

Produzione di DTM per la realizzazione di infrastrutture viarie da rilievi fotogrammetrici speditivi: due esperienze a confronto in India

Riccardo Roncella (*), Cristina Re (**), Gessica Umili (*), Gianfranco Forlani (*), Parvaze Butt (***), Giampiero Carrieri (***), Elena Rabbi (***), Mattia Valentincic (***)

(*) DICATeA Università di Parma, Viale delle Scienze 181/a, 43124 Parma
Tel. 0521 905934, e-mail riccardo.roncella@unipr.it

(**) CISAS, Università degli Studi di Padova, 35129 Padova (PD)
Tel. 0521 906145, e-mail cristina.re@studenti.unipr.it

(***) Geodata Engineering S.p.A. C.so Duca degli Abuzzi, 48/e, 10129 Torino

Riassunto

La redazione di cartografia per la progettazione di infrastrutture in regioni difficilmente accessibili costituisce spesso un problema per le imprese coinvolte. Le condizioni di inaccessibilità dei versanti o la presenza di vegetazione spesso non consentono misure sufficientemente dettagliate con metodi di rilievo topografico tradizionali; affidare il rilievo a topografi locali di non provata esperienza può condurre a ritardi inaccettabili; le spese di trasferta per l'impiego di squadre italiane sono d'altro canto molto onerose. Partendo dall'esperienza fatta in una serie di rilievi fotogrammetrici di versanti in India, il presente lavoro illustra, sottolineando pro e contro, due soluzioni alternative: una acquisizione dati estremamente speditiva da parte di personale esperto oppure la stessa acquisizione da parte di personale dell'impresa già sul posto. In entrambi i casi le immagini e le coordinate dei punti d'appoggio sono state inviate via internet in Italia, dove sono state rapidamente orientate con tecniche di Structure from Motion; orientato il blocco tramite i punti d'appoggio, si ottiene, tramite software di matching denso, il DSM del versante. La rimozione della vegetazione ha richiesto l'applicazione di una o più procedure di filtraggio.

Abstract

Cartographic production to support the design of large infrastructures in not accessible regions is often a problem. Recently our research group has been involved in a series of topographic and photogrammetric surveys in India. Hard accessibility conditions of the slopes and/or the presence of tropical vegetation makes nearly impossible using traditional topographic techniques; entrusting local surveyors (who might not be experienced enough) could lead to delays unacceptable in this phase or to inaccurate results; travel expenses for Italian surveyors teams are on the other hand substantial. The paper presents two different case studies, highlighting pros and cons, where innovative techniques has been tested: in the first a very expeditious data acquisition is performed by few, well experienced, surveyors while most of the data analysis is performed in Italy by sending data via internet; in the other the image and data acquisition was performed directly by non-photogrammetrists already in place. In both cases, images and the coordinates of few ground control points were sent to Italy and then processed in very short time using Structure and Motion and automatic image correlation techniques for DTM generation. The vegetation was removed using filtering techniques as well. In this way while a team is providing the data, the other one, in Italy, can produce the results with low costs and in short times.

Introduzione

La progettazione e realizzazione di grandi opere infrastrutturali è, da sempre, un campo di attività di grande interesse, non solo dal punto di vista economico e politico, ma anche perché in esso nuovi spunti di sviluppo e di ricerca trovano modo di fiorire con maggior facilità: le grandi sfide che tali opere presentano richiedono competenze tecniche avanzate da parte di tutte le persone coinvolte nelle fasi di progettazione, realizzazione e manutenzione, insieme a “coraggio” e iniziativa per affrontare le difficoltà peculiari che l’opera stessa presenta indagando nuove vie e sviluppando tecniche, approcci e metodologie per risolverle.

Il problema di affrontare problemi nuovi in condizioni operative limite è ancor più sentito quando le opere devono essere realizzate in paesi lontani; se il paese in questione è anche culturalmente lontano dal nostro (si pensi ad esempio ai paesi orientali o africani), i tecnici locali hanno consuetudini e pratiche differenti dalle nostre (o nel caso dei paesi in via di sviluppo sono ancora fermi a metodologie superate) e anche il più semplice problema tecnico, complicato dalle differenze linguistiche, può rappresentare un ostacolo di arduo superamento.

Il presente lavoro non ha l’ambizione di fornire delle regole pratiche in tal senso o proporre metodologie generali che possano essere applicate in un ambito così vasto e variegato come quello della realizzazione di grandi opere: esso vuole piuttosto essere una sorta di diario di viaggio e di lavoro, presentando due diverse esperienze di rilievo in India, nella speranza che da esso possano nascere alcuni spunti di riflessione.

Il nostro gruppo di ricerca (Università degli Studi di Parma) già da diversi anni ha un rapporto di collaborazione con una delle principali società di Ingegneria del nostro paese (Geodata Engineering) ed è stato coinvolto durante la primavera del 2011 in una serie di attività di rilievo di versanti (sia in terra sia in roccia) nella regione del West Bengala e del Sikkim (India nord-orientale) e del Kashmir (India nord-occidentale). In entrambi i casi i rilievi dovevano fornire una base conoscitiva per successive fasi di progettazione: in particolare, per la regione del West Bengala, occorreva rilevare le aree di imbocco delle gallerie dell’infrastruttura ferroviaria che fra 5 anni dovrà collegare Sivok (West Bengala) con Rangpo (Sikkim), operazione difficile da svolgersi con tecniche topografiche tradizionali anche per la presenza considerevole di vegetazione a carattere tropicale.

Nel seguito saranno brevemente descritte le aree oggetto di intervento e si cercherà di fornire un quadro delle difficoltà, non solo tecniche o logistiche, che il rilievo presenta; verranno poi richiamate le tecniche fotogrammetriche adottate per completare i rilievi in tempi rapidi e con impiego limitato di risorse; in un paragrafo conclusivo verranno illustrati i risultati ottenuti.

