings of the CIPA WG6 International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording*, Corfu, Greece, 1st to 2nd September 2002. 159 pages: 65–72.

Beraldin JA, Picard M, El-Hakim SF, Godin G, Valzano V, Bandiera A. 2005. Combining 3D technologies for cultural heritage interpretation and entertainment. *Proceedings of SPIE-IS&T Electronic Imaging: Videometrics VIII*, San Jose, California, 18th to 20th January 2005. Vol. 5665, 374 pages: 108–118.

Bernardini F, Rushmeier H, Martin IM, Mittleman J, Taubin G. 2002. Building a digital model of Michelangelo's Florentine Pieta. *IEEE Computer Graphics and Applications*, **22**(1): 59–67.

Bertacchini E, Boni E, Capra A, Castagnetti C, Dubbini M. 2009. Rilievo laser scanner per lo studio e l'analisi di strutture a sviluppo prevalentemente verticale: Torre Asinelli (Bologna), Torre Ghirlandina e della Sagra di Carpi (Modena). Atti 13a Conferenza Nazionale ASITA09.

Bertacchini E, Capra A, Castagnetti C, Dubbini M. 2008. Il rilievo laser scanner 3D della Torre Campanaria della Pieve di Santa Maria in Castello, detta La Sagra. Atti 12a Conferenza Nazionale ASITA08.

Bertacchini E, Boni E, Capra A, Castagnetti C, Dubbini M. 2010. Terrestrial laser scanner for surveying and monitoring middle age towers. Proceedings of XXIV FIG International Congress. ISBN 978-87-90907-87-7.

Bertacchini E, Capra A, Castagnetti C, Corsini A. 2011. Atmospheric corrections for topographic monitoring systems in landslides. Proceedings of FIG Working Week 2011, Bridging the Gap between Cultures, Marrakech, Morocco. ISBN 978-87-90907-92-1.

Bertacchini E, Capra A, Castagnetti C, Rivola R. 2012. Investigating an Active Rockslide by Long-range Laser Scanner: Alignment Strategy and Displacements Identification. Proceeding of FIG Working Week 2012, Rome, Italy. ISBN 97887-90907-98-3.

Besl PJ, McKay ND. 1992. A method for registration of 3-D shapes. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence **14**: 239-256. DOI: 10.1109/34.121791

Bilotta G. 2012. Umanità vista da lontano. Telerilevamento da satellite e grandi progetti europei: GMES e NEREUS. Tesi di dottorato di ricerca in: Nuove Tecnologie e Informazione Territorio-Ambiente. Università IUAV di Venezia.

Bitelli G, Dubbini M, Zanutta A. 2004. Terrestrial laser scanning and digital photogrammetry techniques to monitor landslide bodies. Proceedings of the XX<sup>th</sup> ISPRS Congress Geo-Imagery Bridging Continents: 246-251.

Blais F. 2004 A review of 20 years of range sensor development. Journal of Electronic Imaging, **13**(1): 231- 240.

Blikra LH. 2006. The Åknes rockslide: Monitoring, threshold values and early-warning. Landslides and Engineered Slopes. From the Past to the Future. Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Symposium on Landslides and Engineered Slopes, 30 June - 4 July 2008, Xi'an, China: 1089-1094. DOI: 10.1201/9780203885284-c143.

Boccardo P. 2013. Geomatica per l'infomobilità e ITS. La nostra Geomatica quotidiana. Convegno presso Museo Regionale di Scienze Naturali, Torino.

Böhler W, Hein G, Marbs A. 2001. The potential of non-contact close range laser scanners for cultural heritage recording. Proceedings of XVIII CIPA Symposium - Postdam, Germany.

Böhler W e Marbs A. 2004. 3D scanning and photogrammetry for heritage recording: a comparison. Proceedings of the 12th International Conference on Geoinformatics, Gävle, Sweden, 7th to 9th June 2004. 291–298.

Böhler W. 2005. Comparison of 3D laser scanning and other 3D measurement techniques. Recording, Modelling and Visualisation of Cultural Heritage (Eds. E. P. Baltsavias, A. Gruen, L. Van Gool and M. Pateraki). Taylor & Francis, London, UK. 513 pages: 89–99.

Borg CE e Cannataci JA. 2002. Thealasermetry: a hybrid approach to documentation of sites and artefacts. Proceedings of the CIPA WG6 International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording, Corfu, Greece, 1st to 2nd September 2002. 159 pages: 93–104.

Brückl E, Brunner FK, Kraus K. 2006. Kinematics of a deep-seated landslide derived from photogrammetric, GPS and geophysical data. *Engineering Geology* **88**: 149-159. DOI: 10.1016/j.enggeo.2006.09.004

Bruno F, Bruno G, De Sensi G, Luchi ML, Mancuso S, Mazzupappa M. 2010. From 3d reconstruction to virtual reality: a complete methodology for figital archaeological exhibition. *Journal of Cultural Heritage*, **11**: 42-49.

