

ORTOFOTO DIGITALI

5.1 Generalità

L'ortofoto digitale è un prodotto efficace ed economico utilizzato per rappresentare correttamente, in forma fotografica, la proiezione piana di ogni oggetto tridimensionale. La geometria di questa particolare fotografia è ottenuta mediante la proiezione ortogonale dell'oggetto su un piano, in modo che essa risulti metricamente corretta: pertanto, l'utente può agevolmente misurare l'oggetto rappresentato in una scala nota, esattamente come su una carta tradizionale.

La realizzazione dell'ortoproiezione su superficie continua (liscia) è semplice ed attraverso un DTM con grigliato regolare avente dimensioni dalla maglia variabili tra 10 m e 10 cm (in funzione della scala di rappresentazione) è possibile ottenere precisioni accettabili per tutti i campi applicativi. Sfortunatamente, in molti casi questa condizione di continuità del terreno non si verifica: ad esempio, in un centro urbano la superficie che modella gli oggetti costruiti dall'uomo (edifici, infrastrutture, ponti, etc.) non è certamente liscia e non viene, quindi, descritta propriamente con un grigliato regolare (DTM). L'ortoproiezione di questi tipi di oggetti richiede procedure più raffinate con l'utilizzo di più immagini (spesso disponibili in un blocco fotogrammetrico).

Le soluzioni attualmente più diffuse sfruttano un grigliato regolare integrato con breaklines o un modello digitale di superficie DSM (Digital Surface Model) che fornisce una descrizione matematica completa della forma di ogni oggetto mediante un insieme di primitive geometriche (piani e quadriche).

Il DTM denso può essere una soluzione più efficiente soprattutto considerate le opportunità offerte dalle tecniche di laser scanning oggi disponibili sia per applicazioni aeree che terrestri.

In entrambi i casi, la produzione di ortofoto comporta algoritmi molto complessi e tempi di calcolo onerosi.

L'ortofoto digitale, rappresentando lo stadio più recente dell'evoluzione delle metodologie di rappresentazione del territorio, si distingue per le seguenti principali caratteristiche:

- immediatezza, attualità e ricchezza del contenuto informativo;
- precisione geometrica paragonabile a quella propria delle cartografie di pari scala;
- flessibilità di gestione;
- economicità;
- efficacia, in quanto fornisce informazioni superiori a quelle ricavabili da una cartografia di pari scala.

L'ortofoto digitale costituisce pertanto uno strumento di grande utilità per lo studio del territorio, la progettazione, la salvaguardia ambientale, la costruzione o l'integrazione e l'aggiornamento della base di riferimento di un Sistema Informativo Territoriale (SIT).

E' particolarmente utile nei progetti di massima delle grandi infrastrutture viarie, nello studio dei bacini e nella pianificazione urbanistica. In quest'ultimo settore la grande scala richiesta può comportare problemi metrici dovuti alla distorsione causata dall'altezza dei fabbricati, sebbene un'attenta progettazione e sfruttamento delle riprese può minimizzare il problema. Dal punto di vista economico, l'ortofoto digitale è meno costosa e può essere prodotta più velocemente rispetto alla carta convenzionale.

Essa può, a seconda dei casi, essere considerata come un documento intermedio con cui sanare le lacune della cartografia classica laddove questa è obsoleta o non ancora pronta; oppure un efficace strumento per l'aggiornamento della carta esistente.

L'ortofoto digitale è, in ultima analisi, un prodotto complesso, che integra in modo efficace le principali caratteristiche delle foto aeree (contenuto informativo) e della carta tradizionale.

La tecnologia che sta alla base della produzione di ortofoto digitali impone un approccio differente rispetto alla classica analisi dei prodotti fotogrammetrici abituali. Il mondo della fotogrammetria digitale sposta infatti l'attenzione verso i processi di scansione ed i trattamenti radiometrici, oltre che sulle usuali valutazioni puramente geometriche.

La qualità dell'ortofoto dipende da quella dei dati di input e dall'elaborazione cui essi sono sottoposti. Un'adeguata pianificazione delle caratteristiche della ripresa ed un'ottimizzazione dei parametri di elaborazione consentono di ridurre radicalmente o eliminare alcuni tipici difetti, come la doppia immagine, limitando le incompletezze e le imprecisioni. La qualità dell'ortofoto digitale è dunque legata a tutte le componenti del ciclo di produzione, che possono essere così sintetizzate a seconda che riguardino:

A) I fotogrammi, quali:

- caratteristiche e qualità della camera fotogrammetrica;
- rapporto d'ingrandimento della foto alla scala finale d'utilizzazione globale (qualitativa e quantitativa) o di utilizzabilità parziale (solo qualitativa);
- gamma di densità dei fotogrammi o delle coppie positive soggette a scansione;
- frequenza di campionamento della scansione, in μm o dpi;
- scelta dei punti d'appoggio.

B) La preparazione del DTM, quali:

- variazioni altimetriche del terreno e dei particolari artificiali;
- densità e precisione dei dati del modello numerico del terreno (DTM).

C) Il trattamento delle immagini e la costruzione dell'ortofotocarta, quali:

- scannerizzazione dei diapositivi originali a 1000/1200 dpi, colore o B/N;
- equalizzazione e bilanciamento radiometrico delle immagini;
- caricamento e orientamento interno ed assoluto dei modelli;
- procedura di ortoproiezione;
- procedura di raddrizzamento;
- dimensione finale del pixel, espresso in unità di superficie sul terreno;

- equilibratura radiometrica dell'immagine;
- mosaicatura delle immagini;
- preparazione del file vettoriale (cornici, curve di livello, toponomastica, legende);
- sovrapposizione del file vettoriale al file raster;
- preparazione dei file e plottaggio ad alta risoluzione su carta fotografica;
- archiviazione su CD Rom.

In generale la fotografia aerea non deve essere ingrandita più di 8-10 volte, per cui, ad esempio, per una scala finale pari a 1:1.000 si deve usare una scala del fotogramma sempre maggiore di 1:10.000. Minore è il rapporto di ingrandimento e migliore sarà la qualità dell'immagine ortofotografica, sia dal punto di vista geometrico che da quello radiometrico, poiché aumentando il rapporto di ingrandimento diminuisce la soglia dei dislivelli tollerabili ai fini di una corretta posizione planimetrica. Comunque, è bene considerare che al di sotto di un ingrandimento di 4 volte non c'è percettibile miglioramento, mentre il costo cresce rapidamente. L'ideale, quindi, per economia e qualità è da considerarsi un rapporto tra i 4 e i 10 ingrandimenti: rapporti maggiori non forniscono ortofoto di qualità elevata a causa delle caratteristiche chimico-fisiche delle pellicole disponibili.

Le variazioni altimetriche accettabili nell'ipotesi di una tolleranza planimetrica prefissata, in genere pari a 0.5 mm alla scala finale dell'ortofoto, dipendono dalla focale della camera e dalla quota relativa di volo. Se ad esempio facciamo riferimento a fotogrammi aerei ripresi con focale di 150 mm da una quota relativa di 6.000 m (scala media 1:40.000) ed utilizzati per produrre ortofoto digitali a scala nominale 1:10.000, il dislivello tollerabile è di poco inferiore a 7 metri. In generale si può assumere che il dislivello che si può assorbire ai margini del fotogramma, cioè nelle condizioni geometriche più critiche, senza apprezzabile errore planimetrico sia:

$$h[\text{m}] \approx 4,5 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{H}{l} \quad [5.1]$$

dove $l = S_0/S_f$ rappresenta il rapporto tra la scala finale dell'ortofoto S_0 e la scala media

delle riprese S_f la quale è legata alla quota relativa di volo H ed alla focale f dalla relazione $S_f = f / H$: il dislivello tollerabile è, quindi, direttamente proporzionale ad H ed f .

