

# FOTOGRAMMETRIA TERRESTRE E TECNOLOGIA TABLET IN SCENARI POST SISMA: IL CASO STUDIO DELLA CHIESA DI SANT'AGOSTINO IN AMATRICE.

## TERRESTRIAL PHOTOGRAMMETRY AND TABLET TECHNOLOGY IN POST-EARTHQUAKE SCENARIO: CASE STUDY OF SANT'AGOSTINO CHURCH IN AMATRICE.

Vincenzo Di Pietra<sup>a</sup>

<sup>a</sup> DIATI, Politecnico di Torino, Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129, Torino, Italia – [vincenzo.dipietra@polito.it](mailto:vincenzo.dipietra@polito.it)

**PAROLE CHIAVE:** fotogrammetria terrestre, sensori low-cost, tablet, sisma Centro Italia, beni architettonici, rilievo speditivo.

**KEY WORDS:** close range photogrammetry, rapid survey, low-cost sensors, tablet, earthquake, cultural heritage

### RIASSUNTO

In questo lavoro si vuole dimostrare la possibilità di utilizzare tecnologia tablet per portare a termine operazioni di rilievo fotogrammetrico speditivo in scenari emergenziali quali le zone colpite da un sisma. Negli ultimi anni, numerosi disastri naturali hanno colpito il territorio italiano, generando, nelle figure preposte al primo intervento, la necessità di procedure rapide e sicure, in grado di portare a termine operazioni di ricognizione, ispezione, e rilievo in strutture instabili e beni architettonici danneggiati. Infatti, durante le prime fasi successive ad un terremoto, numerosi operatori quali vigili del fuoco, protezione civile, ispettori geotecnici e topografi, devono operare in prossimità di strutture danneggiate, mettendo a rischio la propria vita a causa di possibili collassi. Modelli digitali tridimensionali e ortofoto ad alta risoluzione sono prodotti ad alto contenuto informativo utilizzabili da queste figure. In questo contesto servono procedure rapide, facili da utilizzare e che permettano di acquisire i dati (le immagini digitali) ad una distanza di sicurezza dall'oggetto. A tale scopo, in questo articolo viene testato l'approccio fotogrammetrico terrestre, partendo dall'acquisizione delle immagini con tablet durante una campagna di rilievo successiva al terremoto avvenuto in centro Italia nell'autunno del 2016. Il caso studio preso in esame è la Chiesa di Sant'Agostino in Amatrice, un bene architettonico altamente danneggiato da un terremoto di magnitudo 6.0 avvenuto il 24 Agosto 2016 in centro Italia. I risultati ottenuti dalle varie procedure di validazione hanno dimostrato come, tali strumenti, unitamente a procedure rapide di acquisizione e processamento dei dati, possano essere utilizzati negli scenari emergenziali con le finalità sopradescritte.

### ABSTRACT

The aim of this study was to investigate the use of tablet devices for rapid close range photogrammetry in post- earthquake scenario. In recent years, numerous natural disaster affected the Italian territory, growing the demand of secure on-field procedures able to accomplish the task of reconnaissance, inspection and survey of instable infrastructure and cultural heritage. In fact, during the early-impact response there are numerous first response figures, like firefighters, civil protection, geotechnical inspectors and surveyors, that have to operate nearby damaged structure putting at risk their lives in case of possible collapses. Tridimensional digital models and high resolution orthoimages are products that share spatial information useful for these operators. These procedures must be rapid, easy to use and must to allow the possibility to conduct the task with a certain distance of the instable or not easily accessible structures. A close range photogrammetry approach is considered in this paper, starting from images acquired by tablets during speditive surveys: the case-study considered in this work is the Sant'Agostino Church in Amatrice (Italy), a cultural heritage highly damaged by the 6.0 magnitude earthquake occurred on 24 August 2016 in the central part of Italy. The results demonstrates how these instruments, coupled with rapid on-field procedures could be useful in post-earthquake scenarios.

### 1. INTRODUZIONE

Negli ultimi anni una serie di eventi sismici di grande intensità hanno colpito il territorio italiano, causando ingenti danni e numerose vittime. Il sisma de L'Aquila del 6 aprile 2009, quello dell' Emilia-Romagna nel maggio del 2012 e la serie sismica avvenuta lo scorso ottobre 2016 in Italia centrale con oltre 300 vittime, sono eventi catastrofici che hanno dimostrato la necessità di strumenti e soluzioni utili in tutte le fasi della gestione dell'emergenza. I task di primo intervento di polizia, esercito e vigili del fuoco, le operazioni di ispezione e monitoraggio di geofisici e geotecnici, le procedure di emergency management di protezione civile e organi preposti, sono tutte operazioni specializzate che necessitano di informazioni complete circa lo stato di fatto della scena e che

devono preservare l'incolumità degli operatori che si interfacciano con zone ad alto rischio per la sicurezza. Quando una struttura viene danneggiata da un sisma, la prima cosa da fare è una rapida ispezione post-disastro. La pericolosità di accesso a queste strutture e le difficoltà intrinseche legate al muoversi nell'ambiente circostante, rendono spesso impossibili le operazioni di ispezione diretta. La fase preliminare di acquisizione dei dati in campagna deve essere portata a termine nel minor tempo possibile e deve essere agevole per i diversi operatori coinvolti (esperti e non). Da tutto ciò scaturisce la necessità di acquisire dati spaziali georeferenziati, completi ed intelligenti, ad una distanza di sicurezza dall'oggetto di ispezione. Tale necessità viene ben soddisfatta dalla fotogrammetria terrestre ed aerea.