Bull JM, Miller H, Gravley DM, Costello D, Hikuroa DCH, Dix JK. 2010. Assessing debris flows using LIDAR differencing: 18 May 2005 Matata event, New Zealand. *Geomorphology* **124**: 75-84. DOI: 10.1016/j.geomorph.2010.08.011.

Cadignani R. 2009. La torre Ghirlandina. Un progetto per la conservazione. Luca Sossella Editore, Roma, p. 288. ISBN 8889829729.

Cadignani R. 2010. La Torre Ghirlandina. Storia e restauro. Luca Sossella Editore, Roma, p. 320. ISBN: 9788889829912.

Caon S. 2013. I sistemi informativi a supporto dello sviluppo energetico sostenibile. La nostra Geomatica quotidiana. Convegno presso Museo Regionale di Scienze Naturali, Torino.

Cardaci A, Mirabella Roberti G, Versaci A. 2011. From the continuous to the discrete model: a laser scanning application to conservation projects. Proceedings of the 4th ISPRS International Workshop 3D-ARCH 2011: "3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures". Trento, Italy, 2-4 March 2011

Carr JC, Beatson RK, Cherrie JB, Mitchell TJ, Fright WR, McCallum BC, Evans TR. 2001. Reconstruction and representation of 3D objects with radial basis functions. Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques: 67-76. doi: 10.1145/383259.383266.

Cassatella C. e Guerreschi P. 2013. Analisi di visibilità per la tutela e la pianificazione del paesaggio. La nostra Geomatica quotidiana. Convegno presso Museo Regionale di Scienze Naturali, Torino.

Castagnetti C e Cielo R. 2009. Il rilievo laser scanner 3D della villa romana di Montegibbio (Sassuolo, MO). Collana Quaderni di Archeologia dell'Emilia Romagna. ISSN 1593-2680.

Castagnetti C, Bertacchini E, Boni E, Capra A, Dubbini M. 2011. Il laser scanning terrestre per l'analisi di edifici di interesse storico ed artistico. *Geomatica – Le radici del futuro, Tributo a Sergio Dequal e Riccardo Galetto*: 99-107. ISBN 88-901939-6-4.

Castagnetti C, Bertacchini E, Corsini A, Capra A. 2013. Multi-sensors integrated system for landslide monitoring: critical issues in system setup and data management. *European Journal of Remote Sensing*, **46**: 104 – 124. doi: 10.5721/EuJRS20134607

Castagnetti C, Bertacchini E, Corsini A, Rivola R. 2014. A reliable methodology for monitoring unstable slopes: the multi-platform and multi-sensor approach. *Proceeding SPIE 9245, Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications V, 92450J*. doi: 10.1117/12.2067407.

Castañeda C, Gutiérrez F, Manunta M, Galve JP. 2009. DInSAR measurements of ground deformation by sinkholes, mining subsidence, and landslides, Ebro River, Spain. *Earth Surface Processes and Landforms* **34**: 1562-1574. DOI: 10.1002/esp.1848

Catani F, Farina P, Moretti S, Nico G, Strozzi T. 2005. On the application of SAR interferometry to geomorphological studies: estimation of landform attributes and mass movements. *Geomorphology* **66**: 119-131. DOI: 10.1016/j.geomorph.2004.08.012

Cavani F. 1912. Sulla pendenza e sulla stabilità della torre degli Asinelli di Bologna.

Cavani F. 1913. Movimenti della sommità rispetto alla base della torre degli Asinelli.

Cavani F. 1917. Sulla pendenza delle principali torri di Bologna, Modena e Pisa.

Cavani F. 1919. Su alcune questioni relative alla pendenza delle torri.

Chen Y, Medioni G. 1992. Object modelling by registration of multiple range images. *Image and Vision Computing* **10**: 145-155. DOI: 10.1109/ROBOT.1991.132043

Corsini A, Borgatti L, Coren F, Vellico M. 2007. Use of multitemporal airborne lidar surveys to analyse post-failure behaviour of earth slides. *Canadian Journal of Remote Sensing* **33**: 116-120. DOI: 10.5589/m07-015

Corsini A, Borgatti L, Cervi F, Dahne A, Ronchetti F, Sterzai P. 2009. Estimating mass-wasting processes in active earth slides-earth flows with time-series of High-Resolution DEMs from photogrammetry and airborne LiDAR. *Natural Hazards and Earth System Sciences* **9**: 433-439. DOI: 10.5194/nhess-9-433-2009

Corsini A, Castagnetti C, Bertacchini E, Rivola R, Ronchetti F, Capra A. 2013a. Integrating airborne and multi-temporal long-range terrestrial laser scanning with total station

measurements for mapping and monitoring a compound slow moving rock slide. *Earth Surface Processes and Landforms*, **38**: 1330-1338. ISSN 0197-9337. doi: 10.1002/esp.3445.

