

Nuove tecnologie di rapid mapping. Ricerche di soluzioni innovative ed esperienze formative.

Original

Nuove tecnologie di rapid mapping. Ricerche di soluzioni innovative ed esperienze formative / Antonia, Spanò; Chiabrando, Filiberto; Lingua, Andrea Maria. - In: ATTI E RASSEGNA TECNICA. - ISSN 0004-7287. - STAMPA. - LXXIII,:3(2019), pp. 41-53.

Availability:

This version is available at: 11583/2844154 since: 2020-09-06T22:53:05Z

Publisher:

Società degli Ingegneri e degli Architetti in Torino

Published

DOI:

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

Nuove tecnologie di *rapid mapping*.
Ricerche di soluzioni innovative ed
esperienze formative

*New rapid mapping technologies. Researches
upon innovative solutions and training
experience*

NANNINA SPANÒ, FILIBERTO CHIABRANDO, ANDREA LINGUA

Abstract

Questo primo contributo finalizzato alla presentazione delle tecnologie di *rapid mapping* ha il ruolo di considerare ed evidenziare i caratteri generali dei metodi senza addentrarsi nei risvolti applicativi dell'articolata serie di esperienze, anche condotte negli scenari interdisciplinari, presenti in questo volume. Esso intende fornire una panoramica generale a partire dai sistemi di acquisizione ormai usualmente definiti *image* e *range based*, cioè fotogrammetrici e basati sul *laser scanning*, con particolare accento su quelli rapidi, fino ad alcuni cenni sui sistemi di archiviazione e diffusione delle informazioni spaziali, principalmente 3D. Un secondo ruolo è quello di collegare le tematiche a un quadro, seppur schematico, della letteratura di riferimento, leggermente più approfondito di quella dei report successivi, in quanto l'organizzazione in approfondimenti sperimentali e operativi avrebbe reso ridondante il contributo dei riferimenti bibliografici riproposti. Sono inseriti infine numerosi rimandi agli altri report del volume che approfondiscono i temi enunciati.

This first manuscript aimed at the presentation of rapid mapping technologies, has the role of considering and highlighting the general features of methods without going into the application aspects of the articulated series of experiences, also conducted in the interdisciplinary scenarios, and presented in this volume. It intends to provide a general overview starting from the survey systems now usually defined as image and range based, i.e. photogrammetric and laser scanning based, with particular emphasis on rapid ones, up to some notes on the systems aimed to the storage and the diffusion of spatial information, mainly 3D. A second role is to connect the issues to a framework, albeit schematic, of the reference literature, but slightly more in-depth than the subsequent reports, since the organization in experimental and operational investigations would have made the contribution of the bibliographic references redundant. Lastly, numerous references to the other reports in the volume are included, which deepen the themes set out.

Nannina Spanò, professore associato di Geomatica,
Politecnico di Torino, DAD
antonia.spano@polito.it

Filiberto Chiabrando, professore associato di
Geomatica, Politecnico di Torino, DAD
filiberto.chiabrando@polito.it

Andrea Lingua, professore ordinario di Geomatica,
Politecnico di Torino, DIATI
andrea.lingua@polito.it

Introduzione

Negli ultimi anni la vulnerabilità del territorio e del patrimonio costruito che vi insiste nonché quella delle comunità che lo abitano, insieme alle constatazioni degli impatti sempre più significati e spesso tragici degli eventi disastrosi, hanno condotto a sviluppare strategie precise e tecnologie specifiche per il *Disaster Management* e il *Damage Assessment*. È stato necessario affinare le conoscenze delle diverse nozioni di rischio e pericolo, nonché quelle di esposizione ad essi e di vulnerabilità per mitigarne gli effetti e per aumentare la resilienza di territori e comunità: in questa direzione gli studi hanno conosciuto un significativo

sviluppo e una precisa azione è stata condotta dall'UNISDR (*United Nations Office for Disaster Risk Reduction*) che ha adottato nel 2015 il Sendai Framework (2015-2030)¹.

Si può dire che le tecnologie della geomatica possano contribuire in tutte le fasi della gestione del disastro, a partire dall'*early warning*, che focalizza il monitoraggio per finalità di allertamento in zone in cui esiste una elevata possibilità che si verifichi un evento catastrofico, e che quindi, in questo contesto di studi post emergenza del terremoto del Centro Italia, non sarà affrontato. Proseguendo il richiamo alle fasi temporali connesse al fronteggiare i disastri, le tecniche geomatiche possono fornire un contributo significativo nei differenti livelli di intervento individuati: dall'*early impact* che comprende prioritariamente il soccorso e il salvataggio di esseri umani ma anche fornire output informativi (compresa la cartografia, prioritariamente satellitare) che permettano di definire l'entità di persone e beni coinvolti per la messa in sicurezza. Nell'*emergency response*, la cartografia d'emergenza da immagini satellitari introdotta e analizzata nel precedente contributo ha un ruolo fondamentale, ma numerosi sistemi di mapping rapido, con dati primari acquisiti da UAV o da sistemi terrestri che saranno presentati in questo contributo (voli fotogrammetrici su Accumoli, Pescara del Tronto ecc.) e in tutto il volume possono considerarsi integrazioni essenziali. Nell'*emergency response monitoring* l'affinamento e l'integrazione di tecniche, come per esempio gli studi sulle strategie di ripresa, l'integrazione di sensori, l'uso e la quantità di punti misurati per via topografica da impiegare, sono corollari essenziali per adeguare i metodi alle condizioni problematiche o alle esigenze che le configurazioni del terreno o degli oggetti che vi insistono richiedono; anche tali aspetti sono approfonditi in contributi del presente volume a partire da quello dedicato ai voli sui piccoli centri. L'*early recovering* infine è una fase nella quale si mettono in atto strategie che mirano al recupero veloce di edifici e infrastrutture per i quali sono fondamentali le conoscenze derivanti da output informativi, come mappe e modelli 3D, in funzione del ritorno rapido alla normalità. Esempi di applicazioni collocabili in questo scenario sono sicuramente quelle applicate al patrimonio costruito di questo volume, svolte in sinergia con gli esperti di studi strutturali².

Questo capitolo si occuperà di evidenziare i caratteri generali del possibile contributo delle varie tecnologie geomatiche nelle diverse fasi dell'*emergency response*, focalizzando l'attenzione sui sistemi e tecniche integrate che operano da distanze in generale decisamente più ravvicinate rispetto a quelle proprie del programma Copernicus che sfrutta il remote sensing satellitare³.

I recenti sciami sismici verificatisi in Italia dall'agosto 2016 infatti, hanno sottolineato l'importanza di approfondire le ricerche geomatiche per la validazione di nuove strategie volte a mappare rapidamente e documentare ambienti e territori resi particolarmente complessi e poco accessibili dai danni del terremoto.

Gli approcci consolidati per il *Building Damage Assessment*, tuttavia, sono basati soprattutto sull'interpretazione visiva dei dati spaziali derivati da sistemi LiDAR⁴, satellitari⁵ e anche immagini aeree⁶. Spesso le criticità sono legate ai limiti della disponibilità temporale dei dati, e in special modo alla scala intrinseca che li contraddistingue, che si rendono particolarmente problematici quando la documentazione necessaria riguarda centri storici urbani, tipicamente densi e quindi difficilmente rilevabili con tecniche remote tradizionali, caratterizzate come già evidenziato nel contributo precedente, da riprese prevalentemente nadirali⁷.

1. Sistemi e metodi emergenti

1.1 Sistemi image based

Per fronteggiare le criticità legate alla scala e al tempo, nonché al solo punto di vista nadirale, e soprattutto per consentire di limitare quanto più possibile la permanenza di operatori nelle aree di rischio, tra le tecniche geomatiche più avanzate, i sistemi aeromobili a pilotaggio remoto (SAPR), cosiddetti "droni", combinati con i principi della fotogrammetria aerea e gli algoritmi dell'*image-matching*, si stanno sempre più affinando per offrire un efficace e sostanziale supporto alle richieste di documentazione speditiva del danno, di valutazione del rischio e dell'agibilità nei siti colpiti da calamità, nonché di elaborazione e condivisione rapida dei dati operativi⁸.

L'impiego di droni equipaggiati con fotocamere e/o videocamere ad alta definizione, insieme a sistemi GPS *on board*, stanno svolgendo in questi anni un ruolo ormai riconosciuto nelle tecniche di documentazione metrica aerea a basso costo. Essi dimostrano sempre più il proprio ruolo determinante non solo per l'osservazione in remoto del sito e la pianificazione delle operazioni di soccorso per la raccolta di informazioni qualitative, ma anche per la produzione di dati metrici a grandissima scala, da cui derivare modelli 3D dotati di *textures* ad alta risoluzione e precisione.

Senza far riferimento in questa sede a complesse classificazioni di piattaforme di volo che comprendono anche sistemi non impiegati ai fini del mapping⁹, e basati per lo più sulla massa operativa al decollo, senza addentrarsi inoltre sulla normativa che regola il loro impiego per uso civile normata dall'ENAC¹⁰, peraltro ovviamente sempre rispettata in qualunque attività intrapresa, proviamo a fornire un quadro schematico dei sistemi UAV impiegati nelle diverse applicazioni riportate in questo volume, per fornire alcuni caratteri essenziali.

