

---

**Enrico BORGOGNO MONDINO, Tamara BELLONE, Fabio GIULIO TONOLO, Andrea LINGUA**  
Politecnico di Torino  
Dipartimento di Ingegneria del Territorio, dell'Ambiente e delle Geotecnologie

# **Generazione di DSM da immagini satellitari stereoscopiche: primi risultati e validazioni**

## Generazione di DSM da immagini satellitari stereoscopiche: primi risultati e validazioni

Enrico BORGOGNO MONDINO

Tamara BELLONE

Fabio GIULIO TONOLO

Andrea LINGUA

Politecnico di Torino

Dipartimento di Ingegneria del Territorio,  
dell'Ambiente e delle Geotecnologie

Corso Duca degli Abruzzi, 24

10129 Torino

t +39 011 564 7687

f +39 011 564 7699

e enrico.borgogno@polito.it

e tamara.bellone@polito.it

e fabio.giuliotonolo@polito.it

e andrea.lingua@polito.it

**Riassunto** > La generazione di modelli digitali del terreno attualmente può essere effettuata mediante diverse tecniche (fotogrammetria, scansioni laser, interferometria radar) caratterizzate da precisioni, risoluzioni e ambiti applicativi differenti. In questo lavoro si analizza una nuova tecnica per la produzione di DSM (*Digital Surface Model*) derivata dalle tecniche fotogrammetriche applicate alle immagini acquisite da piattaforma satellitare ad alta e media risoluzione. In particolare si presenta un insieme di test sperimentali effettuati mediante software commerciali utilizzando coppie stereo acquisite dai satelliti Terra (sensore Aster) ed Eros A1.

I dati generati mediante queste tecniche sono stati analizzati sia in termini qualitativi che quantitativi tramite una comparazione con un DTM di riferimento (il DTM della Regione Piemonte) prodotto con tecniche fotogrammetriche.

Sebbene i primi risultati abbiano evidenziato precisioni dell'ordine di decine di metri, non ancora sufficienti per applicazioni di rilievo a media e grande scala, i DSM generati da immagini satellitari possono comunque soddisfare le specifiche inerenti applicazioni speditive particolari come, ad esempio, la produzione di cartografia in paesi in via di sviluppo mediante ortoproiezione di immagini satellitari ad alta risoluzione e successiva restituzione planimetrica.

**Abstract** > Digital Surface Models (DSM) represent an effective tool for many applications and in particular for terrain morphology investigation and orthoimages generation. The availability of satellite stereo images allows to generate updated DSMs through digital photogrammetric algorithms especially in those areas where old and poor maps exist. In this work we show some quality tests results about DSMs obtained from ASTER and EROS A1 data, elaborated through commercial software. We consider this information very important to understand which kind of applications can reasonably use these data. Such tests take into consideration both qualitative and quantitative aspects. Height profiles comparisons, statistical analysis on differences

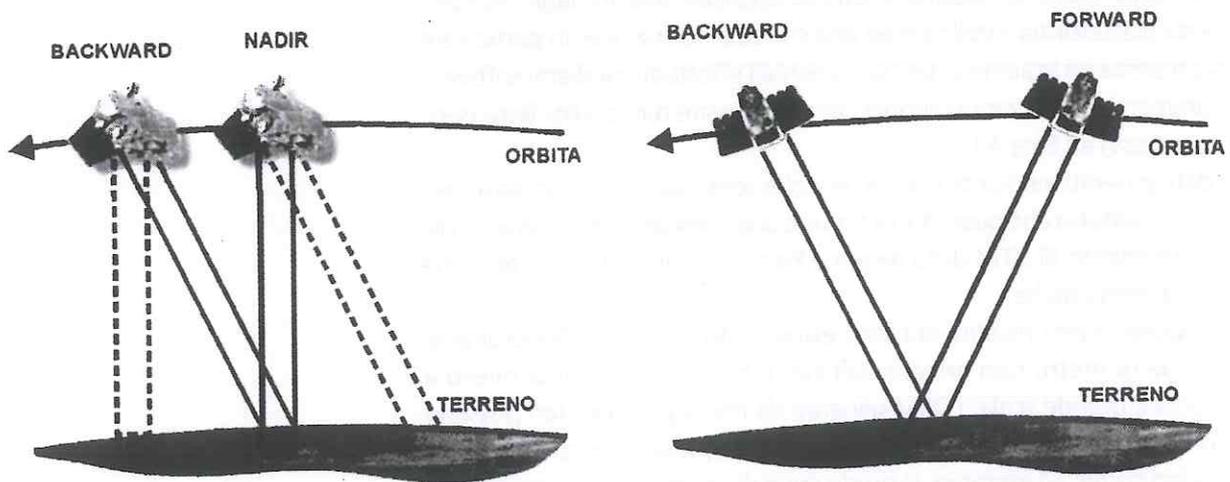
and data mining have been carried out in order to evaluate accuracies and to define the nature of possible systematic errors. Reference data is the available Regional DTM and single height points extracted from technical maps for more precise local investigation.