Corsini A, Ronchetti F, Bertacchini E, Bonacini F, Calicetti P, Capra A, Castagnetti C, Piantelli E, Caputo G, Truffelli G. 2013b. Large scale slope instability affecting SS63 near the Cerreto Pass (northern Apennines, Italy). Margottini C., Canuti, P., Sassa, K. (Eds.), *Landslide Science and Practice*, **6**: 231-237. Berlin Springer, ISBN 9783642313189.

Counsell J e Brkljac N. 1999. A role for VRML as a multimedia backbone in interpreting cultural heritage sites. *Proceedings of IEEE International Conference on Information Visualization*: 115–119.

Cremonini R. e Pispico R. 2013. La Geotematica in tempo reale nella gestione operativa dei rischi naturali. La nostra Geomatica quotidiana. Convegno presso Museo Regionale di Scienze Naturali, Torino.

Cridland T. 2004. The use of ground based laser scanners for the monitoring of building deformations. MEng dissertation, the University of Nottingham.

Dalton-Taggart R. 2012. Scanning the Sacred Moai of Rapa Nui. Professional surveyor. Online only article.

Delacourt C, Raucoules D, Le Mouélic S, Carnec C, Feurer D, Allemand P, Cruchet M. 2009. Observation of a Large Landslide on La Reunion Island Using Differential Sar Interferometry (JERS and Radarsat) and Correlation of Optical (Spot5 and Aerial) Images. *Sensors* **9**: 616-630. DOI:10.3390/s90100616

Delaunay B. 1934. Sur la sphère vide. *Izvestia Akademii Nauk SSSR, Otdelenie Matematicheskikh i Estestvennykh Nauk* **7**: 793-800.

DeLong SB, Prentice CS, Hilley GE, Ebert Y. 2011. Multitemporal ALSM change detection, sediment delivery, and process mapping at an active earthflow. *Earth Surface Processes and Landforms*. Article first published online. DOI: 10.1002/esp.2234.

Delucchi L. 2013. OpenStreetMap: l'informazione geografica per tutti. La nostra Geomatica quotidiana. Convegno presso Museo Regionale di Scienze Naturali, Torino.

Denora D, Romano L, Cecaro G. 2011. Terrestrial laser scanning for the Montaguto landslide (Southern Italy). *Proceedings of the Second World Landslide Forum – 3-7 October 2011, Rome*. 5 pp.

Dunning SA, Massey CI, Rosser NJ. 2009. Structural and geomorphological features of landslides in the Bhutan Himalaya derived from Terrestrial Laser Scanning. *Geomorphology* **103**: 17-29. DOI: 10.1016/j.geomorph.2008.04.013.

El-Hakim SF e Beraldin JA. 1994. On the integration of range and intensity data to improve visionbased three-dimensional measurements. Proceedings of SPIE Videometrics III, Boston, Massachusetts, 2<sup>nd</sup> to 4th November 1994. Vol. 2350, 364 pages: 306–321.

El-Hakim SF e Beraldin JA. 1995. Configuration design for sensor integration. Proceedings of SPIE Videometrics IV, Philadelphia, Pennsylvania, 22nd to 26th October 1995. Vol. 2598, 390 pages: 274–285.

El-Hakim SF. 2001. A flexible approach to 3D reconstruction from single images. ACM Proceedings of SIGGRAPH '01, Technical Sketches, Los Angeles, California, 12th to 17th August 2001. 280 pages: 186.

El-Hakim SF, Beraldin JA, Picard M, Godin G. 2004. Detailed 3D reconstruction of large-scale heritage sites with integrated techniques. IEEE Computer Graphics and Applications, **24**(3): 21–29.

Elseberg J, Borrmann D, Nuchter A. 2011. Full Wave Analysis in 3D Laser Scans for Vegetation Detection in Urban Environments. Proceedings of the XXIII International Symposium on Information, Communication and Automation Technologies (ICAT).

Fantini M, de Crescenzo F, Persiani F, Benazzi S, Gruppioni G. 2008. 3D restitution, restoration and prototyping of a medieval damaged skull. Rapid Prototyping Journal, **14**(5): 318-324. doi: 10.1108/13552540810907992.

Fea M. e Gomarasca MA. 2008. Geomatica per la gestione del territorio. Enciclopedia della Scienza e della Tecnica, Treccani.

Fiani M e Siani N. 2005. Comparison of terrestrial laser scanners in production of DEMs for Cetara tower. Proceedings of XX CIPA International Symposium, Torino, Italy.

Flack PA, Willmott J, Browne SP, Arnold DB, Day AM. 2001. Scene assembly for large scale urban reconstructions. Proceedings of the 3rd International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage (VAST 2001), Glyfada, Greece, 28th to 30th November 2001. 354 pages: 227–234.

Forlani G e Nardinocchi C. 2007. Adaptive filtering of aerial laser scanning data. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, **36** (Part 3/W52): pp. 130–135.

Furukawa Y e Ponce J. 2010. Accurate dense and robust multiview stereopsis. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI), **32**(8): 1362-1376.