La fotogrammetria, tecnica che permette di acquisire informazioni spaziali riguardo a un oggetto semplicemente acquisendo una serie di fotografie ad una determinata distanza, è un potente strumento per ottenere una esaustiva documentazione digitale dello stato delle strutture danneggiate da un terremoto (Yung-Yen et.al, 2017). Oggigiorno, l'utilizzo di camere fotogrammetriche in acquisizioni terrestri o montate su aeromobili a pilotaggio remoto (APR) ci permette di ottenere informazioni 3D complete (Gomez et.al, 2016), ad alta risoluzione e con elevata qualità, ad un costo relativamente basso e attraverso campagne in situ rapide e sicure (Aicardi et.al, 2014). Inoltre, l'enorme diffusione di tecnologie mass-market quali smartphone e tablet (Dabove et.al, 2015), il loro crescente potere computazionale e il concomitante miglioramento dei software fotogrammetrici (open e user-friendly) ha generato un crescente interesse da parte delle figure di primo intervento per l'utilizzo di questi dispositivi nella gestione delle emergenze. Il vantaggio, direttamente osservabile nell'utilizzo di strumentazione mass-market a basso costo, è la possibilità di poter effettuare un rilievo fotogrammetrico rapido, sfruttando i sensori già presenti internamente allo strumento ed evitando di porre l'operatore in pericolo durante le impegnative operazioni di campagna. La facilità d'uso di queste tecnologie e la loro rapida diffusione permette sia un utilizzo semplice da parte degli utenti meno esperti, sia una collezione di dati in maniera partecipata (Schurr et.al, 2005). Inoltre, i modelli tridimensionali ottenuti dal processo fotogrammetrico rappresentano, già nel panorama odierno, strumenti essenziali di informazioni per team multidisciplinari che devono cooperare in maniera coordinata su un oggetto di studio. Essi possono essere utilizzati in remoto da un centro di controllo o in un secondo momento per numerosi scopi, quali ad esempio: supporto decisionale per figure di primo intervento, individuazione di danni strutturali e valutazione di rischi, o ancora documentazione storica e supporto per interventi di recupero e ristrutturazione (Kumar et.al, 2009).

Il 24 Agosto 2016, alle ore 03:36 a.m., un sisma di magnitudo 6.0 (M6.2 USGS) ha colpito l'Italia centrale causando 297 vittime e ingenti danni in numerosi comuni sparsi al confine tra le regioni Lazio, Umbria, Abruzzo e Marche. Numerosi centri storici nella zona attorno all'epicentro hanno subito danni strutturali importantissimi e una parte del patrimonio architettonico di quelle zone è andato perso per sempre. Numerose figure, quali vigili del fuoco, militari e protezione civile sono intervenute per mesi nelle zone rosse per operazioni di ispezione, recupero e protezione, portando a compimento numerosi interventi a rischio della sicurezza personale. In questo contesto, durante una campagna di rilievo effettuata dal DIRECT Team (Disaster Recovery Team) del Politecnico di Torino nelle zone del Centro Italia, due differenti tablet commerciali sono stati utilizzati a scopi fotogrammetrici all'interno della zona rossa di Amatrice. L'oggetto del rilievo speditivo è la Chiesa di Sant'Agostino di Amatrice, un bene architettonico altamente danneggiato dal terremoto e di importanza elevata per la comunità (Fig. 1). Lo scopo di questo articolo è quello di valutare la possibilità di utilizzare tecnologia tablet per portare a termine operazioni di rilievo speditivo in contesti di rischio per la sicurezza personale. Le considerazioni che verranno fatte sono focalizzate su procedure di acquisizione dei dati rapide, sicure e a favore di utenti non esperti in campo fotogrammetrico. I tempi impiegati per le operazioni di campagna e di processamento dei dati sono stati riportati nelle successive sezioni. Inoltre, i modelli tridimensionali ottenuti con sensori complementary metal-oxide semiconductor (CMOS) installati nei tablet, sono stati validati

attraverso la comparazione con una soluzione di riferimento. Alcune analisi statistiche e misure su omografie hanno permesso il confronto tra le soluzioni ottenute. Infine, sono state effettuate alcune considerazioni sui vantaggi e i problemi di questa procedura per operazioni di rilievo rapido in zone critiche.

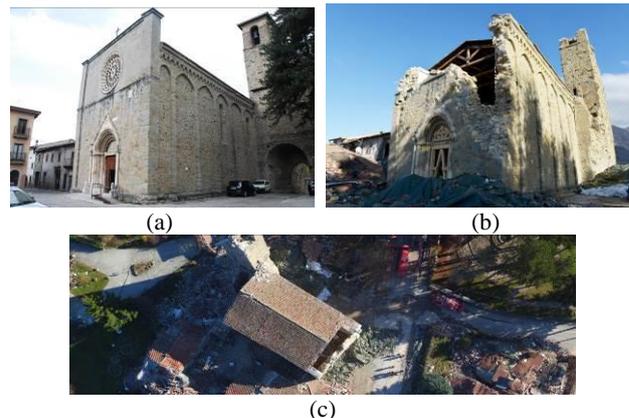


Figura 1. Chiesa di Sant'Agostino ad Amatrice. La chiesa prima (a) e dopo (b) il sisma del 24 Agosto e del 30 Ottobre 2016. (c) Vista da APR della chiesa.