**Dati satellitari utilizzati**

Le prove di generazione di DSM sono state effettuate su dati acquisiti dalle piattaforme Terra (sensore ASTER) ed Eros A1. Entrambi questi sensori consentono di acquisire immagini in modalità stereoscopica *along-track*, anche se con caratteristiche geometriche differenti. Aster acquisisce sistematicamente coppie stereo nella banda dell'IR vicino (figura 1 a sinistra), attraverso due ottiche fisse uguali ma con angoli di vista diversi pari rispettivamente a 0° (*nadir view*) e 27,6° (*backward view*). Eros A1 consente invece di ottenere immagini stereoscopiche pancromatiche (figura 1 a destra) con angoli di vista generalmente quasi simmetrici (*forward view* e *backward view*), orientando l'intera piattaforma a cui il sensore è solidale. I due sistemi di acquisizione descritti sono di tipo *pushbroom* (come tutti i sensori ad alta risoluzione); è da sottolineare l'asincronia dell'acquisizione della piattaforma Eros A1, per la quale la velocità del satellite è superiore a quella di acquisizione (ovvero la traiettoria percorsa lungo l'orbita è maggiore della porzione di terreno acquisita).

Figura 1 – Schema di acquisizione stereoscopica delle piattaforme Terra (Aster, sinistra) ed Eros A1 (destra)

Tabella 1 – Caratteristiche delle piattaforme Terra (Aster, sinistra) ed Eros A1 (destra)



	Terra (Aster)	Eros A1
Risoluzione geometrica (m, nadir)	15	1.8
Quota dell'orbita (km, H)	705	480
Lunghezza focale (m, c)	3.29	~3.5
Precisione determinazione parallasse lungo le colonne (celle, $m_b \cdot \sigma_p$ )	0.5 +1	0.5 +1
B/H	~0.6	~1

Nella Tabella 1 sono riportate le principali caratteristiche di queste piattaforme, che consentono di valutare quale potrebbe essere la precisione nella determinazione delle quote. Si noti che la risoluzione delle immagini Eros A1 acquisite stereoscopicamente sarà sempre inferiore a quella nominale, a causa degli elevati angoli di *off-nadir*. Nell'ipotesi di un'acquisizione fotogrammetrica classica (prospettiva centrale) nel caso normale tale valore può essere determinato secondo la relazione [Kraus]:

$$\sigma_z = m_b \cdot \frac{H}{B} \cdot \sigma_p \quad 1$$

Poiché l'acquisizione satellitare si discosta notevolmente dal modello di prospettiva centrale unica per l'intera scena per cui vale la [1] ( $m_b$  corrisponde al fattore di scala  $H/c$ ) i valori di precisione riportati in Tabella 2 sono da considerarsi unicamente come dati di riferimento.

	$\sigma_z$ (m)
Aster	$\pm 12.5 \pm 25$
Eros A1	$\pm 1.8 \pm 2.6$

Tabella 2 – Precisioni altimetriche di riferimento

### Area di studio

La validazione è stata condotta sulla zona della Val di Susa, prestando particolare attenzione all'area di Oulx (Figura 2), oggetto negli ultimi anni di numerose indagini geomorfologiche intese a monitorarne le possibili deformazioni gravitative.

Tale area è stata scelta considerandone l'elevata escursione altimetrica (circa 3000m) che consente valutazioni più robuste sulla precisione ottenibile. Inoltre la presenza di deformazioni importanti (con spostamenti verticali anche metrici) suggerisce di verificare se DSM ottenuti da immagini satellitari possano essere utilizzati in fase di monitoraggio ed eventualmente con quali limitazioni.

