POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Impiego di aerei ultraleggeri e camere di medio formato per la fotogrammetria aerea a grande scala

Original
Impiego di aerei ultraleggeri e camere di medio formato per la fotogrammetria aerea a grande scala / Chiabrando, Filiberto; DE BERNARDI, Mauro; Roggero, Marco. - In: BOLLETTINO DELLA SOCIETÀ ITALIANA DI FOTOGRAMMETRIA E TOPOGRAFIA. - ISSN 1721-971X. - STAMPA. - 4:(2010), pp. 75-95.

Availability:
This version is available at: 11583/2381107 since:

Publisher:
Società Italiana di Fotogrammetria e Topografia

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)

25 April 2024

IMPIEGO DI AEREI ULTRALEGGERI E CAMERE DI MEDIO FORMATO PER LA FOTOGRAMMETRIA AEREA A GRANDE SCALA

Filiberto CHIABRANDO(*), Mauro Luca DE BERNARDI(*), Marco ROGGERO(*).

(*) Dipartimento di Scienze e Tecniche per i Processi di Insediamento, Politecnico di Torino, Viale Mattioli 39, 10125-Torino

filiberto.chiabrando@polito.it,mauroluca.debernardi@polito.it, marco.roggero@polito.it

Riassunto

Nella fotogrammetria a grande e grandissima scala l'acquisizione dei dati primari, immagini metriche e parametri di orientamento, può essere convenientemente effettuata anche con mezzi di basso o medio costo alla portata di piccole aziende. Tale possibilità è dovuta particolarmente all'attuale disponibilità di piattaforme aeree a basso costo, con o senza pilota, largamente sperimentate in questi ultimi anni nel campo del rilievo dell'archeologia e del monitoraggio delle emergenze ambientali.
Le applicazioni realizzate per mezzo di aeromodelli o droni autopilotati, aerostati frenati o aquiloni sono le più frequenti, ma abbiamo voluto valutare l'impiego sperimentale di aerei ultraleggeri, piuttosto diffuso all'estero ed in particolare negli USA, che si è rivelato molto conveniente in un vasto campo di intervento. Anche la disponibilità di camere digitali di buona risoluzione ed a costi relativamente bassi ha dato un impulso a questa attività.
Si è voluto in particolare valutare la possibilità di realizzare la cartografia a grande scala di piccoli centri abitati in zona collinare, utilizzando come caso studio l'abitato di Varengo (Comune di Gabiano, AL) e realizzando una carta dei tetti in scala 1:1000. L'utilizzo dell'aereo ultraleggero ha consentito la sperimentazione con grande economicità, anche se poi la normativa vigente ne impedisce l'impiego a fini produttivi.
Sebbene la scelta di camere di piccolo formato offra ovvi vantaggi in termini di economia nel rilievo di aree di limitata estensione, è anche necessario considerare il maggior numero di modelli stereoscopici necessari.

Abstract

Even more low costs systems are employed in order to generate cartographic products using photogrammetric techniques.
According to some experiences of the research group using these low cost systems such as Unmanned Aereal Vehicle (UAV) gas balloon etc., the paper shows the result of a high scale map generation using a flight achieved with an ultralight plane equipped with a digital photogrammetric camera.
In particular the test was realized in a little hamlet (Varengo) close to the Municipality of Gabiano (AL-Italy).
A typical photogrammetric process has been performed in order to generate a digital plotting at a scale map of 1:1000; after some consideration about the photographic problems of the lens all the processing steps are reported in the paper: camera calibration, bundle block adjustment, digital plotting and contours realization.

1. Impiego di aerei ultraleggeri in fotogrammetria

1.1.Aspetti normativi

Gli aeromobili utilizzati a scopo fotogrammetrico devono essere regolarmente abilitati alla specifica attività ed essere in possesso delle Autorizzazioni all'effettuazione di sorvolo delle zone oggetto dell'appalto, rilasciate dall'Ente Nazionale per l'Aviazione Civile – Servizio Licenze – ai sensi degli ART. 788 e 793 del Codice di Navigazione, così come modificato dagli PAR. 3 e 4 del D.P.R. 29 settembre 2000, n. 367.

In Italia come in molti altri Paesi vi sono limiti legali all'impiego di aerei ultraleggeri per il lavoro aereo, né è possibile acquisire una licenza di pilota commerciale per questo tipo di velivoli. Ciò significa che l'impiego di questo tipo di piattaforma per la fotografia aerea è limitato all'uso privato e ad applicazioni senza fini di lucro, alla sperimentazione ed alla ricerca. Nonostante queste limitazioni, l'impiego di velivoli ultraleggeri per la fotografia aerea ha avuto successo e larga diffusione fin dai primi anni '80.

È indispensabile un breve cenno alla normativa che disciplina in Italia il Volo da Diporto e Sportivo (VDS), anche perché introduce alcune limitazioni alle possibilità di impiego di piattaforme ultraleggere per la fotografia aerea. Fino agli anni '70 non esisteva in Italia una normativa per il VDS, e quando si iniziò a sperimentare i primi aerei ultraleggeri, spesso auto costruiti, lo si fece operando al di fuori della normativa vigente, pensata per l'Aviazione Generale. La regolamentazione della disciplina arrivò solo molti anni dopo con la Legge 106 del 23/5/1985 e con il relativo regolamento di attuazione, il DPR 404 del 5/8/1988. Di fatto ancora oggi è questa la normativa di riferimento, anche se alcune novità sono state introdotte da alcuni decreti legislativi o ministeriali.

Il DPR 404 stabilisce che:

1. L'attività di volo può essere condotta dall'alba al tramonto, fuori dalle nubi ed in condizioni meteorologiche e di visibilità tali da consentire il continuo riferimento visivo con il terreno sottostante, gli ostacoli e la eventuale presenza di ogni altro tipo di traffico.
2. È vietato il sorvolo dei centri abitati, degli agglomerati di case ed assembramenti di persone.
3. L'attività è consentita fino ad una altezza massima di 500 piedi (150 metri circa) dal terreno, con separazione a vista degli ostacoli e ad una distanza non inferiore a 5 chilometri dagli aeroporti non ubicati entro ATZ (Aerodrome Traffic Zone). Nei giorni di sabato, domenica e nelle altre festività nazionali il limite di altezza è di 1.000 piedi (300 metri circa).
4. È vietato impegnare spazi aerei controllati dai servizi del traffico aereo, zone di traffico aeroportuale, che non sono controllate, nonché le aree ristrette, pericolose o proibite.

Il divieto di sorvolo su centri abitati è stabilito al fine di salvaguardare la sicurezza e la quiete pubblica. Sarebbe infatti difficile gestire un'emergenza su di un centro abitato di grande estensione, per l'impossibilità di portarsi fuori dall'area abitata in tempo utile a predisporre un atterraggio di fortuna; sui piccoli agglomerati di case questo problema non sussiste, ma resta tuttavia il disturbo arrecato dal sorvolo a bassa quota. Il rilievo aereo di piccoli centri può comunque essere gestito pianificando la rotta appena al di fuori della zona abitata, volando alla massima quota possibile o, al limite, ricorrendo a fotogrammi obliqui.

Per gli ultraleggeri non è stabilita una quota minima di volo, e perciò i piloti possono decidere a loro discrezione, ricordando tuttavia che è loro responsabilità condurre il volo in sicurezza. In linea di massima una quota relativa di volo elevata è a favore di sicurezza, concedendo al pilota più tempo per la gestione delle emergenze. In prossimità del suolo inoltre, specialmente in estate, l'aria è più turbolenta a causa dell'irraggiamento solare. Per le riprese fotogrammetriche è comunque sempre possibile ricorrere a lunghezze focali maggiori quanto si aumenta la quota di volo, anche se in questo caso è necessaria una maggiore precisione di puntamento.

