

Regole tecniche per la formazione la documentazione e lo scambio di ortofoto digitali alla scala nominale 1:10000.

Allegato 1

Ortofoto digitali per applicazioni di tipo cartografico alla scala nominale 1:10000 - Specifiche tecniche

SOMMARIO

1 SCOPO	4
2 ACRONIMI.....	5
3 TIPOLOGIA DI PRODOTTO.....	6
Ortofoto digitali per applicazioni di tipo cartografico alla scala nominale 1:10.000.	6
3.1 CARATTERISTICHE DEL PRODOTTO.....	6
3.1.1 RISOLUZIONE GEOMETRICA E DIMENSIONE DEL PIXEL A TERRA (GSD)	6
3.1.2 RISOLUZIONE RADIOMETRICA.....	6
3.1.3 TOLLERANZA PLANIMETRICA.....	6
3.1.4 SISTEMA DI RIFERIMENTO NATIVO	7
3.1.5 DIMENSIONE E TAGLIO	7
3.1.6 FORMATO DEI DATI DIGITALI.....	8
3.1.7 METADATI.....	8
3.2 ACQUISIZIONE DELLE IMMAGINI	9
3.2.1 PIATTAFORMA DI ACQUISIZIONE DELLE IMMAGINI.....	9
PIATTAFORMA AEREA	9
PIATTAFORMA SATELLITARE	9
3.2.2 SISTEMI DI RIPRESA DA AEREO	9
SISTEMA DI RIPRESA ANALOGICO.....	9
SISTEMA DI RIPRESA DIGITALE FRAME BASED	10
SISTEMA DI RIPRESA DIGITALE PUSHBROOM	10
3.2.3 RISOLUZIONE DI ACQUISIZIONE.....	10
ACQUISIZIONE AEREA DI TIPO ANALOGICO	10
ACQUISIZIONE AEREA DI TIPO DIGITALE.....	10
ACQUISIZIONE DA PIATTAFORMA SATELLITARE.....	11
3.2.4 STRUMENTAZIONE DI BORDO	11
STRUMENTAZIONE GNSS.....	11
SISTEMI INERZIALI	11
3.2.5 STRUMENTAZIONE A TERRA.....	12
3.2.6 CARATTERISTICHE DEI VOLI.....	12
ACQUISIZIONE DA PIATTAFORMA AEREA.....	12
ACQUISIZIONE DA PIATTAFORMA SATELLITARE.....	14
3.2.7 DOCUMENTAZIONE DA PRODURRE.....	14
ACQUISIZIONE DA PIATTAFORMA AEREA.....	14
ACQUISIZIONE DA PIATTAFORMA SATELLITARE.....	15
3.3 PRE-PROCESSAMENTO.....	16
3.3.1 SCANSIONE DEI FOTOGRAMMI.....	16
3.3.2 GENERAZIONE DELLE IMMAGINI DIGITALI DA PROCESSARE.....	16
DATA FUSION	17
PROCESSAMENTO RADIOMETRICO	17
3.3.3 PROCESSAMENTO DATI GNSS/IMU.....	17
3.3.4 DATI AUSILIARI	18
PUNTI DI APPOGGIO	18
DATI STAZIONI GNSS	19

DTM	19
3.3.5 MATERIALE DA PRODURRE	20
DATI IMMAGINE	20
DATI DI NAVIGAZIONE	21
DATI AUSILIARI.....	21
3.4 PROCESSAMENTO.....	22
3.4.1 ORIENTAMENTO DELLE IMMAGINI.....	22
ORIENTAMENTO DELLE IMMAGINI DA AEREO MEDIANTE TA.....	22
ORIENTAMENTO DELLE IMMAGINI SATELLITARI.....	22
3.4.2 GENERAZIONE DELL'ORTOFOTO E MOSAICATURA	24
PROCESSAMENTO RADIOMETRICO	24
ORTOPROIEZIONE	24
MOSAICATURA	24
GENERAZIONE DELL'ORTOFOTO FINALE.....	25
VERIFICHE DI QUALITÀ.....	25
3.4.3 DOCUMENTAZIONE DA PRODURRE.....	26
3.5 COLLAUDO	26
3.5.1 COMPLETEZZA DATI	27
3.5.2 CONTROLLO VOLO E IMMAGINI DI PARTENZA.....	27
3.5.3 CONTROLLO DEI DATI GNSS/IMU (eventuali).....	28
3.5.4 CONTROLLO DEL PROCESSAMENTO GEOMETRICO	28
3.5.5 CONTROLLO DEI PUNTI DI APPOGGIO IMPIEGATI.....	28
3.5.6 COLLAUDO GEOMETRICO DEL PRODOTTO	29
3.5.7 COLLAUDO RADIOMETRICO DEL PRODOTTO	29
3.5.8 RELAZIONI DI COLLAUDO IN CORSO D'OPERA E COLLAUDO FINALE.....	29

1 SCOPO

L'ortofoto digitale viene qui intesa nell'accezione più propria del termine, escludendo in questo contesto prodotti provenienti da procedure di raddrizzamento non basate su metodi rigorosi di ortoproiezione (fotopiani, fotomosaici, ...).

Scopo del presente documento è delineare gli elementi necessari a definire lo standard di riferimento che caratterizza la tipologia "ortofoto digitale alla scala nominale 1:10.000".

Sulla base delle principali caratteristiche di impiego delle ortofoto digitali in scala 1:10.000, sono identificabili 2 macroraggruppamenti a cui ricondurre la definizione dei parametri di standardizzazione del prodotto:

TIPOLOGIA A - ortofoto alla scala nominale 1:10.000 per applicazioni prevalentemente cartografiche;

TIPOLOGIA B - ortofoto alla scala nominale 1:10.000 per applicazioni prevalentemente tematiche.

Nel presente documento sono descritte le specifiche tecniche relative alla Tipologia A.

Ortofoto digitali 1:10.000 per applicazioni cartografiche

Non sono oggetto del presente documento le specifiche tecniche per la produzione di modelli altimetrici, per le quali si rimanda alle "Linee guida - Ortoimmagini 1:10.000 e modelli altimetrici" prodotta dal CISIS (Centro Interregionale per i SISTemi informatici, geografici e statistici) e adottate dal Comitato per le regole tecniche sui dati territoriali delle pubbliche amministrazioni.

2 ACRONIMI

B/N	Bianco/Nero
CE95%	<i>Circular Error 95%</i>
CIR	<i>Color InfraRed</i>
CISIS	Centro Interregionale per i SISTemi informatici, geografici e statistici
CNIPA	Centro Nazionale per l'Informatica nella Pubblica Amministrazione
COFA	Comando Operativo Forze Armate
CP	<i>Check Point</i>
CT	Carta Tecnica
CTR	Carta Tecnica Regionale
DEG	Unità di misura angolare nel sistema sessadecimale
DEM	<i>Digital Elevation Model</i>
DL	Direzione dei Lavori
DGNSS	<i>Differential Global Navigation Satellite System</i>
DGPS	<i>Differential Global Positioning System</i>
DPI	<i>Dot Per Inch</i>
DSM	<i>Digital Surface Model</i>
DTM	<i>Digital Terrain Model</i>
DXF	<i>Drawing eXchange Format</i>
ECW	<i>Enhanced Compressed Wavelet</i>
ENAV	Ente Nazionale di Assistenza al Volo
ETRS89	<i>European Terrestrial Reference System 1989</i>
ETRF2000	<i>European Terrestrial Reference Frame 2000</i>
FMC	<i>Forward image Motion Compensation</i>
GCP	<i>Ground Control Point</i>
GEOTIFF	<i>GEOgraphic Tagged Image File Format</i>
GLONASS	<i>GLobal NAVigation Satellite System</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GSD	<i>Ground Sample Distance</i>
IGM	Istituto Geografico Militare
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i>
ISO	<i>International Standard Organization</i>
ITRF	<i>International Terrestrial Reference Frame</i>
JPEG	<i>Joint Photographic Experts Group</i>
LE95%	<i>Linear Error 95%</i>
LiDAR	<i>Light Detection And Ranging</i>
PDOP	<i>Position Dilution of Precision</i>
RDN	Rete Dinamica Nazionale
RFM	<i>Rational Function Model</i>
RPC	<i>Rational Polynomial Coefficients</i>
RGB	<i>Red Green Blue colours</i>
SHP	<i>Shapefile</i>
s.q.m.	scarto quadratico medio (simbolo σ)
TA	Triangolazione Aerea
TIFF	<i>Tagged Image File Format</i>
WGS84	<i>World Geodetic System 1984</i>

3 TIPOLOGIA DI PRODOTTO

Ortofoto digitali per applicazioni di tipo cartografico alla scala nominale 1:10.000.