Va chiarito fin d’ora che tali risultati non presentano carattere di particolare innovatività: in sostanza si sono ottenuti dei modelli digitali di superficie delle diverse aree, eventualmente filtrati per eliminare (o almeno ridurre) la presenza di vegetazione, da cui sono stati desunti alcuni prodotti cartografici che, unitamente ai modelli tridimensionali, formeranno la base geometrica su cui impostare le successive fasi di progettazione. Quello che è rilevante, in questo caso, è riuscire a ottenere tali prodotti in tempi estremamente brevi, con poche risorse, utilizzando personale fondamentalmente non addestrato, in molti casi riuscendo ad aggirare il bisogno di rivolgersi a tecnici o operatori locali poco affidabili o tecnicamente non preparati a svolgere il rilievo. La necessità di svolgere alcune fasi di rilievo con personale italiano (o addirittura elaborando in Italia dati inviati direttamente dall’estero) nasce dal bisogno ingegneristico (tecnico-economico) di ottenere in tempi brevi e con una buona affidabilità informazioni chiave per lo svolgimento del progetto, riducendo al contempo i rischi connessi ad una difficile comunicazione con gli operatori stranieri.

La regione del West Bengala e del Sikkim

Il Bengala Occidentale (figura 1) è uno stato dell’India Orientale che, insieme al Bangladesh, con cui confina ad oriente, forma una delle principali regioni etnico-linguistiche di queste zone del mondo. Morfologicamente lo stato può essere pensato suddiviso in due aree: la prima, pianeggiante,

è costituita dalla piana del Gange; la parte più settentrionale, al contrario, è costituita dalle pendici Himalayane e sub-Himalayane e comprende la regione del Darjeeling (nota a molti per il tè che qui viene prodotto) ed è sostanzialmente collinare e montuosa. A nord del Bengala Occidentale trova posto un altro stato federato (dal 1975) indiano: il Sikkim. Esso è il meno popoloso di tutta l'India, è circondato da paesi stranieri in quanto confina a ovest con il Nepal, a nord e a est con la Cina (regione del Tibet), a sud-est con il Buthan ed è collegato per un piccolo lembo di terra a sud-est con il Bengala Occidentale; insieme le due regioni formano l'unico passaggio verso le regioni orientali dell'India (Assam).

Il clima, fondamentalmente tropicale, fa sì che in queste regioni la vegetazione sia particolarmente rigogliosa. Inoltre, essendo l'urbanizzazione di queste regioni estremamente ridotta, la fauna locale è particolarmente ricca e variegata. Dovendo realizzare rilievi che in molti casi interessano zone forestate, la presenza di predatori (tigri) ed altri animali (elefanti, serpenti) potenzialmente pericolosi complica la logistica delle operazioni: anche nelle zone immediatamente prospicienti le vie di comunicazione è possibile operare solo in particolari ore del giorno, ovvero quando gli animali dormono o comunque non vanno a caccia.

La regione del Kashmir

Il Kashmir (figura 1) è una regione settentrionale del subcontinente indiano al momento di fatto amministrata da tre stati (India, Cina e Pakistan) che ne rivendicano in parte o in tutto la sovranità. La regione, da sempre, basa la sua economia sull'agricoltura e sulla pastorizia. Le poche attività produttive hanno subito (in particolare nell'area pakistana, maggiormente colpita) un duro arresto con il catastrofico terremoto che ha sconvolto la regione nel 2005. Ciononostante, la parte amministrata dall'India (le aree della vallata del Kashmir, Jammu e Ladakh), si ritiene abbia potenziali risorse naturali il cui sfruttamento potrebbe essere un fattore strategico per il rilancio dell'economia della regione.

Le forti tensioni politiche, complicate dalle differenze religiose nell'area indiana in cui convivono mussulmani, indù (e buddisti per una piccola percentuale), rende la regione di difficile accesso: il visto per visitare il paese è di difficile ottenimento e richiede permessi particolari; allo stesso modo la capacità operativa in queste regioni è estremamente limitata dai vincoli militari e dalla evidente pericolosità dei luoghi.

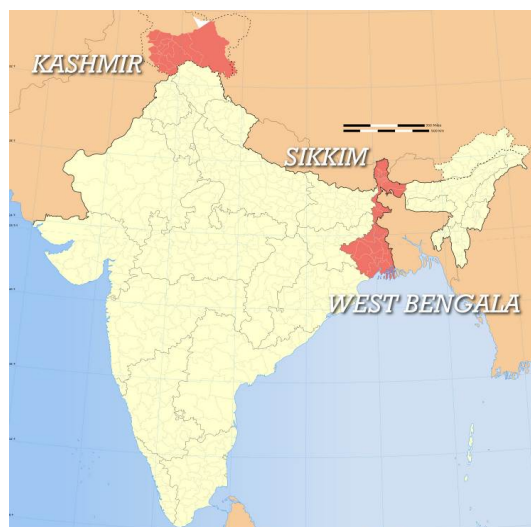


Figura 1 – In evidenza le tre regioni in cui sono stati svolti i rilievi topografici e fotogrammetrici.