Non essendo, però, sempre possibile volare così alto da rendere trascurabili gli errori dovuti alle variazioni altimetriche del terreno, è necessario introdurre ed utilizzare informazioni altimetriche tali da correggere tali errori, e questo è possibile attraverso il processo ortofotografico.

Un aspetto particolarmente importante è la relazione tra la dimensione del pixel di scansione e la scala media della fotografia che viene digitalizzata, in considerazione della scala finale dell'ortofoto richiesta.

Per la risoluzione di scansione nella digitalizzazione, è buona regola adottare un valore in dpi pari approssimativamente a 250 volte il rapporto di ingrandimento (dalla scala della foto alla scala finale dell'ortofoto).

La precisione geometrica dell'ortofoto è legata alla scala dei fotogrammi, a quella dello scanner e a quella del modello numerico del terreno (DTM) e dei punti di appoggio scelti per georeferenziare l'immagine fotografica. In genere, la precisione relativa in un'ortofoto digitale è direttamente legata alla qualità dei punti d'appoggio e del DTM.

Per ortofoto a grande scala i punti d'appoggio sono rilevati direttamente sul terreno; più comunemente i punti usati sono quelli delle reti geodetiche di raffittimento, sulla base dei quali per triangolazione aerea, vengono generati i punti fotogrammetrici necessari per l'orientamento assoluto dei fotogrammi. Se i punti fotogrammetrici usati per la georeferenziazione del fotogramma da rettificare non hanno precisione sufficiente, si possono avere errori significativi e di conseguenza la precisione dell'ortofoto risulta degradata.

Le ortofoto digitali possono realizzarsi utilizzando DTM che variano ampiamente in precisione e contenuto. Le caratteristiche del DTM vanno scelte in funzione della scala dell'ortofoto, della precisione richiesta, della focale della camera, dell'ingrandimento prefissato e dell'accidentalità del terreno che deve essere rappresentato. Nelle zone in cui il terreno cambia rapidamente i punti devono essere ravvicinati; laddove, invece, il terreno è relativamente pianeggiante è sufficiente un reticolo di punti più diradati. Nel caso in cui le variazioni altimetriche presentano discontinuità lineari, come lungo un letto di un fiume, la

vetta di una montagna, ecc., le linee di discontinuità devono essere acquisite in modo tale da assicurare una modellazione che descriva al meglio il terreno.

Il livello di precisione di un DTM per l'ortofotoproiezione può essere calcolato considerando i limiti dello spostamento orizzontale ammesso per un particolare puntiforme chiaramente definito ad una certa scala, che in genere si assume pari a 0.5 mm alla scala della carta. Ad esempio, nel produrre un'ortofoto 1:2.000, uno spostamento nella posizione di un oggetto non dovrebbe superare 1 m sul terreno. Se la camera fotogrammetrica ha una lunghezza focale di 150 mm, si ricava che, ai margini di un foto aerea di dimensioni 23x23 cm, un errore altimetrico nel DTM genera uno spostamento orizzontale equivalente durante l'ortofotoproiezione; se l'ortofoto viene fatta utilizzando solo la parte centrale del fotogramma, l'errore planimetrico indotto può essere ridotto: infatti, più l'area da rettificare è centrata sul fotogramma, maggiore è la tolleranza ammissibile per il DTM. Se, invece, la camera fotogrammetrica ha una focale di 300 mm, gli errori accettabili nel DTM sarebbero raddoppiati. E' evidente, quindi, che una lunghezza focale maggiore consente di tollerare errori più grandi nel DTM rispetto ad una lunghezza focale più corta. In generale il DTM deve avere una densità scelta in funzione della morfologia del terreno e del rapporto d'ingrandimento tra scala finale dell'ortofoto e scala media delle riprese. Un criterio di larga massima per la scelta della densità del grigliato in terreni non particolarmente accidentati può essere il seguente: se l'ingrandimento è tra 4 e 6 volte, può essere adottata una spaziatura da 2 a 8 mm alla scala dell'ortofoto, mentre per ingrandimenti tra 6 e 10 volte è bene scegliere una spaziatura tra 4 e 16 mm.

Le ortofoto digitali in linea di principio non hanno scala, come la cartografia numerica, anche se si introduce il concetto di *scala nominale*, legata alle precisioni conseguibili.

Le scale più adatte, per facilità di leggibilità e di identificazione, sono quelle 1:10.000 e maggiori. E' opportuno, a tal proposito, introdurre il concetto di *scala di fruibilità globale* dell'ortofoto, definita come la scala più grande di visualizzazione alla quale il contenuto metrico risulta di qualità comparabile con quello della corrispondente cartografia convenzionale; è l'equivalente della scala nominale della cartografia numerica.

Esiste comunque una *fruibilità residua* di non trascurabile interesse, legata alla identificabilità e classificabilità dei particolari visibili, e conseguentemente alla dimensione

del pixel; conviene, quindi, definire anche una *scala limite* di visualizzazione dell'ortofoto, pari al valore che consente una leggibilità efficace dei particolari e una loro classificazione, senza tuttavia dar luogo ad informazioni metriche migliori di quelle consentite dalla scala nominale. L'esperienza indica, a tal proposito, che il massimo ingrandimento utilizzabile rispetto alla scala nominale prima definita è pari circa a tre.

5.2 Realizzazione di ortofoto digitali

La produzione di ortofoto digitali si basa essenzialmente nella trasformazione della matrice-immagine dal sistema di coordinate interno alla camera al piano XY del sistema di coordinate terreno. La produzione di un'ortofoto inizia con la definizione della matrice-immagine richiesta nel piano XY del sistema di coordinate terreno, seguita dalla trasformazione del centro di ciascun pixel di questa immagine, ancora inesistente, nel sistema di coordinate della camera (figura 5.1). Per questa trasformazione è necessario conoscere anche le quote Z dei punti del grigliato, calcolabili utilizzando un DTM.

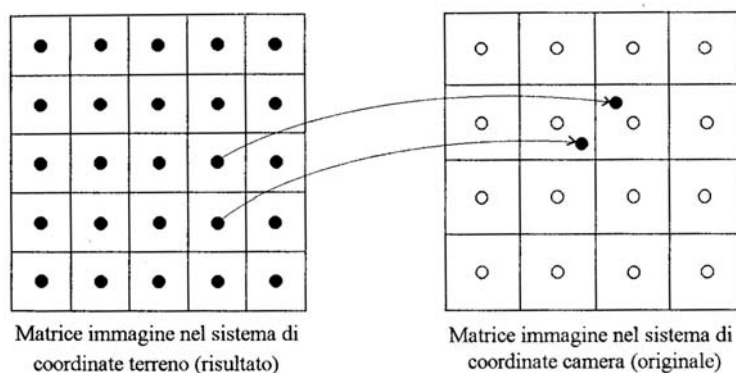


Figura 5.1 Relazione tra le matrici immagine nei sistemi di coordinate terreno ed immagine

Supponendo noti gli orientamenti interno ed esterno dell'immagine digitale originale, da utilizzarsi per l'ortofoto, si possono trasformare i centri dei pixel, dal sistema terreno a quello dell'immagine digitale originale, applicando le equazioni della prospettiva centrale [5.1] che consentono di attuare, inoltre, le correzioni relative alla rifrazione e alla

distorsione dell'obbiettivo.