3.1 CARATTERISTICHE DEL PRODOTTO

3.1.1 RISOLUZIONE GEOMETRICA E DIMENSIONE DEL PIXEL A TERRA (GSD)

Per risoluzione geometrica si intende la densità lineare dell'informazione elementare (pixel) sull'ortofoto, espressa in "*dot per inch*" (DPI).

La porzione di territorio rappresentata da un singolo pixel, supposto quadrato, è caratterizzata dalla dimensione del lato di tale quadrato (GSD = "*Ground Sample Distance*" o "*pixel size*").

La risoluzione geometrica dell'ortofoto è condizionata da una serie di fattori tra i quali le modalità di acquisizione dei dati, l'accuratezza geometrica e il contenuto informativo richiesti. La sensibilità (potere separatore) dell'occhio umano richiede che i pixel dell'ortofoto abbiano dimensione inferiore a 0,1 mm (corrispondenti a circa 250 DPI) affinché l'immagine appaia continua ("di qualità fotografica"). Ne consegue che, per la scala 1:10.000, il GSD dev'essere pari o inferiore a 1 m. Qualora dell'ortofoto alla scala nominale 1:10.000 si ritenga di dover utilizzare anche ingrandimenti alla scala 1:5.000 mantenendo la stessa qualità fotografica, può essere richiesto un GSD di 0,50 m, con modesto aggravio di costi.

3.1.2 RISOLUZIONE RADIOMETRICA

La "risoluzione radiometrica" è il parametro di qualità dell'immagine *raster* che indica il numero di intervalli in cui può essere rappresentata l'intensità radiometrica di ogni pixel. La risoluzione radiometrica è stabilita in funzione delle esigenze geometriche o tematiche dell'utilizzatore e della tipologia del dato spettrale (pancromatico, colore o multispettrale). I valori standard adottati sono:

- 8 bit per pixel per le ortofoto B/N (256 livelli di grigio) e
- 8 bit per pixel per ciascuna delle bande RGB per le immagini a colori.

Nel caso di immagini pancromatiche i valori radiometrici, ossia i 256 livelli di grigio, sono rappresentati da una gamma di valori che va da 0 a 255, dove il valore 0 rappresenta il nero e il valore 255 il bianco; i valori intermedi sono tonalità di variazione di grigi dal nero al bianco. Nel caso delle immagini a colori, i valori 0 e 255 rappresentano, per ciascuna banda, l'assenza o la saturazione del colore.

Il recente affermarsi della tecnologia digitale ha reso praticamente esclusiva la richiesta di immagini a colori.

3.1.3 TOLLERANZA PLANIMETRICA

La tolleranza planimetrica è definita come l'errore massimo di posizione ammesso per un particolare puntuale individuato sull'ortofoto, espresso in metri terreno. Il valore della

tolleranza planimetrica non deve essere superato da più del 5% dei punti dell'ortofoto

La tolleranza è funzione di diversi fattori quali la modalità di acquisizione delle immagini originali, le caratteristiche di scansione, la qualità della georeferenziazione, l'accuratezza del DEM, ecc. per i quali devono pertanto essere rispettati valori di riferimento atti a garantire la tolleranza finale qui definita.

L'errore di posizione planimetrica di un punto P chiaramente individuato sull'ortofoto si determina come differenza fra la posizione del punto, definita dalle sue coordinate N'_P e E'_P lette sull'ortofoto, e le coordinate N_P ed E_P relative allo stesso punto P, misurate sul terreno con tecniche che garantiscano un'accuratezza di almeno un ordine di grandezza superiore a quella del prodotto che si intende realizzare.

Per il rispetto della tolleranza dovrà risultare (almeno nel 95% dei casi):

$$([N'_P - N_P]^2 + [E'_P - E_P]^2)^{1/2} \leq 3 \text{ m per punti al suolo,}$$

$$([N'_P - N_P]^2 + [E'_P - E_P]^2)^{1/2} \leq 6 \text{ m per punti elevati (tetti, viadotti, ...).}$$

3.1.4 SISTEMA DI RIFERIMENTO NATIVO

Nella generazione dell'ortofoto si considera "sistema di riferimento nativo" quello utilizzato nei singoli processi di produzione, quali l'acquisizione dei dati, il rilievo sul terreno, la Triangolazione Aerea. L'ortofoto, generata quindi nel sistema di riferimento geodetico-cartografico nativo, potrà essere successivamente sottoposta a passaggi in altri sistemi di riferimento, utilizzando i *software* ed i grigliati di trasformazione ufficiali più recenti prodotti dall'IGM (ad es. il VERTO_3).

Il sistema di riferimento geodetico da utilizzarsi (*datum*) è l'ETRS89 nella sua realizzazione ETRF2000 (epoca 2008.0) materializzato dalla Rete Dinamica Nazionale (RDN).

Per i dettagli sul sistema di riferimento a livello nazionale, che comunque deve coincidere con quello definito dalla rete dei punti noti presenti nell'area, si rinvia alle specifiche tecniche o linee guida adottate dal Comitato per le regole tecniche sui dati territoriali delle pubbliche amministrazioni.

La rappresentazione cartografica richiesta è la rappresentazione conforme UTM (coordinate cartografiche Est, Nord UTM WGS84 ETRF2000).

3.1.5 DIMENSIONE E TAGLIO

Le ortoimmagini, pur essendo generate e visualizzabili in continuo su tutto il territorio rilevato, devono essere suddivise in *file* separati.

A meno di esigenze particolari espresse dal Committente, di norma il modulo minimo di produzione della ortofoto dovrà essere costituito da una "Sezione" a scala 1:10.000, sedicesima parte di un foglio della serie IGM a scala 1:50.000.

Il taglio, realizzato in forma analitica rigorosa a partire dalle coordinate dei vertici (fornite di norma dal Committente), non deve prevedere zone di sovrapposizione con le sezioni limitrofe: ogni pixel dell'immagine ortofoto deve essere assegnato univocamente a una sola sezione.

3.1.6 FORMATO DEI DATI DIGITALI

Nel caso di cartografia *raster* sono utilizzati una serie di formati standard.

Il formato più diffuso e consigliato è il formato standard GeoTiff (normato dal documento "*GeoTIFF Format specifications*").

In alternativa, su indicazione del Committente, possono essere utilizzati altri formati idonei alla georeferenziazione (ad es. Tiff + tfw, JPeG+jgw, ECW, JPeG2000 e altri).

Per applicazioni in cui è richiesto o è consentito l'impiego di dati compressi, il fattore di compressione massimo deve essere concordato con il Committente e non deve superare, comunque, il valore 8.

3.1.7 METADATI

Per la strutturazione delle informazioni inerenti i metadati si rinvia al "Regolamento recante regole tecniche per la definizione del contenuto del Repertorio Nazionale dei Dati Territoriali, nonché delle modalità di prima costituzione e di aggiornamento dello stesso", approvato dal Comitato e in corso di emanazione e alle successive linee guida che saranno adottate dal Comitato medesimo.

3.2 ACQUISIZIONE DELLE IMMAGINI

3.2.1 PIATTAFORMA DI ACQUISIZIONE DELLE IMMAGINI

Le immagini necessarie alla produzione di ortofoto digitali possono provenire:

- da piattaforma aerea;
- da piattaforma satellitare.

PIATTAFORMA AEREA

Gli aeromobili devono essere in grado di operare a quote operative idonee a garantire l'esecuzione di riprese aeree compatibili con la scala e la risoluzione del prodotto da ottenere, in funzione del dispositivo di acquisizione adottato

Essi 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 dai par. 3 e 4 del D.P.R. 29 settembre 2000, n. 367.

Allo scopo di poter eseguire correttamente il piano di volo progettato, il velivolo deve essere obbligatoriamente dotato di sistema di navigazione GPS/GNSS.

PIATTAFORMA SATELLITARE

I sensori satellitari che possono essere impiegati per la generazione di ortofoto sono quelli dotati di una risoluzione geometrica nominale uguale o inferiore a 1 metro. Inoltre, devono essere disponibili, unitamente al *file* immagine, le informazioni ausiliarie (*file* di metadati) che consentano il processamento geometrico del dato mediante modelli rigorosi o mediante modelli RPF che utilizzano gli RPC contenuti nel *file* di metadati.