Si noti che la condotta del volo prevede la regolamentazione del volo a vista, esclusivamente al di fuori delle aree di traffico controllato. Non è previsto l'uso del GPS, della radio o del trasponder, anche se si ritiene che l'uso di questi ausili alla navigazione possano presto diventare obbligatori, a garanzia di una maggior sicurezza del traffico aereo.

1.2. Il QuickSilver, caratteristiche di volo

Il QuickSilver Sport 2S è un ultraleggero a motore biposto costruito negli USA con la tecnica tubi e tela, con struttura in tubi di alluminio e superfici portanti in tela di dacron. L'apertura alare è di 942 cm e la lunghezza di 556 cm. Pesa al decollo soli 250 kg e il carico utile è di 200 kg. I due posti del pilota e del copilota sono affiancati. La configurazione è ad ala alta e grazie al baricentro molto in basso rispetto all'ala si ottiene una notevole stabilità.
Il motore due tempi Bombardier Rotax 582 è un due cilindri da 580.7cc, che sviluppa 64.4 hp a 6500 RPM; è provvisto di doppio carburatore e raffreddato a fluido.
Le prestazioni sono notevoli: lo spazio necessario per il decollo è di soli 70 m da pista in erba, il rate di salita è di 500 ft/min e la velocità di stallo di 56 km/h. La velocità al 55% della potenza è di 90 km/h, al 100% di 110 km/h. Il consumo di carburante è mediamente di 15 l/h, consentendo un'autonomia di 3 h e un raggio di intervento di 140 km senza scalo.

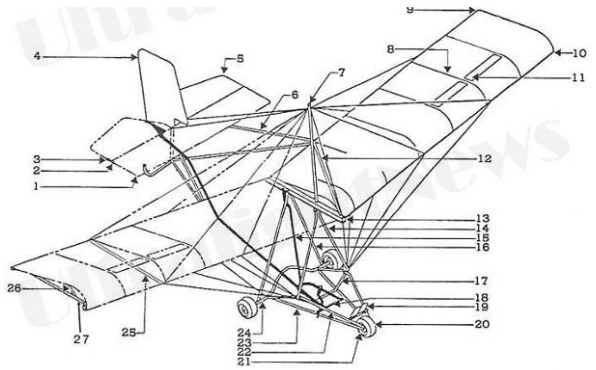


Fig. 1 – QuickSilver Sport 2S.

2.Aspetti fotografici

Prima di esporre le peculiarità delle applicazioni di fotogrammetria aerea con aerei ultraleggeri, è opportuno discutere alcuni aspetti fotografici che hanno indirizzato le nostre scelte in fase di progetto delle prese e del piano di volo. La camera a nostra disposizione è la Canon EOS 1Ds Mark II, da pochi mesi proprietà del CESMO - Centro Servizi di Mondovì, equipaggiata con ottica a fuoco fisso e 20 mm di lunghezza focale. Esporremo comunque le nostre considerazioni su un assortimento di quattro ottiche Canon, di lunghezza focale compresa tra i 14 e i 50 mm, anche al fine di indirizzare un futuro acquisto.

2.1. La Canon EOS 1Ds Mark II

La Canon EOS 1Ds Mark II è un corpo macchina caratterizzato da una robusta struttura e da funzioni di controllo complete, dotato di sensore CMOS da 16.7 Mpixel. Nonostante le grandi dimensioni delle immagini, grazie al processore Digic II la velocità di registrazione è elevatissima, fino a 4 fotogrammi al secondo. La struttura del corpo è in lega di magnesio, leggera, resistente e ottimo schermo alle interferenze elettromagnetiche, contribuendo a limitare il rumore elettronico. Ben realizzato anche il sistema di guarnizioni antipolvere e di impermeabilizzazione che rende la fotocamera adatta per l'impiego in ambienti particolarmente difficili. Le dimensioni sono 158 x 156 x 80 mm; il peso è di 1.8 kg compresa la batteria. L'autonomia di funzionamento è di 9 ore, o di 1650 scatti. Le caratteristiche di questo corpo macchina lo rendono più che idoneo all'impiego in fotogrammetria aerea, soprattutto grazie alla velocità di reazione e di registrazione del processore. Unico difetto è il peso, non trascurabile nella progettazione del supporto del corpo macchina.
Il sensore CMOS misura 36 mm di base e 24 mm di altezza, ed è formato da 17.2 MegaPixel, di cui 16.7 effettivamente utilizzati. La risoluzione massima è di 4992 x 3328 pixel e l'immagine è registrata in formato Raw senza perdita d'informazione a 36 bit di profondità. È prevista inoltre la possibilità di registrare contemporaneamente sia un'immagine Raw che una Jpeg, con qualsiasi livello

di compressione, o anche solo l'immagine Jpeg. L'occupazione di memoria dell'immagine Raw è di circa 15 Mb, e l'intervallo minimo tra due scatti è di soli 0.16 secondi.
Il sensore dispone di una gamma di sensibilità molto ampia ed è possibile impiegare sensibilità da 50 fino a 3200 ISO nominali (misurati[1] da 63 a 4119 ISO), con una regolazione fine in passi di 1/3 EV. È anche possibile eseguire un bracketing sull'esposizione ottenuto variando la sensibilità del sensore, operazione questa impossibile con le pellicole fotografiche. Il rumore a 100 ISO è contenuto e si fa più evidente a sensibilità superiori, ma da esperienze fatte sembra che per scopi fotogrammetrici ci si possa spingere in condizioni di luce scarsa fino a 400 ISO senza introdurre eccessivo disturbo nell'immagine. Non è però consigliabile salire a sensibilità superiori.
La EOS 1Ds può montare gli obiettivi intercambiabili EF delle fotocamere Canon EOS a pellicola, senza alcuna variazione nell'angolo di campo, in quanto il sensore ha le stesse dimensioni del formato 35 mm. La risoluzione è di 2450 linee a f/4, pari a circa 2 pixel per linea. Si tratta di una risoluzione molto elevata, ma ovviamente può essere raggiunta esclusivamente con ottiche di altissima qualità, come ad esempio l'EF 35/1,4 USM. Ai diaframmi maggiori e ai bordi si nota una diminuzione nella resa, normale anche in un obiettivo così ben costruito.

2.2. Scelta e calibrazione delle ottiche

Come già accennato, abbiamo valutato quattro ottiche con focali comprese tra 14 e 50 mm, valutando pregi e difetti di ogni abbinamento ottica – sensore. L'elevata risoluzione, profondità di colore e sensibilità del sensore possono essere sfruttate solo con un'attenta scelta dell'ottica, della sua apertura dei tempi di esposizione. Questi parametri in fotogrammetria aerea sono legati alla quota e alla velocità di volo, che nel caso dell'uso di aerei ultraleggeri sono poco usuali (limitata quota e velocità di volo). Premettiamo che non esiste una scelta ottimale in assoluto, ma focali diverse possono presentare vantaggi diversi in diverse condizioni di presa.

		14 mm	**20 mm**	**24 mm**	**50 mm**
Costruzione	**elementi**	14	11	11	7
	gruppi	10	9	9	6
Lenti speciali		1 asferica		1 asferica e 1 a bassa dispersione	
Angolo di campo		114°	94°	84°	46°
Peso		560 g	405 g	550 g	290 g

Tab. 1 - Caratteristiche costruttive delle ottiche esaminate.

Canon EF 14mm f/2.8 L USM

La qualità ottica è molto buona e la nitidezza al centro dell'immagine è ottima; ai bordi invece è di molto inferiore, tuttavia questo difetto è normale per ottiche di focali così corte. La vignettatura è molto contenuta.

Canon EF 20mm f/2.8 USM

Il principale pregio di quest'ottica è la bassa distorsione. Presenta un'elevatissima nitidezza al centro del fotogramma, a scapito dei bordi sensibilmente inferiori. L'effetto di vignettatura è elevato, quasi un diaframma a f/2.8.

