

## FOTOGRAMMETRIA DA SATELLITE

In termini strettamente disciplinari tutte le tecniche che prevedono il rilievo di proprietà fisiche di un oggetto senza un contatto diretto con l'oggetto stesso e utilizzando la registrazione delle onde elettromagnetiche emesse e/o riflesse sono classificate tecniche di telerilevamento.

In questo senso anche la fotogrammetria e il LiDAR rappresentano tecniche di telerilevamento in quanto si prefiggono di determinare la forma geometrica dell'oggetto utilizzando la registrazione, sotto forma di immagini digitali, delle onde elettromagnetiche comprese nello spettro del visibile o di alcune bande dell'infrarosso.

Nella letteratura specifica di settore con il termine di telerilevamento si intendono tutte quelle tecniche che utilizzando la registrazione delle onde elettromagnetiche emesse e/o riflesse da un oggetto per determinare altre proprietà fisiche.

Il telerilevamento satellitare e aereo costituisce un'importante fonte di dati, necessaria per descrivere il territorio e monitorare diversi parametri ambientali. I dati telerilevati, oggi facilmente disponibili, consentono infatti di ricavare valide informazioni qualitative relative alla superficie terrestre esaminata, oltre che informazioni di tipo geometrico. In particolare, dati satellitari con risoluzione geometrica medio-bassa e buona risoluzione spettrale, caratterizzati da frequente ripetitività temporale, vengono efficacemente applicati per la descrizione e il monitoraggio del territorio. Essi forniscono a basso costo un importante strumento di supporto per le politiche di pianificazione ambientale.

I dati satellitari ad alta e altissima risoluzione, invece, grazie al contenuto metrico, forniscono le basi per la formazione di informazione geografica a media e grande scala, compatibile con i supporti elaborati a partire alla filiera aerofotogrammetrica.

Nel seguito, saranno richiamati molto brevemente i principi base del telerilevamento e le principali caratteristiche dei dati multispettrali aerei e satellitari dedicati alle applicazioni ambientali e cartografiche e infine descritte le abituali procedure di trattamento per l'estrazione delle informazioni in essi contenute.

### **Principi**

Con il termine telerilevamento si fa qui riferimento alle tecniche di rilievo della superficie terrestre tramite strumentazione posta a bordo di aerei o satelliti e non a contatto diretto con l'oggetto da rilevare.

Le caratteristiche misurate dai sensori di telerilevamento sono l'energia elettromagnetica emessa e riflessa dalla superficie terrestre. L'energia elettromagnetica generata da una opportuna sorgente raggiunge l'oggetto osservato e interagisce con esso (avvengono fenomeni di riflessione, diffusione, assorbimento o trasmissione) e di conseguenza si modifica. Tale radiazione viene infine misurata e registrata da un sensore remoto.

Il risultato è solitamente immagazzinato sotto forma di immagini. Analizzando e interpretando tali misure di campo elettromagnetico è possibile risalire alle proprietà di interesse dell'oggetto.

I sensori di acquisizione sono dei sistemi ottico-elettronici in grado di rilevare la radiazione elettromagnetica diffusa o emessa dalla superficie terrestre (emersa o marina) e dall'atmosfera. In particolare, rilevano radiazione solare riflessa (o meglio, diffusa) nel visibile, vicino infrarosso e infrarosso medio e radiazione emessa (emissione termica) nell'infrarosso medio, infrarosso termico e lontano o nelle microonde. Inoltre, appartiene al dominio del telerilevamento anche la capacità di rilevare radiazione riflessa prodotta da sorgenti artificiali, ad esempio nelle microonde (è il caso dei RADAR).

Secondo la modalità dell'acquisizione, si possono suddividere i sensori disponibili in attivi e passivi. I sensori passivi dipendono da una sorgente esterna di energia. Le principali regioni o bande dello spettro elettromagnetico usate nel telerilevamento passivo sono elencate nella Tabella seguente:

Nome	Intervallo di lunghezza d'onda	Sorgente di radiazione	Misurazione
Visibile (V)	0,4 – 0,7 $\mu\text{m}$	Solare	Radiazione solare riflessa
<i>Near InfraRed</i> (NIR)	0,7 – 1,1 $\mu\text{m}$	Solare	Radiazione solare riflessa
<i>Short Wave InfraRed</i> (SWIR)	1,1 – 1,35 $\mu\text{m}$ 1,4 – 1,8 $\mu\text{m}$ 2 – 2,5 $\mu\text{m}$	Solare	Radiazione solare riflessa
<i>Mid Wave InfraRed</i> (MWIR)	3 – 4 $\mu\text{m}$ 4,5 – 5 $\mu\text{m}$	Solare Termica	Radiazione solare riflessa Radiazione termica emessa
<i>Thermal InfraRed</i> (TIR)	8 – 9,5 $\mu\text{m}$ 10 – 14 $\mu\text{m}$	Termica	Radiazione termica emessa
Microonde, radar	1 mm – 1 m	Termica (sistemi passivi) Artificiale (sistemi attivi)	Radiazione termica emessa Rugosità

Queste particolari regioni spettrali sono d'interesse perché ad esse corrispondono le finestre atmosferiche, cioè quelle zone dello spettro elettromagnetico attraverso le quali la radiazione solare riesce a raggiungere la superficie terrestre senza subire assorbimenti. Al di fuori di queste finestre, i vari componenti dell'atmosfera sono in grado di assorbire la radiazione.

Un altro motivo d'interesse per queste parti dello spettro è legato alla natura dei sensori disponibili, che consentono di acquisire solo determinate bande spettrali. Come si può osservare, nelle bande V, NIR e SWIR (da 0,4  $\mu\text{m}$  ai 3  $\mu\text{m}$  circa) la radiazione registrata dal sensore ha origine dal sole ed è stata in parte riflessa dalla superficie terrestre e in parte causata da effetti di scattering che si originano in atmosfera.

Al di sopra dei 5  $\mu\text{m}$ , nella banda TIR, la radiazione termica registrata viene emessa direttamente dai materiali posti sulla superficie terrestre ed è quella dominante. Poiché il fenomeno della radiazione termica emessa non dipende direttamente da una sorgente esterna come il sole, le immagini nella banda TIR possono essere acquisite anche di notte, oltre che di giorno. La banda MWIR, infine, è di transizione e in essa si fanno misurazioni della radiazione solare riflessa e della radiazione termica.