3.2.2 SISTEMI DI RIPRESA DA AEREO

Le riprese possono essere effettuate con camera fotogrammetrica a pellicola o, preferibilmente, con camera digitale. E' ammesso l'uso di due o più camere per l'esecuzione del volo, purché della medesima tipologia.

Le camere devono essere dotate di certificati di taratura di data non anteriore a due anni dalla data della ripresa.

SISTEMA DI RIPRESA ANALOGICO

Le riprese aeree eseguite con camera fotogrammetrica tradizionale a pellicola devono soddisfare tutti i requisiti richiesti dalla tecnica più aggiornata per l'esecuzione dei rilevamenti aerofotogrammetrici a colori (o in bianco e nero). Tali requisiti dovranno essere esplicitati dalla Ditta in fase di offerta.

SISTEMA DI RIPRESA DIGITALE FRAME BASED

I sistemi di presa digitale *frame based* possono essere di vario tipo, con immagine finale generata attraverso l'assemblaggio e l'eventuale fusione di più immagini, acquisite da obiettivi separati e su più bande spettrali.

Nel caso di immagini acquisite da più obiettivi, e combinate successivamente via *software*, sull'immagine risultante non dovranno essere identificabili le linee di separazione tra le varie parti che compongono l'immagine, sia dal punto di vista geometrico (con spostamenti relativi tra una parte e le limitrofe) che radiometrico (con differenze di radiometria tra una parte e l'altra).

Nel caso in cui si produca un'immagine multispettrale tramite procedure di *pansharpening*, l'algoritmo impiegato deve garantire la fedeltà cromatica dei colori, ad esempio senza viraggi verso il blu delle aree vegetate.

SISTEMA DI RIPRESA DIGITALE PUSHBROOM

La composizione di bande RGB, o CIR deve essere acquisita pressoché con lo stesso angolo per tutte le bande. Per tutta la durata dell'acquisizione deve essere garantita la disponibilità di stazioni GNSS¹ a terra nonché dei sistemi GNSS/IMU a bordo dell'aereo.

3.2.3 RISOLUZIONE DI ACQUISIZIONE

ACQUISIZIONE AEREA DI TIPO ANALOGICO

Gli aeromobili devono essere in grado di operare a quote operative superiori a 6-7000 m, idonee a consentire l'esecuzione di riprese aree alla scala media 1:40.000 e oltre.

La quota di volo relativa deve essere tale da assicurare che la scala media dei fotogrammi sia non inferiore a 1:40.000. Lo scostamento dal valore medio dovuto alla morfologia del terreno, alla compatibilità con le esigenze di continuità delle strisciate ed alle eventuali restrizioni imposte dalle Autorità preposte alla regolamentazione del traffico aereo, sarà tale da garantire che in nessun punto della strisciata la scala sia inferiore a 1:44.000.

ACQUISIZIONE AEREA DI TIPO DIGITALE

Qualora si preveda di produrre ortofoto con $GSD_o = 1$ m, l'immagine originale, acquisita con sistemi *pushbroom* o *frame-based*, dovrà essere caratterizzata da un valore di GSD_i , per ogni pixel dell'immagine, inferiore a 0,80 m.

Nel caso si richieda $GSD_o = 50$ cm per l'ortofoto, dovrà essere $GSD_i = 0,40$ m.

¹ Il GNSS (*Global Navigation Satellite System*) è il sistema globale di navigazione satellitare composto dal sistema statunitense GPS (*Global Positioning System*), dal russo GLONASS (*GLObal NAVigation Satellite System*) e in futuro dal sistema europeo Galileo. Pertanto l'acronimo GNSS, utilizzato anche nel seguito del presente documento, include tutti i sistemi di navigazione disponibili, ma spesso può considerarsi sinonimo di GPS (il sistema oggi largamente più diffuso).

ACQUISIZIONE DA PIATTAFORMA SATELLITARE

Nel caso di acquisizione da piattaforma satellitare, l'immagine nativa acquisita dovrà essere caratterizzata da un GSD inferiore a 1 m per ogni pixel dell'immagine.

È consentito esclusivamente l'impiego di immagini di tipo non processato geometricamente dal *satellite operator/provider*. Inoltre va verificato, tramite i metadati forniti a corredo dell'immagine, e in particolare quelli relativi agli angoli di acquisizione, che entrambe le dimensioni del pixel non eccedano quelle prescritte per i pixel dell'ortofoto finale.

3.2.4 STRUMENTAZIONE DI BORDO

STRUMENTAZIONE GNSS

Nel caso di impiego di camere digitali *pushbroom*, oppure nel caso in cui si preveda la determinazione diretta dei centri di presa, durante la ripresa è prescritto l'uso di un ricevitore GNSS, a doppia frequenza, dotato di *input* fotogrammetrico capace di memorizzare, tramite opportuna interfaccia, un impulso emesso dalla camera all'istante di scatto; quest'ultimo va determinato con incertezza non superiore al millesimo di secondo. Tale ricevitore GNSS non è obbligatorio, ma consigliato, negli altri casi.

L'acquisizione dei dati GNSS deve essere eseguita con una frequenza di misura superiore o uguale a 1 Hertz, con ricezione continua di almeno 5 satelliti e PDOP ≤ 5 .

Il rilievo dovrà essere corredato da una relazione che illustri le modalità di misura impiegate per la determinazione, con camera in assetto normale (ω , ϕ e κ nulli), del vettore congiungente il centro di presa e il centro di fase dell'antenna GNSS, le componenti del vettore nel sistema immagine e i relativi s.q.m.

Le componenti planimetriche relative alla posizione del centro di fase dell'antenna rispetto al centro di presa della camera fotogrammetrica devono essere $\leq 0,50$ m.

Per la validità del volo di ripresa di ciascun blocco occorre che, per almeno il 90% dei fotogrammi, sia possibile ricostruire la posizione del centro di fase dell'antenna all'istante di scatto dal trattamento GNSS delle misure di fase. In nessun caso è ammissibile che per una strisciata di bordo di un blocco risultino indeterminati più di cinque fotogrammi consecutivi e più del 30% delle posizioni.

Qualora le condizioni di cui sopra non siano rispettate, il volo dovrà essere ripetuto per le strisciate con le lacune più numerose, fino a rientrare nei limiti di cui sopra, ovvero si dovranno effettuare le operazioni di appoggio a terra necessarie per l'integrazione dei dati mancanti (determinazione dei centri di presa per *space resection* o T.A.).

SISTEMI INERZIALI

Nell'eventualità di uso di sistemi inerziali (IMU) per la determinazione dei parametri angolari di orientamento esterno di ciascun fotogramma, essi devono essere caratterizzati da s.q.m. non superiore a ± 6 mgon per ω e ϕ non superiore a ± 9 mgon per κ .

Dal trattamento dei dati rilevati dai sensori inerziali deve essere possibile la

determinazione dei parametri angolari di orientamento esterno nel rispetto delle stesse percentuali definite per le coordinate dei centri di presa; in caso contrario si procederà analogamente a quanto ivi disposto.

Il complesso delle attrezzature fotogrammetriche (camera da presa + sistema GNSS/IMU) deve essere sottoposto a calibrazione prima e dopo l'esecuzione dei voli.

I dati di posizione e assetto determinati dall'uso di sistemi GNSS/IMU devono essere corredati da una relazione che illustri le modalità di misura impiegate per la determinazione, con camera in assetto normale (ω , ϕ e κ nulli), dei vettori congiungenti il centro di presa, il centro di fase dell'antenna GNSS e l'origine del sistema inerziale, le componenti dei vettori nel sistema immagine e i relativi s.q.m.

I parametri di orientamento esterno saranno sottoposti a verifica di consistenza interna mediante il confronto tra le coordinate di punti nelle zone di sovrapposizione tra modelli consecutivi e tra modelli appartenenti a strisciate contigue, determinati in ciascun modello formato indipendentemente con i parametri dei fotogrammi che lo compongono.