Innanzitutto i sistemi UAV impiegati nell'area del terremoto, sia dal gruppo di geomatica insieme al team DIRECT, sia da parte dei VVF, benché equipaggiati con camere o videocamere dalle caratteristiche diverse, per lunghezze focali e per risoluzione del sensore, sono tutte attestate sulle acquisizioni del visibile (RGB), in quanto studi sull'utilizzo di sensori multi o iperspettrali ed anche termici sono più recenti¹¹.



Figura 1. Comparazione di estratti di ortofoto elaborate da diversi voli fotogrammetrici, eseguiti a diverse quote di volo e mediante droni di differente tipologia: ala fissa eBee, $GSD_{medio}=5$ cm/px (sx); quadri-cottero DJI Phantom, $GSD_{medio}=2,18$ cm/px (centro); ortofoto da modello fuso, $GSD_{medio}=0.92$ cm/px (dx).

In generale tutti i voli vengono pianificati a partire dalla definizione del cosiddetto *ground sampling distance* (GSD) atteso, cioè si predetermina la dimensione del pixel sul terreno (o sull'oggetto del rilievo) nel modello o prodotto fotogrammetrico derivante dal processo, principalmente l'ortofoto ma anche la dimensione del pixel nel DSM (*Digital Surface Model*). In tal modo si ottiene una prima garanzia che il prodotto finale sia adeguato alla scala del rilievo 3D desiderata e che la sua risoluzione sia opportuna per le esigenze di descrizione della realtà che i prodotti, immagine o modelli, saranno chiamati a garantire (Figura 1).

Le caratteristiche dell'oggetto del rilievo, la sua complessità geometrica, la sua estensione, le caratteristiche ambientali e molte altre variabili determinano la scelta del drone; prima fra tutte la conformazione di base che può essere ad ala fissa, capace di sorvolare a quote ragguardevoli e con maggiore autonomia di volo zone piuttosto estese, oppure multi-rotore, più versatile per le capacità di decollo e atterraggio in spazi ristretti e più maneggevole dei primi nelle occasioni di voli ravvicinati o che richiedono strategie di ripresa diverse da quelle standard (strisciate parallele di immagini nadirali stereoscopiche), cioè, come già più volte richiamato, quando siano necessarie riprese oblique per documentare con maggiore accuratezza gli alzati degli edifici.

Semplificando, le acquisizioni fotogrammetriche da droni ad ala fissa, richiamando da vicino i voli tradizionali da aeroplani, sono adeguati e sono stati utilizzati per mappare alla grandissima scala cartografica i centri urbani, mentre i multi-rotori, a seconda delle loro capacità di *payload*, sono stati impiegati per realizzare modelli 3D di complessi monumentali o singoli beni architettonici alla scala dell'edificio, sfruttando la capacità di acquisire immagini oblique oltre quelle in assetto nadirale e poter quindi documentare con elevato dettaglio anche gli alzati del patrimonio costruito¹². Un esempio di modello 3D derivato dall'integrazione di blocchi di immagini nadirali e oblique è riportato in Figura 2¹³.



Figura 2. Modello 3D ottimizzato e con textures di elevata qualità generato da datasets integrati di immagini nadirali e oblique.

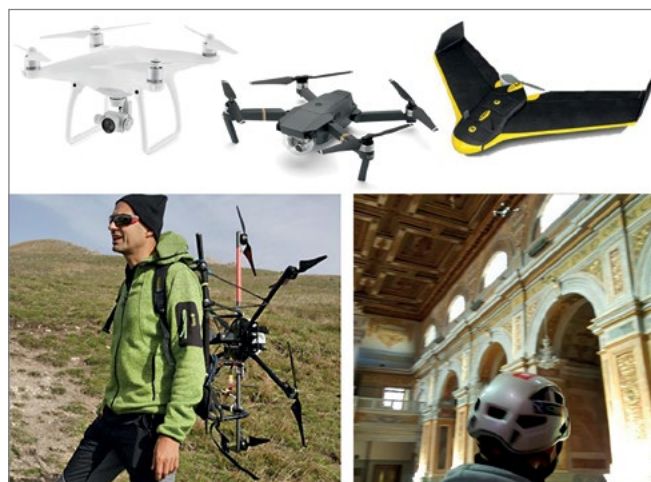


Figura 3. Alcuni modelli rappresentativi di droni impiegati nelle applicazioni svolte nei diversi siti dell'area del terremoto del Centro Italia. Sopra: i droni multi-cotteri COTs della DJI insieme al drone ad ala fissa eBee della SenseFly. Sotto, a sinistra: l'escottero professionale Ubik DIATI MK01 sulle spalle di Paolo Maschio, primo pilota del Laboratorio di Geomatica del DIATI. A destra: volo d'ispezione e ripresa video all'interno della chiesa di San Nicola di Tolentino del drone DJI Mavic, pilotato da Lorenzo Teppati del Lab di Geomatica del DAD.

Rapidamente e con riferimento alla Figura 3, la piattaforma ad ala fissa impiegata sia dal gruppo del Politecnico sia dalla squadra SAPR dei VVF in quanto rivela più che idonea per la creazione rapida di cartografia in caso di emergenza¹⁴ è l'eBee™, configurazione base, prodotto dalla Sensefly, che può montare diverse camere, ed è l'unico considerato inoffensivo dall'ENAC.

In altra occasione sono state riferite le sperimentazioni con l'impiego della stessa piattaforma nella configurazione RTK, che equipaggia cioè a bordo un ricevitore GNSS a doppia frequenza¹⁵; inoltre, a comprova che la rapida evoluzione dei sensori colma i divari, la differenza sostanziale che fino a non molto tempo fa ha caratterizzato la capacità dei droni multi-rotori di equipaggiare gimbal opportune per le riprese oblique, è stata recentemente colmata dall'immissione nel mercato di una nuova piattaforma Ebee con camera basculante e capace anch'essa di riprese oblique, già acquisita da uno dei Laboratori di geomatica del Politecnico.

Mentre per gli UAV ad ala fissa si preferisce il pilotaggio automatico, anche grazie al software E-motion che garantisce un'elevata adattabilità e la sostanziale unica necessità di disporre di un buon modello del terreno per pianificare i voli, per i multi-rotori si adottano sia i pilotaggi automatici che, a volte e in situazioni ambientali o di contesto complesse, anche quelli manuali. La serie di multi-rotori adottati, comprende sia piattaforme professionali come la Ubik DIATI MK01 sia molti prodotti COTs (*commercial off the shelf*) della DJI (Dà-Jiāng Innovations Science and Technology Co., Ltd Technologies) (Figura 1). Il loro impiego è stato direzionato alla generazione di modelli multiscala e multi-sensore, come si avrà occasione di apprendere dai numerosi report del presente volume: in particolare il piccolo quadrotore Phantom 4™, (equipaggiato con una camera 4K, sensore CMOS da 1/2.3", profondità di campo, FoV (*Field of View*) da 94°, immagini da 12.4 MP, tempo massimo di volo di 28 minuti) oppure il molto simile DJI Phantom 4 PRO, equipaggiato con sensore DJI Zenmuse X4S da 20 Megapixel, si sono rivelati molto adatti alle riprese fotografiche alternativamente in Tolentino, San Severino Marche, Sant'Agostino in Amatrice, S. Maria delle Grazie a Varoni¹⁶. Il micro-cottero Mavic DJI è stato impiegato anche per riprese video d'ispezione come riportato in Figura 3 (a destra), all'interno della chiesa di San Nicola a Tolentino. Nel variegato ambito dei sistemi *image based*, a partire dai già citati sistemi UAV, e fino a quelli che sfruttano sensori terrestri e *low cost*, si può dire che qualsiasi sensore capace di registrare immagini, che devono essere acquisite rigorosamente in modalità stereoscopica, o video dai quali estrarre frames caratterizzati da elevati *overlapping*, possono beneficiare degli sviluppi integrati degli algoritmi di *image matching* e della tecnica *Structure from Motion*¹⁷.

Anche nell'ambito dei sensori terrestri sono state sviluppate esperienze positive come si può verificare dai report relativi all'uso di tablet e smartphone (nell'applicazione a

Sant'Agostino di Amatrice) e anche rispetto ai sensori multicamera, (che consentono di ottenere risultati analoghi a quelli delle ottiche sferiche e quindi anche detti sensori 360) impiegati a Norcia¹⁸.

In tutti i casi di acquisizioni basate su immagini sono stati sfruttati software di calcolo che ormai diffusamente si avvalgono di approcci integrati, relativi sia alla fotogrammetria classica che ai nuovi algoritmi che hanno sviluppato l'automazione provenienti dalla Computer Vision¹⁹; in maniera combinata il *matching*²⁰ di immagini e la tecnica SfM risolvono il problema fotogrammetrico di orientare blocchi di fotogrammi stereoscopici in maniera automatica, generando nuvole di punti dense e accurate anch'esse in modalità automatica²¹, beneficiando infine di punti di controllo determinati per via topografica per ottimizzare il calcolo e per controllare la propagazione dell'errore.