Canon EF 24mm f/1.4 L USM

La resa ottica di questo obiettivo è decisamente ottima. Nonostante sia stato progettato per ottenere i massimi risultati possibili a grande apertura si dimostra eccellente anche ai diaframmi più chiusi. La vignettatura è molto contenuta, cosa non comune nei grandangolari ad aperture elevate del diaframma. Anche la distorsione è limitata.

[1] La sensibilità è misurata secondo la norma CIPA DC-004. Essa viene valutata tenendo conto dell'esposizione necessaria a produrre un grigio medio corrispondente al 46,1% del segnale massimo di registrazione (livello di saturazione).

Canon EF 50mm f/1.4 USM

La nitidezza è elevatissima sia al centro che ai bordi per il diaframma f/5.6 e con una qualità tra le migliori a f/1.4. Anche la vignettatura, elevata per un obiettivo convenzionale, è in presenza di una simile apertura relativa perfettamente accettabile. Molto bene la correzione della distorsione e bene anche la precisione del diaframma.

La distorsione radiale è limitata in tutte le ottiche esaminate; normalmente bassa negli obiettivi a focale più lunga come il 50 mm, nel 14 e nel 24 mm è stata contrastata con l'inserimento di una lente asferica. Distorsione radiale e coordinate del punto principale sono state determinate con il programma di calibrazione Calibra 2.0.1, dell'Ing Davide Marenchino e poligono di calibrazione a diedro del laboratorio di fotogrammetria del DITAG.

L'effetto di vignettatura è piuttosto fastidioso in tutti gli obiettivi grandangolari esaminati, e raggiunge il valore di un diaframma per il 14 mm, ma è possibile correggerlo con appositi programmi di elaborazione di immagini. Nel nostro caso abbiamo utilizzato PTLens 8.7.1

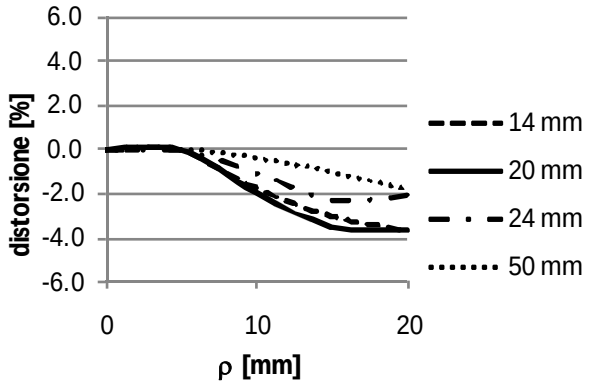


Fig. 2 – Distorsione radiale.

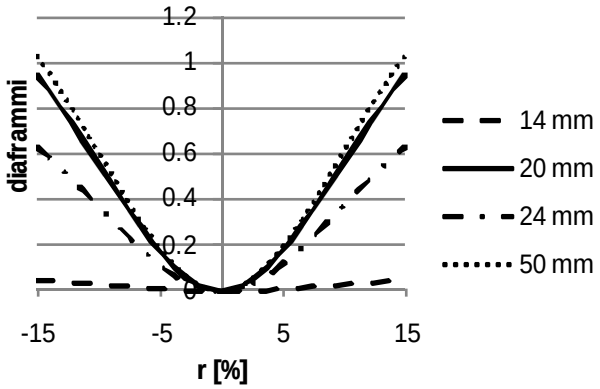


Fig. 3 – Effetto di vignettatura.

Anche l'aberrazione cromatica, che talvolta si verifica nelle zone ad alto contrasto dell'immagine, può essere corretta con PTLens. In particolare è possibile correggere l'aberrazione cromatica trasversale, mentre l'aberrazione cromatica longitudinale può essere minimizzata con l'algoritmo Purple Fringe Photoshop (epaperpress.com/psphoto)[2]. L'aberrazione cromatica è visibile a forti ingrandimenti, e può essere fastidiosa in fase di restituzione fotogrammetrica. Ad ingrandimento normale o su stampa, diminuisce la nitidezza dell'immagine.

Fig. 4 – Correzione dell'aberrazione cromatica trasversale: a sinistra l'immagine non corretta, a destra l'immagine corretta. Si noti la maggiore nitidezza della seconda.

[2] L'aberrazione cromatica longitudinale si verifica quando diversi colori sono a fuoco su diversi piani, ovvero la lunghezza focale è funzione della lunghezza d'onda della luce. Nell'aberrazione cromatica trasversale invece tutti i colori sono a fuoco sullo stesso piano, ma con ingrandimenti diversi.

Per la valutazione della nitidezza ci siamo basati su misure eseguite presso Centro Studi Progresso Fotografico (CSPF, a, b, c, d), e su prove effettuate personalmente fotografando a sensibilità e aperture diverse un soggetto a forte contrasto da grande distanza (da 200 a 2000 m). La nitidezza è espressa nello Subjective Quality Factor Kodak (SQF), ricavato da misure MTF (Modulation Transfer Function). Lo standard MTF misura il contrasto dell'immagine di un target standard, ottenuta con l'ottica da esaminare. Lo standard SQF deriva dall'MTF, e tiene conto anche dell'acuità visiva oltre che della qualità dell'ottica. Nelle ottiche esaminate la nitidezza è migliore per aperture comprese tra f/4 e f/8, e decade nettamente per aperture maggiori. La massima risoluzione si ottiene a f/4 e raggiunge le 2450 linee, pari a circa 3.4 pixel.

