

# TRIANGOLAZIONE SOLARE SANTONI

## METODI DI LAVORO, COMPENSAZIONE E RISULTATI DI NUOVE ESPERIENZE

*Riassunto della comunicazione presentata dal Prof. Ing. Carlo Trombetti al VII Congresso internazionale di Fotogrammetria in Washington.*

Dopo gli esperimenti di aerotriangolazione col periscopio solare Santoni, eseguiti nel 1937 dall'Istituto Geografico Militare, fui incaricato di dirigere i rilevamenti alle scale 1 : 100.000 effettuati con aerotriangolazione solare nella Tripolitania nel 1938 e nell'acrocoro abissino nel 1939-40. I primi per 4.500 km<sup>2</sup> furono ultimati nel 1939 ed i secondi, iniziati nello stesso anno, furono troncati a metà del 1940 per i noti eventi, quando erano già stati restituiti circa 30.000 km<sup>2</sup>.

Non essendovi per l'Italia più ragioni per continuare gli esperimenti alle scale 1 : 100.000, l'Istituto Geografico Militare ha rivolto la sua attenzione alla possibilità dei rilevamenti con la triangolazione aerea solare di territori metropolitani alla scala 1 : 25.000.

Gli esperimenti di cui si riferisce con la presente comunicazione hanno avuto lo scopo di provare nuove attrezzature progettate dal Santoni ed alcuni nuovi procedimenti operativi.

Le presenti esperienze si sono svolte involontariamente in condizioni assai sfavorevoli durante la fase della ripresa aerofotogrammetrica. I risultati conseguiti ed i procedimenti usati si è ritenuto di riferirli ugualmente al Congresso, perché il contributo allo studio della aerotriangolazione con esperienze effettuate in condizioni di sfavore è anche esso importante: le condizioni sfavorevoli nella presa possono verificarsi con una percentuale non trascurabile durante estesi lavori.

1. - È noto che il metodo Santoni di aerotriangolazione solare differisce da altri metodi in quanto la imposizione della inclinazione trasversale e longitudinale di ogni nuovo fotogramma dipende essenzialmente dalla conoscenza, al momento della presa, della posizione altazimutale del Sole e della conoscenza della posizione angolare dell'asse della camera di presa rispetto alla direzione del Sole.

Noti questi elementi angolari e trovato in prima approssimazione lo sbandamento di ciascun fotogramma (a mezzo di un concatenamento nadirale), la risoluzione di due triangoli, di cui uno rettangolo, fornisce sia l'inclinazione trasversale  $\omega$  che quella longitudinale  $\varphi$ . Tale risoluzione può effettuarsi applicando formule o adoperando uno speciale strumento, il calcolatore solare.

Poiché i valori di  $\omega$  e di  $\varphi$  sono funzioni dello sbandamento  $K$  intro-

dotto, una variazione di  $K$  rispetto ai valori approssimati di ingresso provoca una variazione di  $\omega$  e di  $\varphi$  ricavabile a mezzo di coefficienti  $\frac{d\omega}{dk}$  e  $\frac{d\varphi}{dk}$ . Questi si calcolano con formule o si deducono con letture al calcolatore solare.

2. - L'esame critico delle apparecchiature speciali usate nell'esperimento (periscopio solare, fotogoniometro solare, calcolatore solare) e delle apparecchiature normali (macchina aerofotogrammetrica Mod. IV e Stereocartografo Mod. IV) tutte progettate dall'ing. Santoni, ha messo in evidenza la maggiore praticità delle nuove apparecchiature speciali le quali hanno reso indipendenti i mezzi di presa e di restituzione pur conservando praticamente inalterata la precisione raggiunta con le antiche attrezzature.

Particolarmente vantaggioso risulta il calcolatore solare che riduce di  $3/4$  i tempi necessari per ottenere i valori di  $\varphi$  e di  $\omega$ .

Questo strumento consta di una piattaforma livellabile sulla quale è montato un goniometro: imposto al cerchio orizzontale del goniometro l'azimut del Sole  $\theta_s$  ed al cerchio verticale la zenitale del Sole  $Z_s$ , quali risultano dal calcolo, il canocchiale risulta puntato, rispetto alle origini delle graduazioni del calcolatore, nella direzione che il Sole aveva al momento della presa.