1.2 Sistemi range based

Dal momento che uno dei caratteri maggiormente ricercato dall'integrazione di metodi è il raggiungere la grande e grandissima scala di acquisizione dei dati spaziali, i risultati della fotogrammetria UAV vengono ulteriormente completati da nuvole di punti acquisite da terra; le più speditive sono quelle derivate da sistemi di mapping mobile (MMSs) terrestri. I complessi sistemi di mapping mobile da auto o altri veicoli terrestri, che integrano camere sferiche o multi-camere con profilometri laser e ricevitori GNSS coordinati a piattaforme inerziali per la determinazione dei centri di presa, poco si adattano alle situazioni di emergenza; sono quindi stati impiegati e saranno presentati i sistemi LiDAR (*Light Detection and Ranging*) basati su tecnologia SLAM (*Simultaneous Localisation and Mapping*)²². Tale tecnica è stata messa a punto in ambito robotico e sviluppata nei sistemi di rilevamento per mappare a brevi distanze soprattutto ambienti indoor, ma sperimentata con successo anche in situazioni outdoor, portando le capacità di riprendere oggetti mediante nuvole al limite delle capacità del sistema anche negli scenari degli ambienti urbani colpiti o devastati dal terremoto²³.

Tra le varie possibilità disponibili sul mercato al tempo delle acquisizioni nell'area del terremoto, nel 2016, era disponibile il sistema Zeb1 della GeoSLAM oggi aggiornato nel nuovo sistema di scanner portatile Zeb REVO-RT²⁴ (Figura 4). La prima configurazione di questo strumento era composta da uno scanner 2D a tempo di volo con una portata massima di 30 m (Hokuyo scanner) e da un sensore inerziale IMU (Inertial Measurement Unit) utilizzato per un primo calcolo del posizionamento del centro di proiezione dello strumento. Entrambi i sensori erano montati su di una molla di metallo che si muoveva liberamente e casualmente nell'ambiente insieme all'operatore, oggi il sistema è invece configurato in una testa rotante che alloggia i sensori. In entrambi i casi il movimento cui è sottoposto il sensore determina piani di scansione 2D che investono

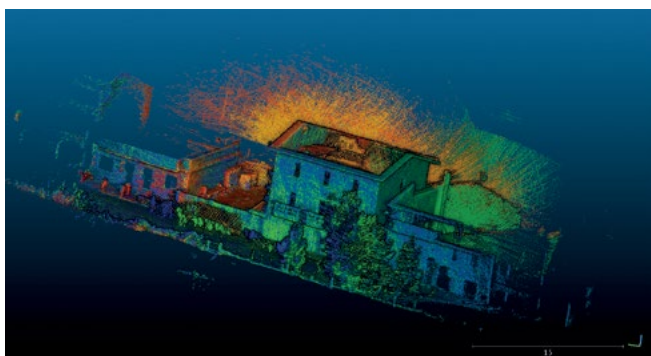
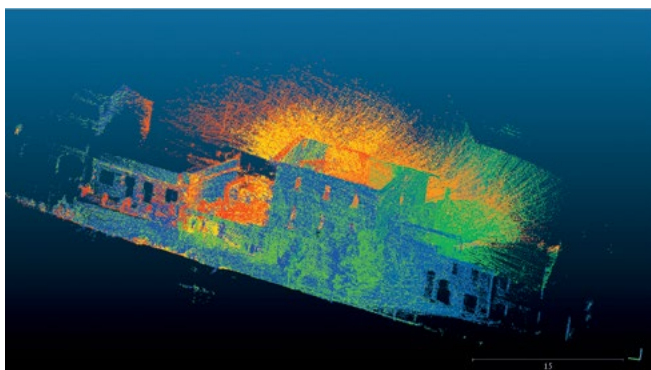


Figura 4. La sezione hand-held dello ZEBI di Geoslam a confronto con la nuova configurazione dotata del dispositivo real-time e della camera Gopro nello Zeb REVO-RT (in alto); esempi di nuvole 3D di due edifici diversi acquisite a Pescara del Tronto nelle ore precedenti il sisma del 26 ottobre. Dall'alto in basso: vista planimetrica di una nuvola con evidenziazione della traiettoria codificata tramite colore rispetto al parametro di qualità della registrazione; vista della nuvola di un secondo edificio codificata con colore rispetto al tempo di acquisizione; stessa nuvola processata con filtro che ottimizza la visualizzazione.

gli oggetti e generano la nuvola di punti 3D. Come detto, tale sistema è basato sulla tecnologia SLAM. La radiazione pulsata che viaggia dal sensore all'oggetto e viceversa, viene allineata durante il percorso dall'algoritmo di registrazione implementato nel sistema e basato sulla tecnologia robotica 3D SLAM²⁵; l'algoritmo funziona sia per la stima del movimento incrementale della traiettoria sia per la registrazione globale della nuvola di punti lungo la traiettoria, si può dire quindi che il sistema utilizza le caratteristiche dell'ambiente per determinare la posizione dello strumento.

I primi test di utilizzo di questo sistema e conseguente generazione di nuvole di punti 3D da parte del gruppo di ricerca del Politecnico sono iniziati proprio nelle aree del terremoto del Centro Italia (Figura 4). Considerando la rapidità di acquisizione che si attesta sui 15-20 minuti per scansione, che ricoprono aree di interesse che sarebbero riprese impiegando mezze giornate di lavoro mediante la classica tecnica laser scanning fissa, lo strumento è stato efficacemente utilizzato in molte applicazioni diverse²⁶. Due sperimentazioni significative sono riportate in questo volume: oltre lo studio multi-sensore già citato, una seconda applicazione è stata realizzata nel convento di San Nicola a Tolentino, prefigurando un futuro di questi sistemi probabilmente anche per il rilievo edilizio speditivo²⁷.

Durante la fase avanzata delle attività connesse alla documentazione post terremoto, e precisamente durante l'estate del 2017, il Laboratorio di geomatica del DIATI aveva acquisito un altro scanner portatile, anch'esso basato su una tecnologia della famiglia degli SLAM.

Si tratta della tecnologia proprietaria di Kaarta Stencil²⁸ basata su una soluzione definita come *laser-visual-inertial odometry based* che è stata integrata con un sensore LiDAR 3D, una camera per la correlazione degli oggetti ripresi nel corso dell'acquisizione, che contribuisce quindi alla determinazione del centro di presa e della traiettoria seguita dallo strumento, e una piattaforma inerziale per generare mappe in tempo reale senza l'utilizzo, anche in questo caso, di un ricevitore GNSS (*Global Navigation Satellite System*)²⁹.

A volte questi sistemi sono immessi nel mercato come prototipi, quindi solo più recentemente il sistema strumento-software Kaarta Stencil è stato ottimizzato e ha fornito, in seguito ai test da parte del gruppo di geomatica, ottimi risultati³⁰.

Ovviamente le molte applicazioni svolte sui contesti del patrimonio costruito anche monumentale dell'Italia centrale, essendo attestati anche, come detto, nell'*early recovering*, hanno beneficiato dell'impiego diffuso di sistemi tradizionali LiDAR da posizione fissa, il cosiddetto *terrestrial laser scanning* (TLS). Tale sistema è oggi unanimemente riconosciuto come il metodo più accurato e in grado di fornire modelli 3D caratterizzati da altissimi contenuti informativi sia geometrici sia, se integrati a progetti fotogrammetrici *close range*, anche dal punto di vista radiometrico e quindi largamente stimati per il rilievo 3D del patrimonio culturale.



Figura 5. La misura di punti di appoggio a terra mediante ricevitore GNSS in modalità RTK, e misura di punti di dettaglio con Total Station.



Figura 6. Area test scelta per la comparazione di densità delle nuvole.

		test area (1000 m ²) n° punti
ZEB		8.270.025
NIKON D800E	low	897.245
	med.	4.033.312
	high	67.832.788
EBEE		152.800
DJI	obl.	13.869.204
	nad.	1.677.843
	fus.	15.022.015
FUSION	low	270.000
	med.	2.148.351
	high	11.740.000

Tabella 1. Comparazione di numero di punti delle diverse nuvole 3D acquisite con metodi diversi per valutarne le capacità descrittive. In ordine secondo le righe di tabella: metodo MMS basato su SLAM, fotogrammetria terrestre mediante camera reflex (sensore CMOS da 36 Mpx, e pixel di 4.89µm), volo mediante Ebee ala fissa e immagini nadirali, volo mediante quadricottero Phantom nelle configurazioni nadirale, obliqua e fusa. In ultimo per il dataset definito "fusion" sono state calcolati i blocchi di immagini aeree e terrestri in modo integrato (cfr. nota 13).

La Tabella 1 riporta i risultati di uno studio svolto nel Laboratorio di geomatica volto a evidenziare una comparazione tra la densità di punti in nuvole generate con tecniche diverse in un'area test rilevata tramite sistemi aerei e terrestri (il modello denominato fusion è determinato dalla fusione di datasets di immagini da drone e acquisiti mediante fotogrammetria terrestre, tramite la camera Nikon D800E.)