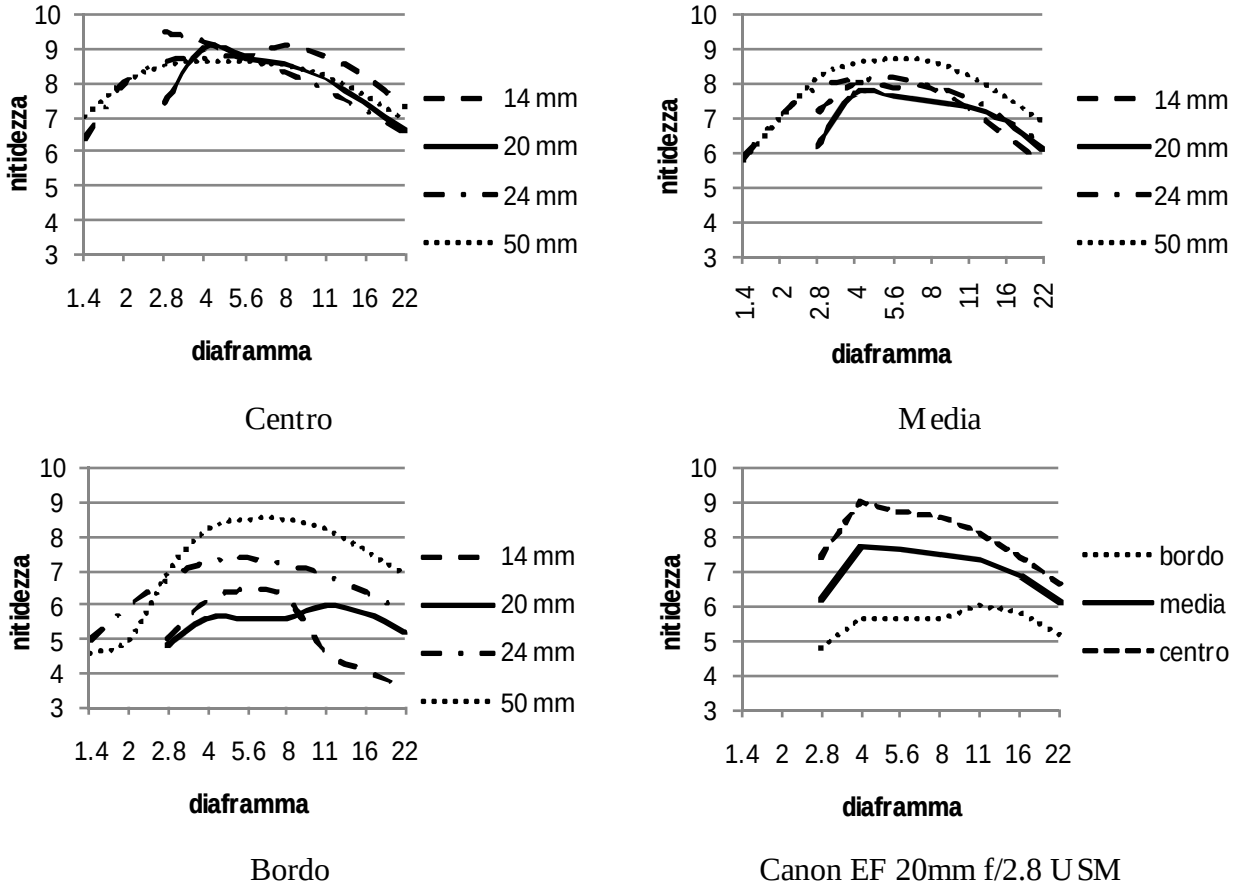


Fig. 5 – Nitidezza. L'unità di misura è un fattore di qualità Kodak ricavato da misure MTF. L'ultimo grafico riporta la nitidezza al centro, al bordo e media del 20 mm provato in volo.

Come abbiamo visto la distorsione è contenuta in tutte le ottiche esaminate, e comunque viene calcolata in fase di calibrazione e può quindi considerarsi poco influente ai fini della restituzione fotogrammetrica. L'effetto di vignettatura è più fastidioso, specialmente alla focali più corte ma, anche grazie alla profondità di colore del sensore, come abbiamo visto può essere facilmente eliminato. Per scopi fotogrammetrici il parametro che invece maggiormente influenza la scelta dell'ottica, oltre ovviamente alla lunghezza focale è la nitidezza, che influisce sulla risoluzione dell'immagine. Tra le ottiche esaminate è il 50 mm a mostrare la maggiore nitidezza media, mentre il 20 mm a nostra disposizione è purtroppo il peggiore, sebbene nell'intervallo di aperture da f/4 a f/8 i risultati siano ancora buoni. Molto interessante anche la soluzione del 14 mm, che al centro dell'immagine presenta una nitidezza addirittura superiore al 50 mm, sebbene verso i bordi le prestazioni siano inferiori.

2.3. Progetto delle prese

Nel progettare la presa si è cercato il modo di sfruttare al massimo la risoluzione del sensore, con un'accurata scelta dell'ottica e della quota di volo adatta alla produzione di cartografia alla scala richiesta. Calcoliamo prima di tutto il valore della GSD (Ground Sampling Dinstance) impiegando diverse focali a diverse quote di volo, come riportato in Tab. 2. La GSD, che rappresenta la proiezione della dimensione del pixel sul terreno, è spesso usata erroneamente come sinonimo di risoluzione. In realtà la risoluzione dell'immagine digitale non è determinata solo dalla geometria del sensore ma anche dalla qualità dell'ottica e da altri fattori esterni, quali le condizioni atmosferiche o il trascinamento, ed in pratica è spesso inferiore alla GSD.

h	[m]	50	70	100	150	200	250	300	350	400
c [mm]	[ft]	164	230	328	492	656	820	984	1148	1311
14		2.6	3.6	5.2	7.7	10.3	12.9	15.5	18.0	20.6
20		1.8	2.5	3.6	5.4	7.2	9.0	10.8	12.6	14.4
24		1.5	2.1	3.0	4.5	6.0	7.5	9.0	10.5	12.0
50		0.7	1.0	1.4	2.2	2.9	3.6	4.3	5.0	5.8

Tab. 2 – GSD: i valori sono in cm.

Come abbiamo già visto, le misure di laboratorio indicano per il sensore della EOS 1Ds Mark II una risoluzione di 2450 linee, ovvero un potere risolutivo di circa 2 pixel. Suggeriamo una formula empirica per stimare la risoluzione effettiva R dell'immagine:

$$R = 10 \cdot \frac{GSD \cdot R_t}{SQF} \qquad (1)$$

dove R_t è il potere risolutivo teorico (espresso in pixel) e SQF il Subjective Quality Factor Kodak. L'unità di misura di R è coerente con GSD. Volando ad esempio con il 20 mm a 200 m di quota, con apertura del diaframma a f/5.6 lo SQF vale 7.8 ed otteniamo una risoluzione effettiva di ~20 cm. Ciò non significa che dettagli a forte contrasto non possano comunque essere visibili, anche se di dimensioni inferiori alla risoluzione effettiva. In volo questa risoluzione sarà ulteriormente limitata dal trascinamento dell'immagine, e vogliamo quindi verificare che l'effetto del trascinamento non sia significativamente superiore a 2 pixel. Tenendo presente che la velocità operativa del QuickSilver in fase di presa può tranquillamente abbassarsi a 70 km/h, verifichiamo il trascinamento del fotogramma, riportato in Tab. 3.

h	[m]	50	70	100	150	200	250	300	350	400
c [mm]	[ft]	164	230	328	492	656	820	984	1148	1311
14		1.5	1.1	0.8	0.5	0.4	0.3	0.3	0.2	0.2
20		2.2	1.5	1.1	0.7	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3
24		2.6	1.8	1.3	0.9	0.6	0.5	0.4	0.4	0.3
50		5.4	3.9	2.7	1.8	1.3	1.1	0.9	0.8	0.7

Tab. 3 – Trascinamento dell'immagine: i valori sono in pixel. I valori campiti in grigio indicano combinazioni quota-focale sconsigliabili (trascinamento superiore a 2 pixel).

Un altro parametro molto importante è l'area coperta dal fotogramma, tanto più grande quanto più elevata la quota di volo e corta la focale. Ovviamente una copertura elevata è preferibile, in quanto a parità di area da cartografare richiede la restituzione di un minor numero di modelli. Uno dei problemi nell'uso fotogrammetrico delle camere di piccolo o medio formato è dato dalla forma rettangolare del sensore. Disponendo il lato lungo del sensore nella direzione di volo, si ottengono modelli approssimativamente quadrati, aumentando la base di presa ma riducendo la larghezza della strisciata; nella realizzazione di un blocco ciò obbliga ad un numero di strisciate maggiore, ma può essere comodo nel caso di strisciate isolate.

h	[m]	50	70	100	150	200	250	300	350	400
c [mm]	[ft]	164	230	328	492	656	820	984	1148	1311
14		86	120	171	257	343	428	514	600	686
20		60	84	120	180	240	300	360	420	480
24		50	70	100	150	200	250	300	350	400
50		24	34	48	72	96	120	144	168	192

Tab. 4 – Copertura del fotogramma: sono riportate in m le proiezioni al suolo del lato minore del sensore. Questa dimensione corrisponde all'incirca al lato del modello.