Problematiche di rilievo semiserie

Come anticipato nella parte introduttiva le problematiche in questa tipologia di lavori, a nostro avviso, non sono tanto da ricercare nelle difficoltà metodologiche che un rilievo a supporto di una generica opera infrastrutturale presenta (pur richiedendo, vista la sua complessità, buone competenze in campo geomatico e una buona capacità di gestire il lavoro) quanto nelle condizioni particolari che i luoghi presentano. Un primo aspetto da non sottovalutare è la preparazione della missione: gli aspetti logistici giocano infatti un ruolo fondamentale in tutto il rilievo, a partire dall'organizzazione del viaggio. Il reperimento dei visti è piuttosto laborioso e costoso soprattutto se, come nel nostro caso, vi è la necessità di utilizzare procedure di urgenza per ridurre al massimo i tempi di intervento; allo stesso modo con poco preavviso è difficile (a meno di non essere viaggiatori abituali) riuscire a svolgere tutte le vaccinazioni e seguire le varie profilassi in tempi brevi; le spese di viaggio sono considerevoli così come quelle di alloggio: pur essendo il costo della vita in India estremamente basso le strutture ricettive per occidentali hanno costi paragonabili a quelli europei. Il trasporto degli strumenti rappresenta una delle difficoltà maggiori: di varie compagnie di assicurazione da noi contattate nessuna è stata in grado di fornire una copertura assicurativa contro il furto o il danneggiamento degli strumenti in paesi fuori dall'UE; l'invio tutto l'equipaggiamento tramite corriere, se da un lato garantisce una certa copertura almeno durante il trasporto in India, rende l'intero processo molto più lungo, complesso (non è detto che il materiale venga inviato fino alla destinazione finale non essendo la rete di distribuzione capillare come in Europa) e costoso; inoltre l'invio deve essere previsto con largo anticipo per avere la sicurezza di disporre degli strumenti all'arrivo del team indipendentemente dai tempi di sdoganamento delle merci. Il metodo più sicuro e rapido è allora quello di portare gli strumenti con sé cercando, se possibile, di imbarcarli sull'aereo come bagaglio a mano per sincerarsi che non vengano troppo maltrattati durante il viaggio. Ancora una volta l'operazione è complicata dal fatto che gli strumenti topografici, per motivi di design, con tutti i loro bottoni, cavi, batterie, etc. tendono, almeno agli occhi dei doganieri, ad assomigliare ad ordigni esplosivi high-tech: è fondamentale scegliere coincidenze "comode" in aeroporto perché i tempi di superamento dei controlli di sicurezza possono diventare piuttosto lunghi.

Una volta arrivati a destinazione altri problemi si manifestano: alle differenze linguistiche con la popolazione locale si somma la difficoltà di comprendere usanze e abitudini locali: il sistema delle caste in India, ad esempio, condiziona pesantemente i rapporti tra gli indiani ma anche, di riflesso, quelli fra gli stranieri e gli indiani; dover interrompere le operazioni di misura a metà pomeriggio perché gli animali della foresta cominciano a spostarsi in cerca di cibo e acqua appare ingenuamente strano a chi, abituato alla fauna della pianura padana, non ha mai pensato di poter diventare la portata principale di una cena mentre sta mettendo in stazione un teodolite; durante la nostra permanenza nel West Bengala si sono svolte elezioni politiche durante le quali la vita del paese si blocca: non è possibile trovare un trasporto per raggiungere i siti da rilevare.

A questo vanno aggiunti altri ostacoli e limitazioni di cui eravamo consci prima ancora della nostra partenza e che rendevano più difficoltoso il raggiungimento degli obiettivi: il rilievo doveva essere realizzato con urgenza avvicinandosi il periodo delle piogge che, di fatto, interrompe fino al suo termine la maggior parte delle attività della regione; non era pensabile realizzare voli fotogrammetrici da aereo o elicottero perché lo stato di militarizzazione delle regioni rende l'iter autorizzativo del volo troppo impegnativo (se non impossibile); le reti infrastrutturali esistenti per raggiungere le destinazioni da rilevare sono in certi casi addirittura fatiscenti: in alcuni orari della giornata si formano code interminabili di veicoli e, per quanto si cerchi di pianificare con intelligenza le operazioni di misura, inevitabilmente si hanno perdite di tempo non trascurabili.

L'autorevolezza delle donne, soprattutto in ambito lavorativo, in questi paesi è spesso messa in discussione in favore di quella degli uomini, per cui se nel gruppo sono presenti (come nel nostro caso) donne, per loro è molto più difficile farsi ascoltare e riuscire a gestire la collaborazione dei lavoratori locali.

Questa che è una cronaca semiserie di alcune delle disavventure e delle difficoltà che il nostro

gruppo ha dovuto affrontare durante la permanenza in India avrebbe assunto toni più drammatici senza il supporto logistico e l'organizzazione in sito da parte del personale di Geodata, che già da diverso tempo opera in questa regione e dispone di una struttura in grado di fornire supporto immediato forte dell'esperienza di anni di lavoro in aree di questo tipo.

Opportunamente avvisati delle difficoltà che avremmo affrontato durante lo svolgimento del lavoro e consci di dover prevedere delle modalità di intervento particolarmente rapide e flessibili si è pensato di applicare in questo rilievo alcune delle tecniche sul cui sviluppo da diversi anni il nostro dipartimento è impegnato.

Metodologie speditive di rilievo fotogrammetrico terrestre

I rilievi in West Bengala prima e quelli in Kashmir poi sono stati utili per mettere a punto una procedura di rilievo estremamente speditiva che fa uso di tecniche avanzate di fotogrammetria terrestre per realizzare modelli digitali di superficie. Vengono acquisite ed elaborate sequenze di immagini appoggiate su punti acquisiti rapidamente tramite stazione totale no-prism di grande portata, capace di produrre monografia dei punti collimati. Nel caso del West Bengala l'acquisizione è stata condotta da un team di esperti estremamente ridotto (2 persone) ottenendo comunque elevate precisioni grazie alla capacità di adattare la ripresa delle immagini alle caratteristiche peculiari di ciascun sito; nel caso del Kashmir, essendo le condizioni di presa molto più semplici, non è stato necessario prevedere l'utilizzo di personale esperto: l'acquisizione delle immagini è stata effettuata dal personale già presente in sito tramite una comune macchina digitale, precedentemente calibrata; la determinazione di punti d'appoggio può essere demandata a topografi locali o ancora una volta al personale presente in loco: spesso, in particolare quando il rilievo interessa aspetti di dettaglio, non è richiesta una precisione particolarmente elevata in termini di georeferenziazione, mentre il poter disporre di un modello digitale rappresentativo della situazione reale dei luoghi è determinante per una buona progettazione; non è dunque indispensabile che questa fase sia seguita da topografi esperti.