1.3 Tecniche per il controllo qualitativo e la georeferenziazione dei dati

I metodi di rilievo 3D emergenti presentati nei precedenti paragrafi, così come quelli più consolidati come la fotogrammetria *close-range* oppure il TLS sono in generale anticipati da misure topografiche che consentono il controllo del valore metrico dei risultati e la loro georeferenziazione. Sempre in linea generale, e a meno che siano pianificati progetti di mapping particolarmente speditivi, le reti di vertici topografici, per lo più determinate tramite tecnica GNSS, sono usualmente misurate per ottenere il riferimento di tutte le misurazioni e degli elaborati di rilievo a un unico sistema di riferimento cartesiano, nonché al controllo della propagazione degli errori accidentali al fine di garantire le tolleranze richieste nei prodotti finali. Il calcolo e la compensazione della rete di vertici sono usualmente eseguiti utilizzando la procedura di compensazione ai minimi quadrati, che stima oltre le coordinate dei vertici anche la loro affidabilità.

Su questo versante non si può dire siano in uso particolari innovazioni, se non quando il sistema di controllo del posizionamento è direttamente integrato nei sistemi di misura oppure quando si adottano nuove strategie o approcci, come per esempio quando viene impiegata la co-registrazione di blocchi fotogrammetrici riferiti a diversi momenti temporali, come riferirà il prossimo contributo³¹.

Sia nel caso di mapping a grandissima scala, sia per il rilievo 3D alla scala architettonica, la posizione di markers aerei e/o terrestri, con l'aggiunta se necessario i punti naturali, viene determinata mediante tecnica GNSS (modalità RTK – *Real Time Kinematic* grazie alle correzioni differenziali trasmesse dalla rete di stazioni permanenti, già denominata ITALPOS ed oggi HxGN SmartNet) o tramite la stazione totale con accuratezza quindi rispettivamente centimetrica o millimetrica; tali punti hanno funzione di *Ground Control Points* (GCPs) sia per l'appoggio di blocchi fotogrammetrici di immagini, sia per la registrazione in un unico sistema delle nuvole LiDAR.

Tutti i punti misurati sono quindi georiferiti in un sistema di riferimento comune (nel caso del centro Italia UTM-WGS 84 Fuso 33 N ETRF 2000) utilizzando i dati derivabili dalla rete nazionale di stazioni permanenti.

2. Condivisione di modelli 3D e immagini georiferite tramite piattaforme web-based

La diffusione estremamente rilevante di modelli tridimensionali delle realtà urbane o relativi al patrimonio culturale (*virtual heritage*) occorsa soprattutto nell'ultima decade, ha determinato un crescente interesse per lo sviluppo di sistemi di archiviazione, conservazione e condivisione via web dei risultati³².

Nonostante gli scenari problematici di validazione, relativi a standard, configurazioni 2D o 3D dei dati, possano rappresentare questioni aperte e molto diverse nei differenti settori

applicativi, non si può non riconoscere una funzione basilare comune e destinata alla condivisione delle conoscenze e degli sforzi già compiuti nella rappresentazione delle diverse realtà anche per esempio in relazione alle piattaforme istituzionali destinate al *damage assessment*, legate al progetto Copernicus o gestite dalla Protezione Civile e discusse nel precedente contributo.

Di seguito sono presentate due attività sperimentate usando soluzioni diverse, la prima appartenente alla sfera dei prodotti commerciali e la seconda open source, cercando di evidenziare le potenzialità di simili sistemi come strumento di lavoro, di condivisione delle informazioni 3D nel corso delle attività di ricognizione e rilievo metrico per facilitarne la pianificazione o rendere maggiormente fruibili i risultati. Le due piattaforme prese in considerazione sono *Acute 3D Viewer*, visualizzatore web della Bentley System legato al software di generazione di nuvole di punti tramite tecnica SfM *Context Capture*³³ e la seconda è l'italiana 3DHOP sviluppata dal Visual Computing Lab dell'ISTI-CNR³⁴.

Il vantaggio del primo sistema è legato all'uso del formato proprietario .3MX, ottimizzato per la visualizzazione di modelli 3D di grandi dimensioni e ad alta risoluzione, tanto da consentire la navigazione di 3Dcity model di grandi città³⁵.

La condivisione di un primo modello 3D da dati UAV acquisiti in seguito all'evento dell'agosto 2016 su Pescara del Tronto è stato usato sia per condividere le strategie operative tra il nostro gruppo e il gruppo GEER (Geotechnical Extreme Events Reconnaissance Association) sia per pianificare presso il Politecnico e con i colleghi esperti di vulnerabilità sismica dell'edilizia storica quali edifici indagare in modo più approfondito durante la missione di ottobre 2016 (che si concluse anzitempo a causa dell'evento del 26 ottobre). Dal momento che a Pescara del Tronto, nonostante la frana combinata al terremoto produsse una devastazione della parte bassa del centro abitato, si era presentata una situazione di particolare interesse nella parte alta, in cui molti edifici implosi si trovavano in adiacenza ad edifici quasi integri.

In Figura 7 sono visualizzati tramite *Acute 3D Viewer* due aggiornamenti successivi del disastro occorso al centro abitato di Pescara del Tronto, oltre alla possibilità di misurare distanze direttamente sul modello condiviso via web.

La seconda soluzione, 3DHOP³⁶, è come detto una piattaforma completamente open source, sviluppata in HTML e JavaScript ed è stata analizzata e sperimentata da parte del gruppo di geomatica³⁷, sia con i modelli di Pescara del Tronto, sia con il modello 3D della chiesa di Sant'Agostino

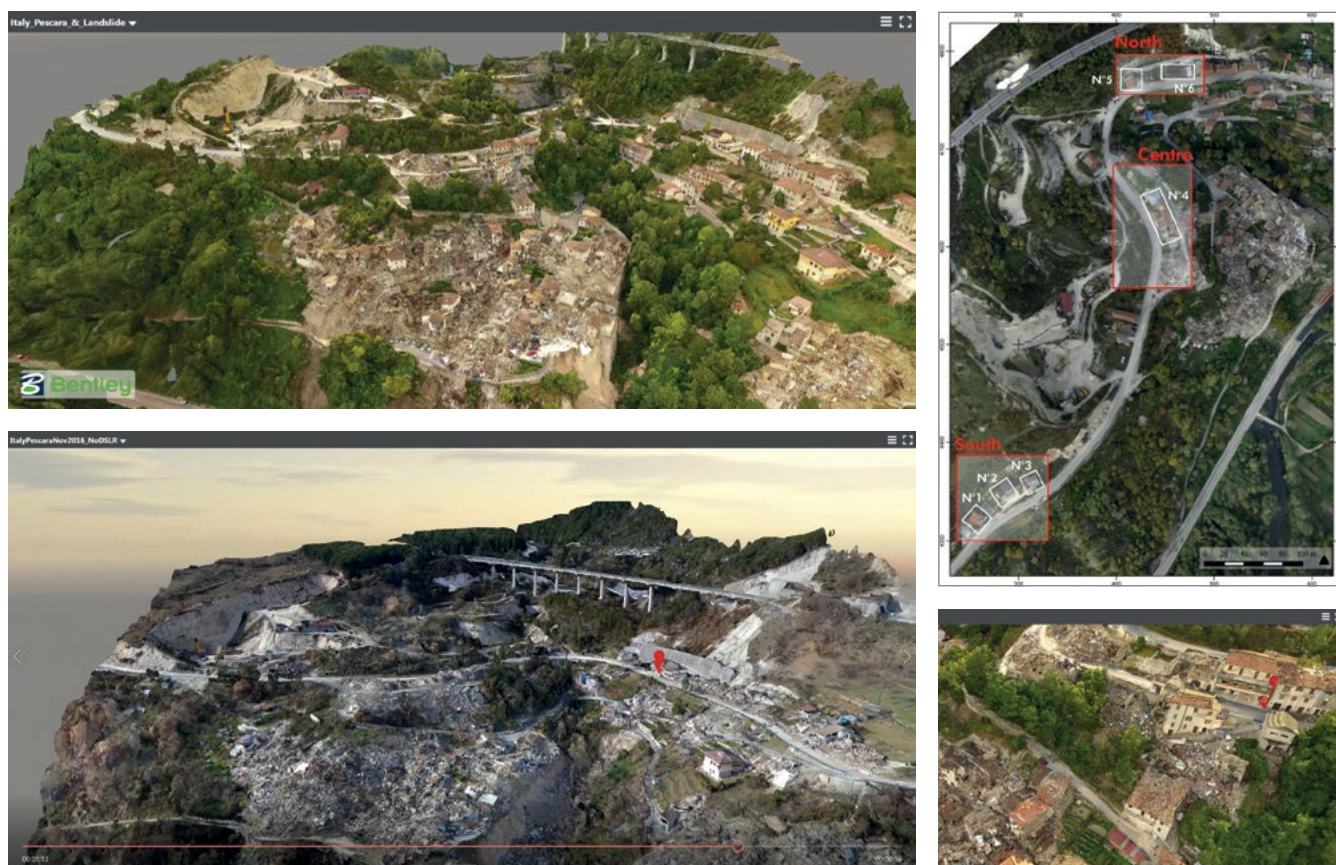


Figura 7. Visualizzazioni del modello 3D di Pescara del Tronto in *Acute 3D Viewer* (realizzato da Kevin W. Franke della Brigham Young University e GEER Team): A sinistra in alto: modello 3D da dati UAV prodotto in seguito all'evento di Agosto, (a sinistra in basso) e in seguito agli eventi del 26 e 30 ottobre. In alto a destra: pianificazione delle aree di indagine approfondita concordata con gli esperti di vulnerabilità sismica delle costruzioni del Politecnico per la missione di ottobre 2016. A destra in basso: attivazione della misura diretta di distanze nel visualizzatore 3D on line. (<http://prismweb.groups.et.byu.net/PLIApp/#%2F>).