## 2. CASO STUDIO

Come precedentemente affermato, uno degli obiettivi del presente lavoro è di valutare la bontà dei modelli ottenibili da tecnologia tablet e di analizzare possibili vantaggi dell'utilizzo di dispositivi mass-market in situazione emergenziali. In particolare, la chiesa di Sant'Agostino di Amatrice è stata oggetto di acquisizione nei primi giorni successivi al terremoto del 24 agosto 2016. La chiesa è situata all'interno della "zona rossa" del centro urbano, un'area soggetta a restrizioni per l'alto rischio di collassi strutturali e rappresenta un bene architettonico di grande valore per la comunità.

### 2.1 Acquisizione dei dati

L'acquisizione dei dati è avvenuta in pochi minuti, effettuando una serie di scatti con due tablet commerciali tra i più diffusi in commercio. Il geotag delle immagini è stato attivato permettendo di acquisire le posizioni GPS dei centri di presa e di salvarle all'interno del file EXIF associato a ciascuna immagine. Nessun altro dato è stato acquisito. Separatamente, sono state acquisite delle immagini con una fotocamera Canon EOS 5D Mark II, una DSLR di alta qualità da utilizzare come dataset di riferimento per le comparazioni. Infine, un rilievo di dettaglio di pochi minuti è stato portato a termine con una stazione totale. Il rilievo, non appoggiato ad una rete di inquadramento, è stato effettuato solamente al fine di inserire in uno stesso sistema di riferimento locale i tre modelli risultanti e per valutare gli scarti sui punti di controllo. L'appoggio non è stato possibile a causa della pericolosità del sito e del breve periodo di stazionamento concesso dagli organi preposti. Allo scopo di verificare l'utilità dei dispositivi mass-market in compiti di rilievo ed ispezione a seguito di un disastro naturale, due tablet commerciali sono stati considerati in questa ricerca: il Sony Xperia Z2 e l'Apple iPad mini 4 le cui caratteristiche sono descritte in Tabella 1.

Model	Apple iPad mini 4	Sony Xperia Z2
Cost [€]	439 - 549	419
Dimension [mm]	203.2 x 134.6 x 6.1	266 x 172 x 6.4
Camera type	CMOS	CMOS
Camera model	8MP iSight camera	8.1MP Exmor RS
Sensor size	3.7 x 2.7	N/A
Focal length [mm]	3.3	2.96
Pixel pitch [μm]	1.12	N/A
Image res. [pixel]	3264 x 2448	3264 x 2448

Tabella 1. Caratteristiche tecniche dei tablet e dei sensori utilizzati in situ.

## 2.2 Processamento dei dati

Come descritto in Piras et.al, (2009), allo scopo di eseguire un processo fotogrammetrico con una camera non metrica è necessario eseguire preliminarmente un processo di calibrazione della camera che ha come obiettivo quello di definire i parametri caratteristici di lenti e sensori. Questi parametri sono necessari per correggere le distorsioni proprie dei sistemi meccanici e digitali di acquisizione e permettere, così, di eseguire operazioni metriche sulle immagini, di ricostruire il modello 3D dell'oggetto acquisito, o ancora di stimare la posizione delle camere. Una delle metodologie più utilizzate per stimare tali parametri è l'auto-calibrazione, un algoritmo basato sull'acquisizione di una serie di immagini che riprendono una griglia di calibrazione creata appositamente per tale processo, sulla quale la posizione delle intersezioni del grigliato sono note con estrema precisione (2mm) (Clarke et.al, 1998).

Oggi giorno i software fotogrammetrici permettono di stimare questi parametri direttamente durante il task di rilievo e ricostruzione 3D senza passare per l'auto-calibrazione. Il vantaggio di questa procedura automatica è quello di ridurre il tempo di processamento e di ottenere un modello tridimensionale con accuratezze accettabili per applicazioni che richiedono una rapida generazione di un dato interpretabile. Poiché lo scopo della ricerca è quello di testare un'applicazione rapida e user-friendly si è deciso non eseguire il processo di calibrazione in quanto richiede maggior accortezza da parte dell'utente.