Anche se i programmi di orientamento automatico e generazione del DTM hanno un buon livello di automazione, il giudizio sui risultati consiglia la supervisione di un esperto. Pertanto l'elaborazione viene effettuata in sede, inviando i dati via internet, anche per motivi di potenza di calcolo a disposizione. Completare il più rapidamente possibile le elaborazioni permette un'eventuale ripetizione delle misure o un intervento mirato a raccogliere eventuali informazioni mancanti.

L'orientamento è effettuato con algoritmi di Structure From Motion (SFM); pur in assenza dell'appoggio a terra, già in questa fase è possibile evidenziare possibili lacune o problemi del rilievo fotogrammetrico. Immediatamente dopo l'orientamento viene generato il DSM per mezzo di algoritmi di correlazione di immagine densi: anche in questo caso è possibile in tempi relativamente brevi (da alcuni minuti ad 1-2 ore, in relazione alla risoluzione richiesta) evidenziare possibili problemi: cattiva illuminazione della scena, mancanza di tessitura degli oggetti, variazioni troppo grandi del punto di vista, occlusioni, etc. Anche in questo caso, la tempestività della risposta permette di comunicare al personale in sito le problematiche emerse e suggerire eventuali provvedimenti.

I modelli prodotti nel sito del West Bengala contenevano percentuali rilevanti di punti determinati sulla vegetazione: caso per caso sono state applicate procedure di filtraggio automatico e semi-automatico dei dati, per arrivare in tempi brevi ad un DTM qualitativamente corretto.

La procedura ed i codici di calcolo sono strutturati in modo da poter inserire in qualsiasi momento i dati d'appoggio per la georeferenziazione; in tal modo il processo non subisce interruzioni o sospensioni in attesa delle coordinate dei punti d'appoggio.

Orientamento automatico

In fotogrammetria terrestre la grande varietà di situazioni sia in termini di risultati attesi, sia in termini di vincoli operativi rende assai delicata la fase di orientamento del blocco e la sua importanza sull'intera procedura, in virtù soprattutto del fatto che le caratteristiche del blocco non

sono sempre. Anche in questo ambito tuttavia le procedure di orientamento automatico con algoritmi di Structure From Motion (SFM) hanno raggiunto livelli di affidabilità elevati (Hartley et al., 2004). Inizialmente vengono estratte sulle immagini, per mezzo di opportuni operatori di interesse e di descrittori (Bay et al., 2008), una serie di elementi (solitamente puntuali) che, con un certo grado di probabilità siano riscontrabili su diversi fotogrammi.

Si procede poi, per mezzo di opportuni criteri geometrici e radiometrici, ad individuare le corrispondenze “putative” fra coppie di fotogrammi e a propagare tali corrispondenze lungo la sequenza.

A questo punto con un metodo di stima robusto si determina una geometria di presa preliminare eliminando nello stesso tempo le corrispondenze sbagliate. Si noti che si perviene a questo risultato grazie soltanto alla struttura del segnale radiometrico analizzata dagli operatori di interesse, all’efficienza nel selezionare gli accoppiamenti corretti nel confronto dei descrittori e alla robustezza del metodo di stima della geometria epipolare e trifocale. Imponendo infine la conoscenza dei parametri di orientamento interno si ottiene una ricostruzione conforme (ovvero equivalente a meno di una trasformazione di similitudine) del blocco e dell’oggetto considerato.

Tali parametri possono essere noti a priori o essere stimati (seppur con un grado di approssimazione a volte non adeguato) direttamente dalle corrispondenze già determinate. In altre parole la ricostruzione conforme dell’oggetto e del blocco può avere luogo anche nel caso in cui siano parzialmente o completamente incogniti i parametri di calibrazione della camera utilizzata. Si calcola infine una stima ottimale (in termini di massima verosimiglianza), utilizzando i risultati ottenuti come parametri approssimati di un sistema risolvibile a minimi quadrati (*bundle adjustment*) in cui possono essere inserite informazioni aggiuntive sul blocco (punti d’appoggio, interdistanze note, orientamenti etc...). L’introduzione dei punti d’appoggio, ovviamente, permette anche di risolvere l’ambiguità legata al sistema di riferimento terreno. Si arriva così alla definizione completa dei parametri di orientamento esterno ed interno di ciascun fotogramma (*Motion*) oltre che della geometria della scena (*Structure*), definita dai punti accettati come corrispondenze corrette dal *bundle adjustment*.

Un algoritmo di Structure From Motion (SFM) in grado di orientare automaticamente una generica sequenza di immagini close-range è stato implementato nel programma Eyedea, sviluppato lo scorso anno presso dagli autori. Il programma, pensato per gestire l’orientamento dei blocchi, possiede un’interfaccia grafica che consente agli utenti di misurare i punti immagine in modo manuale o semiautomatico (selezionando cioè un punto su un’immagine, il software provvede, tramite una procedura di matching, a individuarne gli omologhi sulle altre immagini del blocco); si possono così infittire eventualmente i punti di legame in zone critiche e misurare i punti di appoggio. A valle della SFM l’utente può elaborare con il bundle adjustment l’intero blocco o solo una parte. Un serie di parametri controllano l’esecuzione delle diverse fasi ed un report riassume i risultati di ciascuna.