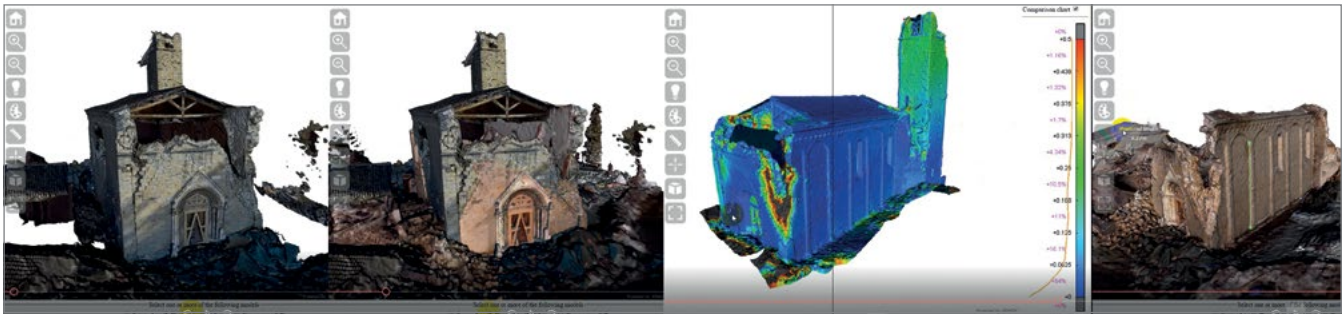


Figura 8. Una serie di screenshot di un video che illustra le capacità di rappresentazione e interazione con il modello 3D in 3DHOP: modello della situazione post evento agosto, post evento ottobre, modello con una texture che illustra le variazioni metriche tramite colore, un esempio di misurazione di distanza eseguita sul modello.

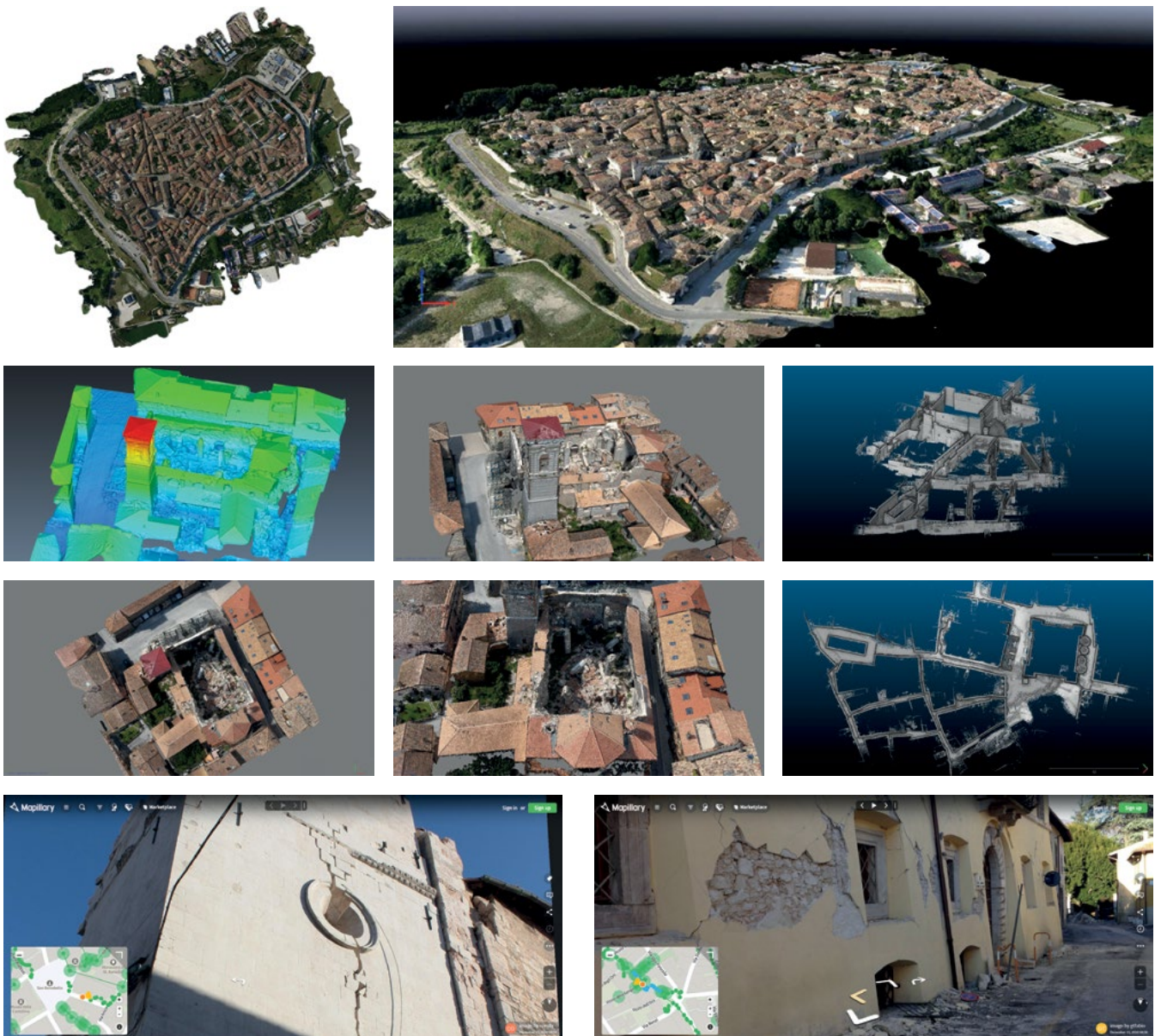


Figura 9. Un insieme di modelli 3D multiscala prodotti da acquisizioni multisensore a Norcia con il contributo del team DIRECT nell'estate 2018. In alto: ortofoto e nuvola di punti con textures prodotta in seguito al volo mediante drone Ebee ad ala fissa. Al centro: quattro viste del modello 3D generato da un volo ravvicinato e con riprese oblique sulla chiesa di Santa Maria Argentea completamente crollata in seguito all'evento del 30 ottobre, a fianco due viste, una 3D e una nadirale, di una nuvola SLAM based nella zona rossa di Norcia. In basso: immagine di una imponente frattura sulla muratura del fianco del chiesa di San Benedetto, situato nella stessa piazza centrale di Norcia, e a fianco, un'immagine caricata su Mapillary del costruito storico danneggiato di Norcia.

ad Amatrice³⁸. Questo web viewer si configura come una soluzione altamente personalizzabile e sono richieste all'utente competenze base di programmazione in Java. Attualmente 3DHOP presenta un'ampia lista di *tools* (Figura 8), in continuo sviluppo, ed è possibile allestire un visualizzatore online che contenga funzioni multiple (misurazione di distanza, estrazione di coordinate, differenti *textures*, creazione di piani per sezionare in maniera interattiva il modello ecc.). L'applicazione al modello di Sant'Agostino si è concentrato in particolare nel predisporre la visualizzazione multi-temporale dei diversi modelli 3D³⁹, generati da acquisizioni che si sono susseguite lungo l'arco temporale dei quattro eventi principali dello sciame sismico 2016-17.

Un limite del programma a questo stadio di sviluppo sembra essere legato alla conversione e compressione dei modelli 3D derivati dal rilievo, che notoriamente sono densi e accurati, e molto pesanti in termini di occupazione di memoria. Il panorama delle piattaforme web-based per la visualizzazione dei modelli 3D è in continuo sviluppo e le ultime soluzioni sembrano essere di grande interesse, come per esempio l'implementazione di questi sistemi per dispositivi mobili, attualmente già in fase di sviluppo⁴⁰.

In contesti come quello delle emergenze, la possibilità di navigare modelli 3D metricamente affidabili su dispositivi mobili, apre la strada a possibili innovazioni nel modo di utilizzare e condividere conoscenze pregresse per facilitare il compito di aggiornamento dei soggetti che operano nelle fasi di soccorso e gestione post evento.

Guardando invece ai versanti quali la piattaforma Mapillary, discussa nel precedente capitolo del *remote sensing* satellitare e aereo, mentre in tale caso si evidenziava l'opportunità di integrare immagini acquisite a terra, anche da smartphone per integrare le mappe Copernicus, proponiamo in questo scenario delle tecnologie di mapping 3D da UAV e altri metodi innovativi terrestri, di ribaltare specularmente l'opportunità anche nei casi discussi in questo contributo.