La piattaforma del calcolatore sostiene il primo anello di un cardano che si inclina attorno ad un asse orizzontale e che materializza l'asse primario di orientamento dell'apparato restitutore. Il primo anello sostiene un secondo anello inclinabile attorno ad un asse normale al precedente e perciò corrispondente al secondo asse di orientamento della camera del restitutore. Un terzo anello ruota dentro il secondo ed il suo asse materializza l'asse principale del periscopio. Tale anello sostiene un settore graduato lungo il quale scorre una mira luminosa a raggi paralleli.

Si orienta il terzo anello e si inclina la mira rispetto alle origini delle graduazioni del secondo anello del cardano come il Sole risulta orientato al momento dello scatto degli otturatori rispetto agli assi periscopici. Se non ci sono inclinazioni trasversale e longitudinale il collimatore del goniometro e la mira risultano allineati. Se esiste inclinazione si muove il cardano della mira fino ad ottenere la collimazione ed i valori degli angoli di inclinazione trasversale e longitudinale sono quelli che competono alla camera nell'istante della presa.

3. - Le condizioni della presa - eseguita con un volo il 1° novembre 1950 - furono oltremodo sfavorevoli. Infatti, oltre alla ridotta elevazione del Sole, che di per sé rende meno sensibile la determinazione dell'assetto delle camere sul piano trasversale del Sole, la scarsità di luce costrinse a togliere gli schermi gialli dagli obbiettivi per cui i fotogrammi ottenuti furono del tutto mediocri.

La strisciata di 100 km, dal fotogramma 3 al fotogramma 57, fu preparata a terra agli estremi ed al centro con regolari operazioni di triangola-

zione (errore medio  $\pm 0,50$  m), e nei fotogrammi intermedi con operazioni di interpolazione da carte esistenti (errore medio  $\pm 1,50$  m).

4. - Le operazioni di ufficio hanno riguardato le letture dell'immagine del cronometro sulla pellicola e le misure del fotogoniometro dell'azimut solare periscopico e della distanza radiale del Sole, da cui se ne è ricavata la distanza zenitale periscopica.

Le condizioni di assetto geometrico fra camera e periscopio vengono controllate in precedenza con mezzi appropriati.

È comunque utile determinare sperimentalmente questo assetto anche al restitutore eseguendo la comparazione con i piazzamenti sulle basi note sul terreno, assumendo il valore medio con correzione *costante* dei dati periscopici.

Lo scostamento tra i valori così ottenuti e quelli dei controlli diretti dipendono ovviamente da eventuali asimmetrie di orientamento interno della presa e da costanti del restitutore.

5. - In tutti gli esperimenti i concatenamenti dei fotogrammi della strisciata dal fotogramma 57 al fotogramma 4 furono eseguiti suddividendo la predetta strisciata in due tratti separati: il tratto 57-30 ed il tratto 32-4.

I percorsi nadirali dettero i valori dei  $K$  dai quali furono dedotti i valori di  $\omega$  e di  $\phi$ .

Il concatenamento dei modelli a mezzo della rotazione relativa di ciascun fotogramma attorno alla direzione solare fu eseguito ripetendo ogni tratto quattro volte: ne risultarono quattro percorsi per ogni tratto eseguiti con personale differente e su strumenti diversi.

Il peggiore risultato bruto di una partenza, si è verificato per il tratto 57-30, al primo percorso, nel quale si è partiti disorientati di  $+5^{\circ},46$  ed errati in scala di  $-0,39/00$  (il segno, come d'uso, significa correzione).

Riportiamo il peggiore risultato bruto di un arrivo. Si è avuto nel tratto, 32-4, al primo percorso, nel quale si sono ottenuti errori in  $X$  di  $-100$  m, in  $Y$  in  $-240$  m, in  $Z$  di  $+240$  m, in orientamento di  $+52^{\circ},30$  ed in scala  $-3,22/00$ .