## Tecniche di acquisizione

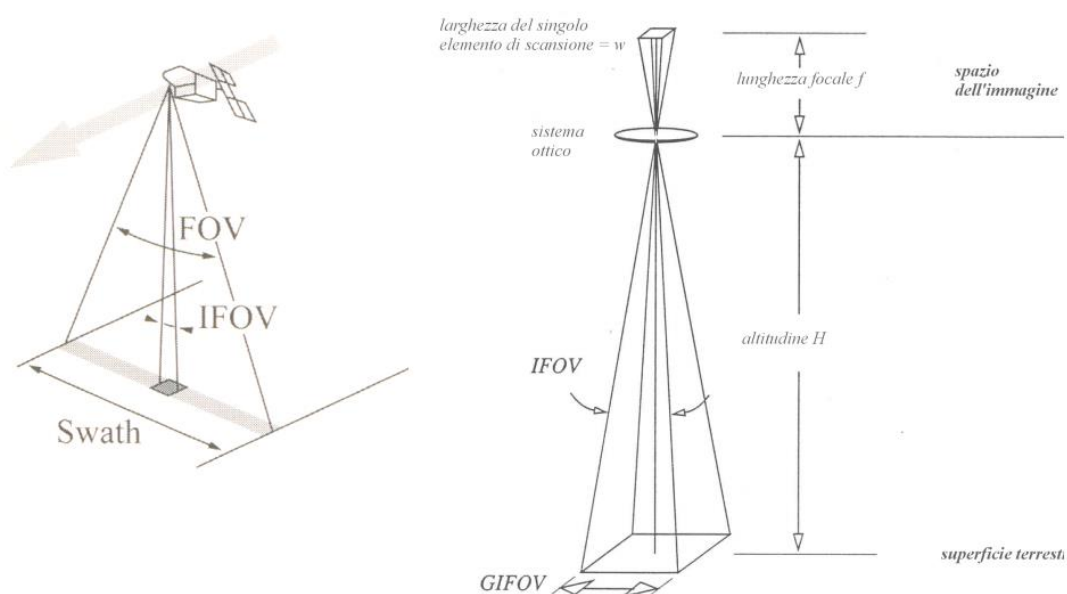
Riprendiamo alcune definizioni già fornite nell'ambito della descrizione dei sistemi di acquisizione di immagini in ambito fotogrammetrico.

Un sensore è un sistema in grado di convertire la radiazione riflessa e/o emessa dagli oggetti posti sulla superficie terrestre, dall'atmosfera e dalle nuvole in un'immagine digitale che rappresenta la distribuzione spaziale di tale energia. I dettagli costruttivi dei sensori variano secondo le lunghezze d'onda acquisite, così come le dimensioni dei sistemi ottici dipendono da limitazioni tecniche.

Componente fondamentale di un sensore è il rilevatore fotosensibile (tecnologia CCD *Charge Coupled Device*) che trasforma il flusso radiante su esso incidente proveniente da una porzione di superficie terrestre in un segnale elettrico, che viene campionato nel tempo e quantizzato.

Un'immagine digitale telerilevata è una matrice rettangolare costituita da celle contenenti un valore numerico proporzionale all'energia proveniente da una piccola porzione della superficie terrestre. In un dato momento, infatti, ogni elemento sensibile che costituisce il sensore, osserva una piccola area della superficie terrestre lungo una data linea di scansione. Questa area a terra può essere considerata una cella dell'immagine. La variabilità del numero contenuto nelle celle che costituiscono la matrice immagine ricompono la scena osservata dal sensore.

L'angolo sotto cui viene prelevata la radiazione, denominato IFOV (*Istantaneous Field of View*), è determinato in grande misura dalla dimensione dell'elemento rilevatore  $w$  del sensore e dalla lunghezza focale  $f$  dell'ottica ( $IFOV=w/f$ ). La radiometria associata ad ogni cella risulta una media delle radianze registrate all'interno dell'IFOV:



Descrizione della geometria di scansione del sistema (a sinistra) e per il singolo elemento di scansione (a destra) posto all'interno di un sensore ottico (la dimensione di  $w$  e  $f$  sono state esagerate rispetto a  $H$  per maggiore chiarezza).

La matrice di celle che costituisce l'immagine digitale, è ottenuta attraverso la combinazione di una scansione nella direzione cross-track (vale a dire ortogonale al movimento della piattaforma che trasporta il sensore) e di uno spostamento della piattaforma lungo la direzione in-track; il valore radiometrico contenuto in una cella è generato ogni volta che il sistema d'acquisizione campiona elettronicamente il flusso continuo dei dati fornito dalla scansione.

Qualunque sia il sistema di acquisizione è utile focalizzare quali parametri possano caratterizzarne la qualità e la valenza applicativa dei prodotti finali (le immagini e le loro elaborazioni).

I parametri più utilizzati sono i seguenti:

- **la risoluzione geometrica** rappresenta la capacità di rivelare i dettagli e può essere definita come la minima distanza di due oggetti puntiformi sulla scena che possono essere distinti sull'immagine. Essa è funzione della quota di volo, delle dimensioni del singolo elemento CCD del sensore e della focale dell'ottica del sistema;
- **la risoluzione radiometrica** rappresenta invece la minima variazione di segnale che il sistema riesce a distinguere. Essa è vincolata dal rapporto tra segnale utile proveniente dall'oggetto e le sue fluttuazioni aleatorie dovute ad esempio al rumore introdotto dal sensore;
- **la risoluzione spettrale** è l'intervallo di frequenza (o lunghezza d'onda) a cui si riferisce la misura in ciascun canale spettrale di cui il sensore è dotato. Per osservare alcune peculiarità della firma spettrale di un oggetto occorre in alcuni casi lavorare su bande molto strette, da cui l'importanza del parametro in questione.