Gaffet S, Guglielmi Y, Cappa F, Pambrun C, Monfret T, Amitrano D. 2010. Use of the simultaneous seismic, GPS and meteorological monitoring for the characterization of a large unstable mountain slope in the southern French Alps. Geophysical Journal International **182**: 1395-1410. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2010.04683.x

Gaiani M, Benedetti B, Apollonio FI. 2011. Teorie per rappresentare e comunicare i siti archeologici attraverso modelli critici. *Ricerca Scientifica e Tecnologie dell'Informazione* Vol 1, Issue 2 (2011), 33-70. doi: 10.2423/i22394303v1n2p33.

Garnero G. 2013. Introduzione alla giornata: La nostra Geomatica quotidiana. Convegno presso Museo Regionale di Scienze Naturali, Torino.

Gaubatz WA. 1996. Rapid prototyping. *IEEE Proceedings of Aerospace Applications Conference*, **3**: 303–311.

Gisotti G. 2012. Il dissesto idrogeologico: previsione, prevenzione e mitigazione del rischio. Dario Flaccovio editore. ISBN: 978-88-579-0132-9

Glenn NF, Streutker DR, Chadwick DJ, Tahckray GD, Dorsch SJ. 2006. Analysis of LIDAR-derived topography information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity. *Geomorphology* **73**: 131-148. DOI: 10.1016/j.geomorph.2005.07.006.

Goodchild MF. 2007. Citizens as sensors: the world of volunteered geography. *GeoJournal*, **69** (4): 211-221. doi: 10.1007/s10708-007-9111-y.

González-Aguilera D, Gómez-Lahoz J, Sánchez J. 2008. A new approach for structural monitoring of large dams with a three-dimensional laser scanner. *Sensors*, **8**: 5866-5883. doi: 10.3390/s8095866.

Gordon S, Lichti D, Franke J, Stewart M. 2003. Structural deformation measurement using terrestrial laser scanners. *Proceedings 11th FIG Symposium on Deformation Measurements, Santorini, Greece*: 8 pp.

Gordon S, Lichti D, Franke J, Stewart M. 2004. Measurement of Structural Deformation using Terrestrial Laser Scanners. *FIG Working Week 2004, Nottingham, United Kingdom*.

Gordon S, Lichti D, Franke J, Stewart M. 2004. Precision measurement of structural deformation using terrestrial laser scanners. *Optical 3D Methods*

Grimm-Pitzinger A e Rudig S. 2005. Laserscannerdaten für flächenhafte Deformationsanalysen. *Proceedings of 13th international geodetic week, Obergurgl, Austria*.

Gruen A, Remondino F, Zhang L. 2004. Photogrammetric reconstruction of the Great Buddha of Bamiyan, Afghanistan. *The Photogrammetric Record*, **19**(107): 177–199.

Guarnieri A, Pirotti F, Vettore A. 2012. Comparison of discrete return and waveform terrestrial laser scanning for dense vegetation filtering. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXIX-B7, Melbourne, Australia: 511-516.

Guidi G, Beraldin JA, Ciofi S, Atzeni C. 2003. Fusion of range camera and photogrammetry: a systematic procedure for improving 3-D models metric accuracy. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, **33**(4): 667–676.

Henderson IHC, Lauknes TR, Osmundsen PT, Dehls J, Larsen Y, Redfield TF. 2011. A structural, geomorphological and InSAR study of an active rock slope failure development. Geological Society, London, Special Publications: 185-199. DOI: 10.1144/SP351.10.

Hesse C e Stramm H. 2004. Deformation measurements with laser scanners – Possibilities and challenges. Proceedings of International Symposium on Modern Technologies, Education and Professional practice in Geodesy and Related fields, Sofia, Bulgaria.

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**: 203–210.

Jaboyedoff M, Couture R, Locat P. 2009. Structural analysis of Turtle Mountain (Alberta) using digital elevation model: Toward a progressive failure. Geomorphology **103**: 5-16. DOI: 10.1016/j.geomorph.2008.04.012.

Kadobayashi R, Kochi N, Otani H, Furukawa R. 2004. Comparison and evaluation of laser scanning and photogrammetry and their combined use for digital recording of cultural heritage. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, **35**(5): 401–406.

Kliparchuk K. e Collins D. 2011. Evaluation of Stereoscopic GeoEye-1 Satellite Imagery to Assess Landscape and Stand Level Characteristics. Proceedings of the ISPRS Canadian Geomatics Conference and Symposium of Commission I, WG I/3, Calgary, AB, Canada.

Kopacik A e Korbasova M. 2004. Optimal Configuration of Standpoints by Application of Laser Terrestrial Scanners. In INGENEO 2004 and FIG Regional Central and Eastern European Conference on Engineering Surveying. Bratislava, Slovakia.

Kuzminskya SC e Gardinerb MS. 2012. Three-dimensional laser scanning: potential uses for museum conservation and scientific research. Journal of Archaeological Science, **39**(8): 2744-2751. doi: 10.1016/j.jas.2012.04.020.