Il processo di acquisizione delle immagini dovrebbe seguire le regole fotogrammetriche di presa geometrica e sovrapposizione delle immagini (Luhmann et.al, 2007), che consistono nella definizione delle posizioni di stazione della camera e dell'angolo di direzione rispetto all'oggetto da misurare. Nella configurazione multi-images non ci sono restrizioni relativamente alla definizione della posizione delle camere e delle direzioni di presa a condizione che il numero di immagini acquisite permetta di osservare interamente l'oggetto di misura da differenti punti di vista (per occlusioni, superfici interne ed esterne) e che vi siano sufficienti intersezioni tra i fasci proiettori. Nel caso studio proposto si è optato per una "presa a raggiera" attorno a due facciate della chiesa, assicurando una sovrapposizione tra prese adiacenti, pari almeno al 50% (Fig. 2). Tale scelta è stata dettata dall'inaccessibilità dell'interno e della parte nord del fabbricato a causa dei crolli verificatisi a seguito del sisma. Per ogni punto di stazione, due immagini a differente altezza sono state acquisite e l'intera operazione è stata effettuata a mano da un utente, senza l'utilizzo di cavalletto per stabilizzare l'immagine. L'intera operazione di rilievo è stata effettuata in pochi minuti. È opportuno osservare che, quando la procedura di acquisizione per fotogrammetria terrestre si scontra con qualche ostacolo fisico, la

fotogrammetria da APR può essere utile per superare tale limite (Fernandez et.al, 2015).

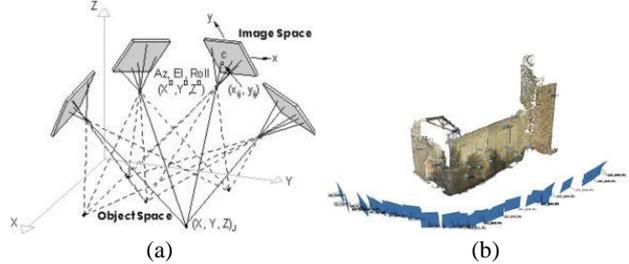


Figura 2. (a) Configurazione multi-immagine. (b) Geometria di presa per l'acquisizione in situ.

Allo scopo di ripercorrere i possibili step per la generazione di un modello tridimensionale da parte di un utente non esperto, la fase di elaborazione dei dati è stata effettuata usando il software commerciale Agisoft Photoscan e percorrendo il workflow consigliato dal software con i parametri di computazione standard. Analizzando le soluzioni disponibili sul mercato, Photoscan può essere considerato il miglior modo per ottenere buoni risultati in maniera molto semplice. Esistono numerosi software ad approccio "Structure from Motion", anche ad accesso libero (Micmac, VisualSFM), ma spesso risultano meno user-friendly per gli utenti meno esperti.

Di seguito viene riportata la procedura classica nel processamento di immagini:

- Key-points matching;
- Orientamento relativo;
- Bundle-block adjustment e generazione nuvola densa;
- Generazione superficie triangolata;
- Generazione e applicazione texture;
- Mosaicatura e creazione ortoimmagine;

La stessa procedura è stata utilizzata per la soluzione di riferimento, un modello 3D della chiesa, ottenuto con una fotocamera DSLR, la quale presenta migliori caratteristiche rispetto ai sensori presenti nei due tablet. Le informazioni riguardanti i modelli tridimensionali generati nel processo fotogrammetrico sono riportate in Tabella 2. Si può osservare che il numero di punti delle due nuvole è dello stesso ordine di grandezza e che le variazioni di poche migliaia di punti possono essere dovute alle operazioni manuali di pulizia della nuvola da porzioni non di interesse e alla rimozione dei punti sparsi.

	iPad mini 4	Xperia Z2	Canon 5D
Photos [n°]	26	45	188
Points [n°]	4.846.278	4.719.731	13.960.996
Faces [n°]	13.288.273	12.255.344	23.953.462
Vertices [n°]	7.125.846	6.438.499	12.176.173
Dim [MB]	128	122	359

Tabella 2. Informazioni relative ai modelli 3D generati con i tablet e con la camera DSLR.

Il processamento dei dati è avvenuto usando un personal computer portatile con Windows7 x64, Intel Core i7, 16 GB di RAM. I tempi di calcolo sono stati di circa 2 ore per i modelli ottenuti dalle immagini acquisite con i tablet e di circa 3 ore per il modello di riferimento. A conclusione del workflow si sono ottenute per ogni dataset una nuvola di punti densa e un modello 3D texturizzato.

### 3. VALIDAZIONE DEI RISULTATI

Al fine di validare i risultati ottenuti dal processo fotogrammetrico applicato alle immagini acquisite in maniera rapida dai due tablet in oggetto, le nuvole di punti sono state comparate con la nuvola 3D di riferimento, ottenuta dalle immagini acquisite con una DSLR camera, la Canon EOS 5D Mark II. Per la generazione di tale modello di riferimento, 188 frames sono stati acquisiti e sono stati processati al fine di ottenere un modello completo della chiesa. Anche in questo caso il modello è stato ottenuto con il software Agisoft Photoscan. Quattordici punti naturali in facciata sono stati misurati con una stazione totale e sono stati considerati come control points per la valutazione del processo fotogrammetrico, ottenendo uno scarto quadratico medio assoluto di circa 1,5 cm sui punti di appoggio (Control Points) e di circa 5 cm su punti di controllo (Check Points). Il modello risultante è composto da circa 14 milioni di punti (Fig. 3). L'intera campagna di rilievo è stata effettuata nel più rapido tempo possibile (circa 30 minuti) tenendo sempre a mente la pericolosità del sito, classificato come zona rossa.



Figura 3. Modello tridimensionale texturizzato della Chiesa di Sant'Agostino ad Amatrice ottenuto con le immagini acquisite da fotocamera DSLR.