3.2.5 STRUMENTAZIONE A TERRA

Nell'eventualità di uso di sistemi inerziali (GNSS/IMU) per la determinazione dei parametri di orientamento esterno di ciascun fotogramma, durante le riprese devono essere attivati sul terreno ricevitori con le medesime caratteristiche di quello a bordo. Le distanze tra il vettore aereo e il ricevitore fisso più vicino non devono superare i 50 Km. I ricevitori devono essere in stazione su vertici IGM95 (per i quali siano disponibili le coordinate nel sistema di riferimento ETRF2000 – epoca 2008.0 – materializzato dalla RDN), o su vertici determinati mediante la misura di almeno due linee di base che li colleghino ai vertici della rete IGM95 o stazioni permanenti inquadrature nella RDN; ciascuno deve tracciare almeno 5 satelliti tra quelli ricevuti sull'aereo. Queste prescrizioni sono obbligatorie nel caso in cui si lavori con orientamento diretto. Nel caso in cui i dati da sistemi inerziali siano utilizzati come semplice ausilio per la fase di triangolazione aerea, l'organizzazione della strumentazione a terra non è soggetta a prescrizioni particolari.

3.2.6 CARATTERISTICHE DEI VOLI

ACQUISIZIONE DA PIATTAFORMA AEREA

Prima di procedere all'esecuzione delle riprese aeree fotogrammetriche, la Ditta dovrà predisporre il piano di volo su base cartografica a scala 1:50.000 sul quale, per ogni strisciata, dovranno essere indicati:

- l'effettiva copertura dei singoli fotogrammi, con la loro codifica ipotizzata;
- l'asse della strisciata, con i limiti (inizio e fine) della copertura stereoscopica.

In una tabella allegata dovranno inoltre essere indicate, per ogni strisciata:

- la quota assoluta di volo prevista;
- la quota minima e la quota massima del terreno sorvolato;

- le corrispondenti scale minima e massima;
- il GSD minimo e massimo corrispondenti.

Per la progettazione del piano di volo si consiglia l'impiego di un DTM di livello 0 o 1 relativo all'area da rilevare e di idonei strumenti *software* di progetto.

Le caratteristiche del volo sono funzione degli strumenti di acquisizione impiegati, per ciascuno dei quali devono essere definite apposite prescrizioni di dettaglio atte a garantire la correttezza del processo.

Le strisciate devono essere realizzate con assi rettilinei, paralleli e a quota costante, preferibilmente in direzione E-W o N-S, a meno che caratteristiche morfologiche o altri fattori locali non consiglino direzioni di volo diverse.

Nel caso di utilizzo di strumentazione INS/IMU, la durata del volo sulla singola strisciata deve essere tarata in modo da limitare il *drift* dell'IMU, e quindi la strisciata avrà lunghezza non superiore a 80 km.

In aggiunta alla copertura di base è consigliata, in corrispondenza di coste, la realizzazione di ulteriori strisciate aventi l'asse parallelo all'andamento medio della linea di costa in concomitanza di un'inclinazione di quest'ultima, rispetto alla normale alla direzione di volo, compresa tra i 30 e i 60 gradi sessagesimali; dette strisciate vanno effettuate in modo che almeno l'80% della copertura abbracci la parte di terra.

Per ottenere un adeguato irrigidimento dei blocchi, soprattutto nel caso in cui si vogliono determinare i centri di presa con GNSS cinematico, è opportuno prevedere due strisciate integrative trasversali in corrispondenza dei bordi di ciascun blocco, eseguite con le stesse caratteristiche delle strisciate longitudinali.

Il piano di volo dovrà essere sottoposto all'approvazione del Committente, prima della realizzazione delle riprese.

Le riprese fotogrammetriche del territorio da rilevare devono possedere tutti i requisiti richiesti dalla tecnica più aggiornata per l'esecuzione dei rilievi a grande scala.

In particolare l'esecuzione delle riprese aerofotogrammetriche deve garantire:

- la totale copertura stereoscopica dell'area d'interesse;
- il rispetto dei parametri previsti dal piano di volo (altezza di volo, assi delle strisciate, ricoprimenti, ...) compatibilmente con i vincoli imposti dagli Enti di assistenza al volo, civili e militari;
- il migliore periodo nell'arco dell'anno, in funzione anche della finalità, del sorvolo dell'area di interesse, concentrato possibilmente in un esiguo numero di giorni consecutivi.

Le variazioni degli elementi di orientamento angolare fra fotogrammi consecutivi, nonché i valori assoluti degli angoli di orientamento φ , ω e k dei singoli fotogrammi non devono superare 5 gon.

Il ricoprimento longitudinale (*overlap*) dei fotogrammi sull'asse della strisciata deve essere, in zone pianeggianti e collinose, pari al 60%, con oscillazioni comprese entro $\pm 5\%$,

incrementato fino al $70\% \pm 5\%$ in aree a morfologia accidentata, quali le zone di montagna o aree con forti variazioni trasversali di pendenza;

Il ricoprimento trasversale (*sidelap*) delle strisciate adiacenti deve essere non inferiore a 10% nelle zone pianeggianti e collinose, e a 20% nelle zone di montagna

In ogni strisciata lo scostamento orizzontale massimo del punto di presa dall'asse della strisciata medesima, come indicato sul piano di volo, non deve superare 200 m, e deve garantire comunque il valore minimo ammesso per il ricoprimento trasversale. Lo scostamento verticale deve essere contenuto in modo da garantire rigorosamente il rispetto della scala minima ammessa in ciascun punto dei fotogrammi.

Le riprese vanno eseguite in ore a cavallo del mezzogiorno solare, in modo da ridurre al minimo le ombre: l'angolo di elevazione del sole deve essere maggiore di 35° .

Non deve essere presente neve, ad eccezione delle zone di quota superiore a 2000 m.

I voli devono essere completati entro un ristretto numero di giorni consecutivi, compatibilmente con le condizioni meteorologiche e con l'estensione dell'area da rilevare. Dovrà essere prodotta opportuna documentazione della situazione meteo nel caso di giorni di *stand-by*. E' cura di chi effettua il volo programmare gli interventi di manutenzione dell'aeromobile e della strumentazione di bordo, inclusa la camera, in modo che non interferiscano con le tempistiche di volo

Ciascun fotogramma dovrà essere identificato da un codice univoco.

Prescrizioni diverse da quelle sopra citate, quali ad esempio il tollerare modeste percentuali di copertura nuvolosa o nevososa, dovranno essere oggetto di esplicita deroga concessa dalla Direzione Lavori o figura equivalente, sentito il Collaudatore.

ACQUISIZIONE DA PIATTAFORMA SATELLITARE

Per quanto riguarda i dati satellitari, l'acquisizione dovrà essere effettuata con *pixel size* mai superiore al valore del *pixel* previsto per l'ortofoto finale. Il prodotto generato dovrà essere del tipo descritto in 5.2.3 Le immagini satellitari devono essere:

- sgombre da nuvole o copertura nevososa, in analogia a quanto specificato in 5.2.6 (acquisizione da piattaforma aerea);
- acquisite con un angolo rispetto al nadir non superiore a 15° ;
- acquisite e fornite con risoluzione radiometrica nativa: non sono ammesse immagini successivamente ricampionate.

3.2.7 DOCUMENTAZIONE DA PRODURRE

ACQUISIZIONE DA PIATTAFORMA AEREA

A conclusione del volo fotogrammetrico, la documentazione e i materiali prodotti, necessari per la esecuzione dell'ortofoto devono essere i seguenti:

- per riprese digitali:

- fotogrammi prodotti in formato nativo digitale;
- *report* di calibrazione del sistema GNSS/IMU prima e dopo il volo;
- per riprese analogiche:
 - *file* della scansione dei fotogrammi originali;
 - diapositive e copie su carta dei fotogrammi, se richieste;
- per entrambi i sistemi di acquisizione:
 - relazione descrittiva delle procedure seguite;
 - certificazione della data del volo;
 - certificato di taratura della camera fotogrammetrica;
 - relazione sulla verifica dell'assenza di neve e nuvole nelle immagini;
 - relazione sulla verifica di completezza della copertura stereoscopica;
 - grafico delle strisciate: allestito per ciascuna giornata di volo, in formato DXF o SHP, con indicazione del codice identificativo di ciascun fotogramma e della sua copertura effettiva (tenuto conto della morfologia del terreno);
- se si è utilizzato il sistema GNSS/IMU e, in ogni caso, a valle delle operazioni di T.A., un *file* in formato ASCII o Excel con riportato, per ciascun fotogramma:
 - il codice identificativo del fotogramma;
 - le coordinate E,N,h del punto di presa;
 - i parametri angolari Ω, Φ, K ;
 - la data di presa.