Per produrre ortofoto occorre assegnare le densità dell'immagine originale ai centri dei pixel trasformati. Il criterio del "*pixel più vicino*", più comunemente usato, adotta come densità del pixel in esame quella del pixel il cui centro è più vicino al punto trasformato. Nello schema di figura 5.1, per esempio, nella posizione 3,4 (riga 3, colonna 4) avremo la densità g_{23} della matrice dell'immagine originale, mentre nella posizione 4,4 la densità g_{22} , e così via. Questo metodo, sebbene richieda tempi di calcolo modesti, presenta lo svantaggio di consentire la traslazione del pixel, nel caso più sfavorevole, di una quantità pari a metà pixel e quindi, nell'ortofoto digitale si possono avere spostamenti relativi fra particolari fino ad un pixel. Per essere sicuri che non vada perso nessun pixel dell'immagine originale, si dovrebbe scegliere un numero di pixel dell'ortofoto digitale considerevolmente maggiore di quello dell'immagine originale stessa: su terreno pianeggiante è sufficiente un'esuberanza di circa il 25%, mentre per terreni con forti dislivelli è consigliabile raddoppiare il numero dei pixel.

Il criterio "*trasformazione bilineare*" rappresenta una valida alternativa al metodo precedente; in questo caso la densità si calcola, a partire da quelle dei quattro pixel più vicini, con una trasformazione bilineare. Questo metodo ha il vantaggio di non produrre discontinuità nelle linee mentre ha il difetto di richiedere un maggiore tempo di calcolo rispetto a quello necessario col metodo del "*pixel più vicino*".

Nelle ortofoto è più importante il contenuto dell'immagine in termini di grigio o di colori piuttosto che l'estrema precisione geometrica: per questo, in genere, ci si accontenta di immagini originali da cui ricavare ortofoto con dimensioni dei pixel di circa 25 μm , superiore a quella usata per la misura digitale di punti fotogrammetrici.

Le ortofoto ottenute per via digitale presentano notevoli vantaggi rispetto a quelle ottenute dalla proiezione fotografica; ne sono esempio:

- la possibilità di ottenere una precisione geometrica migliore grazie alla rappresentazione della superficie del terreno con un grigliato molto fitto;
- la possibilità di migliorare la qualità dell'immagine operando sul contrasto della densità dei grigi e dei colori;
- la possibilità di ottenere un'ottima mosaicatura ai bordi tra immagini adiacenti

- utilizzate per produrre un'unica ortofoto;
- la possibilità di memorizzare l'ortofoto digitale come livello informativo di un GIS (Geographic Information System).

5.2.1 Le immagini digitali

La produzione delle ortofoto e la qualità del prodotto finale dipendono dalla scala di rappresentazione delle foto, che nella fotogrammetria digitale comunemente hanno formato 23 x 23 cm, e dall'intervallo di digitalizzazione scelto. Questo varia con i seguenti criteri:

- l'intervallo di digitalizzazione deve essere di 7 μm se la risoluzione dell'immagine originale è di 50 lp/mm, mentre deve essere 3.5 μm per una risoluzione di 100 lp/mm;
- la dimensione minima del pixel è di 10 μm in quanto una sua ulteriore riduzione aumenta il disturbo dovuto al rumore di fondo;
- le dimensioni dei files devono essere controllate poiché la memoria utilizzata per la memorizzazione delle immagini è fattore importante che influisce sull'elaborato finale; in Tabella 5.1 sono riportati i valori standard per una foto aerea di formato 23 x 23 cm;
- l'incertezza di definizione degli oggetti topografici alle medie scale: questo fattore assume importanza fondamentale qualora l'ortofoto digitale prodotta deve essere inserita in un Geographic Information System GIS. L'incertezza di definizione può rimanere tra i 25 cm ed alcuni metri, in funzione del terreno e della qualità richiesta;
- evitare un forte ingrandimento da foto a ortofoto: questo potrebbe influire negativamente sulla qualità fotografica dell'ortofoto stessa. L'occhio umano, infatti, ha una risoluzione monoculare di circa 0.04 mm alla distanza standard di 25 cm, cui corrisponde una risoluzione di 12.5 paia di linee per mm. Se la foto originale ha una risoluzione di 50 lp/mm, è lecito produrre un ingrandimento di $50/12.5 = 4x$, ottenendo così un'ortofoto di circa 70 x 70 cm.

Il tipo di formato nel quale è prodotta l'ortofoto digitale può, infine, costituire un problema qualora questa non possa essere importata direttamente dal software di visualizzazione e di elaborazione. E' necessario valutare attentamente le dimensioni dei

files: al variare delle dimensioni dei pixel, l'occupazione di memoria varia con legge quadratica inversa, per cui un'ortofoto con pixel doppio di un'altra occupa un quarto di memoria rispetto all'altra, con conseguente decremento dei tempi di gestione. Il vantaggio nell'utilizzare le ortofoto digitali è dunque direttamente correlato al software e all'hardware di visualizzazione ed elaborazione usato.

Intervallo di scansione	Dimensione del file	
	Foto (Colori)	Foto (Bianco e nero)
5 μm	2018 MB	6054 MB
10 μm	504 MB	1513 MB
20 μm	126 MB	378 MB
50 μm	20 MB	61 MB
100 μm	5 MB	15 MB

Tabella 5.1 Dimensione dei files per foto di dimensione 23 x 23 cm.

5.2.2 Generazione di ortofoto con DTM contenenti breaklines

La generazione di ortofoto prevede l'utilizzo di modelli numerici delle quote (DEM), intesi come grigliati di punti all'interno dei quali si può interpolare la quota di un generico punto del terreno, di cui si predefinisce la posizione planimetrica. Nella produzione dell'ortofoto tale interpolazione viene effettuata per definire la quota in corrispondenza del baricentro di ogni pixel dell'ortofoto digitale: note, quindi, le tre coordinate terreno del pixel, è possibile risalire al corrispondente pixel dell'immagine di partenza attraverso un'operazione di prospettivazione. L'interpolazione presume che la superficie del terreno sia continua: ogni brusca discontinuità genera sensibili errori in quota, e conseguenti errori nella posizione planimetrica del pixel ortoproiettato. E' per questo che i tradizionali DEM risultano inadatti alla produzione di ortofoto di manufatti (edifici, viadotti, etc.) che sono delimitati da linee di discontinuità. Un'ortofoto di precisione rappresenta un prodotto fotocartografico in cui vengono corrette anche le deformazioni prospettiche determinate dalle suddette discontinuità. Si possono utilizzare due soluzioni: definire le linee di discontinuità (breaklines), di cui si tiene conto nell'eseguire le operazioni di interpolazione, oppure

utilizzare i cosiddetti "DEM densi", con maglie di pochi metri (anche al di sotto del metro) e quindi con numerosi punti, che richiedono un pesante lavoro d'acquisizione. Nella prima soluzione, quando si tratta di zone urbane, il numero di linee di discontinuità è talmente elevato che la loro definizione si traduce, in pratica, nella restituzione tradizionale della carta, vanificando i vantaggi dell'ortofoto. Lo stesso trattamento dei dati diventa più complesso, tanto da dare luogo ad uno specifico "modello numerico del terreno" (DSM), che rappresenta fedelmente la forma dell'oggetto mediante una serie di superfici piane connesse, che delimitano la volumetria delle strutture emergenti.

In figura 5.2 è mostrata la relazione che sta alla base della generazione di un'ortofoto digitale considerando breaklines. La matrice dell'ortofoto digitale, definita nel piano XY del sistema coordinate-terreno come sopra descritto, ha la dimensione del pixel compresa tra i 25 e i 50 cm nel sistema di coordinate terreno.

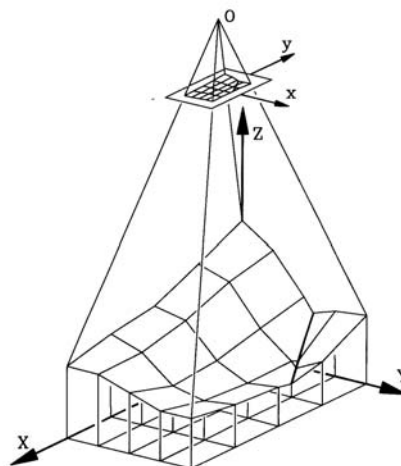


Figura 5.2 Relazione tra il modello digitale del terreno e l'immagine originale

Nel nostro caso, utilizzando un DTM con grigliato di 10 metri si hanno dai 400 ai 1.600 pixel per ogni maglia. Come si può intuire il numero dei pixel dell'ortofoto è largamente superiore a quello delle maglie del modello del terreno; questo ci dà la possibilità di generare ortofoto in due differenti modalità.