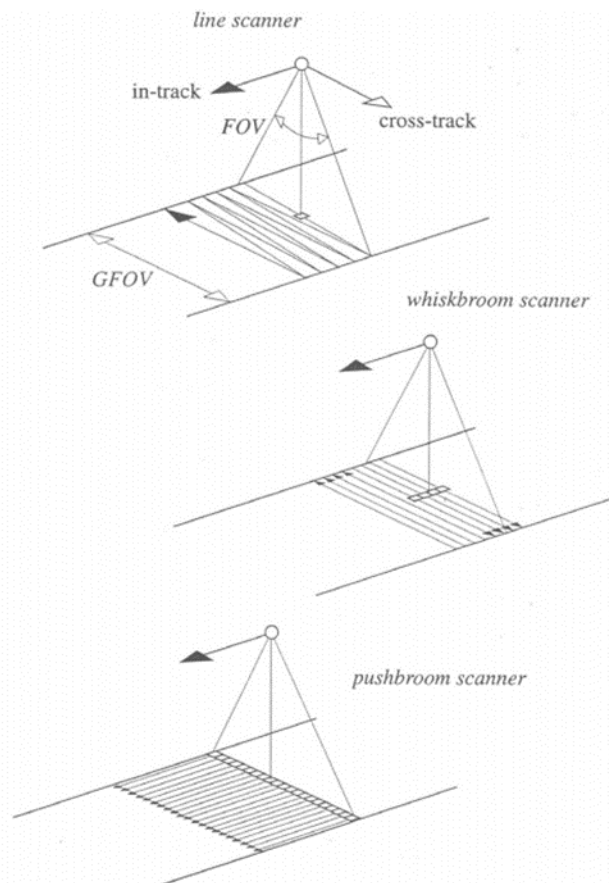
In base al numero di bande che il sensore può acquisire, si distinguono sistemi:

- Monospettrali o pancromatici (1 sola banda);
- Multispettrali (da 2 a poche decine di bande);
- Iperspettrali (molte decine di bande).

L'acquisizione dei dati telerilevati è vincolata alla quantità di energia radiante che il sistema deve raccogliere; ciò impedisce di migliorare contemporaneamente i parametri di risoluzione definiti. A parità di qualità della tecnologia usata, le tre risoluzioni sono legate tra loro e il miglioramento di una va sempre a discapito delle altre. In particolare, un aumento della risoluzione spettrale del sistema è sempre accompagnato da un peggioramento della risoluzione geometrica delle immagini acquisite, per effetto dell'aumento necessario delle dimensioni degli elementi CCD.

D'altra parte, un sensore caratterizzato da una buona risoluzione spettrale, fornisce una risposta spettrale molto dettagliata, caratteristica che si rivela indispensabile per le applicazioni del telerilevamento finalizzate alla lettura del territorio.

In considerazione della geometria di scansione impiegata, i sistemi di acquisizione si classificano in due categorie fondamentali, *linescanner* e *pushbroom*:



Schema del principio di acquisizione delle immagini mediante scansione meccanica (line scanner e whiskbroom scanner) e pushbroom.

La tecnica di scansione meccanica (line scanner) prevede la presenza di uno specchio rotante o oscillante che proietta l'IFOV del rilevatore verso diverse porzioni della superficie. La superficie viene "esplorata" secondo linee ortogonali (o quasi) alla linea di volo (scansione lineare) o secondo archi di circonferenza (scansione conica). La combinazione del movimento dello specchio e della piattaforma può determinare scansioni a terra di geometria più o meno complicata.

L'energia elettromagnetica incidente sullo specchio viene inviata a un prisma che, in corrispondenza delle differenti direzioni di rifrazione, ripartisce le differenti bande spettrali ai relativi elementi sensibili del sensore.

Spesso un solo rilevatore non avrebbe tempo sufficiente per scandire una linea dell'immagine e perciò vengono allineati alcuni rilevatori lungo la direzione di volo per acquisire altrettante linee contemporaneamente (sensori a scansione meccanica di tipo *whiskbroom*).

Nel rilevamento a scansione meccanica esiste una notevole distorsione geometrica insita nel meccanismo proprio di scansione e indipendente dall'assetto della piattaforma.

Questo succede in particolar modo nei sensori che acquisiscono con specchi oscillanti, in quanto a velocità costante di oscillazione dello specchio del sistema non corrisponde un IFOV costante al

suolo. Dato che le immagini digitali devono presentare celle della matrice immagine di uguale dimensione lungo le righe e le colonne, l'IFOV al suolo (non costante) viene forzato ad assumere la stessa dimensione lungo ogni singola linea di scansione e questo avviene ricampionando l'immagine ad una risoluzione geometrica media (si parla in proposito di EIFOV, *Effective Instantaneous Field of View*). I sistemi a scansione meccanica permettono di osservare zone a terra ampie (ampia "swath" o campo di vista) e assicurano di solito una dettagliata esplorazione dello spettro elettromagnetico, estesa sovente all'infrarosso medio e termico.

In definitiva, questi sistemi di acquisizione presentano generalmente buone risoluzioni radiometriche e spettrali, ma basse risoluzioni al suolo; questo, unito alla difficoltà di stabilire un modello prospettico che tenga conto dell'oscillazione dello specchio in contemporanea all'avanzamento della piattaforma, rende tali sistemi difficilmente utilizzabili per scopi metrici, ma efficaci per le applicazioni ambientali del telerilevamento.

Nel caso dei sensori di tipo *pushbroom*, infine, un'intera linea dell'immagine, costituita da un certo numero di celle ed ortogonale alla direzione di volo, viene acquisita da altrettanti rivelatori allineati tra loro. Il movimento della piattaforma permette poi di acquisire linee successive tra loro adiacenti.

I sistemi di questo tipo assicurano le migliori risoluzioni spaziali grazie al maggior tempo che ogni rivelatore dedica a ciascuna cella e limitano le distorsioni geometriche. Questo tipo di sensori e il loro campo di applicazione, fundamentalmente legato alla fotogrammetria, sono già stati trattati nel capitolo riguardante la fotogrammetria.