In sostanza, immagini georiferite acquisite anche da dispositivi mobili e facilmente condivisibili nello scenario *crowd sourced*, possono integrare sia i modelli 3D acquisiti con metodo MMS basato su SLAM, sia modelli 3D generati da voli a bassissima quota e mediante immagini oblique.

Non solo il vantaggio può attestarsi su profondi danneggiamenti dell'edilizia storica dei centri colpiti, ma anche rendere più speditiva la consapevolezza delle entità di danno occorse al patrimonio architettonico. Nella cornice di una possibile struttura organizzativa nella quale pochi soggetti acquisissero dati di diversa natura e che richiedono diverse tipologie e gradi di competenze, molta parte della capacità di evidenziare urgenze e azioni di supporto potrebbe compiersi in remoto, almeno per le fasi temporali più vicine al disastro. La Figura 8 evidenzia a Norcia le relazioni possibili tra i modelli speditivi da UAV e *range-based* terrestri con l'archivio delle stesse immagini georiferite e condivise in Mapillary a cura del personale di Ithaca incaricato dalla Protezione Civile.

Conclusioni e prospettive

Il quadro metodologico presentato consente di chiarire che i metodi e gli strumenti della geomatica oggi disponibili rispondono a numerose esigenze:

- rapidità di acquisizione; i sopralluoghi destinati alle campagne di rilievo ai quali i progetti presentati in questo volume si riferiscono sono state essenzialmente tre della durata di alcune giornate (3-4 mediamente). Solitamente durante le fasi di acquisizione si raccoglie un'enorme quantità di dati in tempi molto rapidi, tanto che sono necessari tempi piuttosto ampi per le elaborazioni, soprattutto, come scontato, nei casi in cui gli obiettivi prevedano prodotti come ortofoto e DSM ottenibili in modo automatico, come per esempio i disegni architettonici basati su nuvole e ortofoto relativi al patrimonio costruito;
- sicurezza degli operatori; l'uso di tecniche rapide, in larga parte fotogrammetriche, caratterizzate cioè, tra le molte prerogative, da quella di non prevedere un contatto diretto con l'oggetto di interesse, rende i metodi innovativi di rilievo 3D, sia *image* che *range based*, fondamentali per contrarre i tempi di lavoro nelle zone pericolose. Questo vantaggio legato alla sicurezza degli operatori è sicuramente il primo in ordine di rilevanza che ha motivato la collaborazione con la squadra SAPR del Vigili del Fuoco, e ha direzionato le strategie di ricerca sulla possibile riduzione dei punti di controllo a terra da determinare per via topografica necessari per ottenere risultati caratterizzati da accuratezze idonee agli scopi;
- elevato automatismo nelle fasi di elaborazione; lo sviluppo che ha condotto negli ultimi anni ad una rilevante efficienza degli algoritmi di *image matching* e SfM è senz'altro una delle prerogative nodali che ha motivato la diffusione ed il largo impiego dei metodi di estrazione automatica di nuvole di punti, DSMs e ortofoto, che hanno un ruolo fondamentale per gli obiettivi di mapping alle diverse scale;
- completezza tridimensionale e radiometrica; le esperienze che si presentano in questo volume contribuiscono a chiarire quanto i punti di vista aereo, da bassa quota, e terrestri, ottenibili rispettivamente tramite la fotogrammetria UAV con riprese nadirali e oblique e i metodi rapidi terrestri come l'MMS basato su SLAM, consentono di ottenere coperture tridimensionali complete degli oggetti d'interesse. Il contributo significativo di acquisizioni fotogrammetriche consente di integrare il dato radiometrico che è estremamente importante per interpretare correttamente i danni occorsi;
- alta risoluzione dei risultati ottenuti; lo sviluppo tecnologico dei sensori in termini di risoluzione e la loro miniaturizzazione, nonché le configurazioni multicamera e obiettivi 360°, hanno incontrato favorevolmente la possibilità di integrare a basso costo, sensori RGB nei sistemi terrestri e UAV COTs. I sistemi di stabilizzazione della

ripresa di immagini e video hanno inoltre innovato in modo significativo la possibilità di raccogliere dati qualitativamente rilevanti dal punto radiometrico⁴¹.

- accuratezza e precisione controllate; tale controllo che predefinisce le precisioni attese nel rilievo metrico e controlla a posteriori le accuratezze raggiunte nei risultati, principalmente ottenibili con l'integrazione delle misure topografiche di vertici e GCPs, è un approccio alle misure che caratterizza le azioni di rilevamento sin dalle epoche di diffusione dei metodi tradizionali e che continua a caratterizzare le strategie di lavoro anche in questa era odierna di sviluppo delle tecnologie digitali.

Queste prerogative appena evidenziate contribuiscono a rendere efficaci i metodi innovativi di rilevamento 3D sia nelle fasi dell'*early impact* per la gestione dell'emergenza, sia, con l'integrazione di metodi meno rapidi, come testimoniato da molti contributi presenti nel volume, per affrontare l'emergenza a lungo termine dei danni occorsi ai beni architettonici e affrontata in collaborazione interdisciplinare con le indagini geotecniche e strutturali.

I prodotti bidimensionali come le ortofoto, i modelli digitali (DSM/DTM), o la loro combinazione in ortofoto solida caratterizzata da 2.5 dimensioni⁴², ma anche modelli 3D, nella forma di nuvole di punti o poligonali, nelle configurazioni che esaltano la geometria o con *textures* ad elevata risoluzione che rendono i modelli fotorealistici, possono essere condivisi con gli operatori degli enti di tutela e tutti gli attori coinvolti nel processo di recupero post disastro anche in modalità *web-based*, come visto in merito alle piattaforme digitali di visualizzatori 3D o le soluzioni quali Mapillary, ad integrazione delle strategie Copernicus a scala minore.

Nel corso della presentazione nel volume delle articolate applicazioni svolte, saranno più volte citati i termini "integrazione di metodi" o "fusion di metodi o dati", quando l'integrazione si configura anche come collaborazione di parti di metodi o algoritmi per ottenere risultati diversi dalla semplice somma di risultati; queste strategie si sono rivelate oggi come le più idonee per raggiungere obiettivi prefissati ottimizzando costi e prestazioni.

Tra le prospettive a breve e lungo termine, volte a enfatizzare sempre più i vantaggi legati alla rapidità, automazione, sicurezza e possibilità di fruire facilmente dei risultati possiamo evidenziare i seguenti ambiti in rapida crescita:

- l'utilizzo di vettori terrestri caratterizzati da navigazione autonoma o controllata in remoto, a integrazione di quelli aerei, per cui si prefigura una collaborazione di UAV e UGV (unmanned ground vehicle)⁴³;
- l'interpretazione dei dati finora principalmente mediata dal confronto umano, sta assistendo a sviluppi importanti legati all'intelligenza artificiale (AI) anche nel campo della geomatica. La segmentazione di nuvole di punti e la conseguente classificazione, l'analisi di immagini e molti

altri segmenti delle fasi di processamento dei dati stanno conoscendo una stagione in cui si prefigurano utilizzi del *deep learning* per un'ulteriore automazione anche sul versante della produzione di informazione strutturata e di cartografia⁴⁴;

- nel campo della strutturazione dei database spaziali e degli standard per l'informazione geografica utili alla produzione e diffusione della cartografia, stanno conoscendo un rapido sviluppo le ontologie spaziali, a livello geografico, urbano e del patrimonio culturale, finalizzate a massimizzare l'efficacia e la fruibilità delle informazioni prodotte. Un quadro informativo di base e uno sviluppo direzionato proprio alla valutazione dei danni sismici legati allo standard europeo (EMS 98), si può consultare in uno dei contributi del volume⁴⁵ che riporta alcuni risultati del progetto ResCult (*Increasing Resilience of Cultural heritage: a supporting decision tool for the safeguarding of cultural assets*)⁴⁶.

A corollario della sintesi appena tracciata, proponiamo in chiusura di questo contributo una scheda (Figura 10) che riporta i risultati metrici finali dell'unica esperienza che non si è attestata in ambiente urbano o contesto di beni architettonici, bensì naturale; si tratta del rilievo mediante fotogrammetria UAV di una porzione del sistema delle faglie del Monte Vettore, una paleo faglia situata sul versante meridionale del monte, opposto a quello di Castelluccio, la cui documentazione è stata concordata con il gruppo GEER⁴⁷.

Gli scenari di ricerca applicata sono stati coniugati in queste attività che hanno seguito gli eventi sismici del Centro Italia ad altri tre obiettivi già evidenziati in presentazione del volume. Innanzitutto sono state messe alla prova le capacità interdisciplinari della nostra scuola Politecnica nel prefigurare analisi comparate e interrelate tra le discipline della geomatica, della Geotecnica, delle Strutture, della prefigurazione degli scenari di progetto di rigenerazione urbana e del paesaggio post disastro.

In secondo luogo, come già richiamato, la formazione studentesca nelle aree dell'Architettura e dell'Ingegneria è stato sicuramente un fattore determinante e che ha connotato larga parte delle attività, tanto che gran parte dei report brevi a fondo volume, o porzioni dei contributi più estesi, sono derivati da tesi di laurea.

In ultimo, ma particolarmente rilevante per il nostro gruppo, è la collaborazione con la squadra SAPR dei Vigili del Fuoco, che ha rivestito un ruolo fondamentale sull'intera esperienza formativa e di ricerca.