La prima, prevede la possibilità di interpolare le altezze Z del centro di ogni pixel, e quindi calcolare i punti corrispondenti nella matrice dell'immagine originale con le equazioni di collinearità con lo svantaggio, però, di dover applicare le [1.5] per ogni pixel dell'ortofoto.

La seconda soluzione, più economica, è chiamata “*metodo dell’ancoraggio*”: solo i vertici delle maglie del grigliato, vengono trasformati nella matrice dell’immagine originale tramite le [1.5] mentre i rimanenti punti interni sono interpolati linearmente. La figura 5.3 mostra lo schema di funzionamento per una maglia quadrata del grigliato in cui sono note le coordinate \overline{XY} dei quattro punti ancorati nel sistema locale, mentre x, y sono le coordinate dell’immagine ottenute attraverso una trasformazione bilineare del tipo:

$$\begin{aligned} x &= b_{01} + b_{11}\overline{X} + b_{21}\overline{Y} + b_{31}\overline{XY} \\ y &= b_{02} + b_{12}\overline{X} + b_{22}\overline{Y} + b_{32}\overline{XY} \end{aligned} \tag{5.2}$$

dove i coefficienti b_{ik} si determinano dalle coordinate dei quattro punti ancorati:

$$\begin{pmatrix} b_{01} \\ b_{11} \\ b_{21} \\ b_{31} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1/\Delta & 1/\Delta & 0 & 0 \\ -1/\Delta & 0 & 1/\Delta & 0 \\ 1/\Delta^2 & -1/\Delta^2 & -1/\Delta^2 & 1/\Delta^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} \tag{5.3}$$

$$\begin{pmatrix} b_{02} \\ b_{12} \\ b_{22} \\ b_{32} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1/\Delta & 1/\Delta & 0 & 0 \\ -1/\Delta & 0 & 1/\Delta & 0 \\ 1/\Delta^2 & -1/\Delta^2 & -1/\Delta^2 & 1/\Delta^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{pmatrix}$$

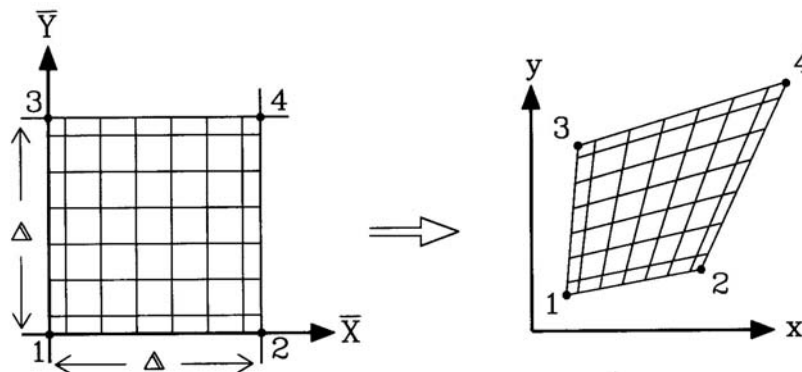


Figura 5.3 Trasformazione di una maglia quadrata del grigliato con quattro punti ancorati.

La figura 5.4 mostra il caso di una maglia triangolare in cui le equazioni costituiscono una trasformazione affine dove i coefficienti si determinano, come nel caso precedente, dalle coordinate dei punti ancorati, secondo le [5.5]:

$$\begin{aligned} x &= c_{01} + c_{11}\bar{X} + c_{21}\bar{Y} \\ y &= c_{02} + c_{12}\bar{X} + c_{22}\bar{Y} \end{aligned} \tag{5.4}$$

dove i coefficienti c_{ik} si determinano dalle coordinate dei quattro punti ancorati:

$$\begin{pmatrix} c_{01} \\ c_{11} \\ c_{21} \end{pmatrix} = \frac{1}{\bar{X}_2\bar{Y}_3 - \bar{X}_3\bar{Y}_2} \begin{pmatrix} \bar{X}_2\bar{Y}_3 - \bar{X}_3\bar{Y}_2 & 0 & 0 \\ \bar{Y}_2 - \bar{Y}_3 & \bar{Y}_3 & -\bar{Y}_2 \\ \bar{X}_3 - \bar{X}_2 & -\bar{X}_3 & \bar{X}_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \tag{5.5}$$

$$\begin{pmatrix} c_{02} \\ c_{12} \\ c_{22} \end{pmatrix} = \frac{1}{\bar{X}_2\bar{Y}_3 - \bar{X}_3\bar{Y}_2} \begin{pmatrix} \bar{X}_2\bar{Y}_3 - \bar{X}_3\bar{Y}_2 & 0 & 0 \\ \bar{Y}_2 - \bar{Y}_3 & \bar{Y}_3 & -\bar{Y}_2 \\ \bar{X}_3 - \bar{X}_2 & -\bar{X}_3 & \bar{X}_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix}$$

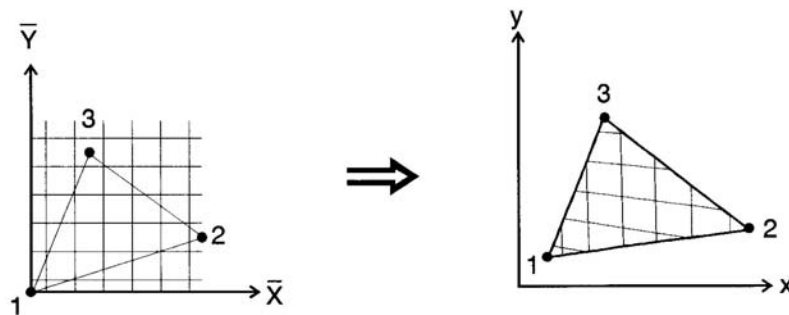


Figura 5.4 Trasformazione affine nel caso di maglia triangolare con tre punti ancorati.

Noti i coefficienti b_{ik} e c_{ik} attraverso le [5.2] e le [5.4] si possono calcolare i punti corrispondenti nell'immagine originale del centro di ogni pixel dell'ortofoto.

Il metodo dell'ancoraggio risulta meno preciso di quello che prevede l'uso delle equazioni di collinearità: la figura 5.5 mostra tale errore d nel sistema di coordinate immagine, in

funzione del passo della maglia Δ , anch'esso in coordinate immagine, e della pendenza del terreno (%).

E' bene notare come nella trattazione fatta la matrice dell'immagine si trova nel sistema xy di coordinate della camera mentre in realtà il sistema è quello $x'y'$ dello scanner: in questo modo i parametri relativi alla trasformazione affine possono essere determinati dalle coordinate delle marche fiduciali.

I toni di grigio vengono assegnati attraverso il principio "del più vicino" o attraverso una trasformazione lineare o anche interpolazioni di ordine superiore con cui si raggiunge una qualità superiore.

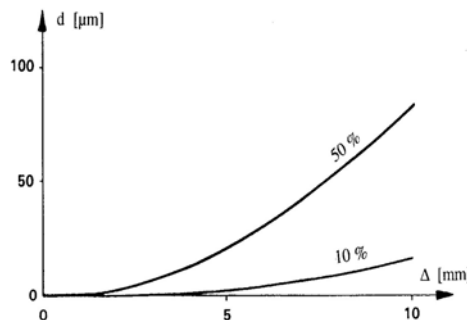


Figura 5.5 Errore d della trasformazione bilineare in funzione del passo della maglia Δ e della pendenza del terreno espressa in % (Foto 23 x23 cm; Distanza principale =150 mm).