ACQUISIZIONE DA PIATTAFORMA SATELLITARE

Le immagini dovranno essere corredate da dati ausiliari, che possano essere impiegati nel processo di ortoproiezione rigorosa. In particolare, sono richiesti:

- metadati relativi all'acquisizione e al pre-processamento delle immagini quali, ad esempio:
 - angoli medi di acquisizione;
 - pre-processamento operato;
 - coordinate dei vertici dell'immagine;
 - altezza di acquisizione;
 - data e ora di acquisizione;
- metadati relativi ai parametri di posizione e orientamento del sensore relativi ad alcune epoche di acquisizione;
- metadati relativi ai RPC.

3.3 PRE-PROCESSAMENTO

3.3.1 SCANSIONE DEI FOTOGRAMMI

La tecnologia moderna è indirizzata all'utilizzo esclusivo delle camere digitali, tuttavia è ancora ammesso l'utilizzo di camere fotogrammetriche tradizionali (a pellicola). In tal caso il trasferimento, mediante scansione, del contenuto informativo dai fotogrammi al supporto informatico è un'operazione fondamentale che condiziona in modo determinante il processo di elaborazione dell'ortoimmagine sia per l'aspetto geometrico che radiometrico. Lo *scanner* utilizzato per la scansione dei fotogrammi deve essere di tipo fotogrammetrico, a elevata precisione e risoluzione geometrica, e idoneo alla scansione unitaria di tutto il fotogramma.

I parametri minimali di riferimento sono:

- accuratezza geometrica della scansione $\leq 3 \mu\text{m}$;
- risoluzione ottica della scansione da definire in accordo con il committente, e comunque tale da garantire una dimensione del *pixel* non superiore a $21 \mu\text{m}$.

Anche nel caso di acquisizione delle immagini con pellicola fotografica, la richiesta di fotogrammi a colori è largamente preponderante.

La verifica radiometrica durante l'acquisizione dell'immagine (*dodging*) viene realizzata abitualmente per migliorare la qualità e l'uniformità dell'immagine stessa. I valori di luminosità dell'immagine possono deviare dai valori originali per interpolazione dei valori di luminosità durante i processi di rettifica e di scansione. In ogni caso deve essere mantenuta il più possibile la corrispondenza radiometrica tra l'immagine digitale e l'originale.

La risoluzione radiometrica finale deve essere di almeno 8 bit per banda spettrale. E' raccomandata l'adozione di sistemi di scansione in grado di acquisire almeno a 12 bit.

La scansione deve garantire che l'immagine abbia caratteristiche qualitative di tipo radiometrico quali:

- saturazioni (valori 0 o 255 per ciascuna banda nelle immagini a 3 x 8 bit) limitate, e comunque non pregiudicanti la leggibilità degli elementi antropici e naturali presenti;
- sfruttamento dell'intera gamma di risoluzione radiometrica, senza discontinuità nell'impiego dei livelli di colore;
- contrasto ben bilanciato;
- fedeltà nei colori rispetto all'originale;
- corretta visibilità delle marche fiduciali.

3.3.2 GENERAZIONE DELLE IMMAGINI DIGITALI DA PROCESSARE

Nel caso di acquisizione con camera di tipo digitale, il processo per passare dal dato acquisito dalla camera alle singole immagini finali, può richiedere una serie di passaggi intermedi, che possono prevedere:

- assemblaggio di *output* da diversi obiettivi per la generazione di un'unica immagine;
- *data fusion* tra bande multispettrali e immagine pancromatica;

- processamento radiometrico per esaltare la leggibilità delle immagini.

Le immagini generate devono essere caratterizzate da una codifica univoca. Qualsiasi dato associato all'immagine (ad esempio i parametri di orientamento) deve essere in linea con la codifica definita. Non è ammesso che una stessa immagine, appartenente allo stesso progetto, abbia codici differenti.

DATA FUSION

Il processo di *data fusion* viene applicato per quella tipologia di sensori che, partendo da immagini pancromatiche a risoluzione maggiore e immagini multispettrali acquisite a risoluzione minore, impiegano algoritmi di *pansharpening* per generare, via *software*, delle immagini multispettrali alla risoluzione dell'immagine pancromatica. Questo processo può essere realizzato con algoritmi diversi, che producono risultati diversi, privilegiando maggiormente l'aspetto radiometrico o quello geometrico. In ogni caso, la procedura di *data fusion* dovrà:

- preservare i colori delle immagini multispettrali;
- non introdurre saturazioni che alterino la leggibilità dell'immagine;
- non presentare viraggi verso tonalità diverse da quelle originali;
- non introdurre differenze radiometriche significative tra immagini consecutive della stessa strisciata;
- non degradare la risoluzione geometrica originaria dell'immagine pancromatica.

PROCESSAMENTO RADIOMETRICO

Il processamento radiometrico è applicato sia alle immagini satellitari che alle foto aeree. Ha come obiettivo la realizzazione di immagini, da 8 a 16 bit, di *input* per la fase di ortoproiezione e mosaicatura. Le immagini devono essere processate in modo da aumentarne la leggibilità e ridurre e compensare le differenze sia radiometriche che di illuminazione tra le varie immagini appartenenti alla stessa strisciata o volati nel corso della stessa missione di acquisizione.

Essendo il processamento radiometrico applicabile anche in sede di mosaicatura, in questa fase esso potrà essere più o meno spinto.

In ogni caso, il processamento radiometrico in generale dovrà:

- non introdurre saturazioni verso i valori più alti che compromettano irreversibilmente la leggibilità dell'immagine e quindi della risultante ortofoto;
- consentire la corretta discriminazione di elementi territoriali all'interno delle zone più scure, quali quelle d'ombra, senza saturare su valori bassi l'immagine;
- mantenere il più possibile inalterati i colori delle immagini, limitandosi alle sole modifiche della luminosità e del contrasto, e correggendo solo eventuali viraggi verso una tonalità dominante;
- non appiattire eccessivamente la dinamica delle singole immagini.

3.3.3 PROCESSAMENTO DATI GNSS/IMU

Nell'ipotesi in cui si utilizzino i metodi di georeferenziazione diretta come ausilio per la fase

successiva di aerotriangolazione, una volta terminata la fase di acquisizione dei fotogrammi è di primaria importanza il corretto processamento dei dati di navigazione (GNSS/IMU) registrati a bordo.

In particolare, questa fase può essere sinteticamente suddivisa attraverso l'esecuzione di tre *step* consecutivi:

- I. *Raw data ingestion* (GNSS/IMU di bordo e GNSS di terra) : *download* e analisi di qualità dei dati grezzi di navigazione registrati a bordo e a terra durante l'acquisizione;
- II. *DGNSS processing* : elaborazione DGNSS dei dati GNSS di bordo mediante la rete di stazioni di riferimento dislocate a terra;
- III. *DGNSS/IMU data fusion* : fusione dei dati DGNSS e IMU.

L'obiettivo finale, in accordo con quanto scritto in precedenza, consisterà nella produzione di un documento di testo in cui siano disponibili, per ogni istante di acquisizione della fotocamera:

- le coordinate del centro di presa (E,N,H) con accuratezza $\sigma_{ENH} \leq \pm 0,20$ m;
- i parametri di orientamento dei fotogrammi (ω, ϕ, k) con accuratezza $\sigma_{\phi\omega} \leq \pm 6$ mgon e $\sigma_k \leq \pm 9$ mgon;

3.3.4 DATI AUSILIARI

PUNTI DI APPOGGIO

I punti di appoggio (in inglese, *Ground Control Point, GCP*) da utilizzare per il calcolo della Triangolazione Aerea devono essere misurati mediante rilievo in campagna, o desunti da reti preesistenti, le cui caratteristiche di precisione siano compatibili con le esigenze di precisione della carta da produrre e siano certificate da operazioni di collaudo.

Non è ammesso l'impiego di punti desunti da cartografia tecnica preesistente.

È richiesta l'acquisizione anche di altri punti, detti punti di controllo (in inglese *Check Point, CP*), che verranno utilizzati non in fase di stima dei parametri di orientamento, ma per fornire un utile controllo di precisione del prodotto finale.

Il numero e la distribuzione dei GCP e dei CP devono essere tali da garantire il rispetto delle precisioni del prodotto da generare, riportate in 5.1.3.

Per i punti ottenuti tramite rilievi a terra, sulla base delle accuratezze indicate in 5.1.3, sono prescritte le seguenti accuratezze: $\sigma_{E,N} = \pm 0,50$ m; $\sigma_H = \pm 0,75$ m.

Ciascun punto impiegato dovrà essere descritto tramite una monografia contenente almeno le seguenti informazioni:

- identificativo del punto;
- coordinate E,N,H;
- modalità di misura;
- schizzo o foto, prospettiva o nadirale, per consentire l'identificazione univoca del punto sulle immagini.