### **Metodologia operativa**

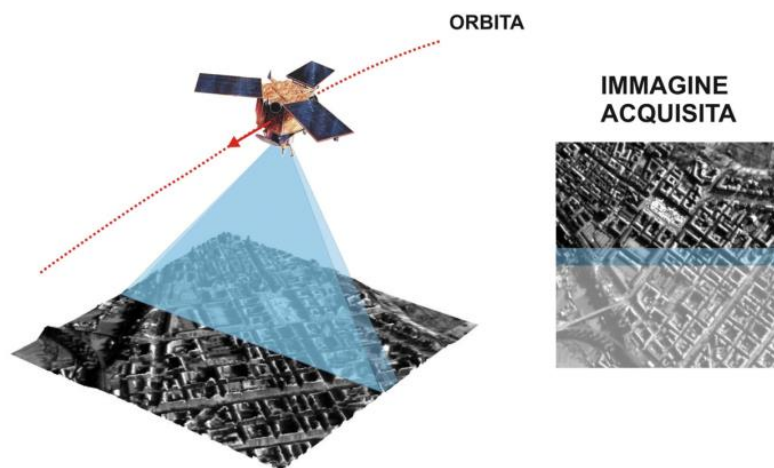
La metodologia operativa di acquisizione basata su *array* lineari di sensori CCD è nota in letteratura come modalità *pushbroom*, il termine anglosassone, traducibile (letteralmente ma non adeguatamente) con "spazzola", viene utilizzato per esemplificare il concetto alla base dell'acquisizione: viene cioè "spazzolata" l'intera superficie per porzioni lineari trasversali al moto. Le immagini digitali sono cioè assemblate linea per linea, acquisite ad intervalli di tempo regolari (tempo di integrazione o *dwell time*) dal sensore lineare CCD (o da n sensori lineari che acquisiscono in bande diverse dello spettro elettromagnetico o con angoli di vista differenti) solidale alla piattaforma (aerea o satellitare) in movimento lungo la propria traiettoria.

Dal punto di vista geometrico lo schema di riferimento è quello della prospettiva centrale, relativo però non all'intera immagine ma alla singola linea, da cui il nome immagini a prospettiva centrale multipla. Dal punto di vista fotogrammetrico questo implica una variazione continua nel tempo dei parametri di orientamento esterno, ovvero posizione del centro di presa ed angoli di assetto. In particolare, le piattaforme satellitari possono orientarsi, variando il proprio assetto angolare, per inquadrare porzioni della superficie terrestre non posizionate lungo la traccia orbitale. Tale caratteristica implica che la risoluzione geometrica nominale di un'immagine telerilevata

(riferita ad acquisizioni nadirali) diminuisca progressivamente con l'aumentare dell'angolo di vista medio del sensore.

Una distinzione operativa necessaria è quella tra *pushbroom* sincrono ed asincrono. Nel primo caso la velocità della piattaforma è uguale alla velocità di scansione della superficie terrestre, mentre nel secondo caso la velocità del sensore è superiore rispetto a quella di acquisizione.

Questa seconda modalità, distintiva dei satelliti Eros A ed Orbview-3, implica la necessità di variare con continuità l'assetto angolare della piattaforma (a cui il sensore è solidale). Tale variazione di assetto induce sull'immagine delle distorsioni geometriche aggiuntive rispetto a quelle comuni ad un'acquisizione *pushbroom* sincrona, che devono quindi essere adeguatamente modellizzate durante la fase di stima dei parametri di orientamento esterno.



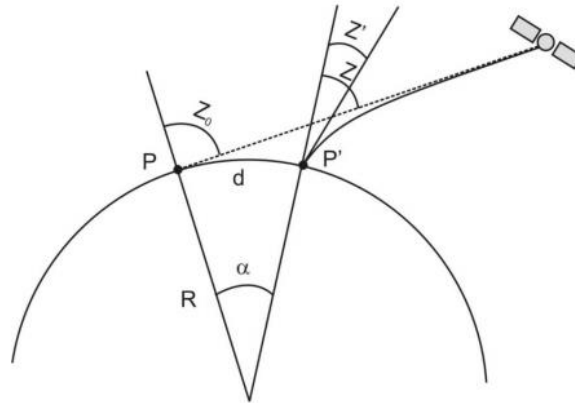
Esistono inoltre sistemi *pushbroom* dotati di sensori lineari multipli (**SLM**) che riprendono con continuità il territorio sorvolato con tre o più viste simultanee: una vista nadirale (nadir), una vista inclinata nella direzione di volo (*forward*) ed una vista inclinata in direzione opposta al volo (*backward*). Ciò si ottiene posizionando sul piano focale tre sensori **CCD** lineari sensibili generalmente a diverse bande dello spettro elettromagnetico.

### **Orientamento di scene stereoscopiche**

L'acquisizione di coppie stereoscopiche a prospettiva centrale multipla, indispensabile qualora l'obiettivo dell'elaborazione delle immagini sia l'estrazione di informazioni tridimensionali del territorio, può essere ottenuta in modalità differenti.

La prima, ovvia, è quella di effettuare due scansioni in tempi differenti dopo un periodo tale per cui il velivolo ripercorre la stessa traiettoria in cui è stata acquisita la prima immagine.

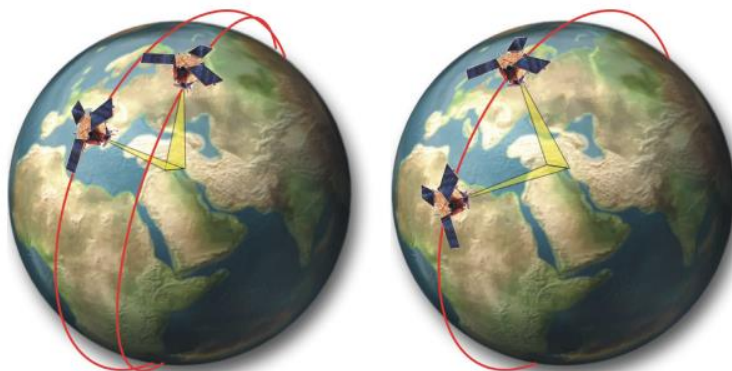
Questa opzione, sebbene risulti la più semplice dal punto di vista operativo, può presentare alcuni inconvenienti quali immagini con differente illuminazione, copertura nuvolosa o diffusione atmosferica in zone differenti delle immagini, variazioni dello stato vegetativo in caso di intervallo temporale elevato, ecc.