Il *public engagement* con sfondo culturale ed educativo consentito dalla task force del Politecnico coordinata da Sebastiano Foti, ha rappresentato un efficace motore per la condivisione di esperienze tra studenti, docenti, giovani ricercatori e personale esterno al Politecnico coinvolto nelle attività.

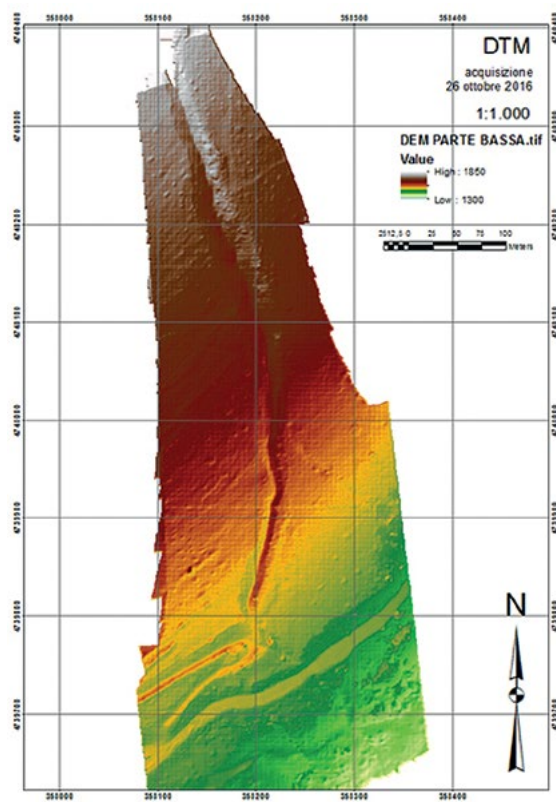
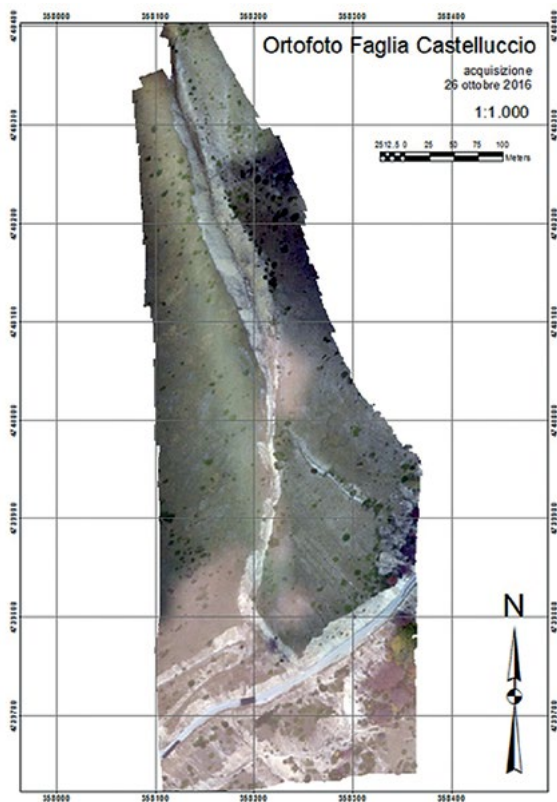
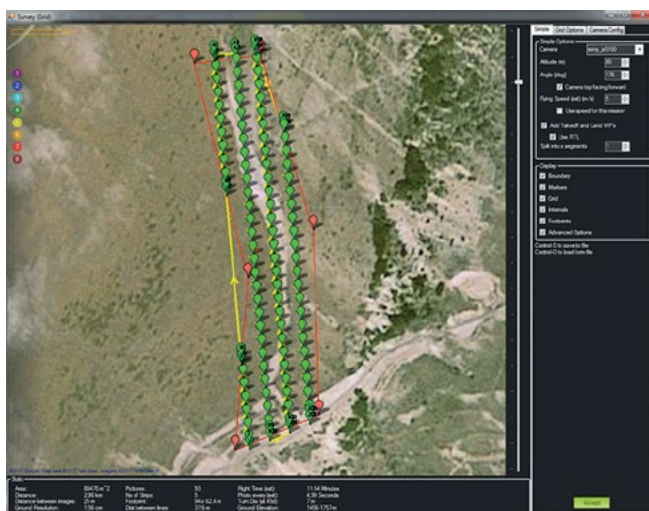
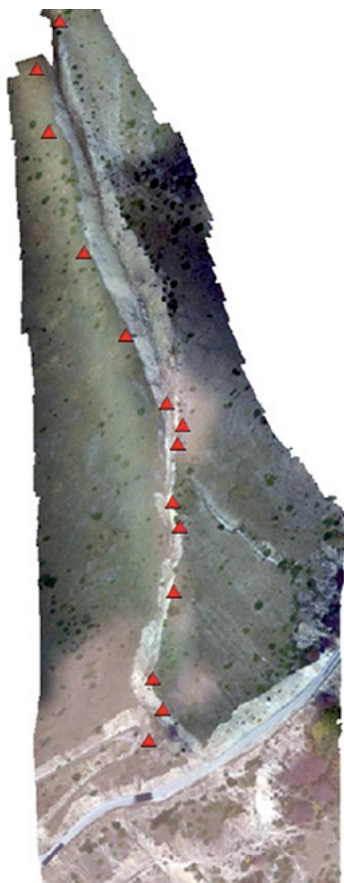


Figura 10. Alcune fasi di lavorazione ed elaborati fotogrammetrici finali relativi all'esperienza di documentazione 3D della paleo faglia del Monte Vettore, nei pressi di Castelluccio. (a) ortofoto con disposizione dei GCPs; (b, c) posizionamento dei markers e messa in stazione del ricevitore GNSS con baricentro particolarmente basso per via del forte vento; (d) pianificazione automatica del volo e disposizione dei centri di presa dei fotogrammi; (e, f) ortofoto (GSD 4 cm) e DSM (GSD 8 cm) finali.