Per il progetto delle prese facciamo ora riferimento al caso normale della fotogrammetria (Kraus, 1997):

$$\sigma_X = m_b \sqrt{\left(\frac{\xi}{c} \cdot \frac{Z}{B}\right)^2 \sigma_{P_\xi}^2 + \sigma_\xi^2} \qquad (2)$$

$$\sigma_Y = m_b \sqrt{\left(\frac{\eta}{c} \cdot \frac{Z}{B}\right) \sigma_{P_\xi}^2 + \sigma_\eta^2} \qquad (3)$$

$$\sigma_Z = m_b \frac{Z}{B} \sigma_{P_\xi} \qquad (4)$$

$$\sigma_{or} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \qquad (5)$$

dove Z è la quota di volo, B la base di presa, c la lunghezza focale e $m_b = Z/c$ la scala media del fotogramma. Assumeremo al bordo del sensore le coordinate immagine ξ e η pari a 12 mm, l'errore di collimazione σ_ξ e σ_η pari a 7.2 µm e l'errore di parallasse e $\sigma_{P\xi}$ pari a 5.0 µm. Assumiamo che sia richiesto un ricoprimento longitudinale dell'80%, idoneo ad esempio per la produzione di ortofotocarte anche su aree edificate. Ripetendo il calcolo per diverse quote di volo e diverse lunghezze focali, assumendo sempre che il ricoprimento longitudinale sia dell'80%, otteniamo gli scarti quadratici medi $\sigma_x = \sigma_y$ e σ_{or} delle coordinate planimetriche; la Tab. 5 riporta in cm i valori $2.45\sigma_x$, dove il fattore 2.45 è usato per il calcolo dell'accuratezza planimetrica ad un livello di confidenza del 95%. Nella stessa tabella alle scale cartografiche da 1:50 a 1:2000 sono associati dei colori, assumendo le tolleranze di scala

$$\sigma_{max} = g \cdot sc \qquad (6)$$

dove $g = 0.2\ mm$ è l'errore di graficismo e sc è il fattore di scala (dato il rapporto di scala $1{:}sc$)[3]. Le ultime due colonne, con campitura tratteggiata, si riferiscono a quote di volo superiori a 1000 ft e quindi non ammesse dalla normativa sul volo ultraleggero. Anche le combinazioni quota-focale che producono un trascinamento eccessivo hanno campitura tratteggiata.

h	[m]	50	70	100	150	200	250	300	350	400
c [mm]	[ft]	164	230	328	492	656	820	984	1148	1311
14		10	14	20	30	40	49	59	69	79
20		7	10	14	21	28	35	42	48	55
24		6	8	12	17	23	29	35	40	46
50		3	4	6	8	11	14	17	19	22

Tab. 5 – Scarti quadratici medi planimetrici in cm delle coordinate restituite, previsti nelle condizioni più sfavorevoli (ai bordi del modello) a diverse quote di volo e con diverse focali. Ai colori sono associate le scale cartografiche ■ 1:50, ■ 1:100, ■ 1:200, ■ 1:500, ■ 1:1000, ■ 1:2000.

[3] La verifica è in accordo con l'ASPRS accuracy standard.

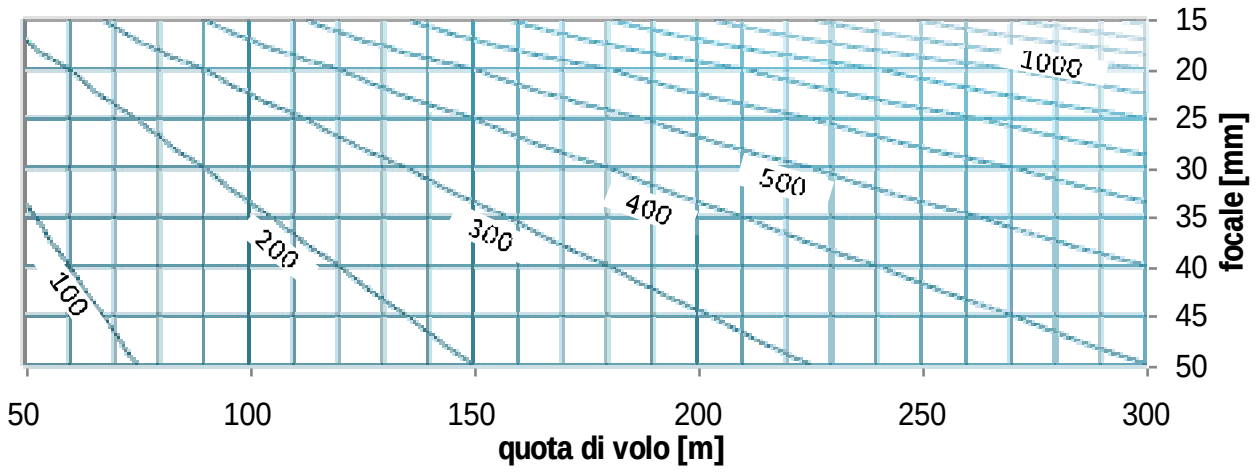


Fig. 6 – Scala di restituzione in funzione della quota di volo e della lunghezza focale, con rapporto B/h ≈ 1/3. Il grafico è costruito con i valori di Tab. 5.

Osserviamo dalla Tab. 5 che potremo lavorare alle scale comprese tra 1:200 e 1:2000, mentre non è possibile spingersi a scale inferiori a causa dell'effetto di trascinamento. La copertura massima, idonea per la scala 1:2000, la possiamo invece ottenere volando con il 14 mm a 300 m di quota; la proiezione al suolo dei fotogrammi sarà in questo caso di circa 510×770 m e potremo quindi lavorare su modelli di 500×500 m. Come si può notare, quasi mai ci troviamo di fronte ad una scelta univoca: ad esempio dovendo produrre una carta in scala 1:1000 di un centro abitato potremmo decidere di massimizzare la produttività volando a 250 m con il 14 mm; con una focale così corta però le occlusioni sono molto elevate, specialmente verso i bordi del modello, e potremmo allora optare per il 20 o il 24 mm volando a 300 m.

Nel nostro caso studio è richiesta la produzione della cartografia di un piccolo centro abitato alla scala 1:1000. Disponendo del solo 20 mm la scelta è obbligata e la quota di volo deve essere di 200 m. Sarebbe stato necessario volare un po' più basso per restare nella tolleranza della scala 1:1000, ma abbiamo scelto una quota maggiore per evitare di dover eseguire strisciate parallele ed avere la certezza di includere la larghezza dell'abitato in un'unica strisciata. Volando su un'area abitata inoltre è preferibile non sorvolare le abitazioni a quota troppo bassa e, trovandoci in una zona collinare, questa scelta è anche a favore della sicurezza del volo. Per quanto riguarda l'ottica, disponendo di tutto l'assortimento la scelta ottimale sarebbe ricaduta sul 24 mm, che a parità di quota di volo avrebbe consentito l'acquisizione di immagini più nitide con una risoluzione di ~15 cm, anziché di 20 cm come con il 20 mm.

3. Il volo

3.1. Il piano di volo

Il volo di trasferimento dall'aviosuperficie IVCMON (cascina Lucchina di Moncrivello) a Varengo si effettua prevalentemente su territorio pianeggiante, evita i centri abitati maggiori, prevede l'attraversamento del fiume Po e termina in un ultimo breve tratto di sorvolo sulle prime colline del Monferrato. La distanza da coprire è di 24.2 km alla quota relativa di volo di 500 ft (~150 m).

Fig. 7 – Rotta IVCMON-Varengo. È indicato il campo alternativo IVCVER.