Va inoltre prodotto un *file* vettoriale, in formato *shapefile*, contenente i punti di controllo e

avente come attributi per ciascun punto:

- identificativo del punto;
- coordinate E,N,H.

DATI STAZIONI GNSS

Durante la fase di processamento dei dati di navigazione di bordo sono di fondamentale importanza i dati relativi alle stazioni GNSS di riferimento a terra.

Nel caso in cui ci si preveda la misura diretta dei centri di presa, e nel caso di acquisizione mediante camere fotogrammetriche di tipo *pushbroom*, in accordo con quanto scritto in precedenza, la rete GNSS di terra deve essere progettata in modo tale da:

- avere i ricevitori posti su vertici IGM95 o su vertici determinati mediante la misura di almeno due linee di base che li colleghino ai più vicini vertici della rete IGM95 o a stazioni permanenti inquadrate nella RDN;
- coprire omogeneamente l'area di acquisizione;
- non avere ricevitori posti tra di loro ad una distanza inferiore ai 10 Km;
- non superare i 50 Km di distanza tra il vettore aereo e il ricevitore fisso più vicino.

I dati delle suddette stazioni devono essere corredati con *file* ancillari in cui vengono riportate le coordinate di tutti i ricevitori utilizzati con accuratezza centimetrica e in un sistema di riferimento non antecedente all'ITRF2005.

Purché siano rispettate le precedenti condizioni, possono essere utilizzate stazioni permanenti disponibili nella zona del volo e già inquadrate nel sistema di riferimento ETRF2000 (epoca 2008.0) o vertici ad esse collegati con almeno due basi.

Nel caso in cui il dato del sistema GNSS/IMU sia soltanto di ausilio all'aerotriangolazione, non ci sono prescrizioni particolari nel disegno della rete di stazioni GNSS a terra.

DTM

Secondo quanto descritto nelle "Linee guida - Ortoimmagini 1:10.000 e modelli altimetrici" prodotte dal CISIS (Centro Interregionale per i Sistemi informatici, geografici e statistici) e adottate dal Comitato per le regole tecniche sui dati territoriali delle pubbliche amministrazioni, dovranno essere impiegati DTM di livello 2 o superiori.

Per comodità, si riportano qui di seguito le specifiche relative al livello 2:

- tipologia DEM o DSM
- accuratezza in quota:
 - in campo aperto $P_{Q(a)} = 2$ m
 - copertura arborea > 70% $P_{Q(b)} = 1/4$ altezza media alberi (nel caso di DEM)
 - edifici (nel caso di DSM) $P_{Q(c)} = 2.50$ m
- tolleranza in quota:
 - in campo aperto $T_{Q(a)} = 4$ m
 - copertura arborea > 70% $T_{Q(b)} = 1/2$ altezza media alberi (nel caso di DEM)
 - edifici (nel caso di DSM) $T_{Q(c)} = 5$ m

- accuratezza planimetrica: $P_{EN} = 2$ m (0.2 mm alla scala 1:10.000)
- tolleranza planimetrica: $T_{EN} = 4$ m
- passo di griglia: 20 m
- *breakline* o punti quotati per oggetti che causano irregolarità del terreno maggiori di 4 m entro una maglia del grigliato *breakline* sempre necessarie per i seguenti oggetti: dighe, viadotti, linee di costa di laghi, fiumi, mari e impluvi; le *breakline* devono seguire il terreno con la accuratezza sopra specificata delimitazione delle aree non rappresentabili (“zone morte”): specchi d’acqua, zone di minor accuratezza per densa vegetazione. Le linee di delimitazione devono indicare la quota del terreno, altrimenti (ad es. se appartenenti a un tetto) devono avere quota convenzionale; gli specchi d’acqua devono seguire il terreno.
- delimitazione della zona rappresentata sempre presente
- applicazioni principali: ortofoto alla scala 1:10.000 (e 1:5.000 solo se riprese con campo normale, $f = 300$ mm); studi ambientali, delimitazione dei bacini idrografici
- aree di applicazione: aree lontane da centri urbani caratterizzate da colture estensive, in mancanza di DTM di maggior accuratezza
- sorgente dei dati: CTR a scala $\geq 1:10.000$, fotogrammetria, LiDAR

3.3.5 MATERIALE DA PRODURRE

Al termine della fase di pre-processamento, saranno disponibili le immagini in formato idoneo, corredate da tutte le informazioni necessarie per il processamento geometrico, siano esse derivate da aereo o da satellite. Dovranno essere quindi forniti:

DATI IMMAGINE

- Immagini in formato .tif non compresso, a 8 o 16 bit, processate radiometricamente. Nel caso di immagini satellitari, che possono raggiungere una dimensione *file* ben superiore ai 2 Gb, è ammessa la fornitura in un formato proprietario da utilizzare poi nella fase di processamento geometrico;
- certificato di calibrazione della camera fotogrammetrica
- grafico di volo in formato *shapefile*, con riportati l’identificativo di ciascun fotogramma e il suo abbracciamento al suolo;
- per le sole foto aeree, un *file* ASCII contenente, per ciascun fotogramma:
 - identificativo del fotogramma;
 - se si sono utilizzati dispositivi GNSS/IMU, i parametri di orientamento calcolati dal processing dei dati GNSS/IMU;
 - data di acquisizione;
- *report* di qualità in formato tabellare delle immagini che riporti, per ciascun fotogramma/immagine:
 - eventuale presenza di nuvole;
 - problemi radiometrici.
- per le sole immagini acquisite in modo analogico e portate in digitale mediante scansione, *report* del processo di scansione, con indicazione della procedura seguita e della risoluzione di scansione adottata;
- *report* sull’eventuale processo di *data fusion* e *processing* radiometrico.

DATI DI NAVIGAZIONE

Per quanto riguarda il processamento dei dati di navigazione, il dato di *output* consisterà in un *file* in cui, per ogni fotogramma acquisito, si indica:

- lo *strip.ID* (numero sequenziale utilizzato come identificativo della strisciata a cui appartiene il fotogramma);
- il *photo.ID* (numero sequenziale utilizzato come identificativo del fotogramma);
- se disponibili:
 - le coordinate del centro di presa (E , N , H);
 - i parametri angolari di orientamento (Ω , Φ , K).

DATI AUSILIARI

Dovranno essere descritti e documentati:

- i punti di appoggio (GCP) e di controllo (CP) utilizzati, secondo quanto descritto in 5.3.4;
- qualora utilizzate, le stazioni GNSS a terra.

3.4 PROCESSAMENTO

3.4.1 ORIENTAMENTO DELLE IMMAGINI

Vengono considerati distintamente i casi di immagini acquisite da piattaforma aerea e da piattaforma satellitare.

ORIENTAMENTO DELLE IMMAGINI DA AEREO MEDIANTE TA

La Triangolazione Aerea (TA) avrà come *input* immagini preprocessate radiometricamente, eventualmente corredate dell'orientamento iniziale calcolato in fase di pre-processamento. La metodologia di calcolo che dovrà essere adottata è quella rigorosa: a stelle proiettive o a modelli indipendenti.

Il risultato della compensazione di un blocco è ritenuto accettabile quando gli scarti sui punti sono inferiori ai seguenti valori:

- scarti residui sui punti di appoggio (GCP):
 - 1.0 metri in planimetria;
 - 0.9 metri in altimetria;
- scarti residui sui punti di controllo (CP):
 - 2.0 metri in planimetria;
 - 1.8 metri in altimetria.

Nel caso in cui si utilizzino tecniche di fotogrammetria diretta, le precisioni (s.q.m.) con cui determinare i parametri di orientamento esterno delle immagini sono almeno le seguenti:

- coordinate del centro di presa:
 - $\sigma_{ENH} = \pm 0.2$ metri;
- parametri angolari di orientamento dei fotogrammi:
 - $\sigma_{\Omega\Phi} = \pm 6$ mgon;
 - $\sigma_K = \pm 9$ mgon.

Anche in questo caso gli scarti residui sui CP devono essere inferiori a:

- 2.0 metri in planimetria;
- 1.8 metri in altimetria.

ORIENTAMENTO DELLE IMMAGINI SATELLITARI

Per la produzione di ortofoto cartografiche possono essere impiegate immagini satellitari, purché l'angolo di acquisizione (*off-nadir*) sia minore di 15° e la risoluzione (GSD) sia al massimo di 1 m.