Schematizzazione dell'effetto della rifrazione atmosferica

La seconda modalità, nota come stereoscopia across-track (Figura in basso a sinistra), implica che il vettore sia in grado di modificare il proprio assetto angolare orientando l'ottica di acquisizione, generalmente solidale alla piattaforma stessa. In questo modo è possibile inquadrare la stessa area acquisita durante il precedente passaggio o che verrà acquisita nel passaggio successivo. Anche questa opzione, seppure caratterizzata da una differenza temporale di un solo giorno, può presentare gli stessi aspetti negativi illustrati nel caso precedente. In aggiunta la risoluzione di almeno una delle due immagini è necessariamente inferiore a quella nominale (al nadir).

Esiste infine la modalità in-track (o along-track – Figura in basso a destra), per cui le due immagini inquadranti la stessa area vengono acquisite durante la medesima orbita. Quest'ultima opzione è sicuramente la più idonea qualora le immagini siano elaborate per l'estrazione di informazioni metriche tridimensionali piuttosto che per analisi di movimenti e deformazioni. In questo caso sono infatti minimizzate le variazioni di illuminazione e le differenze locali fra le immagini.



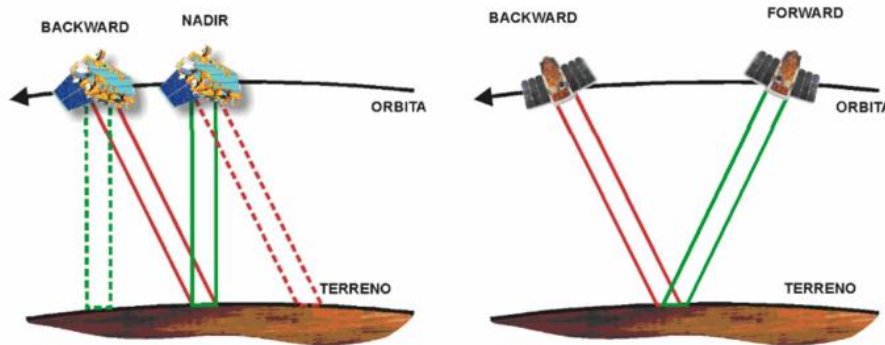


La stereoscopia in-track può essere ottenuta essenzialmente attraverso due modalità:

- presenza di ottiche fisse orientate secondo angoli di vista differenti. Tale tecnica di acquisizione stereoscopica è utilizzata dai satelliti Spot-5 e Terra (sensore Aster, figura in basso a sinistra);
- rapido orientamento della piattaforma tra le due acquisizioni. (Era questo il caso dei satelliti Eros, QuickBird e Ikonos che, grazie alle dimensioni ed al peso ridotto, erano definiti piattaforme “agili”, in grado cioè di orientarsi e stabilizzarsi in tempi molto brevi).

Sebbene tutte i satelliti citati siano stati dotati di tale caratteristica, Eros A è stato il primo in grado di fornire sistematicamente ed in tempi brevi coppie stereoscopiche all’utenza civile.

La stima dei parametri di orientamento di coppie stereoscopiche satellitari non viene descritta nel seguito in quanto il procedimento è analogo a quanto illustrato per il caso delle immagini a prospettiva centrale unica, ovvero mediante l’utilizzo di punti di legame che consentono di aggiungere nuove equazioni al sistema risolutivo.



Nel corso degli anni, diverse generazioni di satelliti hanno avuto caratteristiche operative utili ai fini del rilievo del territorio per finalità cartografiche.

Grazie alla loro tecnologia, infatti, è stato possibile acquisire informazione geografica e ambientale con livelli di dettaglio e caratteristiche di presa, per esempio stereocoppie, compatibili con i supporti già prodotti da filiera aerofotogrammetrica.

Di seguito, saranno elencati alcuni tra i satelliti che hanno rivestito maggiore importanza per le finalità sopra indicate.



## QUICKBIRD

QuickBird, lanciato il 18 Ottobre del 2001, è stato operativo dalla primavera del 2003, su un'orbita polare eliosincrona con  $97,2^\circ$  di inclinazione e con una velocità al suolo pari a  $7,1$  km/s. Era in grado di acquisire sia in modalità multispettrale (tre bande nel visibile ed una nell'infrarosso vicino) sia pancromatica, con risoluzione geometrica variabile tra  $0.61$  m e  $0.66$  m per angoli di acquisizione standard, cioè compresi tra  $0^\circ$  e  $15^\circ$ . Il satellite era in grado di effettuare acquisizioni stereoscopiche, caratteristica che tuttavia non è stata pienamente sfruttata dal punto di vista commerciale. Inoltre era dotato di una importante capacità di memorizzazione dei dati.

I dati QuickBird sono ancora disponibili nelle librerie di diverse organizzazioni, essenzialmente in due modalità: *Basic* e *Standard*, ai quali si aggiunge la disponibilità di prodotti ortorettificati. Il prodotto *Basic*, al quale sono applicate solo correzioni radiometriche, è basato sulla singola scena di circa  $16.5 \times 16.5$  km<sup>2</sup>.

La risoluzione geometrica al suolo era variabile, e dipendeva dall'angolo di acquisizione della scena come descritto in precedenza. Nel packaging (circa  $1.6$  Gb per scene pancromatiche) erano forniti sia il file immagine non georeferito sia file ausiliari relativi a metadati, *Rational Polynomial Coefficients (RPC)*, effemeridi, calibrazione geometrica ed assetto angolare.

Per la produzione di ortofoto, le informazioni fornite a corredo dell'immagine potevano essere integrate con un **DTM** e con punti di controllo a terra, dalla cui accuratezza dipendeva la precisione del prodotto finale. Per le sue caratteristiche, il prodotto *Basic* era rivolto ad utenti in

grado di effettuare un processamento avanzato dell'immagine dal punto di vista geometrico, in modo da ottenere la massima precisione nella georeferenziazione del dato. Il prodotto *Standard* differiva dal precedente in quanto ad esso erano applicate correzioni geometriche volte all'inquadramento in un sistema di riferimento ed al ricampionamento del pixel ad una dimensione di 0.60 o 0.70 m. Il *packaging* comprendeva: il file immagine, i metadati, il file degli **RPC**. Questo tipo di prodotto poteva essere acquistato anche su una superficie complessiva minore della singola scena.

L'orbita del satellite QuickBird's è stata riposizionata nel 2011 per poter estendere la missione; il satellite è rientrato nell'atmosfera della Terra il 27 Gennaio 2015, ponendo termine alla sua vita.