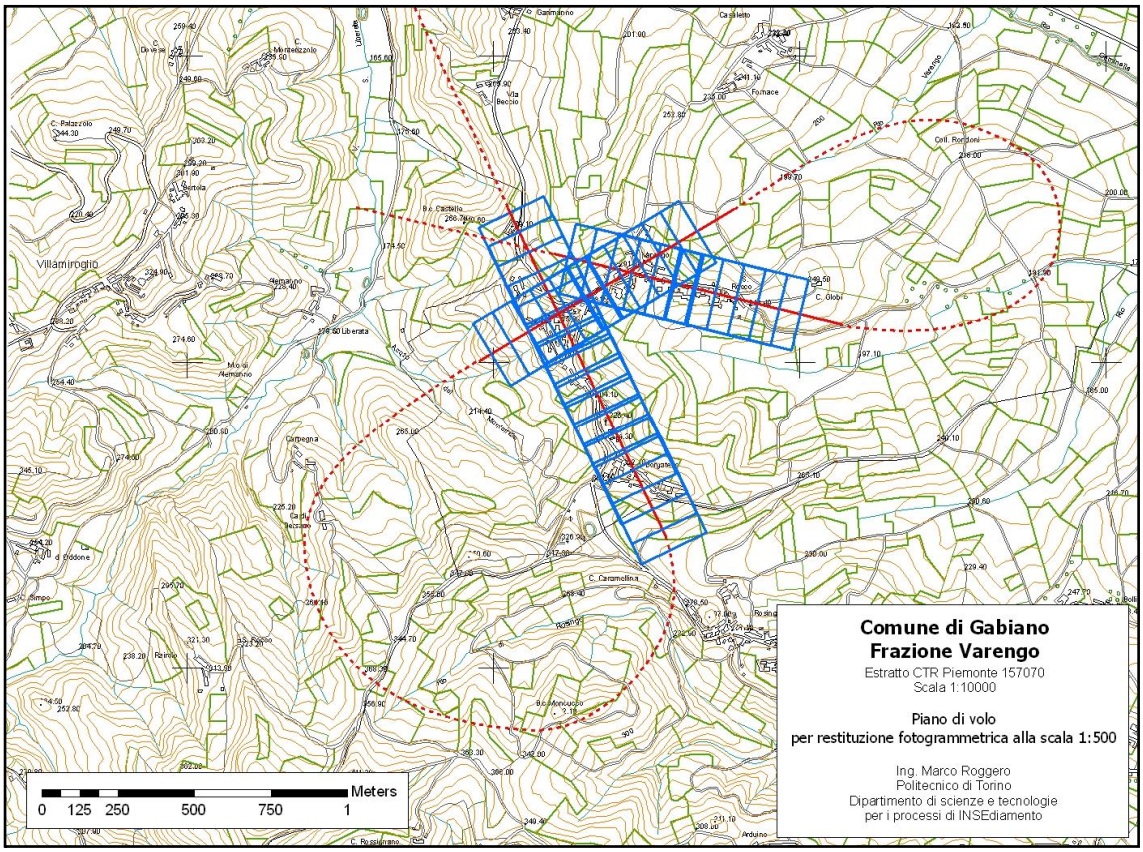


Fig. 8 – Piano di volo per la copertura fotogrammetrica alla scala 1:500 della frazione Varengo.

3.2. Appoggio e triangolazione

Al termine delle operazioni di acquisizione delle immagini fotogrammetriche sono stati seguiti i tradizionali passaggi che portano alla realizzazione della cartografia numerica.

In particolare l'obiettivo del lavoro oltre alla valutazione delle potenzialità dell'aereo ultraleggero utilizzato per l'acquisizione di immagini per scopi fotogrammetrici, è stato quello di realizzare una cartografia a grandissima scala dell'area circostante la Chiesa di Sant'Eusebio (Fig. 9).

Fig. 9 - Area oggetto della sperimentazione

L'appoggio eseguito con tecnica GPS in modalità rapido statica ha riguardato l'intera area della Frazione. Sono stati acquisiti 18 punti chiaramente identificabili sui fotogrammi (**Fig. 10**) e facilmente accessibili al fine di consentire una corretta acquisizione delle misure. Le coordinate dei punti di appoggio sono state calcolate utilizzando come punto di coordinate note la stazione GPS permanente del Comune di Crescentino che dista dall'area della sperimentazione circa 10 Km.

Fig. 10 - Localizzazione del punto sul fotogrammma e fase di acquisizione

Il tempo di stazionamento per ogni singola base è stato di circa 45 minuti con *sample rate* pari a 5 secondi; tale modalità di acquisizione ha consentito di ottenere al termine del processo di calcolo residui sui punti (Tab. 7) congruenti con le tolleranze tipiche di una cartografia a grandissima scala.
Il trattamento dei dati è stato eseguito con l'utilizzo di Leica Geo-Office (Leica Geosystem).
Le coordinate sono state calcolate nel sistema di riferimento UTM-WGS84 con quota ellissoidica e successivamente rototraslate nel sistema Gauss-Boaga e quota ortometrica grazie all'utilizzo del software Verto-GIS.
Successivamente si è proceduto con il processo fotogrammetrico (ASPRS, 2004) che può essere sintetizzato nelle seguenti fasi:

- Orientamento Interno
- Collimazione dei punti utili per il calcolo dell'orientamento esterno (Ground Control Point's), collimazione punti di controllo (Control Points) ed infine generazione automatica dei punti di legame (Tie Points).
- Triangolazione aerea (Bundle Block Adjustment)

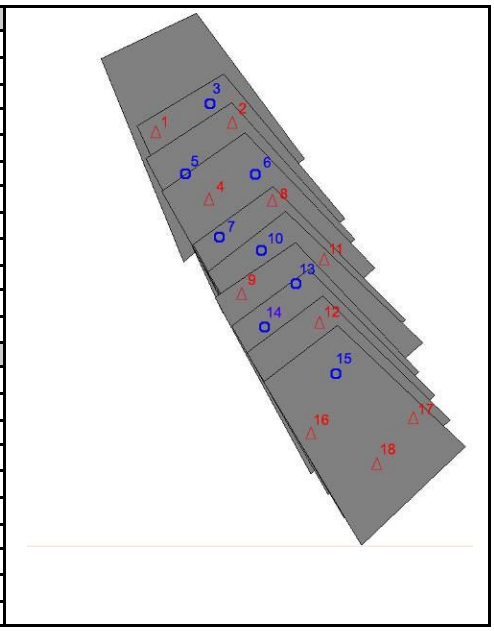
Per quel che riguarda la fase di orientamento interno sono stati utilizzati i parametri della Camera stimati attraverso il software Calibra 2.0.1 (Marenchino, 2004) . I valori impiegati (c distanza principale, x_0,y_0, posizione del punto principale, k_1,k_2,k_3, parametri di distorsione radiale) all'interno del software fotogrammetrico utilizzato (Leica Photogrammetric Suite) sono riportati in Tab. 6.

PARAMETRI ORIENTAMENTO INTERNO CANON EOS 1Ds	
c [mm]	20.424
x_0 [mm]	17.935
y_0 [mm]	-12.034
K_1 [1/mm2]	-1.8725E-04
K_2 [1/mm4]	1.9625E-07
K_3 [1/mm6]	3.4780E-10

Tab. 6 - Parametri di calibrazione della Canon Eos 1Ds con ottica Canon EF 20mm f/2.8 USM.

La fase successiva è quella che prende il nome di orientamento esterno o Triangolazione aerea e prevede il calcolo diretto delle relazioni tra coordinate immagine e coordinate oggetto (Kraus, 1997). Per l'esecuzione di questo processo è quindi necessario collimare manualmente sulle immagini una serie di punti necessari per calcolare la suddetta relazione e di conseguenza la posizione della camera al momento dell'acquisizione. Le stelle di proiezione subiscono singolarmente una rototraslazione spaziale, regolata dalle equazioni di collinearità costruita in modo tale che i raggi passino il più possibile per i punti di appoggio (GCP). Inoltre come consuetudine sono stati anche inseriti i punti di legame, i cosiddetti *Tie points*, che "aiutano" l'algoritmo di calcolo facendo si che i raggi generati da tali punti si intersechino al meglio in corrispondenza degli stessi.
Infine sono stati presi in considerazione anche una serie di *Check Points* che consentono di valutare il grado di affabilità della triangolazione aerea.

GCP's	***rX [m]***	***rY [m]***	***rZ [m]***
1	0.00	0.00	0.00
2	-0.02	0.02	-0.02
4	0.03	-0.01	0.00
8	0.01	0.00	0.01
9	-0.01	0.02	0.03
11	0.02	0.01	0.01
12	-0.03	0.02	0.03
16	0.01	0.01	-0.02
17	0.01	0.02	0.03
18	0.01	-0.01	0.02
Media	0.00	0.01	0.01
RMS	±0.02	±0.01	±0.02
CP's	***rX [m]***	***rY [m]***	***rZ [m]***
3	0.03	0.02	0.02
5	-0.02	-0.01	0.01
6	0.03	0.01	-0.02
7	0.02	0.01	0.01
10	0.03	0.02	-0.03
13	0.01	0.03	0.02
14	0.02	0.02	0.03
15	0.01	0.00	0.01
Media	0.02	0.01	0.01
RMS	±0.02	±0.01	±0.02



Tab. 7 - Residui sui GCP's (in rosso nella figura) e sui CP's (in blu nella figura)

I risultati al termine del *Bundle Block Adjustment*, nonostante le non ottimali caratteristiche dei fotogrammi impiegati (ricoprimento non costante, immagini non perfettamente nadirali ecc) confermano la buona riuscita delle operazioni di triangolazione aerea.