Conclusa la generazione del modello fotogrammetrico rappresentante la soluzione di riferimento, si è proceduto ad estrarre una porzione della chiesa di Sant'Agostino comune a tutti e 3 i modelli generati che non presentasse occlusioni. Tale porzione, la facciata sud-est, è stata utilizzata per effettuare alcune analisi statistiche e misure. Il software Photoscan permette di esportare la stima degli errori (media e scarto quadratico medio) sui punti di appoggio e sui punti di controllo collimati sulle immagini processate. Questi valori, riportati in Tabella 3. sono indicativi dell'accuratezza geometrica globale del modello fotogrammetrico ottenuto dal software di Structure from Motion.

	iPad mini 4	Xperia Z2
Punti di appoggio		
X err. [m]	0,0200	0,0174
Y err. [m]	0,0612	0,0510
Z err. [m]	0,0347	0,0278
Punti di controllo		
X err. [m]	0,0133	0,0114
Y err. [m]	0,0630	0,0268
Z err. [m]	0,0399	0,0587

Tabella 3. Stima degli errori sui punti di appoggio e sui punti di controllo.

#### 3.1 Comparazione distanza Cloud2Cloud

Il primo metodo utilizzato per valutare la qualità dell'approccio fotogrammetrico con sensori mass-market è il calcolo della

distanza tra ogni singolo punto delle nuvole utilizzando l'algoritmo Nearest Neighbors (NN). Tale calcolo permette di valutare quanto il modello fotogrammetrico da tablet si discosti da quello di riferimento. Per questo tipo di analisi può essere utilizzato il software libero CloudCompare, il quale presenta numerosi algoritmi utili alla comparazione tra nuvole di punti, come l'Iterative Closest Point (ICP) e il Cloud2Cloud (C2C). In particolare, quest'ultimo è stato utilizzato sulla facciata sud-est della chiesa in un sistema di riferimento locale per entrambe le nuvole oggetto di validazione. Il C2C è un algoritmo che permette di calcolare la distanza assoluta e la distanza lungo le tre direzioni principali tra una nuvola di riferimento, nel nostro caso quella della camera DSLR, e una seconda nuvola di punti, quella da tablet. I valori statistici di output sono la distanza minima, la distanza massima, la media delle distanze e lo scarto quadratico medio. Il calcolo della distanza può essere effettuato con diversi algoritmi quali il NN o il Least Squares Plane. Come detto precedentemente, la scelta è ricaduta sul NN impostando una distanza massima di ricerca di 10 cm. Tutti i punti distanti dalla soluzione di riferimento di oltre 10 cm sono stati considerati come outliers. Tale considerazione è motivata dalla scelta del piano di facciata sud-est come porzione di validazione; essendo una la direzione principale di errore, ed essendo molto simili procedure e sensori, gli errori di cui ci interessiamo sono al di sotto di tale limite. I valori statistici calcolati tra le migliaia di punti della nuvola vengono riportati in un istogramma e visualizzati in scala di colori direttamente sulla nuvola di punti (Fig. 4).

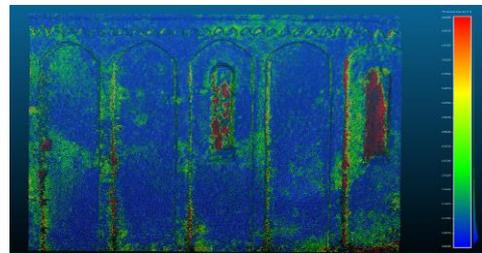


Figura 4. Rappresentazione in scala di colore della distanza assoluta tra soluzione di riferimento e soluzione da validare.

In Tabella 4. sono riportati i valori statistici ottenuti dall'analisi. Le figure 5-7 riportano la mappa in scala di colore delle distanze sulla facciata selezionata per i due sensori testati e viceversa le figure 6-8 mostrano i corrispettivi istogrammi e distribuzioni statistiche. Per entrambe le nuvole di punti si osserva che la media è di circa 2 cm e lo scarto quadratico medio è di circa 1,5 cm. Il modello tridimensionale ottenuto dall'Xperia Z2 presenta valori statistici migliori nell'ordine di pochi millimetri.

	Distanza Assoluta C2C	
	iPad mini 4	Xperia Z2
Minimo [m]	0,0000	0,0000
Massimo [m]	0,1000	0,1000
Media [m]	0,0183	0,0168
Dev. Standard [m]	0,0162	0,0153

Tabella 4. Analisi statistica della comparazione tra le nuvole di punti ottenuti con tecnologia tablet e nuvola di punti di riferimento, ottenuta con la fotocamera DSLR Canon EOS 5D Mark II.

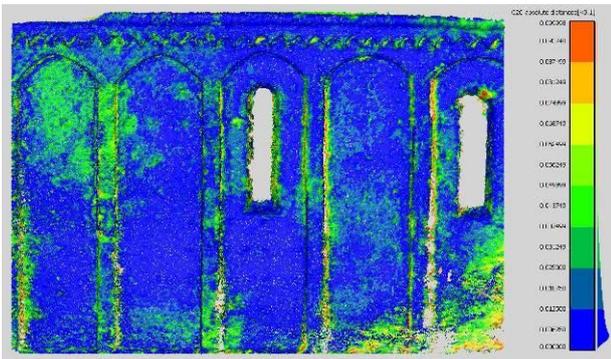


Figura 5. Rappresentazione grafica in scala di colori della distanza assoluta C2C tra nuvola di punti iPad mini 4 e nuvola di punti di riferimento Canon EOS 5D Mark II.