<b>Altitudine dell'Orbita</b>	450 km
<b>Sensore pancromatico</b>	Si
<b>Sensore multispettrale</b>	Si (4)
<b>Swath (nadir)</b>	16,5 km
<b>Pushbroom</b>	Sincrono
<b>Dimensione Scena</b>	272 km <sup>2</sup>
<b>Risoluzione geometrica pancromatico</b>	0,61 m
<b>Risoluzione geometrica multi-spettrale</b>	2,44 m
<b>Risoluzione radiometrica</b>	11 bit per pixel
<b>Angolo max di off-nadir</b>	0°-25°
<b>Periodo di Rivisitazione</b>	2-5 giorni
<b>Prezzo per nuove acquisizioni (pancromatico prodotto base)</b>	21 US\$/km <sup>2</sup>
<b>Prezzo per immagini da archivio (pancromatico prodotto base)</b>	16 US\$/km <sup>2</sup>
<b>Produttore</b>	DigitalGlobe



Doha, Qatar, May 2013. ©DigitalGlobe



Port Elizabeth, South Africa, December 17, 2014 ©DigitalGlobe



## ORBVIEW-3

Lanciato il 26 giugno 2003, OrbView-3 è stato uno degli ultimi satelliti, dal punto di vista cronologico, ad affacciarsi nel panorama dell'alta risoluzione geometrica. Come i suoi predecessori, ha acquisito sia in modalità pancromatica sia in modalità multispettrale, con una risoluzione geometrica massima pari a 1 m. Le caratteristiche tecniche dettagliate sono riportate in tabella. I dati OrbView-3 erano disponibili in due modalità: OrbView BASIC™ and OrbView ORTHO™.

L'accuratezza di posizionamento planimetrico massima dichiarata era in entrambi i casi pari a 12 m. Sono stati commercializzati ulteriori prodotti a valore aggiunto quali OrbView DEM™, OrbView DSM™, OrbView Thematic Map™ e OrbView Feature Map™. I primi due prodotti hanno fornito informazioni di tipo altimetrico, il terzo è un indice differenziale di vegetazione normalizzato (NDVI) e l'ultimo è una restituzione vettoriale di entità cartografiche effettuata a partire dal dato ortoproiettato.

Il centro di controllo ORBIMAGE's, situato a Dulles, Virginia, ha gestito l'intera telemetria, tracciamento e controllo del satellite, così come l'archiviazione dei dati e i servizi di distribuzione.

Il sensore di OrbView-3's ha avuto un malfunzionamento il 4 Marzo del 2007. Orbview-3 è rimasto sotto controllo finché non è stato volutamente fatto uscire dall'orbita nel 2011.

<b>Altitudine dell'Orbita</b>	470 km
<b>Sensore pancromatico</b>	Si
<b>Sensore multispettrale</b>	Si (4)
<b>Swath (nadir)</b>	8,0 km
<b>Pushbroom</b>	Sincrono
<b>Dimensione Scena</b>	64 km <sup>2</sup>
<b>Risoluzione geometrica pancromatico</b>	1 m
<b>Risoluzione geometrica multispettrale</b>	4 m
<b>Risoluzione radiometrica</b>	11 bit/pixel
<b>Angolo max di off-nadir</b>	50°
<b>Periodo di Rivisitazione</b>	1-3 giorni
<b>Prezzo per nuove acquisizioni (pancromatico prodotto base)</b>	10 US \$/km <sup>2</sup>
<b>Prezzo per immagini da archivio (pancromatico prodotto base)</b>	Non ancora presente
<b>Produttore</b>	Orbimage
<b>Distributore</b>	Orbimage

One meter panchromatic image of Ankara vicinity, Turkey





Four meter MS image of crops illustrating differences in vegetation growth





Fiji Islands, May 13, 2004



## SPOT-5

Il satellite SPOT 5, lanciato il 4 maggio 2002, è stato operativo dal 16 luglio 2002 con una vita operativa prevista fino al 2014. Il satellite cessò di funzionare il 31 Marzo del 2015.

Esso ha continuato la missione dei precedenti satelliti SPOT (1÷4), lanciati a partire dal 1986, ma montava a bordo strumenti tecnologicamente innovativi, come il **HRG** (*High Resolution Geometric*) e il **HRS** (*High Resolution Stereoscopic*). La risoluzione geometrica dei dati del satellite Spot 5 è stata fino a quattro volte maggiore di quella dei dati SPOT precedenti (5 m nel pancromatico e 10 m del multispettrale, invece di 20 m) mentre la dimensione delle immagini è la stessa: 60 km x 60 km, oppure 60 km x 120 km quando sono usati i due strumenti **HRG** di cui il satellite disponeva. L'accuratezza di posizionamento planimetrico, senza punti di controllo, è stata superiore ai 50 metri, contro i 350 metri dei satelliti delle missioni precedenti. Questi miglioramenti sono risultati particolarmente vantaggiosi per le applicazioni che richiedevano scale di riferimento da 1:25.000 a 1:10.000.

Grazie al nuovo strumento HRS a bordo della piattaforma SPOT 5, sono stati, inoltre, possibili, solamente per la produzione di modelli digitali del terreno, acquisizioni simultanee di stereocoppie con uno *swath* eccezionalmente ampio (600 km x 120 km). Questi prodotti hanno offerto un'eccellente accuratezza senza punti di controllo, dell'ordine di 10 metri in altezza e di 15 m in planimetria.

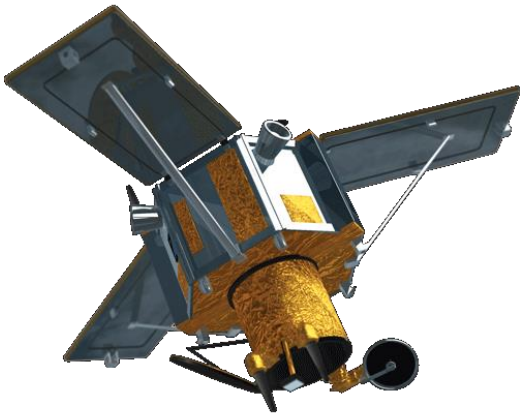
La modalità pancromatica è stata caratterizzata da una risoluzione a terra di 5 m (2.5 m in modalità SUPERMODE) e da una radiazione misurata in banda unica nello spettro elettromagnetico corrispondente al visibile, con esclusione del blu (0.51-0.73  $\mu\text{m}$ ).