5.2.3 Generazione di ortofoto con DTM contenenti edifici

Si consideri l'edificio rappresentato nella figura 5.6. Se il DTM descrive solamente la superficie liscia del terreno, la proiezione del punto Q dà origine alla posizione errata Q_0' anziché restituire la corretta posizione Q_0 che, inoltre, coincide con l'ortoproiezione P_0 del punto P . L'esempio pratico in figura 5.6 mostra questo effetto: il piede dell'edificio è rappresentato in posizione corretta, mentre il tetto dell'edificio è spostato in posizione errata.

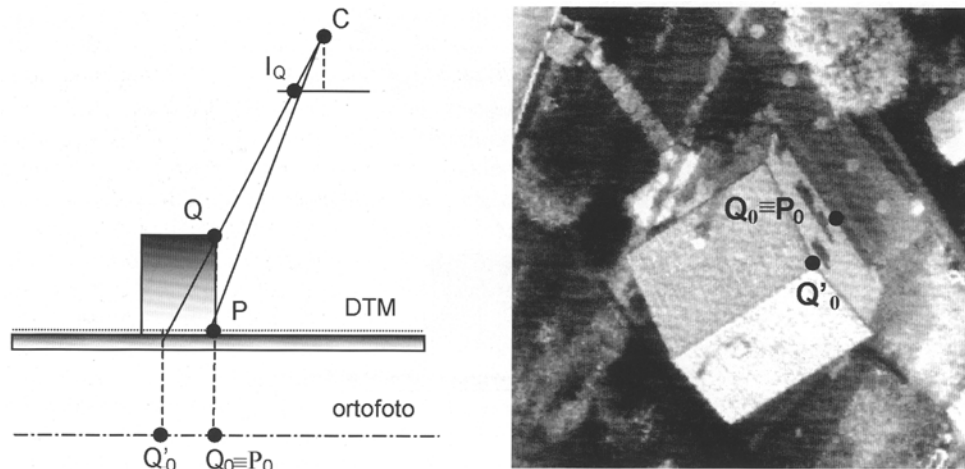


Figura 5.6 Ortoproiezione con descrizione errata della forma ed esempio pratico (Dequal, 2001).

Adesso si consideri il caso in cui anche la casa sia descritta dal DTM (figura 5.7). Il punto Q è rappresentato correttamente in Q_0 ma, se si usa una ortoproiezione tradizionale, si perde il punto P (nascosto dal punto Q a causa della geometria di proiezione) sostituito dal punto visibile Q raddoppiato (in P_0) sull'ortofoto risultante, come mostrato nell'esempio pratico di figura 5.6. In ogni caso, l'immagine dell'area defilata non è disponibile sul fotogramma considerato e dovrebbe essere estratta, dagli altri fotogrammi disponibili. Il raddoppio dell'immagine genera comunque confusione e va quindi evitato.

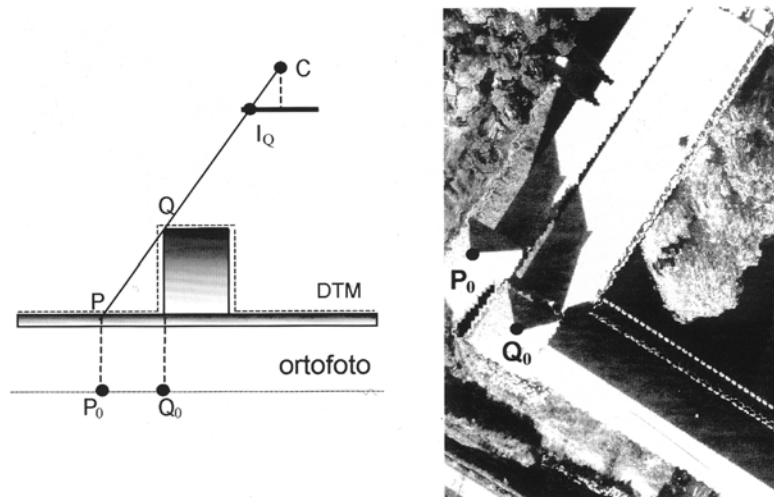


Figura 5.7 Ortoproiezione con aree nascoste ed esempio pratico (Dequal, 2001).

Considerando questi due effetti, si può stabilire che, per generare un'ortofoto precisa e completa di una superficie discontinua, sono richieste:

- la corretta descrizione della superficie;
- la disponibilità di più immagini in cui siano rappresentati tutti i dettagli dell'oggetto.

Se sono disponibili differenti immagini prospettiche (come mostrato in figura 5.8), occorre utilizzare specifiche precauzioni nell'uso dei raggi di proiezione per ogni punto, al fine di evitare l'effetto di raddoppio dell'immagine. Per esempio, il punto Q_0 deve essere ottenuto dall'immagine I_Q e il punto P_0 da I_P .

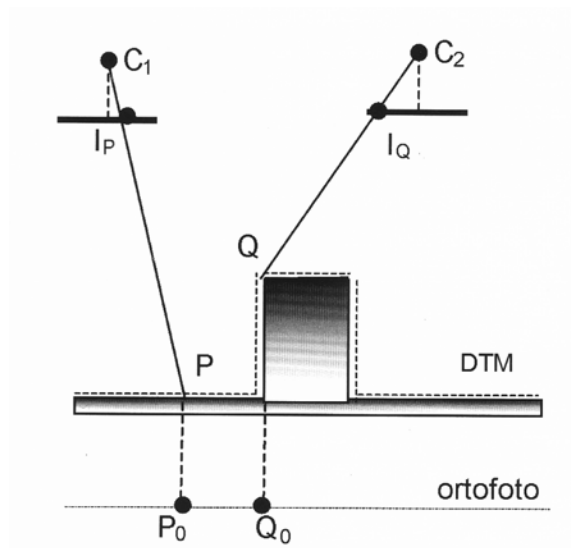


Figura 5.8 Generazione di ortofoto di precisione da immagini multiple.

La descrizione dettagliata di una superficie tridimensionale discontinua può essere ottenuta seguendo differenti approcci.

Una prima possibile soluzione tende a minimizzare il numero di punti richiesti. Ciò può essere ottenuto mediante un grigliato regolare di punti, integrato con breaklines, presenti in numero sufficiente per descrivere correttamente le discontinuità della superficie. Se si considera un'area urbana o un oggetto architettonico complesso, è chiaro che la descrizione di tutte le linee di discontinuità equivale alla restituzione dell'intera area: la indicata misura delle breaklines (figura 5.9) non può essere automatizzata e risulta, pertanto, onerosa in termini di tempo e di costi.

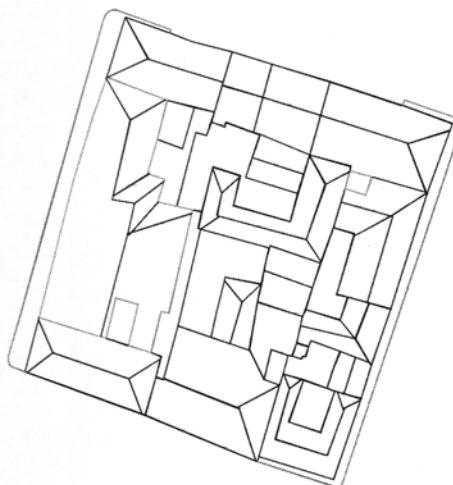


Figura 5.9 Breaklines in un centro urbano.