Ricostruzione del DSM

I metodi di correlazione d’immagine vengono da tempo impiegati per la generazione di DSM. La tecnica più semplice, come noto, è quella che utilizza il coefficiente di correlazione fra i toni di grigio di una finestra rettangolare su un’immagine di riferimento (*template*) ed quelli di una finestra di uguali dimensioni su un’altra immagine (*patch*). Nel momento in cui intervengono trasformazioni non trascurabili fra le due immagini (rotazioni, cambiamenti di scale, differenti punti di vista, etc.) con il coefficiente di correlazione non si è più in grado di valutare se due punti su due immagini differenti sono effettivamente omologhi. Conviene allora stimare a minimi quadrati una trasformazione della patch (solitamente una affine) tale da ottimizzare la corrispondenza dei toni di grigio fra le due finestre (*Adaptive Least Squares Matching – LSM*, (Gruen, 1985)). Nel caso in cui i fotogrammi siano orientati, si possono inoltre utilizzare come vincolo aggiuntivo anche le equazioni di collinearità impiegando contemporaneamente anche più di due immagini (*Multi-Photo Geometrically Constrained Matching - MGCM* (Gruen et al., 1988)).

In questo caso le equazioni di collinearità, usate come vincolo geometrico nella stima, forniscono un più elevato grado di affidabilità e, se si dispone di parametri di orientamento sufficientemente precisi, migliorano le precisioni dei punti restituiti.

Dense Matcher è un pacchetto software per la generazione di DSM sviluppato presso il DICATeA e basato su algoritmi di correlazione area-based. Esso implementa sia la versione stereo (LSM) sia, nel caso di più immagini, la versione MGCM. Il codice è in grado di funzionare in modalità multi-processore raggiungendo velocità di produzione superiori ai 1000 punti al secondo.

Metodologie speditive di rilievo fotogrammetrico terrestre

Lo scopo del rilievo in West Bengala era di produrre una serie di modelli digitali del terreno di alcuni portali di imbocco (per uno sviluppo di circa 150-200 m in planimetria e per circa 30-50 m in altimetria) delle gallerie ferroviarie che andranno realizzate nel tratto che collegherà Sivok con Rangpo. Dal modello digitale si sarebbe poi dovuto desumere una rappresentazione a curve di livello della morfologia delle diverse zone e, in un secondo momento, essere in grado di estrarre sezioni o altre informazioni ritenute significative per le successive fasi della progettazione. Lo scopo dei rilievi in Kashmir era sostanzialmente analogo, ma le aree da rilevare avevano estensione più limitata; inoltre il rilievo era maggiormente finalizzato ad individuare spazialmente con chiarezza eventuali interferenze (edifici, alberi, manufatti, etc.) con il tracciato dell'infrastruttura.

In entrambi i casi si è ritenuto che una precisione di circa 5-10 cm e una risoluzione sul terreno di circa un punto ogni 5-10 cm fosse più che sufficiente per garantire tutte le informazioni necessarie anche nelle fasi successive della progettazione.

Di seguito vengono brevemente descritte le scelte tecniche implementate in ciascun rilievo e vengono presentati alcuni dei risultati ottenuti.

Il rilievo in West Bengala ha richiesto circa 10 giorni di permanenza in sito per un team di due persone: il rilievo vero è proprio è stato svolto in circa 5 giorni e i restanti 5 sono stati necessari per i trasferimenti, un giorno è stato trascorso in albergo in corrispondenza delle elezioni che hanno interrotto tutte le attività, mentre un altro è stato necessario all'arrivo per organizzare il lavoro. Al ritorno in Italia, essendo già a buon punto le elaborazioni delle immagini, in circa dieci giorni il lavoro è stato terminato con tutte le restituzioni e la redazione della documentazione tecnica.

Il rilievo in Kashmir è stato ancora più rapido (il numero di siti e la loro estensione erano però assai inferiori) in quanto l'acquisizione è stata svolta da personale già in sito in concomitanza con altre attività; per l'elaborazione dei dati sono stati sufficienti circa dieci giorni: in questo caso le operazioni di restituzione risultano in parte rallentate perché l'acquisizione del blocco da parte di personale non esperto in fotogrammetria fa sì che la configurazione del blocco non sia ottimale, richiedendo maggiori sforzi in fase di restituzione per raggiungere i livelli qualitativi richiesti. In un caso, essendo risultate inadeguate le basi di presa (troppo ridotte) non è stato possibile produrre il modello digitale del terreno.

Il rilievo in West Bengala

Nel rilievo in West Bengala è stata utilizzata una camera digitale Nikon D3X da 24 Mpixel con sensore FX e ottiche calibrate Nikkor da 18, 35 e 50 mm. Per il rilievo dei punti d'appoggio sono stati impiegati ricevitori GPS Leica (modello 1200 e 500) e stazione totale Topcon IS 203 in grado, fra l'altro, grazie ad una camera integrata e coassiale al cannocchiale di acquisire immagini dei punti rilevati. Il suo utilizzo permette una scelta più veloce dei punti d'appoggio per il blocco fotogrammetrico e mette in grado anche il personale in sede di procedere con le fasi di orientamento.

I rilievi in zone così impervie obbligano ad adattare la struttura geometrica del blocco in maniera piuttosto flessibile alle specifiche condizioni; in questi casi si manifesta il valore aggiunto fornito da un fotogrammetra esperto rispetto al personale non addestrato. Ad esempio, in uno degli imbocchi prossimi a Rangpo (figura 2.a) la vegetazione interessa solamente la parte sommitale dell'imbocco ed è costituita prevalentemente da alberi ad alto fusto non eccessivamente fitti; la

parte inferiore della parete, invece, presenta roccia scoperta e può pertanto essere ricostruita con livelli di risoluzione e dettaglio elevati: dal modello digitale sarebbe infatti possibile ricavare anche informazioni geostrutturali tramite analisi di stabilità. Si è deciso quindi di produrre un modello digitale (figura 2.b) costituito da porzioni contigue e distinte a diversa risoluzione: la parte basale maggiormente dettagliata e quella sommitale, costituita dalle zone vegetate, opportunamente filtrata per considerare solamente punti sul terreno e inevitabilmente con un livello di dettaglio molto inferiore.