Per l'area relativa alla chiesa di Sant'Eusebio è stato orientato l'intero blocco direzione Nord-Sud composto da 10 fotogrammi, nella Tab. 7 sono riportati i residui, la media dei residui e lo scarto quadratico medio sui GCPs e sui CPs utilizzati e lo schema del blocco fotogrammetrico.

3.3. Restituzione

La fase successiva ha riguardato la produzione della cartografia a grande scala dell'area oggetto della ricerca. Ottenuti i parametri di orientamento esterno e di conseguenza la ricostruzione della geometria di presa è stato possibile procedere con la restituzione fotogrammetrica. Tale fase è stata realizzata grazie all'utilizzo del modulo PRO-600 integrato all'interno del software di fotogrammetria digitale utilizzato: Leica Photogrammetric Suite. Durante la restituzione si sono riscontrati alcuni problemi relativi alla non perfetta visione stereoscopica ottenuta, in particolare gli effetti di trascinamento presenti sulle immagini non consentivano una visione nitida dei particolari a terra ed inoltre, a causa della forte convergenza in alcune immagini acquisite sull'area si sono riscontrate notevoli difficoltà sulla corretta collimazione e sulla conseguente restituzione delle geometrie degli oggetti ripresi. Nonostante tali problemi è stato comunque possibile ottenere un corretto brogliaccio che è servito per le successive integrazioni realizzate con tradizionali strumenti topografici sul terreno.

Nella successive figure sono riportate il brogliaccio realizzato in questa fase del lavoro e alcune fasi del processo di restituzione.

Fig. 11 - Brogliaccio di restituzione realizzato sull'area oggetto della sperimentazione

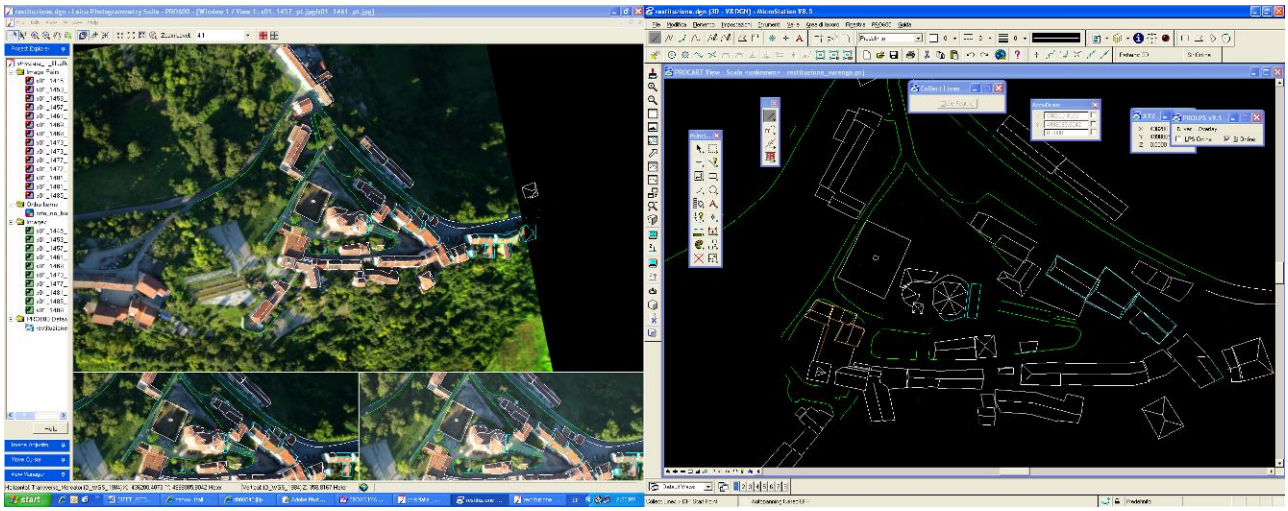


Fig. 12 - Fasi di restituzione nel modulo PRO-600 del software Leica Photogrammetic Suite

3.4. Estrazione delle curve di livello

Per ottenere una corretta rappresentazione plano-altimetrica della zona oggetto della ricerca è stato necessario riportare sulla cartografia anche la componente altimetrica, rappresentata sotto forma di punti quotati e curve di livello.

Alla luce delle difficoltà intercorse durante la fase restituzione fotogrammetrica non è stato possibile restituire direttamente le curve di livello dell'area presa in considerazione. Per ottenere tali informazioni altimetriche si è optato per la generazione automatica delle stesse partendo da un piano quotato ricavato in fase di restituzione. Grazie ai punti quotati è stato possibile utilizzando il software Surfer della Golden Software ricavare una rappresentazione tipica per la cartografia numerica abitualmente prodotta. L'algoritmo utilizzato per l'estrazione delle curve di livello è il Kriging; questa tecnica di interpolazione sviluppata in campo minerario da D. G. Krige si basa sull'assunzione che il parametro da interpolare è trattabile come una variabile regionalizzata. Punti vicini fra loro saranno maggiormente correlati, mentre punti distanti saranno statisticamente indipendenti (Isaaks e Srivastava,1989; Oliver e Webster,1990).

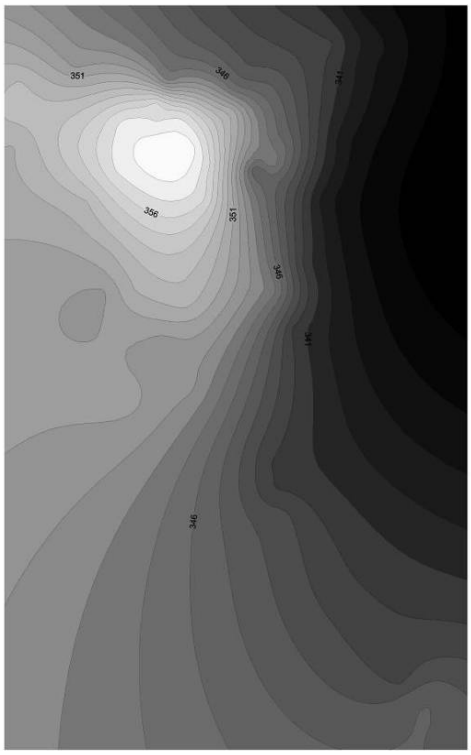


Fig. 13 - Curve di Livello generate

I risultati al termine dell'interpolazione hanno portato i risultati riportati nella Fig. 13.

Tali dati sono dunque serviti per integrare la rappresentazione vettoriale realizzata nella precedente fase del processo fotogrammetrico. Nella successiva Fig. 14 si riporta il risultato finale ottenuto dopo l'integrazione sul terreno e il relativo editing cartografico.