Una seconda soluzione consiste nella definizione di un modello digitale di superficie (DSM) per modellizzare l'oggetto complesso. Si definiscono il triangolo piano e il quadrilatero piano come le primitive geometriche necessarie per descrivere l'oggetto e si usa un database relazionale per gestire questo sofisticato strumento di interpolazione. Nell'esaminare il processo di acquisizione dei dati e di costituzione di un adeguato DSM supponiamo di avere a disposizione un modello del terreno che comprende le breaklines, ma non gli edifici (figura 5.10). Durante la scansione del terreno sarebbe auspicabile considerare separatamente i punti che generano il terreno (ground points), da quelli che costituiscono le superfici delle costruzioni (building points). La modellazione del terreno sotto il costruito non è possibile a meno che non si disponga di misure fatte prima della costruzione degli edifici. Questi vengono rappresentati a partire dal tetto che, costituito da triangoli, è modellato tramite un certo numero di punti misurati (1-6). Le verticali passanti attraverso i punti di gronda intersecano il terreno in un certo numero di punti (7-10) le cui coordinate XYZ permettono la modellazione delle pareti, approssimate con superfici trapezoidali. La creazione di un DSM non può essere automatizzata sebbene la gestione di una tale strumentazione richiede complessi programmi ed elevati tempi di calcolo.

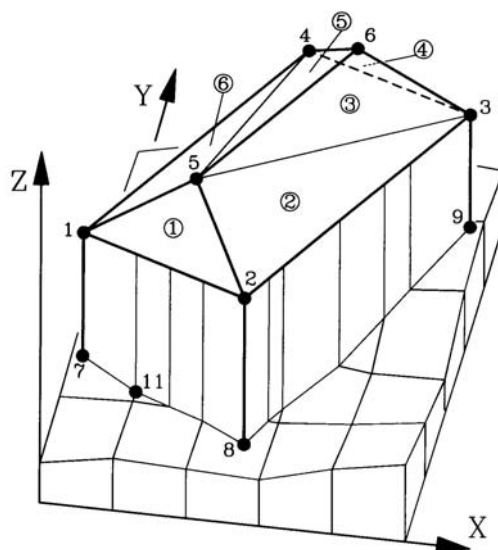


Figura 5.10 DTM con modellazione di una casa attraverso triangoli e trapezi.

Nel caso di un ponte si procede analogamente: occorre identificare i punti di intersezione dei profili superiore ed inferiore dello stesso con il modello del terreno.

In alternativa all'uso delle breaklines, si può realizzare un DTM "denso" con un grigliato di punti molto fitto: si rimanda l'analisi dei DDTM (Dense Digital Terrain Model) al paragrafo 5.2.5.

5.2.4 Generazione di ortofoto di precisione

Amhar e Ecker proposero nel 1996 una procedura per produrre un'ortofoto di precisione, progettata per l'ortoproiezione in ambito urbano, basata su un DSM gestito per mezzo di un database relazionale. Essi proposero di utilizzare le immagini per separare automaticamente il suolo dagli edifici, generando l'ortofoto in due passi successivi: prima il terreno, poi i tetti. I risultati di questi due passi sono uniti, poi, in una singola ortofoto digitale. Le aree nascoste, invece, sono ridotte o eliminate combinando ortofoto della stessa zona generate con immagini differenti.

Una più generale soluzione, proposta dal prof. S. Dequal, prevede di assumere come dati in ingresso un DTM denso, generato mediante strumentazione laser a scansione, e un serie di immagini digitali orientate, contenenti l'area che deve essere ortoproiettata.

Si consideri, a titolo esemplificativo, l'edificio mostrato in figura 5.11. Nell'immagine prospettica, lungo un raggio di proiezione, il punto più alto copre il punto sottostante. Quindi, la procedura funziona operando dal punto più alto a quello più basso.

La procedura inizia dal punto R. Si suppone, per semplicità, che l'immagine sia in toni di grigio. L'estensione alle immagini a colori è immediata. Si individua innanzitutto il pixel che contiene la miglior registrazione del valore di grigio del punto, scegliendo l'immagine che ha il punto principale più vicino al punto considerato (immagine I1). Per evitare di avere una duplicazione dell'immagine (figura 5.7), questo pixel deve essere inibito: si crea, pertanto, una immagine *flag*, dove ogni pixel contiene la quota utilizzata per l'ortoproiezione del pixel sull'ortofoto da realizzare. Un'immagine del punto R è anche presente sull'immagine I2 e, per lo stesso motivo, questo pixel deve essere inibito, anche se non è stato utilizzato (I1 è stata scelta per R). Si proietta, poi, con le stesse modalità il punto S che risulta presente solo in I1. Quando la procedura giunge al punto P, si accorge che il pixel sull'immagine I1 è già stato usato per il punto R. L'immagine *flag* inibisce un ulteriore utilizzo di questo pixel, in quanto la quota memorizzata è maggiore della quota del punto P. La procedura, allora, tenta l'estrazione del tono di grigio dall'immagine I2: questo pixel non è inibito e rende possibile la proiezione del punto R.

Quando si passa a proiettare il punto Q, il primo tentativo comporta l'utilizzo del pixel corrispondente in I1, che è già stato usato per il punto S: il *flag* inibisce la lettura del valore radiometrico. Il secondo tentativo comporta l'utilizzo del pixel corrispondente in I2, che è già stato usato per il punto R. In questo caso, non essendo disponibili altre immagini, l'ortoproiezione del punto Q non può essere definita: esso viene rappresentato mediante un valore convenzionale (ad esempio bianco).

Questo semplice esempio descrive tutti i casi che possono presentarsi durante la procedura di ortoproiezione.

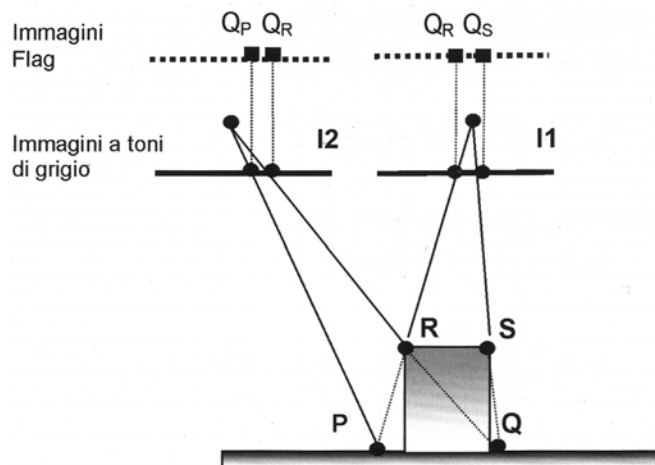


Figura 5.11 Schema della procedura di ortoproiezione.

ACCORTHO (*ACCurate ORTHOprojection*) è un esempio di software di semplice utilizzo in cui è stata implementata la procedura descritta con cui produrre ortofoto rigorose di aree urbane o di oggetti architettonici complessi, mediante procedure interamente automatica. Esso è basato sull'utilizzo di un DEM denso, acquisito con laser scanner o prodotto a partire da una cartografia numerica tridimensionale preesistente, ed un insieme di immagini digitali orientate. Disponendo, quindi, di una copertura fotografica multi-immagine, quantomeno stereoscopica, si ricercano le immagini che contengono il pixel corrispondente alla posizione plano-altimetrica di ogni pixel dell'ortofoto. A partire dall'insieme dei fotogrammi orientati che contengono la porzione di terreno da ortoproiettare ed il relativo DEM, viene eseguita la selezione automatica delle immagini contenenti la zona interessata all'interno del blocco fotogrammetrico e l'interpolazione del DEM per attribuire ad ogni pixel dell'immagine ortoproiettata la quota corrispondente. Per ogni pixel dell'ortofoto si crea un vettore con i nomi delle immagini che contengono il pixel corrispondente, ordinati considerando la distanza planimetrica tra il centro di proiezione dell'immagine ed il pixel (in ordine crescente). Questo viene prospettivizzato sulla prima immagine selezionata e si verifica se il pixel individuato è già stato utilizzato per una quota maggiore a quella del pixel in esame. In caso affermativo esso viene prospettivizzato sulle successive immagini selezionate; altrimenti, si interpola il valore radiometrico da associare al pixel in esame e si registra la quota di questo pixel in una matrice di servizio associata all'immagine scelta.