Per l'orientamento delle immagini satellitari sono ammessi due metodi:

- modello rigoroso (o parametrico);
- funzioni razionali (RFM) tramite coefficienti RPC.

In nessun caso, neanche in situazione morfologica perfettamente piana, è ammesso l'impiego di altri metodi, quali ad esempio l'interpolazione polinomiale o la generazione di RPC generati a partire da punti di appoggio (GCP).

I punti di coordinate note utilizzati per l'orientamento (GCP), devono possedere le caratteristiche di seguito riportate:

- distribuzione omogenea: i GCP devono essere distribuiti in modo da coprire l'intera immagine, per quanto possibile senza lasciarne porzioni sguarnite; in particolare è consigliabile distribuire alcuni GCP lungo il bordo dell'immagine, in corrispondenza degli angoli e del punto centrale di ogni lato, essendo la parte maggiormente soggetta a deformazioni.
- localizzazione: i singoli GCP devono essere chiaramente identificabili e collimabili tanto nello spazio immagine quanto nello spazio oggetto, pertanto la loro scelta deve essere condizionata sia dall'effettiva visibilità sull'immagine, sia dalla possibilità di effettuare stazionamenti con ricevitori GNSS per ottenerne le coordinate. E' consigliata la loro dislocazione a quota terreno e possibilmente in corrispondenza di oggetti sufficientemente stabili sul territorio.
- numero: il numero consigliato di GCP varia in base al sensore che ha acquisito l'immagine, al modello utilizzato per l'orientamento e, in generale, alle caratteristiche geometriche dell'acquisizione. Tuttavia una volta definito un sensore e un modello di orientamento è possibile individuare un numero minimo di GCP, superato il quale non si ottengono significativi miglioramenti della precisione del modello.

Per quanto riguarda i modelli basati sulle funzioni polinomiali razionali con RPC forniti nei metadati, lo scopo dei GCP è essenzialmente quello di stimare i coefficienti di una trasformazione di ordine zero (traslazione piana) o, in alcuni casi, di primo ordine (trasformazione affine piana) per raffinare l'orientamento. Conseguentemente da 3 a 5 GCP sono generalmente sufficienti.

Per quanto riguarda invece i modelli rigorosi (fisicamente basati), in generale, tale numero è variabile (approssimativamente tra 8 e 15) in funzione del sensore e del tipo di immagini (immagini grezze – *Level 1A* o proiettate sull'ellissoide – *Level 1B*).

I punti di controllo (CP) devono possedere le medesime caratteristiche dei GCP relativamente a distribuzione e accuratezza, avendo anche cura che la localizzazione dei CP sia il più possibile complementare a quella dei GCP (ogni CP deve essere il più distante possibile dai GCP circostanti).

In termini di scarti sui punti, l'orientamento è considerato accettabile se sono soddisfatte le condizioni seguenti:

- scarti residui sui punti di appoggio (GCP):
 - in planimetria < 1.0 metri;
 - in altimetria < 0.9 metri;
- scarti residui sui punti di controllo (CP):
 - in planimetria < 2.0 metri;
 - in altimetria < 1.8 metri.

3.4.2 GENERAZIONE DELL'ORTOFOTO E MOSAICATURA

PROCESSAMENTO RADIOMETRICO

Qualora esistano significative variazioni di luminosità e contrasto tra fotogrammi adiacenti, anche se già pre-processati radiometricamente, devono essere eseguite delle operazioni di elaborazione della radiometria che minimizzino le differenze di colore, tonalità e contrasto tra i fotogrammi da mosaicare, ma senza alterare la leggibilità dell'informazione. Questa operazione può essere effettuata con strategie diverse, basate su strumenti automatici o interattivi. L'operazione non è richiesta nel caso in cui la mosaicatura da effettuare riguardi specchi d'acqua. Il processamento deve preservare il più possibile la dinamica radiometrica delle immagini interessate, e gli algoritmi applicati non devono saturare (verso l'alto o verso il basso) parti delle immagini.

ORTOPROIEZIONE

Il processo di ortoproiezione prevede l'elaborazione geometrica delle immagini orientate, impiegando un idoneo modello digitale del terreno (v. 5.3.4) per tener conto della morfologia dell'area.

Il metodo di ricampionamento da adottare è quello della convoluzione cubica, in modo da eliminare effetti di scalettatura dell'immagine senza grossi impatti sulla risoluzione effettiva. Qualora le immagini siano state acquisite in direzione prossima a E-W o N-S, è ammesso anche l'impiego dell'interpolazione bilineare.

Il processo di ortoproiezione è sempre basato su modelli rigorosi di presa per quanto riguarda immagini aeree, mentre per i dati satellitari è anche ammesso il processamento tramite RPC.

MOSAICATURA

La mosaicatura, effettuata attraverso la fase di assemblaggio delle singole immagini allo scopo di ottenere un'immagine unica, deve garantire la congruenza radiometrica e geometrica interna. Essa viene effettuata attraverso la preventiva creazione di linee di taglio tra le varie immagini da mosaicare, che garantiscano la continuità degli elementi topografici tra immagini originali adiacenti. E' ammesso che, lungo la linea di taglio, ci possa essere disallineamento tra le due immagini da mosaicare non superiore alla metà della precisione geometrica richiesta per il prodotto finale

Le linee di taglio:

- vanno scelte in modo da ridurre al minimo il loro impatto sulla qualità del prodotto. Non è ammessa, quindi, la mosaicatura secondo linee di taglio rettilinee, a meno che non esista alcuna differenza radiometrica/geometrica tra le parti da mosaicare, e la linea di taglio non sia visibile sul mosaico finale;
- in generale, dovranno essere digitalizzate seguendo particolari naturali, quali fossi, siepi, ecc, o lungo discontinuità radiometriche marcate del territorio, in modo che le

- linee di taglio nell'immagine finale risultino il più possibile mascherate;
- qualora non sia possibile seguire elementi naturali o zone di forte contrasto, le linee di taglio dovranno essere comunque individuate in modo da minimizzare le variazioni di tonalità;
 - non dovranno mai tagliare edifici, in modo da evitare l'introduzione di discontinuità dovute alla differente prospettiva delle immagini interessate;
 - in generale, dovranno essere definite in modo da impiegare preferibilmente le parti centrali dei fotogrammi, che presentano in maniera meno evidente deformazioni prospettive residue.

E' ammessa l'applicazione, a cavallo della linea di taglio, di filtri di *smoothing* che si estendano per non più di 10 pixel da una parte e dall'altra della linea, al fine di mascherare il più possibile piccole imperfezioni in prossimità della linea di taglio. E' raccomandato anche l'impiego di algoritmi di *feathering* per rendere più graduale e omogeneo dal punto di vista radiometrico l'accostamento tra le immagini adiacenti.

GENERAZIONE DELL'ORTOFOTO FINALE

Al termine della fase di mosaicatura o contestualmente ad essa, va effettuata la creazione dell'ortofoto finale secondo il taglio richiesto.

In linea di massima, qualora si tratti di coperture estese, il riferimento da adottare è il taglio delle sezioni 1:10.000 identificate come sedicesima parte di un foglio della serie IGM 1:50.000. Sono comunque possibili altri tagli, in relazione alle esigenze operative, indicati dalla Direzione Lavori o figura equivalente, sentito il Collaudatore.

Il prodotto finale dovrà essere fornito:

- In formato tiff + tfw, 8 bit, non compresso, 3 o 4 bande spettrali in un singolo *file*, oppure
- in formato .ecw, con compressione variabile da 1 a 4, 3 bande spettrali (RGB o CIR), oppure
- in altro formato standard, richiesto dal Committente.

VERIFICHE DI QUALITÀ

Il prodotto finale va sottoposto a verifiche di tipo sia geometrico che radiometrico.

Le verifiche geometriche vanno effettuate selezionando almeno il 5 % delle sezioni generate (siano esse corrispondenti alle sezioni 1:10.000 o altro).

Per ogni sezione devono essere:

- verificate le coordinate di almeno 20 dettagli planimetrici sul terreno, ciascuno identificato da un codice univoco, confrontandole con le coordinate degli stessi punti misurati con accuratezza di un ordine di grandezza superiore rispetto a quella dell'ortofoto prodotta (indicativamente con accuratezza maggiore o uguale a 30 cm). Non è ammesso l'impiego di punti già usati per l'orientamento delle immagini. Dovranno sussistere, per il 95% dei punti controllati, le relazioni di cui al 5.1.3;
- analizzate le linee di taglio presenti. In particolare ne dovrà essere analizzata la rilevabilità e l'eventuale presenza di disallineamenti tra le due immagini oggetto di mosaicatura.