Lauknes TR, Piyush Shanker A, Dehls JF, Zebker HA, Henderson IHC, Larsen Y. 2010. Detailed rockslide mapping in northern Norway with small baseline and persistent scatterer interferometric SAR time series methods. Remote Sensing of Environment **114**: 2097-2109. DOI: 10.1016/j.rse.2010.04.015

Lercari N. 2011. Il linguaggio degli ambienti virtuali culturali: comunicare la storia di Bologna attraverso il progetto Nu.M.E. Tesi di Dottorato Storia e Informatica, XXIII ciclo, Università di Bologna.

Lichti DD, Gordon SJ. 2004. Error Propagation in Directly Georeferenced Terrestrial Laser Scanner Point Clouds for Cultural Heritage Recording. Proceedings of FIG Working Week. ISBN: 87-90907-30-2.

Limoncelli M. 2011. Applicazioni digitali per l'archeologia: il restauro virtuale. *Digitalia*, **VI**(1).

Lindenbergh R e Pfeifer N. 2005. A statistical deformation analysis of two epochs of terrestrial laser data of a lock. *Proceedings of Optical 3D Measurement Techniques*, Vol II: 61-70. Vienna, Austria.

Lindenbergh R, Pfeifer N, Rabbani T. 2005. Accuracy analysis of the Leica HDS3000 and feasibility of tunnel deformation monitoring. *Proceedings of ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop "Laser scanning 2005"*, Enschede, the Netherlands

Lingua A, Piatti D, Rinaudo F. 2008. Remote monitoring of a landslide using an integration of GB-INSAR and LIDAR techniques. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **37**: 361-366. ISSN: 1682-1750.

Luzi G, Pieraccini M, Mecatti D, Noferini L, Macaluso G, Galgaro A, Atzeni C. 2006. Advances in ground based microwave interferometry for landslides survey: a case study. *International Journal of Remote Sensing*, **27** (12): 2331-2350. doi:10.1080/01431160600554975.

Maas HG e Hampel U. 2006. Photogrammetric Techniques in Civil Engineering Material Testing and Structure Monitoring. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **72** (1): 39-45.

Mallet C e Bretar F. 2009. Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **64** (1): 1-16. doi:10.1016/j.isprsjprs.2008.09.007.

Manferdini AM e Garagnani S. 2011. Digital exhibitions and fruition of archaeological finds. *Proceeding of International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XXXVIII-5/W16: 429-436. Trento, Italy.

Manzino AM. 2013. I sistemi di riferimento nel quotidiano. Saldi ma non scontati. *La nostra Geomatica quotidiana*. Convegno presso Museo Regionale di Scienze Naturali, Torino.

Marini JW, Murray CW Jr. 1973. Correction of laser range tracking data for atmospheric refraction at elevations above 10 degrees. Greenbelt Maryland, Goddard space flight centre.

Metternicht G., Hurni L., Gogu R. 2005. Remote sensing of landslides: An analysis of the potential contribution to geo-spatial for hazard assessment in mountainous environments. *Remote Sensing of Environment*, **98**: 284-303. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2005.08.004>.

McKean J, Roering JJ. 2004. Objective landslide detection and surface morphology mapping using high-resolution airborne laser altimetry. *Geomorphology* **57**: 331-351. DOI: 10.1016/S0169-555X(03)00164-8

Monserrat O, Crosetto M. 2008. Deformation measurement using terrestrial laser scanning data and least squares 3D surface matching. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **63**: 142-154. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2007.07.008.

Moratti L, Pellegrini L. 1977. Alluvioni e dissesti verificatisi nel Settembre 1972 e 1973 nei bacini dei fiumi Secchia e Panaro (province di Modena e Reggio Emilia). *Bollettino dell'Associazione Mineraria Subalpina*, Torino, anno XIV, n. 2, giugno 1977.

Nordvik T, Nyrnes E. 2009. Statistical analysis of surface displacements - an example from the Åknes rockslide, western Norway. *Natural Hazards and Earth System Science* **9**: 713-724. DOI: 10.5194/nhess-9-713-2009

Oppikofer T, Jaboyedoff M, Blikra L, Derron MH, Metzger R. 2009. Characterization and monitoring of the Aknes rockslide using terrestrial laser scanning. *Natural Hazards Earth System Sciences* **9**: 1003-1019. DOI: 10.5194/nhess-9-1003-2009

Pavlidis G. 2007. Methods for 3D digitization of Cultural Heritage. *Journal of Cultural Heritage*, 8: 93-98.

Pedrazzi S. 2008. Le sculture ritrovate. Analisi storico-artistica e litologica dell'apparato scultoreo della Ghirlandina. Tesi di Laurea Specialistica in Scienze per il Recupero e la Conservazione del Patrimonio Archeologico. Università di Modena e Reggio Emilia.