La modalità multispettrale è stata caratterizzata da risoluzione a terra di 10 m (la banda 4, relativa all'infrarosso medio, ha una risoluzione effettiva di 20 m, ma è stata fornita ricampionata a 10 m, per uniformità con le rimanenti tre bande) e uno spettro di radiazione osservata di 4 bande spettrali (corrispondenti al verde, rosso, infrarosso vicino e infrarosso medio dello spettro elettromagnetico).

<b>Altezzudine dell'Orbita</b>	832 km
<b>Sensore pancromatico</b>	Si
<b>Sensore multispettrale</b>	Si (4)
<b>Swath (nadir)</b>	60 km
<b>Pushbroom</b>	Sincrono
<b>Dimensione Scena</b>	3600 km <sup>2</sup>
<b>Risoluzione geometrica pancromatico</b>	5 m (2,5 supermode)
<b>Risoluzione geometrica multispettrale</b>	10 m
<b>Risoluzione radiometrica</b>	8 bit/pixel
<b>Angolo max di off-nadir</b>	31°
<b>Periodo di Rivisitazione</b>	1 giorno
<b>Prezzo per nuove acquisizioni (pancromatico prodotto base)</b>	0,98 €/km <sup>2</sup>
<b>Prezzo per immagini da archivio (pancromatico prodotto base)</b>	0,75 €/km <sup>2</sup>
<b>Produttore</b>	Spotimage
<b>Distributore</b>	Telespazio



Naples, 2002



## IKONOS

Il satellite IKONOS, in orbita dal settembre 1999 e operativo dall'inizio del 2000, è stata la prima piattaforma ad acquisire immagini ad alta risoluzione.

Dopo più di 15 anni di attività, IKONOS fu dismesso e fece rientro verso l'atmosfera terrestre. Tutte le immagini rilevate nel corso degli anni sono a disposizione presso diverse organizzazioni, tra le quali l'European Space Imaging archive.

Come evidenziato in Tabella, esso era dotato di un sensore pancromatico ed uno multispettrale: il primo aveva una risoluzione geometrica al suolo di 0.82 m ad 11 bit e acquisiva nella banda spettrale dei 0.45-0.90  $\mu\text{m}$ ; il sensore multispettrale aveva invece una risoluzione geometrica al suolo di 3.2 m e 4 bande ad 11 bit (3 nel visibile ed 1 nell'infrarosso vicino). I prodotti IKONOS erano distribuiti in tre diverse modalità: GEO, STEREO ed ORTHO.

I prodotti GEO rappresentavano il livello più elementare di elaborazione, con una correzione geometrica preliminare effettuata utilizzando i dati di posizionamento e assetto della piattaforma ed una successiva georeferenziazione per uniformarla alla proiezione cartografica assegnata; il livello standard di accuratezza era di 25 m.

Potevano essere distribuiti in diverse opzioni: come dato pancromatico, come multispettrale o come pansharpened (iniezione dell'informazione radiometrica del multispettrale alla banda del pancromatico alla massima risoluzione geometrica). I prodotti STEREO erano ottenuti da stereocoppie acquisite nello stesso passaggio orbitale, minimizzando così le variazioni di luminosità.

Erano distribuiti in due differenti livelli di accuratezza: Standard con 12 m di accuratezza orizzontale e 13 m verticale; Precision con 1 m di accuratezza orizzontale e 2 m verticale. Il processo di ortorettifica, caratteristico delle immagini ORTHO, correggeva le distorsioni causate dalla geometria dell'acquisizione e dalla variabilità del suolo, utilizzando modelli digitali del terreno e punti di controllo al suolo.

<b>Altitudine dell'Orbita</b>	681 km
<b>Sensore pancromatico</b>	Si
<b>Sensore multispettrale</b>	Si (4)
<b>Swath (nadir)</b>	11 km
<b>Pushbroom</b>	Sincrono
<b>Dimensione Scena</b>	120 km <sup>2</sup>
<b>Risoluzione geometrica pancromatico</b>	0,82 m
<b>Risoluzione geometrica multispettrale</b>	3,2 m
<b>Risoluzione radiometrica</b>	8/11 bit/pixel
<b>Angolo max di off-nadir</b>	26°
<b>Periodo di Rivisitazione</b>	1-14 giorni
<b>Prezzo per nuove acquisizioni (pancromatico prodotto base)</b>	N/A (richiedere preventivo)
<b>Prezzo per immagini da archivio (pancromatico prodotto base)</b>	Circa 35\$/km <sup>2</sup> (richiedere preventivo)
<b>Produttore</b>	Space Imaging
<b>Distributore</b>	EUSI, Planetek



The Tha Chin River snakes through Sumut Sakhon City of Thailand, Dec. 20, 2014



Venice, 0,82 m

Di seguito, saranno presentati alcuni sensori e macchine attualmente in orbita con caratteristiche “fotogrammetriche”.

## **WORLDVIEW**

Le WorldView series consistono in una costellazione di satelliti ad alta risoluzione per utilizzo commerciale. Sono di proprietà della Maxar, i primi 3 satelliti della serie sono ancora in attività e hanno fornito immagini fin dal 2017, mentre WorldView 4 è stato dismesso a causa di un malfunzionamento ai giroscopi nel Gennaio 2019.

- WorldView-1 lanciato nel 2007, è stato il primo satellite commerciale al mondo con risoluzione di 50 cm;
- WorldView-2 lanciato nel 2009 quale prosecuzione della missione WorldView-1. Esso è stato il primo satellite commerciale con risoluzione multispettrale a 8 bande;
- WorldView-3 lanciato nel 2014, molto simile al WorldView-2 ma posizionato su un’orbita più bassa;
- WorldView-4 lanciato nel 2016, offriva immagini pancromatiche con risoluzione di 31 cm e multispettrali di 1.23 m.

The WorldView series è parte dell’ESA's Third Party Missions Programme nel quale l’ESA ha un accordo con l’European Space Imaging (EUSI) per distribuire I dati acquisiti dalle missioni.