È richiesta una relazione di sintesi che deve riportare:

- la lista delle sezioni esaminate;
- l'elenco dei CP impiegati, con:
 - identificativo del punto;
 - coordinate E, N dei punti;
 - modalità di misura dei CP;
 - scarti nelle coordinate E e N;
- s.q.m. complessivi degli scarti E e N;
- CE95% complessivo.

Le verifiche radiometriche, anch'esse da riportare in una relazione di sintesi, dovranno appurare che:

- l'intera area presenti delle caratteristiche radiometriche il più possibile omogenee;
- le area sature, che compromettano la leggibilità dell'immagine, devono essere in misura massima dello 0.5% della superficie totale dell'immagine;
- i colori siano fedeli in relazione alle bande spettrali adottate;
- non vi sia presenza di nubi, né di ombre da esse riportate;
- siano assenti fumi e foschia, se non in zone industriali ove tale presenza è perenne.

3.4.3 DOCUMENTAZIONE DA PRODURRE

File immagini contenenti le ortofoto secondo il taglio (ad esempio: sezione 1:10.000) e il formato prestabiliti:

- tabulato contenente, per ciascuna ortofoto,
- l'elenco delle immagini impiegate;
- relazione con i risultati delle verifiche di qualità geometrica;
- relazione con i risultati delle verifiche di qualità radiometrica;
- tabulato con riportato, per ciascuna immagine:
 - codice identificativo dell'immagine;
 - parametri di orientamento;
 - data di acquisizione;
- tabulati della triangolazione, con gli scarti sui punti impiegati;
- descrizione del metodo di ortoproiezione applicato;
- metadati secondo quanto prescritto in 5.1.7.

3.5 COLLAUDO

Le operazioni di collaudo devono comprendere il collaudo dei parametri caratterizzanti le fasi intermedie (collaudo in corso d'opera) e di quelli stabiliti per il prodotto finale (collaudo finale). Devono inoltre comprendere il controllo della strumentazione utilizzate e delle modalità operative.

La validazione dovrà essere effettuata, pertanto, attraverso:

- un controllo di qualità sulle fasi intermedie;
- un controllo di qualità sul prodotto finale.

Saranno quindi oggetto di collaudo:

- la qualità delle fasi intermedie
 - volo (piano di volo, calibrazioni dei sensori, completezza della copertura stereoscopica, rispetto del piano di volo, ...);
 - orientamento dei fotogrammi, con controllo dei tabulati di triangolazione
 - qualità geometrica e radiometrica delle singole immagini;
 - caratteristiche del DTM, verificate attraverso i relativi metadati e/o mediante misure integrative ad hoc;
- la qualità del prodotto finale
 - risoluzione geometrica e radiometrica dell'ortofoto prodotta;
 - tolleranze planimetriche;
 - sistema di riferimento;
 - dimensione e taglio;
 - formato dei dati digitali;
 - consistenza e correttezza dei metadati del prodotto finale.

Le verifiche saranno effettuate attraverso l'esame delle relazioni tecniche relative alla strumentazione, alle elaborazioni e ai risultati ottenuti, nonché effettuando nuove misure *ad hoc*.

3.5.1 COMPLETEZZA DATI

Il collaudo verificherà che:

- tutta l'area sia coperta da dati immagine;
- tutta la documentazione a corredo di ciascun immagine sia stata prodotta;
- tutte le documentazioni ausiliarie richieste (esempio: certificati di calibrazione, piani e grafici di volo, ecc.) siano stati consegnati;
- la nomenclatura sia esatta e univoca;
- i formati adottati siano quelli previsti.

3.5.2 CONTROLLO VOLO E IMMAGINI DI PARTENZA

Verificherà inoltre che:

- il formato del dato sia quello previsto;
- la codifica sia univoca;
- esista corrispondenza tra immagini acquisite e piano di volo;
- per tutte le immagini sia disponibile la data di presa;
- per tutto il territorio sia completa la copertura stereoscopica;
- i certificati di calibrazione siano disponibili e aggiornati;
- le variazioni dei parametri di orientamento dei fotogrammi siano in linea con le prescrizioni;
- il volo sia stato effettuato in periodi idonei.

Possono anche essere effettuati controlli su singoli modelli, mediante orientamento interno e relativo su stereo restitutore analitico o digitale, allo scopo di verificare:

- i parametri relativi di presa (orientamento relativo);
- le parallassi residue nella formazione del modello, che non devono superare in nessun punto $\pm 10 \mu\text{m}$.

3.5.3 CONTROLLO DEI DATI GNSS/IMU (eventuali)

In fase di collaudo verranno verificati:

- la qualità dei dati grezzi di navigazione mediante:
 - analisi dei dati IMU (ricerca di eventuali *data-gap*);
 - analisi dei dati GNSS (ricerca di eventuali *data-gap* o errate temporizzazioni, numero e affidabilità dei satelliti osservati);
 - analisi dei *file* ancillari dove vengono memorizzati gli istanti di acquisizione delle immagini registrate (ricerca di eventuali *data-gap* o errate temporizzazioni);
 - i *report* delle misure delle *baseline* effettuate in campagna e le relative schede di stazione;
- la qualità dell'*output* prodotto durante la fase di *DGNSS processing*:
 - analisi dei dati GNSS di *input* ;
 - numero e affidabilità dei satelliti impiegati;
 - verifica delle misure delle *baseline* utilizzate;
 - analisi dell'accuratezza del dato ricostruito di *output*;
 - le accuratezze delle coordinate dei centri di presa della camera fotogrammetrica;
 - il calcolo di compensazione.

3.5.4 CONTROLLO DEL PROCESSAMENTO GEOMETRICO

In fase di collaudo verranno verificati:

- gli algoritmi adoperati;
- le operazioni di orientamento, tramite l'analisi dei residui dei punti di appoggio e di controllo.

3.5.5 CONTROLLO DEI PUNTI DI APPOGGIO IMPIEGATI

Verranno controllati, su un numero di blocchi pari almeno al 20% dei blocchi impiegati:

- il numero di punti di appoggio (GCP) adoperati per blocco/scena;
- la posizione dei GCP all'interno del blocco/scena;
- gli scarti per blocco/scena.

Nel caso di immagini satellitari processate singolarmente, verranno analizzati i tabulati dei GCP di tutte le scene.

3.5.6 COLLAUDO GEOMETRICO DEL PRODOTTO

Il collaudo verrà effettuato su almeno il 5% delle sezioni, anche servendosi dei tabulati di controllo generati in fase di produzione. Esso dovrà verificare, per ogni sezione, che:

- i punti di controllo adottati rispettino gli standard di precisione del prodotto finale;
- lungo le linee di mosaicatura non siano presenti spostamenti superiori a quanto prescritto;
- i bordi fra sezioni adiacenti siano definiti analiticamente, con calcolo rigoroso.

3.5.7 COLLAUDO RADIOMETRICO DEL PRODOTTO

Il collaudo, effettuato su almeno il 5% delle sezioni, verificherà che:

- la sezione sia omogenea dal punto di vista radiometrico, e che eventuali discontinuità siano localizzate seguendo l'andamento di elementi naturali;
- non risultino presenti predominanti di colore;
- le saturazioni, se presenti, non compromettano la leggibilità degli elementi territoriali;
- non vi sia presenza di nuvole, né di ombre da esse riportate;
- la presenza di fumi e foschie sia limitata e giustificata.

3.5.8 RELAZIONI DI COLLAUDO IN CORSO D'OPERA E COLLAUDO FINALE

Al termine di ciascuna operazione di collaudo il Collaudatore invierà alla DL (o figura equivalente), che ne trasmetterà copia alla Ditta appaltatrice, una relazione dettagliata delle risultanze positive o negative delle verifiche eseguite.

Successivamente alla consegna definitiva e al collaudo positivo di tutti gli elaborati relativi alle singole fasi operative, verrà redatto il verbale di collaudo finale, nelle forme prescritte dalla legge.

Il Collaudatore provvederà anche a misurare, in contraddittorio con la Ditta esecutrice, la superficie totale effettivamente rilevata.

Se richiesto dalla DL (o figura equivalente), egli esprimerà infine il proprio parere tecnico sulle cause di eventuali ritardi, dopo aver esaminato la documentazione giustificativa prodotta, allo scopo di consentire la definizione delle eventuali penali.