Pesci A, Bonali E, Casula G, Boschi E. 2011. Le informazioni estraibili dal dato laser scanner per lo studio di edifici storici. *Archeomatica*, **3**: 12-16.

Pieraccini M, Guidi G, Atzeni C. 2001. 3D digitizing of cultural heritage. *Journal of Cultural Heritage*, **2**(1): 63-70. doi: 10.1016/S1296-2074(01)01108-6.

Pieraccini M, Noferini L, Mecatti D, Atzeni C, Teza G, Galgaro A, Zaltron N. 2006. Integration of Radar Interferometry and Laser Scanning for Remote Monitoring of an Urban Site Built on a Sliding Slope. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing* **44**: 2335-2342. DOI: 10.1109/TGRS.2006.873574.

Pierrot-Deseilligny M e Clery I. 2011. APERO, An open source bundle adjustment software for automatic calibration and orientation of set of images. *IAPRS&SIS*, vol. 38, n. 5/W16, Trento, Italia, 2011, CD-ROM.

Pierrot-Deseilligny M, De Luca L, Remondino F. 2011. Automated image-based procedures for accurate artifacts 3D modeling and orthoimage generation. *Proceeding of 23th International CIPA Symposium*, Prague, Czech Republic.

Prokop A, Panholzer H. 2009. Assessing the capability of terrestrial laser scanning for monitoring slow moving landslides. *Natural Hazards and Earth System Sciences* **9**: 1921-1928. DOI: 10.5194/nhess-9-1921-2009

Rabatel A, Dedieu JP, Thibert E, Letreguilly A, Vincent C. 2008. 25 years (1981-2005) of equilibrium-line altitude and mass-balance reconstruction on Glacier Blanc, French Alps, using remote-sensing methods and meteorological data. *Journal of Glaciology* **54** (185): 307–314.

Remondino F e Roidakis A. 2003. Human figure reconstruction and modelling from single image or monocular video sequences. 4th International Conference on 3-D Digital Imaging and Modelling (3DIM), Banff, Canada, 6th to 10th October 2003. 498 pages: 116–123.

Remondino F e Al-Hakim SF. 2006. Image-based 3D modelling: a review. *The Photogrammetric Record* **21**(115): 269–291.

Remondino F, Guarnieri A, Vettore A. 2005. 3D modelling of close-range objects: photogrammetry or laser scanning? *Proceedings of SPIE-IS&T Electronic Imaging: Videometrics VIII*, San Jose, California. Vol. 5665, 374 pages: 216–225.

Remondino F, El-Hakim SF, Gruen A, Zhang L. 2008. Turning images into 3D models. *IEEE Signal Processing Magazine*, **25**(4): 55-64.

Rivola R, Bertacchini E, Castagnetti C, Toschi I, Capra A. 2011. Registrazione di scansioni laser scanner: potenzialità del metodo diretto. *Bollettino della Società Italiana di Fotogrammetria e Topografia* **2**: 43-62.

Roberts G e Hirst L. 2005. Deformation monitoring and analysis of structures using laser scanners. *Proceedings of FIG Working Week 2005 and GSDI-8*, Cairo, Egypt: 10 pp.

Roering JJ, Stimely LL, Mackey BH, Schmidt DA. 2009. Using DInSAR, airborne LiDAR, and archival air photos to quantify landsliding and sediment transport. *Geophysical Research Letters* **36**: L19402. DOI: 10.1029/2009GL040374

Ronchi AM. 1997. Real virtuality: use of hypermedia and VR in the field of education and cultural heritage. *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE '97)*, **1**: 244–249.

Rüeger JM. 1990. *Electronic Distance Measurement, An Introduction*. Springer-Verlag: 266 pp. ISBN: 3540515232.

Scaioni M. 2005. Direct Georeferencing of TLS in Surveying of Complex Sites. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **36**.

Scaioni M, Giussani A, Roncoroni F, Sgrenzaroli M, Vassena G. 2004. Monitoring of Geological Sites by Laser Scanning Techniques. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* **35**: on DVD.

Schade S, Díaz L, Ostermann F, Spinsanti L, Luraschi G, Cox S, Nuñez M, De Longueville B. 2013. Citizen-based sensing of crisis events: sensor web enablement for volunteered geographic information. *Applied Geomatics*, **5** (1): 3-18. doi: 10.1007/s12518-011-0056-y.

Schäfer T, Weber T, Kyrinovic P, Zámečnicková M. 2004. Deformation Measurement using Terrestrial Laser Scanning at the Hydropower Station of Gabčíkovo. Proceedings of INGEO 2004 and FIG Regional Central and Eastern European Conference on Engineering Surveying, Bratislava, Slovakia: 11-13.

Schneider D. 2006. Terrestrial laser scanning for area based deformation analysis of towers and water dams. In Proceedings of 3rd IAG/12th FIG Symp., Baden, Austria: 22-24.

Scopigno R. 2005. Gestione efficiente dei dati prodotti dai sistemi di scansione tridimensionale. Arts and Humanities.