<https://www.maxar.com/constellation>

<https://earth.esa.int/eogateway/missions/worldview>

## **Costellazione EROS NG™**

Concepiti inizialmente per usi militari e di intelligence, i satelliti della missione EROS (Earth Resources Observation Satellite) sono gestiti dalla società israeliana ImageSat International che, con il lancio del primo satellite nel 2000, è divenuta la prima società non statunitense in grado di commercializzare prodotti ad alta risoluzione. La missione è composta da due differenti tipologie di satelliti: EROS A ed EROS B; attualmente è operativo solo EROS B; in origine era stata prevista una costellazione di quattro satelliti EROS-B, ma il numero è stato ridotto a uno solo mentre il satellite EROS A è rientrato il 7 Luglio 2016.

Nel gennaio 2011, è stato comunicato che sarebbero iniziati i lavori su un nuovo satellite EROS C. ImageSat ha annunciato l'intenzione di lanciare un totale di altri tre satelliti in date successive, al fine di fornire una copertura completa, con sei satelliti funzionali, dell'intera superficie del pianeta. Il lancio di EROS C, originariamente previsto per il 2008, è stato posticipato più volte e al momento sembra che il progetto sia stato accantonato.

EROS A è stato il primo della costellazione di 8 satelliti prevista da ImageSat International; lanciato il 5 Dicembre 2000, il satellite è stato posto in orbita polare eliosincrona ad una altitudine di 500



km; esso montava un sensore pancromatico a 1,8 metri di risoluzione con la possibilità di campionare ulteriormente il dato fino ad una risoluzione sub-metrica (Hypersampled mode). EROS B, è stato lanciato nel 2006 e ha un aspetto simile a EROS A; è posto ad un'altezza di 500 km e monta a bordo un sensore pancromatico con risoluzione spaziale di 0,70 m.

La particolare caratteristica della missione EROS è la capacità di puntamento che permette ai satelliti di essere puntati e stabilizzati in breve tempo sul sito di interesse del cliente a partire da una ripresa al nadir, perpendicolarmente alla superficie, fino a raggiungere un'inclinazione massima di ripresa pari a 45° con azimuth selezionabile nei 360°.

EROS B è equipaggiato con un sensore CCD pushbroom con 10.000 pixel per linea e un totale di 96 linee. Il satellite può operare in entrambe le modalità asincrona o sincrona ed è il primo satellite commerciale ad offrire immagini ad alta risoluzione durante le prese notturne.

Le immagini EROS sono acquistabili direttamente da Imagesat ed è possibile ottenere i dati raw, radiometricamente corretti, geometricamente corretti e infine ortorettificati.

<https://www.imagesatintl.com/home/eros-ng/>

## **SPOT CONSTELLATION**

La costellazione è stata progettata per coprire vaste aree di territorio con tempi di acquisizione molto brevi e caratteristiche tali da soddisfare le esigenze cartografiche e di monitoraggio ambientale.

Con gli attuali satelliti SPOT 6 e 7, di proprietà e gestiti dalla Airbus Defence and Space, il progetto continua una lunga storia di acquisizione di informazioni iniziata 35 anni fa con il lancio di SPOT-1 nel 1986. Oggi l'ampio archivio permette l'accesso ad un'unica banca dati immagini e dati storici degli ultimi decenni ad alta risoluzione che copre miliardi di km<sup>2</sup>. SPOT 6 e 7 proseguiranno la loro missione, rispettivamente, fino al 2025 e al 2027.

Una acquisizione SPOT copre un'area molto grande in un singolo passaggio con una risoluzione fino a 1.5 m. Questo tipo di precisione permette l'utilizzo delle immagini per la produzione di cartografia a livello nazionale e regionale alla scala 1:25,000. SPOT 6 e SPOT 7 operano in un'orbita monitorata di 180 gradi che consente la rivisitazione giornaliera del pianeta; inoltre, lo swath molto ampio consente una acquisizione giornaliera di 3 di km<sup>2</sup> per satellite.

SPOT 6 e 7 operano nella stessa orbita dei satelliti ad altissima risoluzione Pléiades (50 cm), come un'unica costellazione di 4 satelliti.

<https://www.intelligence-airbusds.com/imagery/constellation/spot/>

## PLÉIADES

Airbus Defence and Space ha lanciato con successo i due satelliti ad alta risoluzione Pléiades-1A il 16 dicembre 2011 e Pléiades-1B il 2 dicembre 2012.

Si tratta di un sistema di satelliti duali di osservazione in grado di soddisfare esigenze svariate, sia commerciali che militari, con un'ampia gamma di applicazioni, comprese mappatura, sviluppo urbano, idrologia, geofisica e vulcanologia.

Questa costellazione è in grado di fornire immagini a colori alla risoluzione di 50 cm, ottenute dal ricampionamento delle immagini originali acquisite nel pancromatico a 70 cm di risoluzione e nel multispettrale a 2.8 m di risoluzione, con un tempo di rivisitazione giornaliero di qualsiasi punto della Terra. Inoltre, i satelliti Pléiades sono in grado di acquisire immagini ad alta risoluzione stereo in un solo passaggio. L'accuratezza dell'immagine è di circa 3 metri, ma può essere migliorata, fino all'eccezionale valore di 1 metro, con l'uso di GCP. Poiché il satellite è stato progettato principalmente per la gestione delle emergenze, la richiesta di immagini può avvenire fino a sei ore prima dell'acquisizione.

L'elevata risoluzione delle immagini Pléiades consente la realizzazione di cartografia alla scala di 1:5.000.

I due satelliti assicurano una zona di ripresa con *swath* di 20 km e una capacità massima di acquisizione di 1 milione di kmq al giorno per satellite. L'orbita è circolare ed eliosincrona, ha una quota di 694 km e un tempo di rivisitazione di 2 giorni.

Le immagini Pléiades sono acquisite ad una risoluzione di 50 cm nel pancromatico e 2 m nel multispettrale nelle bande:

- Pan: 480-830 nm
- Blue: 430-550 nm
- Green: 490-610 nm
- Red: 600-720 nm
- Near Infrared: 750-950 nm

<https://www.intelligence-airbusds.com/en/8692-pleiades>

<https://www.intelligence-airbusds.com/imagery/sample-imagery/>