Note

- ¹ United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR), Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030, *United Nations Off. Disaster Risk Reduct.*, 32 (2015); <https://www.unisdr.org/we/coordinate/sendai-framework>; <https://www.disasterscharter.org>.
- ² Cfr. in questo volume i contributi alle pp. 91, 102, 147.
- ³ <https://emergency.copernicus.eu/mapping>.
- ⁴ Meizhang He, Qing Zhu, Zhiqiang Du, Han Hu, Yulin Ding, Min Chen, *A 3D Shape Descriptor Based on Contour Clusters for Damaged Roof Detection Using Airborne LiDAR Point Clouds*, in «Remote Sensing», 8 (3) 189, 2016; DOI: 10.3390/rs8030189.
- ⁵ Gabriele Bitelli, Romano Camassi, Luca Gusella, Alessandro Mogno, *Image change detection on urban area: the earthquake case*, in «International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», 35, 2004, pp. 692-697. Piero Boccardo, Fabio Giulio Tonolo, *Remote sensing role in emergency mapping for disaster response*, in «Engineering Geology for Society and Territory», 5, 2015, pp. 17-24; DOI: 10.1007/978-3-319-09048-1_3.
- ⁶ Francesco Nex, Evelina Rupnik, Isabella Toschi, Fabio Remondino, *Automated processing of high resolution airborne images for earthquake damage assessment*, in «International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XL-1 (1), 2014, pp. 315-321; DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-1-315-2014.
- ⁷ Norman Kerle, *Satellite-based damage mapping following the 2006 Indonesia earthquake-How accurate was it?*, in «International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation», 12 (6), 2010, pp. 466-476; DOI: 10.1016/j.jag.2010.07.004. Guido Lemoine, Christina Corbane, Christophe Louvrier, Mayeul Kauffmann, *Intercomparison and validation of building damage assessments based on post-Haiti 2010 earthquake imagery using multi-source reference data*, in «Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions», 1 (2), 2013, pp. 1445-1486; DOI: 10.5194/nhessd-1-1445-2013. Patrick Maier, *Assessing Disaster Damage: How Close Do You Need to Be?*, 2016; in <https://irevolutions.org/2016/02/09/how-close/> (9/02/2016).
- ⁸ Sophie Crommelinck, Rohan Bennett, Markus Gerke, Francesco Nex, Michael Yang, George Vosselman, *Review of Automatic Feature Extraction from High-Resolution Optical Sensor Data for UAV-Based Cadastral Mapping*, in «Remote Sensing», 8 (8), 689, 2016; DOI: 10.3390/rs8080689. Jorge Fernandez Galarreta, Norman Kerle, Markus Gerke, *UAV-based urban structural damage assessment using object-based image analysis and semantic reasoning*, in «Natural Hazards and Earth System Science», 15 (6), 2015, pp. 1087-1101; DOI: 10.5194/nhess-15-1087-2015.
- ⁹ International Unmanned Aerial System Community, *Unmanned Aircraft System. The Global Perspective 2008/2009*, 2008.
- ¹⁰ Ultimo aggiornamento: ENAC, 21 maggio 2018, emendamento 4 edizione 2 Regolamento *Mezzi Aerei a Pilotaggio Remoto*.
- ¹¹ Mariangela Musci, Irene Aicardi, Paolo Dabove, Andrea Lingua, *Reliability of the geometric calibration of an hyperspectral frame camera*, in «International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XLII-2/W13, 2019, pp. 1701-1707. Guglielmo Cortese, *Integrazione innovativa di termografia e fotogrammetria aeree da UAV per l'analisi del costruito storico*, tesi di laurea in Architettura, Costruzione e Città, Politecnico di Torino, relatori A. Spanò, F. Giulio Tonolo, dicembre 2019.
- ¹² Andrea Lingua, Francesca Noardo, Antonia Spanò, Simone Sanna, Francesca Matrone, *3D model generation using oblique images acquired by UAV*, in «International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XLII-4/W2, 2017, pp. 107-115; DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-4-W2-107-2017.
- ¹³ Giulia Sammartano, *Suitability of 3D dense models from rapid mapping strategies for Cultural Heritage documentation and conservation. Validation of metric and non-metric information extraction from integrated solutions*, tesi di dottorato di ricerca in Beni Architettonici e paesaggistici, Politecnico di Torino, XXX ciclo (2018), tutor A. Spanò, F. Chiabrandò.
- ¹⁴ Irene Aicardi, Filiberto Chiabrandò, Nives Grasso, Andrea Lingua, Francesca Noardo, Antonia Spanò, *UAV photogrammetry with oblique images: first analysis on data acquisition and processing*, in «International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XLI-B1, 2016, pp. 835-842; DOI: 10.5194/isprs-archives-XLI-B1-835-2016.
- ¹⁵ Filiberto Chiabrandò, Fabio Giulio Tonolo, Andrea Lingua, *UAV direct georeferencing approach in an emergency mapping context. The 2016 Central Italy earthquake case study*, in «International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XLII-2/W13, 2019, pp. 247-253; DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-247-2019, 2019.
- ¹⁶ Cfr. in questo volume il contributo a p. 130.
- ¹⁷ Thomas Luhmann, Stuart Robson, Stephen Kyle, Ian Harley, *Close range photogrammetry: principles, techniques and applications*, Whittles, Dunbeath 2006; https://books.google.it/books/about/Close_Range_Photogrammetry.html?id=2A11QgAACAAJ&redir_esc=y.
- ¹⁸ Cfr. in questo volume il contributo a p. 193.
- ¹⁹ Richard Szeliski, *Computer vision: algorithms and applications*, Springer, Berlin 2010.
- ²⁰ Sono moltissimi gli algoritmi sviluppati per migliorare il matching automatico di immagini, tanto che vengono classificati in base alle primitive geometriche sulle quali si basa la ricerca. Tra i più noti e impiegati SIFT, SURF, FAST; il primo ha innescato lo studio degli altri: David G. Lowe, *Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints*, in «International Journal of Computer Vision», 60 (2), 2004, pp. 91-110; <https://link.springer.com/content/pdf/10.1023%2FB%3AVI-SI.0000029664.99615.94.pdf>.
- ²¹ Riflessioni sull'uso comparato di algoritmi derivati dalla fotogrammetria classica e dalla computer vision si possono trovare in: Irene Aicardi, Filiberto Chiabrandò, Andrea Lingua, Francesca Noardo, *Recent trends in cultural heritage 3D survey: The photogrammetric computer vision approach*, in «Journal of Cultural Heritage», 2017; DOI: 10.1016/j.culher.2017.11.006. Mentre test sul diverso uso di algoritmi di *image matching* in differenti software in: Filiberto Chiabrandò, Antonia Spanò, *Points clouds generation using TLS and dense-matching techniques. A test on approachable accuracies of different tools*, in «ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», II-5/W1, 2013, pp. 67-72; DOI: 10.5194/isprsannals-II-5-W1-67-2013.
- ²² Michael Bosse, Robert Zlot, Paul Flick, *Zebedee: Design of a Spring-Mounted 3-D Range Sensor with Application to Mobile Mapping*, in «IEEE Transactions on Robotics», 28 (5), 2012, pp. 1104-1119; DOI: 10.1109/TRO.2012.2200990.
- ²³ Uno studio approfondito su questo tema, ripreso anche in un report rapido a fine volume, pp. 186, è contenuto nella tesi di dottorato di Giulia Sammartano (cfr. nota 13).

²⁴ <http://geoslam.com/>.

²⁵ Søren Riisgaard, Morten R. Blas, *SLAM for Dummies. A Tutorial Approach to Simultaneous Localization and Mapping*; MIT OCW, 2005; DOI: 10.1017/S0025315400002526.

²⁶ Giulia Sammartano, Antonia Spanò, *Point clouds by SLAM-based mobile mapping systems: accuracy and geometric content validation in multisensor survey and stand-alone acquisition*, in «Applied Geomatics», 10 (4), 2018, pp. 317-339.

²⁷ Cfr. in questo volume il contributo a p. 217.

²⁸ <https://www.kaarta.com/products/stencil-2-for-rapid-long-range-mobile-mapping/>.

²⁹ Ji Zhang, Sanjiv Singh, *Laser-visual-inertial odometry and mapping with high robustness and low drift*, in «Journal of Field Robotics», 35(8), 2018, pp. 1242-1264.

³⁰ Alessio Calantropio, Francesca Matrone, Andrea Lingua, *L'integrazione di tecniche fotogrammetriche e MMS nel rilievo metrico dei Beni Culturali*, in Atti della Conferenza nazionale ASITA, 2019, pp. 157-164.

³¹ Cfr. in questo volume il contributo a p. 54.

³² David Koller, Bernard Frischer, Greg Humphreys, *Research challenges for digital archives of 3D cultural heritage models*, in «Journal on Computing and Cultural Heritage», 2 (3):7, 2009; DOI: 10.1145/1658346.1658347.

³³ <https://www.bentley.com/en/products/product-line/reality-modeling-software/acute3d-viewer>.

³⁴ <http://vcg.isti.cnr.it/3dhop/>.

³⁵ <https://docs.bentley.com/LiveContent/web/ContextCapture%20Help-v10/en/GUID-2DC934AB-2D7D-4349-9B71-A9DB8495A7E6.html>.

³⁶ Marco Potenziani, Marco Callieri, Matteo Dellepiane, Massimiliano Corsini, Federico Ponchio, Roberto Scopigno, *3DHOP: 3D heritage online presenter*, in «Computers & Graphics», 52, 2015, pp. 129-141.

³⁷ La realizzazione dei test di utilizzo della piattaforma 3DHop si deve ad Alessio Calantropio.

³⁸ Cfr. in questo volume il contributo a p. 147.

³⁹ Filiberto Chiabrando, Andrea Di Lolli, Giulia Sammartano, Giacomo Patrucco, Antonia Spanò, Lorenzo Teppati Losè,

Multitemporal 3D modelling for cultural heritage emergency during seismic events: Damage assessment of S. Agostino church in Amatrice (RI), in «International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», 42(5W1), 2017, pp. 69-76; DOI: 10.5194/isprs-Archives-XLII-5-W1-69-2017.

⁴⁰ <https://graphics.cs.yale.edu/software-packages/cher-ob-open-source-platform-shared-analysis-and-video-dissemination-cultural>. Per l'uso dell'applicativo Cher-Ob in sito vedi: Kiraz Goze Akoglu, Eleni Kotoula, Stefan Simon, *Combined use of ultrasonic pulse velocity (UPV) testing and digital technologies: a model for long-term condition monitoring memorials in historic Grove Street Cemetery*, NewHaven, in «Journal of Cultural Heritage», 2019; DOI: 10.1016/j.culher.2019.07.015.

⁴¹ Cfr. in questo volume il contributo a p. 212.

⁴² Sergio Dequal, Andrea Lingua, *True orthophoto for architectural surveys*, in «International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», 34, part 5/C7, 200), pp. 269-276. Leandro Bornaz, Sergio Dequal, *The solid image: an easy and complete way to describe 3D objects*, in «International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», vol. XXXV/B5, 2004, pp. 183-188.

⁴³ <http://www.tradr-project.eu/>; <http://conference.ing.unipi.it/vgr2016/images/papers/188.pdf>.

⁴⁴ A questo proposito è possibile citare il Workshop di AI per beni culturali tenutosi presso il Castello del Valentino proprio nel dicembre 2019; [http://www.politocomunica.polito.it/events/appuntamenti/\(idnews\)/13944](http://www.politocomunica.polito.it/events/appuntamenti/(idnews)/13944).

⁴⁵ Cfr. in questo volume il contributo a p. 118.

⁴⁶ <https://www.rescult-project.eu/>.

⁴⁷ GEER, *Engineering Reconnaissance of the 24 August 2016 Central Italy Earthquake. Version 2*, in P. Zimmaro, J.P. Stewart, (eds.), *Geotechnical Extreme Events Reconnaissance Association Report No. GEER-050B*, 2016; DOI: 10.18118/G61S3Z. GEER, *Engineering Reconnaissance following the October 2016 Central Italy Earthquakes. Version 2*, in P. Zimmaro, J.P. Stewart, (eds.), *Geotechnical Extreme Events Reconnaissance Association Report No. GEER-050D*, 2017; DOI: 10.18118/G6HS39.