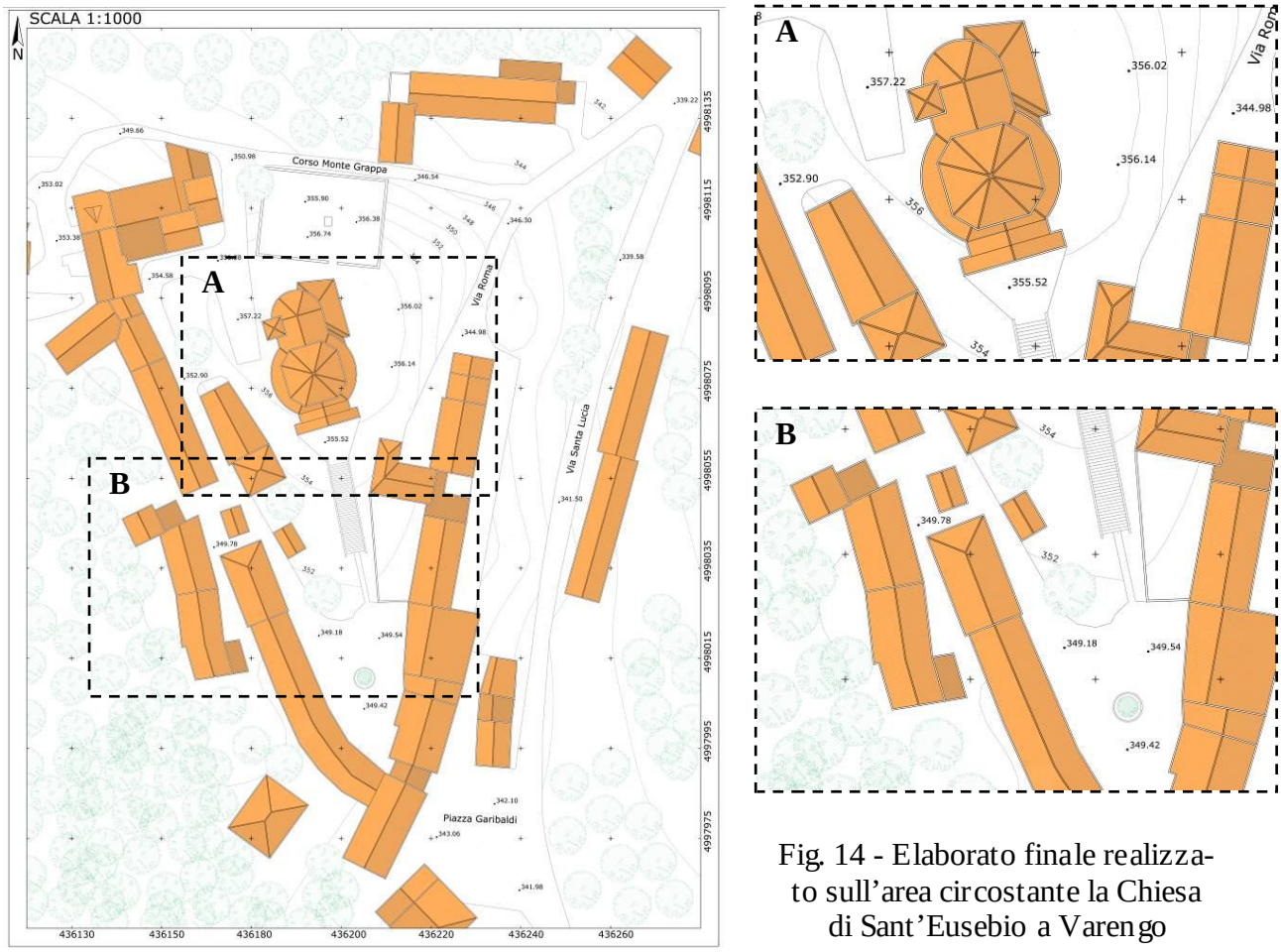


Fig. 14 - Elaborato finale realizzato sull'area circostante la Chiesa di Sant'Eusebio a Varengo

4. Conclusioni

Alla luce dell'esperienza realizzata sull'area è possibile affermare che la metodologia seguita consente in tempi brevi di ottenere prodotti cartografici a grandissima scala che rispettano le precisioni tipiche di una cartografia costruita con metodologie convenzionali. E' necessario sottolineare però che sono stati riscontrati alcuni problemi che hanno riguardato soprattutto la fase di ripresa delle immagini; tale fase è fondamentale per la buona riuscita di un qualsiasi processo fotogrammetrico.

I problemi sono stati dettati dalla mancanza di un apposito alloggiamento della camera nella parte inferiore dell'ultraleggero, l'acquisizione "manuale" ha portato ad un eccessivo effetto di trascinamento su alcuni fotogrammi ed in particolare alla convergenza che si è riscontrata nella maggior parte delle immagini. Grazie ad un numero esuberante di acquisizioni è stato comunque possibile avere una copertura stereoscopica sufficiente per poter eseguire correttamente la fase di triangolazione aerea e la successiva restituzione. La triangolazione aerea ha dato residui di pochi centimetri sia sui punti di appoggio che sui punti di controllo, dimostrando la validità del sistema per la produzione di cartografia a grande scala. I prodotti di restituzione sono stati ampiamente integrati con misure sul terreno per poter ottenere un prodotto cartografico utile per una corretta rappresentazione dell'area e confermano le potenzialità dei sistemi non convenzionali per la realizzazione di prodotti cartografici (Colomina et al, 2009; Chiabrando et al 2009).

E' in fase di progetto un sistema da ancorare nella parte inferiore dell'ultraleggero che consenta di eliminare le complicazioni riscontrate nella fase di presa.

Ringraziamenti

Si ringraziano:

- per l'assistenza prestata nella calibrazione delle ottiche l'Ing. Davide Marenchino, autore del programma di calibrazione, e il Dott. Paolo Maschio, tecnico del laboratorio di fotogrammetria del DITAG.
- per l'esecuzione delle misure di appoggio e l'assistenza logistica l'Arch. Fabrizio Goggi, tecnico del laboratorio di Rilievo del DINSE e l'Arch. Valentina Tarro Genta.
- Il CESMO - Centro Servizi di Mondovì, proprietario della Canon EOS 1Ds Mark II.
- il pilota del QuickSilver Piero Derro che con dedizione e perizia ha partecipato alla stesura del piano di volo ed infine condotto a termine in piena sicurezza le prove in volo e il volo test, e il Sig. Salvatore Brondo per l'intervento artigianale necessario all'adattamento del velivolo al lavoro di fotogrammetria aerea.
- il Direttore del DINSE Arch. Gabriella Peretti per il sostegno economico e i continui incoraggiamenti.

Bibliografia

ASPRS, (2004). Manual of Photogrammetry. Fifth edition. Editore McGlone J.C.

Chiabrando F.; F. Rinaudo; F. C. Nex; D. Marenchino; D. Piatti,(2009). UAV systems for photogrammetric recording in archaeological areas: problems, suggestions, and products. Proceedings - SPIE, pp. 747807-747807-12, 2009, Vol. 7478.

Centro Studi Progresso Fotografico, (CSPF, a). Canon EF 14mm f/2.8 L USM.

Centro Studi Progresso Fotografico, (CSPF, b). Canon EF 20mm f/2.8 USM.

Centro Studi Progresso Fotografico, (CSPF, c). Canon EF 24mm f/2.8 USM.

Centro Studi Progresso Fotografico, (CSPF, d). Canon EF 50mm f/1.4 USM.

Colomina I., Blàzquez M., Molina P., Parès M.E., Wis M., (2008) Towards a new paragdigm for high-resolution low-cost photogrammetry and remote sensing. XXI ISPRS congress proceedings, Beijing, China.

Kraus K., (1996). Photogrammetry – Vol I. Theory and applications. Edizioni Dummler, Bonn

Kraus K., (1997). Photogrammetry – Vol II. Advanced methods and applications. Edizioni Dummler, Bonn

Isaaks E.H., Srivastava R.M., (1989) An Introduction to Applied Geostatistics, Oxford University Press

Marenchino D., (2004). Calibrazione fotogrammetrica di camere digitali amatoriali. Tesi di Laurea, Politecnico di Torino, Italy.

Oliver M. A., Webster R., (1990) Kriging: a method of interpolation for geographical information system, INT. J. Geographical Information Systems, VOL. 4, No. 3, 313-332

Warner W.S., Graham R.W., Read R.E., (1996) Small format aerial photography, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, ISBN 1-57083-034-7.