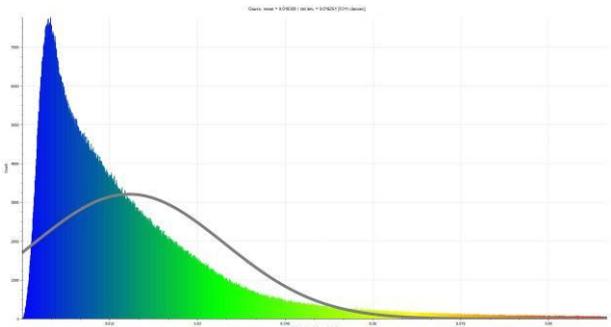


Figura 6. Distribuzione statistica della distanza assoluta C2C tra nuvola di punti iPad mini 4 e nuvola di punti di riferimento Canon EOS 5D Mark II.

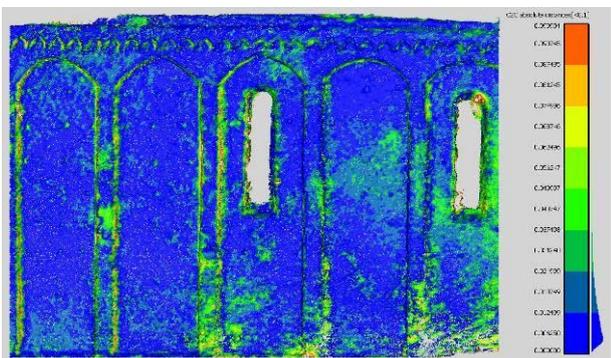


Figura 7. Rappresentazione grafica in scala di colori della distanza assoluta C2C tra nuvola di punti Xperia Z2 e nuvola di punti di riferimento Canon EOS 5D Mark II.

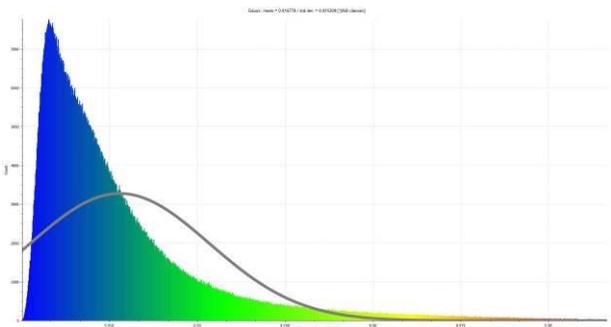


Figura 8. Distribuzione statistica della distanza assoluta C2C tra nuvola di punti iPad mini 4 e nuvola di punti di riferimento Canon EOS 5D Mark II.

Graficamente è possibile osservare le zone di facciata che presentano maggiori differenze dal punto di vista della distanza assoluta calcolata con l'algoritmo C2C. È evidente come, per entrambe le nuvole di punti, la parte sud-est della facciata presenti maggiori differenze rispetto alla nuvola di riferimento, nell'ordine di 3-5 cm. Interessante, invece, notare che l'errore di modellazione si distribuisce maggiormente nella parte nord-ovest della nuvola iPad mini 4, mentre per la nuvola Sony Xperia Z2 tale errore non si riscontra. I risultati ottenuti sono sintetizzati in Tabella 5, dove si può osservare che per l'iPad mini 4 circa l'83% dei punti si discosta dal modello di riferimento di meno di 3 cm. Per l'Xperia Z2, nella stessa distanza sono contenuti il 90% dei punti.

	Distanza Assoluta C2C [%]	
	iPad mini 4	Xperia Z2
D < 1 mm	~ 38,99	~ 21,46
1 mm < D < 2 mm	~ 28,53	~ 52,73
2 mm < D < 3 mm	~ 15,52	~ 15,71
2 mm < D < 10 mm	~ 16,95	~ 10,10

Tabella 5. Distanza dei punti e relative percentuali.

### 3.2 Estrazione informazioni qualitative da ortoimmagini

Un'altra analisi effettuata allo scopo di valutare il livello di dettaglio e l'utilità dei modelli tridimensionali ottenuti dalla tecnologia tablet è la valutazione qualitativa delle ortoimmagini ottenute dal processo fotogrammetrico. Come affermato precedentemente, gran parte delle operazioni di accertamento dei danni strutturali agli edifici causati dai terremoti è ancora basata su una valutazione visiva, e le immagini digitali generate a conclusione del processo fotogrammetrico risultano particolarmente efficaci in termini di qualità del dato RGB. Il vantaggio, in questo caso, rispetto ad una semplice immagine acquisita con sensore CMOS del tablet, è la possibilità di avere una omografia completa dell'oggetto su cui effettuare misure metriche di elementi di interesse nella stabilità strutturale dell'edificio. La Figura 9 (a e b), riporta le ortoimmagini della facciata sud-est della Chiesa di Sant'Agostino ottenute con i due tablet e le immagini (c e d) mostrano un particolare su una porzione di facciata danneggiata dalle scosse sismiche. Si è inoltre tentato di ricalcare, sulle omografie generate, alcuni elementi architettonici e particolari strutturali per comparare le differenze tra i due dati finali e per dimostrare la possibilità di estrarre dati metrici in formati utili per i tecnici interessati (Fig. 10).