Scopigno R e Cignoni P. 2004. Making profitable use of the digital 3d model in the David's restoration. Giunti Editore S.p.A, Firenze, 2004

Sequeira V, Wolfart E, Bovisio E, Biotti E, Goncalves JGM. 2001. Hybrid 3D reconstruction and image-based rendering techniques for reality modelling. SPIE 4309, 346 pages: 126–136.

Shih N-J, Leeb C-Y, Linc Q, Chen R-X. 2015. 3D Scans for Weather-damaged Sculptures. Computer-Aided Design and Applications, **12**(3): 270-281. doi: 10.1080/16864360.2014.981454.

Sgrenzaroli M, Wolfart E. 2002. Accurate texture-mapped 3D models for documentation, surveying and presentation purposes. Close-Range Imaging, Long-Range Vision ISPRS Commission V, Symposium 2002, Corfu.

Slob S, Van Knapen B, Hack R, Turner K, Kemeny J. 2005. Method for automated discontinuity analysis of rock slopes with three-dimensional laser scanning. Proceedings of the Transportation Research Board 84th Annual Meeting, January 9–13, Washington DC, 16 pp.

Strozzi T, Farina P, Corsini A, Ambrosi C, Thüring M, Zilger J, Wiesmann A, Wegmüller U, Werner C. 2005. Survey and monitoring of landslide displacements by means of L-band satellite SAR interferometry. Landslides **2**: 193 - 201. DOI: 10.1007/s10346-005-0003-2

Sylaiou S, Liarokapis F, Kotsakis K, Patias P. 2009. Virtual museums, a survey and some issues for consideration. Journal of Cultural Heritage, **10**: 520- 528.

Terashima N, Tiffin J, Rajasingham L. 1999. Experiment of virtual space distance education system using the objects of cultural heritage. Proceedings of IEEE International Conference on Multimedia Computing and Systems, **2**: 153–157.

Teza G, Galgarp A, Zaltron N, Genevois R. 2007. Terrestrial laser scanner to detect landslide displacement fields: a new approach. International Journal of Remote Sensing **28**: 3425-3446. doi: 10.1080/01431160601024234

Teza G., Pesci A., Genevois R., Galgaro A. 2008. Characterization of landslide ground surface kinematics from terrestrial laser scanning and strain field computation. *Geomorphology*, **97**: 424–437.

Toschi I, Rivola R, Bertacchini E, Castagnetti C, Dubbini M, Capra A. 2013. Validation tests of open-source procedures for digital camera calibration and 3D image-based modelling. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XL-5/W2, 2013 XXIV International CIPA Symposium, Strasbourg, France: 647-652.

Travelletti J, Oppikofer T, Delacourt C, Malet JP, Jaboyedoff M. 2008. Monitoring landslide displacements during a controlled rain experiment using a long-range terrestrial laser scanning (TLS). *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **37**: 485-490.

Tsakiri M, Lichti D, Pfeifer N. 2006. Terrestrial laser scanning for deformation monitoring. 3rd IAG / 12th FIG Symposium, Baden: 10 pp.

Ujike K e Takagi M. 2004. Measurement of Landslide Displacement by object extraction with ground based Portable Laser Scanner. *Proceedings of the 25th Asian Conference on Remote Sensing*, Chiang Mai, Thailand.

Van Den Eeckhaut M, Poesen J, Verstraeten G, Vanacker V, Nyssen J, Moeyersons J, Van Beek LPH, Vandekerckhove L. 2007. Use of LIDAR-derived images for mapping old landslides under forest. *Earth Surface Processes and Landforms* **32**: 754-769. doi: 10.1002/esp.1417.

Van Den Heuvel FA. 1998. Vanishing point detection for architectural photogrammetry. *Proceedings of ISPRS Commiss. V Symposium, Int. Arch. Photogramm. Remote Sensing*, **32**(5): 652–659.

Van Gosliga R, Lindenbergh R, Pfeifer N. 2006. Deformation analysis of a bored tunnel by means of terrestrial laser scanning. *Proceedings of the ISPRS technical commission symposium*, Dresden, Germany.

Vosselman G e Maas HG. 2001. Adjustment and filtering of raw laser altimetry data. OEEPE workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Elevation Models, Stockholm, 1-3 March, 11 pp.

Vu HH, Keriven R, Labatut P, Pons JP. 2009. Towards high-resolution large-scale multiview stereo. *IEEE Proceeding Conference CVPR'09*: 1430-1437.

Wasowski J, Ferretti A. 2007. Detecting site instability hazards with SAR interferometry. *New Developments and Challenges in Remote Sensing*: 717-723. ISBN 978-90-5966-053-3

Watson GA. 2006. Computing Helmert transformations. *Journal of Computational and Applied Mathematics* **197**: 387-394. DOI: 10.1016/j.cam.2005.06.047

Willis A, Speicher J, Cooper DB. 2007. Rapid prototyping 3D objects from scanned measurement data. *Image and Vision Computing*, **25**(7): 1174-1184. doi: 10.1016/j.imavis.2006.06.011.