In tutti i percorsi effettuati con concatenamento solare si è riscontrato un errore di chiusura in azimut corrispondente ad un sistematico errore di circa  $2^{\circ}$  per vertice. Tale errore non era da imputare ai mezzi di restituzione ma presumibilmente al film. A rigore, tale errore sistematico dovrebbe essere rivelato dagli stessi percorsi nadirali, il che consentirebbe di effettuare i concatenamenti solari usando una precorrezione azimutale. Nel caso oggetto, mentre nel tratto 57-30 il fenomeno si è manifestato coerentemente a quanto sopra, nel tratto 32-4 l'errore di chiusura del percorso nadirale è risultato molto differente dall'errore di chiusura del concatenamento solare. Una analisi appropriata ha confermato l'influenza dei dislivelli dei punti di riporto sull'errore di chiusura dei percorsi nadirali.

Si giunge così alla notevole conclusione che lo scopo del percorso nadirale deve essere genericamente limitato a fornire i valori approssimati degli sban-

damenti dei fotogrammi intermedi, necessari per i calcoli, e che tale percorso non è in grado di fornire un valore attendibile dell'errore sistematico di trasporto di azimut.

6. - L'esame delle influenze degli errori accidentali e degli errori sistematici sui concatenamenti solari ha portato alla conclusione che la compensazione deve essere effettuata in base ai seguenti criteri informativi:

1) l'errore sistematico, qualunque esso sia, va calcolato in base al suo effetto nell'interno dell'ultimo modello;

2) in base all'entità ed al segno della deformazione presa in esame su detto modello va calcolato il coefficiente di correzione sistematico e quindi corretta la catena;

3) l'errore residuo generale finale, riferito alla rete geodetica va attribuito ad errori accidentali e compensato linearmente.

Il metodo solare si presta poi in modo particolare per ridurre tutti i percorsi ad un unico percorso angolare.

Infatti ad un effetto  $dK$  ne consegue un effetto  $d\varphi$  ed un effetto  $d\omega$  secondo rapporti incrementali noti. Pertanto utilizzando diversi concatenamenti, si può stabilire un  $K$  medio di ciascun fotogramma sulla base dei concatenamenti eseguiti. Rispetto a questo se ne trae i corrispondenti  $dK$  per ciascun fotogramma il quale dà luogo ad un  $dy$ ; inoltre mentre il  $d\omega$  genera una flessione e quindi una  $dz$  sull'asse, il  $d\omega$  genera una torsione e quindi una  $dz$  fuori dell'asse.

Si può così ridurre a posteriori ciascun concatenamento a quello che si sarebbe verificato con il  $K$  medio, cioè ad un unico percorso angolare, ottenendo in definitiva altrettanti concatenamenti indipendenti da eventuali errori causati dalla connessione solare.

In questi esperimenti i risultati ottenuti hanno rivelato errori accidentali molto sensibili, dovuti essenzialmente alla deficiente definizione fotografica. In casi come questi, effettuate le correzioni percorso per percorso di uno stesso tratto, in conseguenza dei valori correttivi di  $K$  si ottiene una prima riduzione della entità degli errori; adesso le differenze tra i vari percorsi dipendono dai soli errori accidentali. Orbene alla media dei vari percorsi corretti competeranno errori ulteriormente ridotti.

Nel caso nostro dopo la compensazione eseguita con i metodi accennati nei paragrafi precedenti ne sono risultati errori medi dell'ordine da 3,0 m a 5,5 m per le coordinate  $X$  ed  $Y$ , e da 4,0 m a 7,8 m per la quota.

Dopo l'applicazione dei valori correttivi conseguenti al  $dK$  ne sono risultati percorsi con errori medi variabili da 2,6 m a  $\pm 5,3$  m per le coordinate  $X$  e  $Y$ , e da  $\pm 3,4$  m a  $\pm 5,8$  m per le quote.

Infine al percorso risultante dalla media dei percorsi ridotti ne è risultato un errore medio variabile da 2,0 m a 5,0 m per le coordinate  $X$  e  $Y$ , e da  $\pm 3,0$  m a  $\pm 3,5$  m per le quote.