Figura 2 – Una delle zone di imbocco in prossimità di Rangpo: 2.a (a sinistra) una delle immagini utilizzate per ricostruire il DSM; 2.b (a destra) il modello digitale del terreno restituito.

Le immagini potevano essere acquisite solo dal versante opposto della vallata, muovendosi sul crinale di una ripida collina che scende verso il fiume Rangpo Chu: optare per prese pseudo-nadirali muovendosi parallelamente alla giacitura del fronte avrebbe prodotto un base di presa complessiva insufficiente; muoversi lungo il greto del fiume, pur rappresentando una buona alternativa in termini fotogrammetrici era piuttosto pericoloso e avrebbe richiesto troppo tempo.

Si è quindi ripreso un blocco muovendosi a zig-zag lungo il fianco della collina (figura 3) cercando disporre le prese sia in direzione orizzontale sia in direzione verticale per diversificare il più possibile gli angoli di vista: il rapporto massimo in entrambe le direzioni fra base di presa e distanza dall'oggetto è pari circa a 1 a 13. Per quanto riguarda l'orientamento dei fotogrammi il fatto che tutte le immagini inquadrino sostanzialmente la stessa area fa sì che la molteplicità dei punti di legame sia particolarmente elevata; utilizzando metodi di correlazione multi-immagine (MGCM) la ricostruzione del DSM, nonostante le piccole basi di presa, è assai poco rumorosa.

L'utilizzo della stazione totale IS203, che fra le altre caratteristiche ha anche la possibilità di raggiungere portate particolarmente elevate nella misura di distanza (fino a circa 1 km nelle normali condizioni operative), ha permesso di individuare un numero elevato di punti d'appoggio lungo tutto il bordo della zona di interesse in tempi estremamente brevi (circa 30 minuti). Durante l'operazione i due GPS sono stati messi in funzione in prossimità della stazione totale in modo da fornire la georeferenziazione al blocco. Complessivamente per l'acquisizione delle immagini, dei dati di georeferenziazione, e la misura dei punti d'appoggio sono state sufficienti un paio d'ore.

Per quanto riguarda la zona retrostante la parete, in gran parte coperta da vegetazione d'alto fusto sulla quale comunque sono stati rilevati punti dall' algoritmo di correlazione, per il filtraggio si è sfruttata la densità di punti relativamente elevata (circa 5 per mq).

Sono stati applicati sia un filtro minimo sia un mediano su griglia di ampiezze sufficienti (da 5x5 a 20x20 m) per eliminare le chiome degli alberi. In tal modo la superficie involucro del minimo rappresenta la miglior approssimazione della superficie in presenza di vegetazione; la superficie mediana è invece una miglior descrizione nelle zone con vegetazione rada. Dopo aver approssimativamente contornato le zone più ampie di terreno aperto, i dati filtrati sono stati interpolati su griglia di passo 5 m con un interpolatore liscio (inverso della distanza) su un raggio di qualche decina di metri.

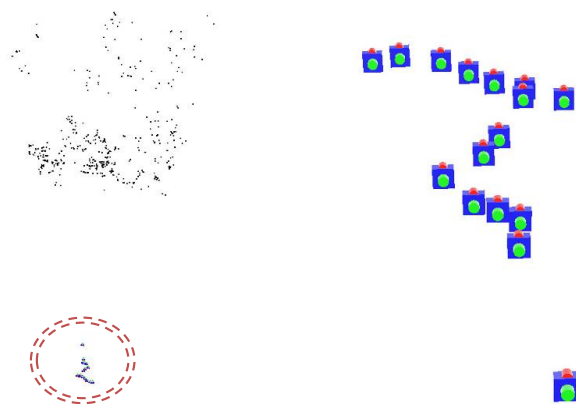


Figura 3 – Configurazione geometrica del blocco realizzato in prossimità di Rangpo.

Il secondo caso ritenuto interessante riguarda un'altra area di imbocco (Tumthang Khola) in corrispondenza di un tratto di foresta: in questo caso la difficoltà maggiore consisteva nel fatto che per seguire lo sviluppo piuttosto articolato del fronte e potendosi muovere solo nelle sue immediate vicinanze a causa degli ostacoli rappresentati dagli alberi, il numero di fotogrammi per riprendere la scena era particolarmente elevato (figura 4).

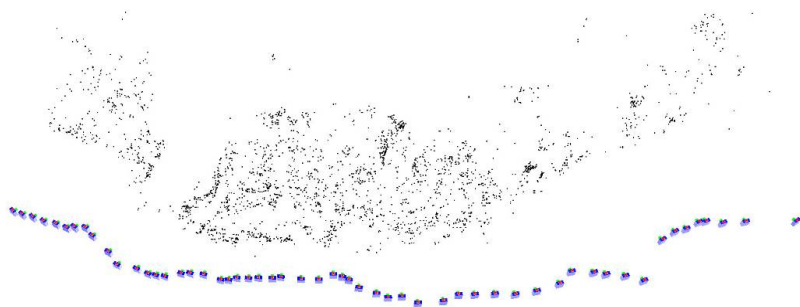


Figura 4 – Sviluppo del blocco fotogrammetrico nell'imbocco del Tumthang Khola.

Il blocco è costituito da 55 immagini che si sviluppano su una lunghezza di circa 100 metri seguendo una traiettoria all'incirca parallela all'andamento del terreno in corrispondenza dell'imbocco; spesso fra un'immagine e la successiva si notano bruschi cambiamenti di prospettiva dovuti al fatto che, per evitare gli alberi, il percorso seguito è piuttosto irregolare.