Alcune misure equi-distribuite su particolari architettonici della facciata in esame sono state effettuate e comparate fra loro. Misurando distanze su entrambe le monografie ottenute con tecnologia tablet, sono state calcolate le differenze con le stesse distanze misurate sul modello di riferimento. I risultati ottenuti sono mostrati in Figura 11, e riportati, per chiarezza, in Tabella 6. Ciò ci permette di osservare come i due modelli generati si discostino di pochi mm nella globalità ma presentano variazioni non ugualmente distribuite in tutto lo spazio modello.

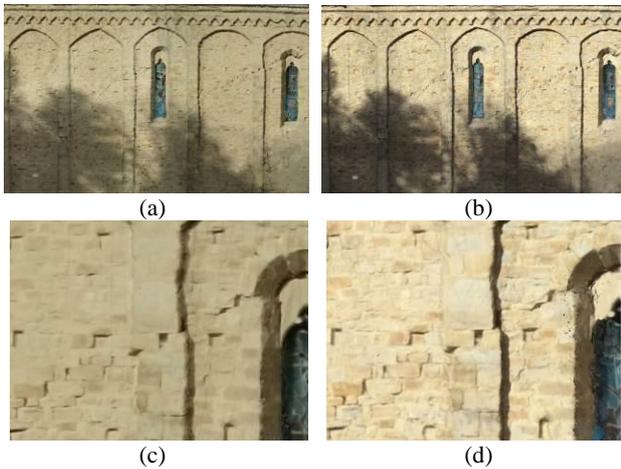


Figura 9. Ortoimmagini della facciata sud-est della Chiesa di Amatrice. (a) Ortoimmagine derivante dal modello 3D iPad mini 4 e (b) ortoimmagine derivante dal modello 3D Xperia Z2. (c,d) Particolare su porzione di facciata danneggiata dal terremoto.



Figura 10. Estrazione di elementi architettonici dalle ortoimmagini di facciata ottenute dal processo fotogrammetrico.

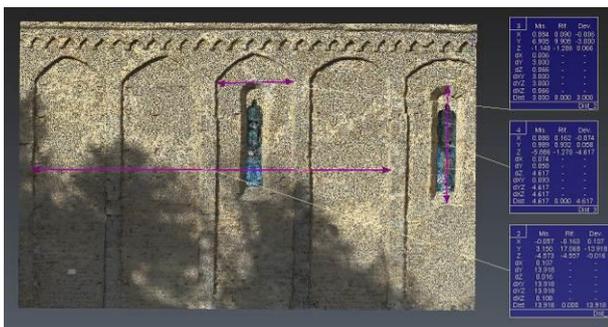


Figura 11. Misure architettoniche effettuate sulla facciata sud-est della Chiesa di Sant'Agostino.

	iPad mini 4	Xperia Z2	Canon Eos	$\Delta$ iPad mini – Canon	$\Delta$ xperia – Canon
D <sub>1</sub> [m]	13,918	13,923	13,879	-0,039	-0,044
D <sub>2</sub> [m]	3,000	3,003	3,079	0,079	0,076
D <sub>3</sub> [m]	4,617	4,596	4,598	-0,019	0,002

Tabella 6. Misure effettuate su particolari architettonici della facciata e differenze.

### 3.3 Estrazione di sezioni per valutazione modello triangolato

Infine allo scopo di valutare la mesh ottenuta per scopi di misure metriche su ingombri e volumi, sono state effettuate alcune analisi su profili di sezione della superficie triangolata finale. In questo caso il software utilizzato è stato il prodotto commerciale 3DReshaper che ha permesso di calcolare la distanza tra polilinee estratte dalla sezione della mesh. Analizzando i risultati ottenuti e riportati in Figura 8, si osserva che sia il modello iPad che il modello Xperia presentano un discostamento rispetto alla polilinea di riferimento di meno di 3 cm per l'83% dello sviluppo della stessa. Nessuna sostanziale differenza pertanto è riscontrabile a conclusione di questa analisi.

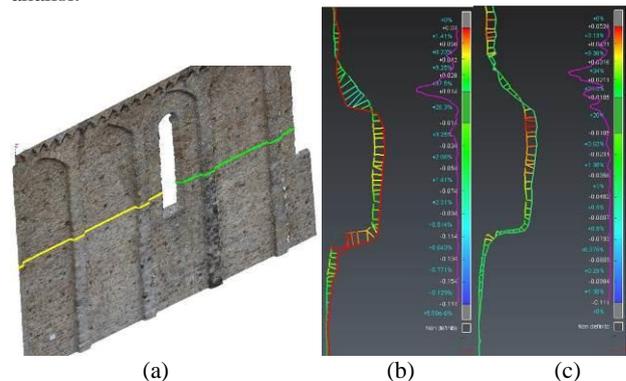


Figura 12. Confronto tra polilinee estratte tramite sezione delle mesh ottenute con sensori tablet: (a) il profilo di sezione scelto, (b) le distanze assolute tra profilo di riferimento e profilo derivante da iPad mini 4 e (c) la distanza assoluta tra profilo di riferimento e profilo derivante da Xperia Z2.