Qualora nessuna delle immagini selezionate risulti utilizzabile, al pixel dell'ortofoto viene associato un valore convenzionale (vuoto); questa eventualità si verifica quando il particolare ricercato risulta defilato in tutte le immagini disponibili.

Si analizzano di seguito alcuni procedimenti per inglobare edifici e ponti nel DTM per la creazione di ortofoto digitali.

5.2.4.1 Trasformazione diretta dell'immagine

Nella trasformazione diretta si determina la posizione XY di ogni punto dell'ortofoto corrispondente ai pixel dell'immagine originale. Il raggio, definito nello spazio dal pixel dell'immagine orientata e il centro di proiezione, interseca il modello del terreno in cui è stato integrato l'edificato. Si ottiene, così, un set di coordinate del terreno XY di tutti gli elementi che costituiscono gli oggetti contenuti in un pixel dell'immagine originale; questi costituiscono una matrice bidimensionale avente le dimensioni dell'immagine originale.

Nota la matrice XY , si possono localizzare i pixel dell'immagine originale che approssimano la posizione del pixel dell'ortofoto; con questi, mediante un'interpolazione dei toni di grigio, ricavare le coordinate X_0Y_0 del punto ricercato insieme alle coordinate dei quattro punti più vicini (figura 5.12). Il valore della tonalità di grigio g_0 può essere calcolata con una trasformazione bilineare nelle direzioni X e Y a partire dal valore g_1 a g_4 .

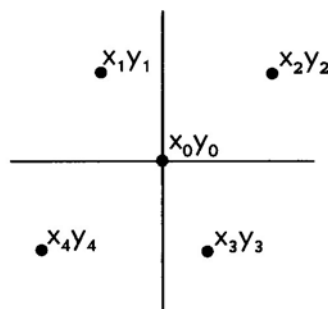


Figura 5.12 Posizione del pixel dell'ortofoto (X_0, Y_0) e dei quattro pixel "vicini" dell'immagine originale.

La trasformazione diretta, pur essendo un metodo molto semplice, ha alcuni svantaggi:

- richiede un elevato numero di calcoli, che possono essere ridotti tramite l'utilizzo di immagini piramidali, o procedure analoghe;
- richiede una lunga analisi delle matrici XY per eliminare il problema delle zone d'ombra;
- nell'interpolazione dei toni di grigio si possono avere punti appartenenti a superfici differenti e quindi dover ricorrere a procedure molto complesse.

5.2.4.2 Trasformazione indiretta dell'immagine

Nella trasformazione indiretta dell'immagine i raggi vengono tracciati per il centro di proiezione di ogni pixel dell'ortofoto; si individuano, così, i punti di intersezione tra i raggi e la superficie del modello. Se risulta più di un'intersezione allora il pixel dell'ortofoto giace in una zona d'ombra, altrimenti le coordinate XY dell'immagine originale, generalmente ricavate mediante interpolazione, sono inserite nella matrice dell'immagine. Tutti i pixel dell'immagine originale, esclusi quelli al di sotto dei ponti, forniscono informazioni per la trasformazione.

La qualità del procedimento dipende dalle caratteristiche del modello del terreno, la cui struttura deve essere tale da impedire le intersezioni multiple. La ricerca dei punti di intersezione può essere limitata alle due dimensioni, determinando l'intersezione tra il piano passante per il centro di proiezione e contenente il pixel dell'ortofoto in esame, con il modello del terreno in esame.

5.2.4.3 Metodo combinato con matrice indice

Questo metodo si basa sulla possibilità di avere il modello digitale degli edifici distinto da quello del terreno; se esiste una componente comune, i due vanno precedentemente separati.

La caratteristica di questo metodo è quella di creare una matrice indice, delle dimensioni dell'immagine originale, contenente tre diversi tipi di codice (figura 5.13):

- 0 per i pixel del terreno;
- 1 per i tetti degli edifici;
- 2 per i muri verticali.

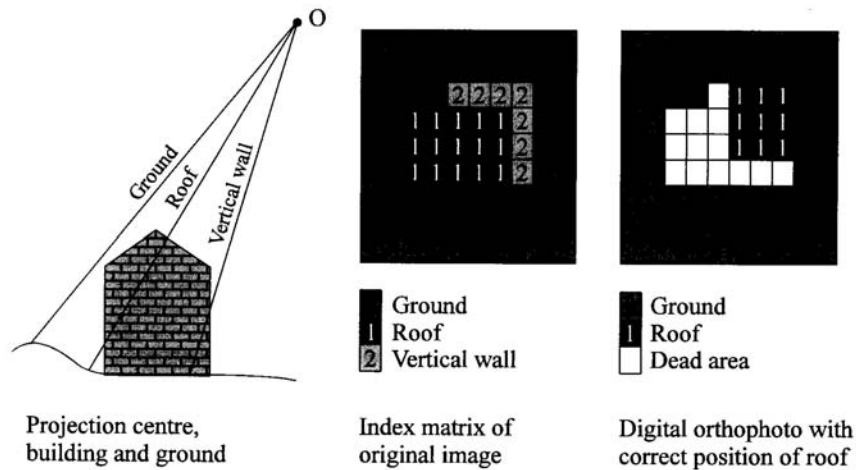


Figura 5.13 Creazione di un ortofoto considerando la matrice indice.

Per definire la matrice indice occorre:

- definire la matrice, assegnando il valore 0 a tutti gli elementi;
- trasformare i poligoni dei tetti e dei muri verticali nell'immagine originale;
- inserire nelle corrispondenti regioni della matrice i codici 1 per i tetti e 2 per le pareti verticali: è necessario che le zone considerate siano visibili;
- generare l'ortofoto dei tetti con il metodo della trasformazione indiretta dell'immagine;
- cancellare i pixel aventi codice 1,2 dall'immagine originale;
- generare l'ortofoto dal modello digitale del terreno considerando l'immagine maschera come descritto nel Paragrafo 5.3.2;
- combinare l'ortofoto dei tetti con quella del terreno: le zone d'ombra rimangono bianche (figura 5.13).

Questo metodo presenta il grande vantaggio di poter riempire le zone d'ombra mediante le informazioni ottenute da altre immagini aventi diversa angolazione a condizione, però, che

gli edifici non siano troppo ravvicinati e che le ortofoto siano a piccola-media scala in modo tale che le zone d'ombra non giochino un ruolo significativo.

5.2.5 Generazione di ortofoto a grande scala con DEM denso (DDTM)

Un DTM denso, o DDTM (Dense Digital Terrain Model), è costituito da un grigliato di punti molto denso in cui la dimensione della singola maglia può variare da 1 m a 1 cm, in funzione dell'applicazione aerea o architettonica e della scala di rappresentazione dell'ortofoto. L'elevata densità di punti presenti rende corretta l'interpolazione all'interno della singola maglia anche senza ricorrere alle breaklines (figura 5.14).

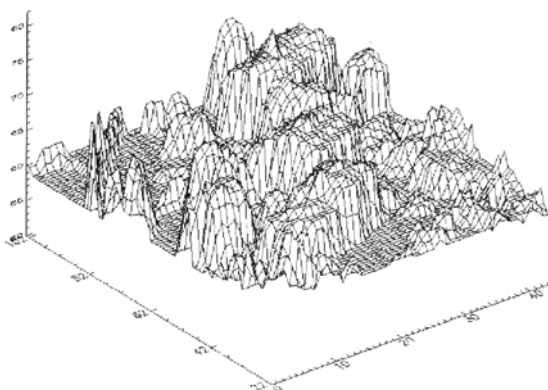


Figura 5.14 DTM denso.