Indipendentemente da ciò il blocco è sufficientemente rigido: mediamente su ciascuna foto sono stati individuati 240 punti di legame corrispondenti complessivamente a più di 2800 punti terreno, con una ridondanza media di circa 5 collimazioni per punto. L'utilizzo della stazione totale ha permesso di individuare rapidamente un elevato numero di punti d'appoggio in corrispondenza di elementi naturali sul terreno; il fatto di disporre di una monografia fotografica dei punti misurati ha consentito di riconoscere e impiegare quasi tutti i punti misurati. Complessivamente per le operazioni di acquisizione delle immagini sono stati sufficienti solo pochi minuti; i punti d'appoggio sono stati rilevati da tre stazioni di poligonale, il che ha allungato un po' i tempi di lavoro (circa un'ora). In realtà il tempo maggiore è stato speso, in questo caso, per collegare, sempre con una poligonale sviluppata nella foresta, i punti di stazione usati per la misura dei punti

d'appoggio con due posizioni in un'area senza vegetazione in cui fosse possibile acquisire con sufficiente tranquillità il segnale GPS per la georeferenziazione del rilievo. L'orientamento automatico della sequenza ha richiesto invece meno di un'ora e ha permesso, già durante le operazioni di rilievo, di verificare se fossero necessarie ulteriori immagini o misure. In figura 5 viene presentata la ricostruzione del DSM dell'imbocco.

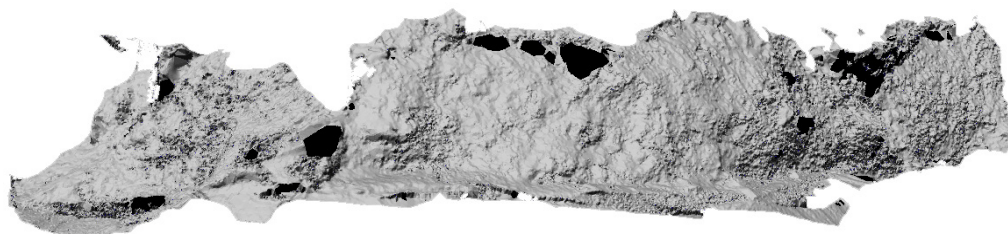
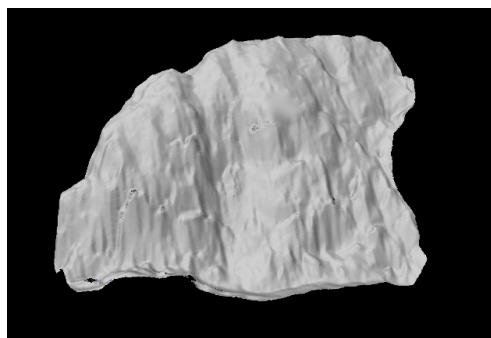


Figura 5 – Modello digitale di superficie dell'imbocco del Tumthang Khola.

L'ultimo caso ritenuto d'interesse per i rilievi in West Bengala è rappresentato dal sito del Teesta Bridge (vedi la foto di fig. 6a) in cui è stato maggiormente necessario utilizzare operazioni di filtraggio della vegetazione perché DenseMatcher ha riconosciuto moltissimi punti sulla vegetazione (la nuvola di punti colorata esportata delinea tronchi rami e fogliame). In questo caso ci si è ispirati ad una tecnica proposta da Kraus e Pfeifer (1998) che prevede la ripetizione della stima di una superficie più volte, eliminando ad ogni passo i punti con residui positivi (ovvero in linea di massima dei punti appartenenti alla vegetazione) ed eseguendo delle medie locali robuste; in alcune zone, in particolare in corrispondenza dei salti di roccia, è stata anche necessaria una preliminare rimozione manuale per evitare un eccessivo liscciamento del risultato.



a.



b.

Figura 6 – Una delle zone di imbocco in prossimità del ponte sul fiume Teesta: 6.a (a sinistra) uno dei fotogrammi che mostra la vegetazione fitta che ricopre la parete; 6.b (a destra) il modello digitale del terreno filtrato.

Grazie alla sovrabbondanza di dati grezzi (circa 120 pti per mq), è stato possibile decimare il set iniziale senza perdere troppa risoluzione sul terreno; la griglia finale è stata ottenuta applicando nuovamente un interpolatore in funzione dell'inverso della distanza, includendo i punti in un raggio di pochi metri. In figura 6 b è mostrato il risultato ottenuto dopo il filtraggio dei dati.

Il rilievo in Kashmir

Nel rilievo in Kashmir ci si è avvalsi di personale Geodata Engineering già presente sul posto per l'acquisizione dati; in questo caso infatti l'organizzazione di una trasferta del team di fotogrammetri si presentava troppo complessa e costosa; al tempo stesso le condizioni particolarmente favorevoli per la presa dei fotogrammi in tutti i siti e la minor influenza della vegetazione rendevano la soluzione scelta del tutto ragionevole.

Per l'acquisizione delle immagini è stata utilizzata una camera digitale Nikon D3100 da 14 Mpixel con ottiche calibrate Nikkor da 18 mm con sensore DX (focale equivalente pari a 27 mm). Per la determinazione dei punti d'appoggio ci si è avvalsi di topografi locali che hanno individuato su fotografie digitali delle diverse pareti la posizione approssimata dei punti. Andando ad individuare i punti più caratteristici e verificando che i residui del bundle adjustment non risultassero troppo elevati, è stato possibile individuare con buona affidabilità i punti d'appoggio effettivamente misurati.