## 4. CONCLUSIONI

Il presente articolo ha dimostrato come l'uso di strumenti tablet per applicazioni di rilievo fotogrammetrico speditivo in scenari catastrofici, quali le fasi successive ad un sisma, può essere utile ai fini di una mappatura e una documentazione rapida di un oggetto. Dato l'elevato numero di disastri naturali avvenuti nel nostro territorio, l'uso di strumenti commerciali portatili, quali i tablet, può essere fondamentale per il compimento di differenti tipi di interventi, quali sopralluoghi, ispezioni e rilievi su infrastrutture instabili e beni architettonici danneggiati. Le procedure d'utilizzo di questi strumenti devono essere rapide, facili da applicare in situ, e idonee a garantire la generazione di modelli tridimensionali da una distanza di sicurezza dalla struttura instabile o difficilmente raggiungibile. La procedura esposta, unitamente all'utilizzo di strumenti a basso costo durante le operazioni di rilievo, ha dimostrato le potenzialità della tecnica fotogrammetrica terrestre anche per gli scopi sopraesposti. Tale tecnica è stata applicata al caso studio della Chiesa di Sant'Agostino in Amatrice (Italia), un bene architettonico danneggiato gravemente dalla scossa di magnitudo 6.0 avvenuta il 24 Agosto 2016 nelle regioni del centro Italia. La validazione dei risultati è stata effettuata con diversi metodi e ha trattato sia la qualità geometrica dei modelli ottenuti sia la qualità radiometrica delle ortofoto estratte. I risultati ottenuti appaiono interessanti poiché mostrano che le differenze tra i modelli 3D ottenuti e le immagini da tablet sono dell'ordine di pochi cm rispetto al modello di maggior precisione utilizzato come soluzione di riferimento in questo lavoro. Per entrambi i modelli circa il 90 % dei punti si discosta

dalla nuvola di riferimento di meno di 3 cm. I tempi di acquisizione dei dati sono dell'ordine dei minuti e l'utilizzo di un software fotogrammetrico user-friendly permette di ottenere un dato utilizzabile e di alta qualità in circa 2 ore. La possibilità di individuare danni evidenti sulle facciate per un'analisi preliminare della stabilità della struttura è stata dimostrata. Inoltre è importante sottolineare che anche se le caratteristiche dei tablet in termini di performance sono diverse, entrambi permettono di raggiungere accuratezze nell'ordine dei 5 cm, valore più che accettabile per un rilievo speditivo.

## RINGRAZIAMENTI

L'autore vuole ringraziare tutti i membri del Team Direct (studenti, ricercatori, professori e tecnici) per l'aiuto e il supporto durante le numerose campagne di rilievo effettuate nel centro Italia. In particolare Paolo Maschio, Lorenzo Teppati Losè e Paolo Dabove per l'intensa campagna di rilievo portata a termine ad Amatrice.

## BIBLIOGRAFIA

I. Aicardi, A. Lingua, and M. Piras, 2014. "Evaluation of mass market devices for the documentation of the cultural heritage." In *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40.5: 17.

Clarke, Timothy A., and John G. Fryer, 1998. "The development of camera calibration methods and models." In *The Photogrammetric Record* 16.91: 51-66.

P. Dabove, and A.M. Manzino, 2016. "Accurate Real-time GNSS positioning assisted by tablets: An innovative method for positioning and mapping", In *GEAM. Geoingegneria Ambientale E Mineraria*, 148(2), 17-22.

Fernandez Galarreta, J.; Kerle, N.; Gerke, M., 2015. UAV-based urban structural damage assessment using object-based image analysis and semantic reasoning. In *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 15, 1087–1101.

C. Gomez, and H. Purdie, 2016. "UAV-based Photogrammetry and Geocomputing for Hazards and Disaster Risk Monitoring—A Review." In *Geoenvironmental Disasters* 3.1, 23.

S. Kumar, R. K. Rathy, and D. Pandey, 2009. "Design of an ad-hoc network model for disaster recovery scenario using various routing protocols". In *Proc. ACM Int. Conf. Adv. Comput., Commun. Control (ICAC3)*, 100–105.

Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., & Harley, I. 2007. Close range photogrammetry. Wiley

Piras, M., Lingua, A., Dabove, P., & Aicardi, I, 2014. Indoor navigation using Smartphone technology: A future challenge or an actual possibility?. In *Position, Location and Navigation Symposium-PLANS 2014, 2014 IEEE/ION* (pp. 1343-1352). IEEE.

N. Schurr, J. Marecki, M. Tambe, P. Scerri, N. Kasinadhuni, and J. P. Lewis, 2005. "The future of disaster response: Humans working with multiagent teams using DEFACTO". In *Proc. AAAI Symp., AI Technol. Homeland Secur.*, 9–16.

K. Yung-Yen, J.Y. Han, and J.Y. Chou, 2017. "Application of Close-Range Photogrammetry for Post-Failure Reconnaissance of a Retaining Wall." In *Geotechnical Hazards from Large Earthquakes and Heavy Rainfalls*. Springer Japan, 503-512.