Zhang Z. 1994. Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces. *International Journal of Computer Vision* **13**: 119-152. DOI: 10.1007/BF01427149

Zhang L, Dugas-Phocion G, Samson JS, Seitz S M. 2002. Single view modelling of free-form scenes. *Journal of Visualization and Computer Animation*, **13**(4): 225–235.

Zogg HM e Schulz T. 2007. Terrestrial laser scanning with focus on dam monitoring. *Dam Engineering*, **XVIII** (3): 217-237.

### ***Leggi e Direttive***

Decreto Legislativo 22 gennaio 2004, n. 42. "Codice dei beni culturali e del paesaggio, ai sensi dell'articolo 10 della legge 6 luglio 2002, n. 137". *Gazzetta Ufficiale* n. 45 del 24 febbraio 2004 - Supplemento Ordinario n. 28.

Decreto Legislativo 27 gennaio 2010, n. 32. "Attuazione della direttiva 2007/2/CE, che istituisce un'infrastruttura per l'informazione territoriale nella Comunità europea (INSPIRE)". *Gazzetta Ufficiale* n. 56 del 9 marzo 2010 - Supplemento Ordinario n. 47.

Decreto Ministeriale (infrastrutture) 14 gennaio 2008. "Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni (NTC2008)". *Gazzetta Ufficiale* n. 29 del 4 febbraio 2008.

Decreto Ministeriale 29 luglio 2011, n. 336. "Determinazione dei settori concorsuali, raggruppati in macrosettori concorsuali, di cui all'articolo 15. Legge 30 dicembre 2010, n. 240".

Direttiva del Parlamento Europeo e del Consiglio 2007/2/CE del 14 marzo 2007 "che istituisce un'Infrastruttura per l'informazione territoriale nella Comunità europea (Inspire)".

Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri del 9 febbraio 2011 "Linee guida per la Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale, con riferimento alle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti del 14 gennaio 2008".

Guidelines for the preservation of digital heritage. 2003. Prepared by the National Library of Australia. Information Society Division, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.

UNESCO. 1972. *Photogrammetry applied to the survey of Historic Monuments, of Sites and to Archaeology*. UNESCO editions.

### ***Documenti divulgativi***

3D Risk Mapping. Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning - Training material based on practical applications. Prepared by the Learning tools for advanced three-dimensional surveying in risk awareness. Version 4 June 2008.

APAT Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici. Fenomeni di dissesto geologico - idraulico sui versanti: Classificazione e simbologia. Manuali e Linee Guida 39/2006

CESI RICERCA. 2006. Strumenti e metodologie per il rilievo ed il monitoraggio di frane. Progetto RdS – Governo del Sistema Elettrico. Dicembre 2006.

Creaform teaching manual. 2014. Reverse engineering of physical objects. Versione 1.0, Marzo 2014, documento on-line.

Rapporto ANCE/CRESME. 2013. Lo stato del territorio italiano 2013. Dati aggiornati al 23/01/2014.

### ***Riferimenti hardware e software***

Riegl LPM-321: [www.riegl.com](http://www.riegl.com)

Riegl LMS-Z620: [www.riegl.com](http://www.riegl.com)

Leica ScanStation 2: [hds.leica-geosystems.com](http://hds.leica-geosystems.com)

Leica ScanStation C10: [hds.leica-geosystems.com](http://hds.leica-geosystems.com)

Romer CMM Infinite 2.0: [www.hsands.com](http://www.hsands.com)

ScanWorks Perceptron: [www.europac3d.com](http://www.europac3d.com)

Konica Minolta Range7: [www.konicaminolta.eu](http://www.konicaminolta.eu)

JRC 3D Reconstructor: [www.gexcel.it](http://www.gexcel.it)

Rapidform XOR: [www.rapidform.com](http://www.rapidform.com)

CloudCompare: [www.danielgm.net/cc](http://www.danielgm.net/cc)

## Ringraziamenti

---

Il primo pensiero è sicuramente rivolto alla mia splendida famiglia, sempre in grado di essermi vicino ed appoggiarmi in qualsiasi situazione, e a tutti gli amici che hanno rappresentato un punto di riferimento per l'attività extra-lavorativa.

Un immenso ringraziamento va a tutti i colleghi del gruppo del Laboratorio di Geomatica e non che, ognuno in modo diverso, mi ha permesso di costruire un lungo percorso di ricerca e formazione, professionale e personale, e infine raggiungere questo ambito e prezioso traguardo.

Un particolare riconoscimento per questo va ovviamente al Prof. Alessandro Capra per la disponibilità e la collaborazione mostrate durante questi anni.

Infine, un'immensa dedica è rivolta a Cristina ed Eleonora e alla società che insieme a loro ho costituito e spero possa regalarci grandi soddisfazioni già nell'immediato futuro.

*L'unico modo di fare un ottimo lavoro è amare quello che fai.*