In figura 7 viene mostrato il primo blocco realizzato: 10 immagini, tutte con basi di presa piuttosto piccole inquadrano complessivamente una porzione di parete di circa 80-100 m di sviluppo planimetrico per 50-60 m di sviluppo verticale. E' possibile notare a destra come alcune zone del modello digitale presentino delle lacune dovute ad occlusioni che avrebbero potuto essere colmate riprendendo altre immagini da posizioni differenti. Tuttavia nel complesso la completezza del modello è più che soddisfacente ed adeguata per le fasi di progettazione.

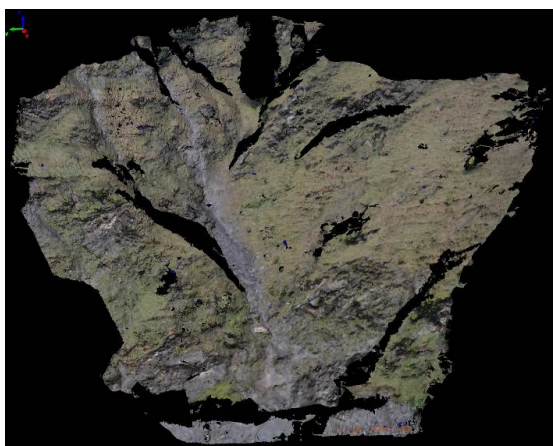
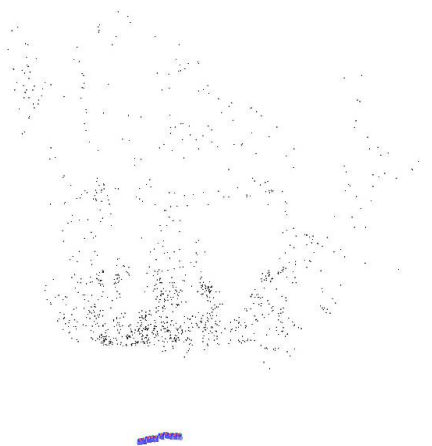


Figura 7 – Una delle zone di imbocco nei rilievi in Kashmir: (a sinistra) è visibile la struttura del blocco e i punti di legame utilizzati durante l'orientamento; (a destra) il modello digitale del terreno con applicate le informazioni radiometriche desumibili dai fotogrammi.

Il secondo sito realizzato riguarda l'imbocco classificato T74: per esso valgono considerazioni del tutto analoghe al precedente. In figura 8 vengono presentati il risultato della fase di orientamento automatico della sequenza e il modello digitale restituito.

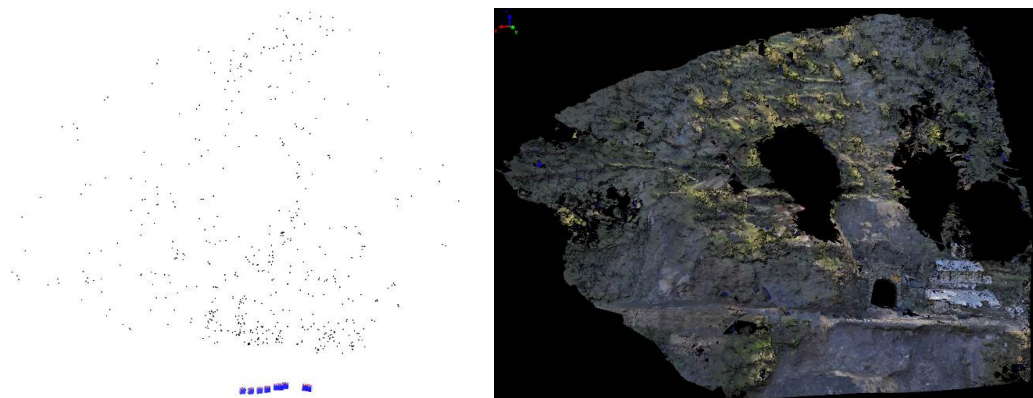


Figura 8 – La zona di imbocco T74: (a sinistra) la struttura del blocco e i punti di legame; (a destra) il modello digitale del terreno.

Conclusioni

Lavorare in paesi lontani (soprattutto culturalmente) dal nostro è un'esperienza impagabile sotto molti punti di vista (non tutti strettamente professionali). Trovarsi in condizioni operative limite, affrontare continue difficoltà e dover individuare rapidamente soluzioni, a volte anche non convenzionali, ai problemi che si presentano rende il lavoro stimolante; vedere i risultati prendere forma in maniera così rapida è di grande soddisfazione per tutte le persone coinvolte.

Riteniamo che in ambiti simili a quelli presentati la fotogrammetria terrestre possa rappresentare uno strumento estremamente potente per realizzare una base conoscitiva dei luoghi accurata, completa e dai costi di realizzazione tutto sommato contenuti. La possibilità di demandare la fase di acquisizione dei dati, in molti casi piuttosto semplice, a personale con un minimo di addestramento nelle discipline geomatiche, e di far elaborare i dati in Italia da personale specializzato consente di raggiungere elevati livelli di efficienza senza compromettere la qualità del prodotto.

Bibliografia

Hartley, R.I., Zisserman A. (2004). "Multiple View Geometry in Computer Vision". *Cambridge University Press*, UK, 2nd ed., 672 pp.

Bay H., Ess A., Tuytelaars T., Van Gool L. (2008) "SURF: Speeded Up Robust Features", *Computer Vision and Image Understanding (CVIU)*, Vol. 110, No. 3, pp. 346-359.

Gruen A. (1985) "Adaptive Least Squares Correlation: A Powerful Image Matching Technique", *South African Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartograph.* Vol. 14. pp. 175-187.

Gruen A., Baltsavias E. P. (1988) "Geometrically Constrained Multiphoto Matching". *PERS*, vol. 54, no. 5, pp 663-671.

Kraus K., Pfeifer N. (1998). "Determination of Terrain Models in Wooded Areas with Airborne Laser Scanner Data" *ISPRS Journal of Photogrammetry & R. S.*, vol. 53, pp. 193-203.