E' possibile individuare quattro differenti procedure per la misurazione di un DTM denso.

La prima consiste in una restituzione fotogrammetrica manuale, soluzione inaccettabile in quanto troppo lunga e costosa. Può però essere presa in considerazione solo per piccole aree, o per integrazione degli altri metodi.

La seconda possibilità si basa sull'uso di una procedura automatica per la generazione di DTM mediante algoritmi di autocorrelazione. Come noto in letteratura, questi metodi hanno, generalmente, una percentuale media di successo dell'80%: la parte restante deve essere misurata manualmente dall'operatore. Questo valore medio, però, diminuisce drammaticamente nel caso di superfici discontinue in cui sono presenti parecchie zone

defilate: in questi casi, sul modello non sono individuabili i punti omologhi e l'algoritmo entra in crisi.

Una terza possibilità per la generazione di DDTM prevede l'utilizzo di raffinate tecniche di interpolazione applicate alla cartografia numerica tridimensionale dell'oggetto in questione. Infatti, una carta numerica realizzata mediante tecniche fotogrammetriche secondo le regole presenti nei moderni capitolati d'appalto costituisce una descrizione tridimensionale del tessuto urbano e delle infrastrutture presenti sul territorio: oltre all'altimetria cosiddetta "liscia" rappresentata mediante punti quotati e curve di livello, le entità sono generalmente descritte mediante vertici tridimensionali, gli edifici sono definiti mediante la quota di gronda, mentre le strade e infrastrutture viarie (ponti, viadotti, etc.) sono rappresentati mediante tronchi costituiti da aree chiuse tridimensionali. Questi elementi, seppur semplificati permettono di ricostruire un DDTM che descrive correttamente le discontinuità presenti sul territorio. A tale scopo è stato sviluppato un software in Visual Fortran, in grado di generare automaticamente un DDTM di passo definito, a partire da una cartografia numerica a grande scala; esso riconosce le entità areali sulla base della codifica e le utilizza nel modo corretto per le fasi di interpolazione.

Una quarta possibilità deriva dalle recenti tecniche di generazione di un DTM denso mediante l'uso del "*laser scanner aviotrasportato*", che rappresenta una nuova tecnica di acquisizione efficiente ed economica per realizzare DEM ad alta densità. Questo nuovo strumento di rilievo è in grado di rilevare migliaia di punti in pochi secondi con elevata precisione. Questa tecnologia, basata su strumentazione elettro-ottica, utilizza una serie di impulsi ad alta intensità diretti contro l'oggetto per misurarne la distanza dallo strumento stesso. Nello stesso tempo si misurano le due direzioni angolari in modo da determinare le coordinate tridimensionali di ciascun punto. Da questi punti così acquisiti può essere ricostruito il modello tridimensionale dell'oggetto. Sono già disponibili sul mercato strumenti laser scanner sia per applicazioni aeree che per applicazioni terrestri.

La griglia generata dal laser scanner è irregolare in quanto la spaziatura in direzione X e Y dipende dalla direzione e dalla distanza tra lo strumento e il punto misurato: è possibile variare la densità dei punti misurati semplicemente cambiando la distanza di acquisizione.

Il processo è completamente automatico e la generazione del DTM (acquisizione ed elaborazione dei dati) è facile e veloce; prima di poter utilizzare il DTM generato da laser scanner, però, esso deve essere pre-processato in modo da individuare outlier e gross errors, presenti specialmente nelle acquisizioni aeree, e regolarizzato per semplificarne la gestione dei dati. Il laser scanner, in conclusione, può essere considerato una soluzione ottimale per la produzione di un DTM denso, sia dal punto di vista tecnico che economico. Attraverso confronti eseguiti tra le ortofoto prodotte con questa procedura e i dati metrici disponibili si è vista la possibilità di produrre ortofoto di precisione di ambiti urbani fino alla scala 1:1.000.

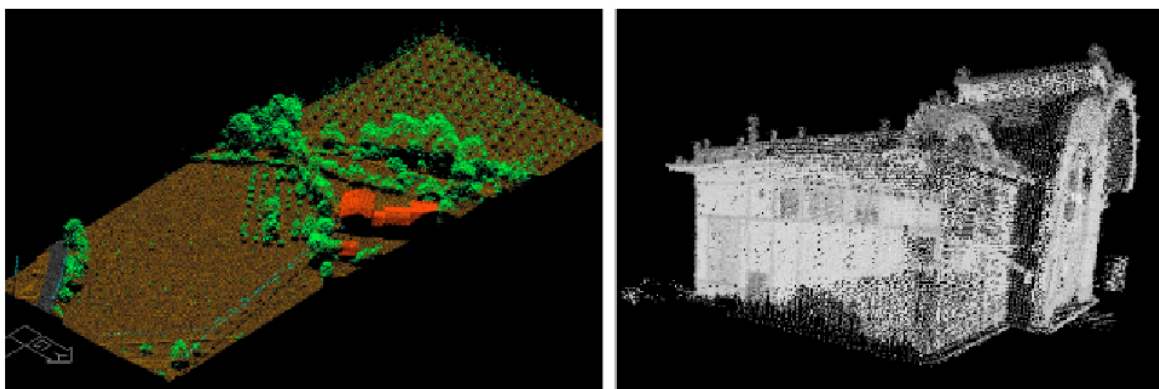


Figura 5.14 Esempi di DTM generato con laser scanner aereo e terrestre.

5.3 Stereo-ortofoto

La stereofotogrammetria risolve molte delle lacune presentate dalle ortofoto digitali, prima tra tutte la difficoltà di interpretare la morfologia della superficie rappresentata.

La possibilità di impiegare le ortofoto per permettere una visione stereoscopica (da qui il nome di stereo-ortofoto), permette sostanzialmente di semplificare notevolmente l'interpretazione del territorio. Gli impieghi sono molteplici e vanno dalla super-imposizione vettoriale e raster, alla possibilità di interpretare il territorio tridimensionalmente.

Con il termine stereo-ortofoto s'intende la visualizzazione stereoscopica dell'ortofoto. Il principio teorico di generazione di questa rappresentazione si basa sulla possibilità che l'immagine provvista di DTM può essere considerata un oggetto tridimensionale. Di conseguenza, definito un sistema di riferimento arbitrario, per ogni oggetto 3D è possibile generare un numero qualsiasi di viste prospettiche. In particolare, se si generano 2 viste prospettiche, caratterizzate da un certo rapporto B/H, è possibile generare una visione stereoscopica confortevole. Il sistema di puntamento può prevedere solo spostamenti planimetrici, poiché la quota può essere ottenuta direttamente dal DTM. Il fatto che non sia più necessaria la messa in quota del cursore da parte dell'utente, e che non si debbano eseguire procedure di orientamento per ottenere una visione stereoscopica, rende la stereo-ortofoto uno strumento accessibile anche a persone non esperte. Le stereo-ortofoto, inoltre, hanno la caratteristica di non dipendere dalla geometria del volo che ha generato le ortofoto di partenza: la stereoscopia può essere generata secondo una qualsiasi direzione.

Il campo d'applicazione della stereoscopia comprende quello di competenza delle ortofoto; ad esso si aggiunge la possibilità di impiegare le stereo-ortofoto digitali insieme ad altri dati (super-imposizione) al fine di specificarne le operazioni d'interpretazione, e la capacità di visualizzare carte tematiche e/o raster georeferenziati (ad esempio la CTR) in modo da ottenere uno strumento di analisi del territorio tridimensionale a tutti gli effetti. L'elevata semplicità ed il grande contenuto informativo delle stereo-ortofoto rendono tale strumento ideale nella progettazione di opere sul terreno quali: strade, dighe, opere fluviali.