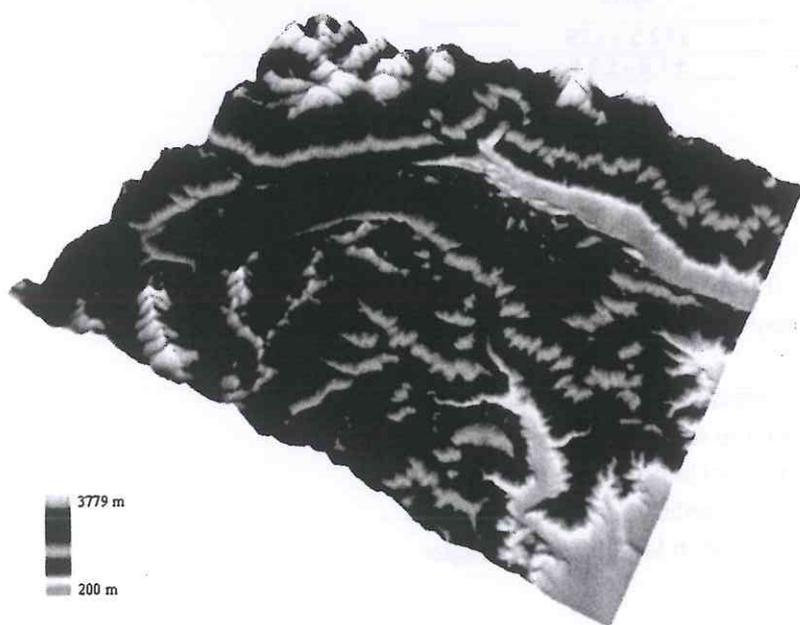


Figura 2 – Visualizzazione tridimensionale di un particolare dell'area di studio (Sauze d'Oulx, Val di Susa, Piemonte)

Fig. 3 - Visualizzazione tridimensionale in pseudocolore del DTM della Regione Piemonte relativo all'area di studio

**Caratteristiche delle scene e dati di riferimento**

Tabella 3 – Caratteristiche principali delle immagini utilizzate

Le immagini utilizzate in questo lavoro sono state acquisite dalle piattaforme Terra (sensore Aster) ed Eros A1. In tabella 3 sono riportate le caratteristiche principali relative a tali dati:

	<b>ASTER</b>	<b>EROS A1</b>
Risoluzione geometrica (m)	15	2.5 (off-nadir ~ 30°)
Livello di processamento	1B	1A
Dimensioni medie (km)	75 x 65	13 x 18
Data di acquisizione (gg/mm/aaaa)	23/03/2003	25/07/2003

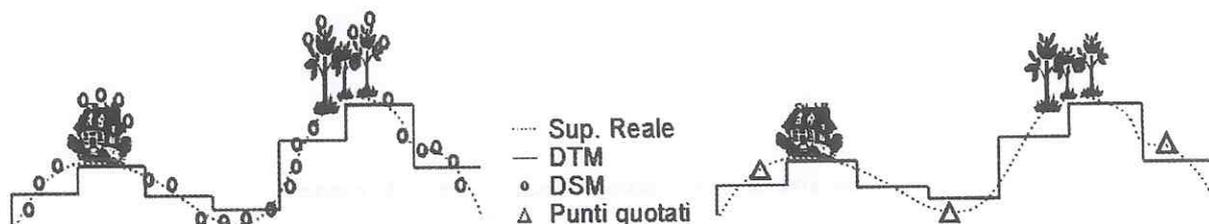
Sulla base della precisione potenziale precedentemente stimata mediante la [1] sono stati utilizzati come dati di riferimento altimetrici:

- il DTM della Regione Piemonte (restituito con un passo di 80m ed interpolato a 50m) la cui precisione altimetrica nominale è di  $\pm 2.5$  m (Figura 3);
- 141 punti quotati estratti dalla cartografia tecnica provinciale (CTP) in forma numerica alla scala 1:5.000 con precisione altimetrica pari a  $\pm 1.2$  m. Questa cartografia è stata utilizzata anche per l'individuazione dei punti di appoggio.

Il primo tipo di dato, utilizzato per valutare le differenze altimetriche, si può ragionevolmente ritenere omogeneo rispetto al prodotto derivato dalle immagini satellitari in quanto entrambi sono una rappresentazione discreta regolare della superficie reale. Inoltre attualmente esso costituisce l'unico dato altimetrico con copertura regionale completa e precisioni sufficienti per un suo utilizzo, in questo caso, come dato di riferimento. In relazione alla procedura di confronto descritta è possibile identificare alcuni limiti legati alla diversa natura dei dati disponibili:

- il limite maggiore è dovuto al fatto che il modello generato dalle immagini satellitari con procedure automatiche è concettualmente un DSM, ovvero un modello digitale di superficie in cui le quote riportate si riferiscono al terreno solo laddove questo non sia ricoperto da oggetti quali vegetazione, edifici o infrastrutture;
- non possono essere escluse differenze indotte da un diverso passo di restituzione/interpolazione e dal diverso posizionamento planimetrico dei punti di cui viene misurata la quota.

I punti quotati sono stati invece utilizzati per valutare quanto correttamente il modello del terreno approssimi la superficie reale. Gli schemi di figura 4 evidenziano i concetti sopra riportati, relativi rispettivamente alle differenze DTM/DSM e punti quotati/DTM.



### Software utilizzati

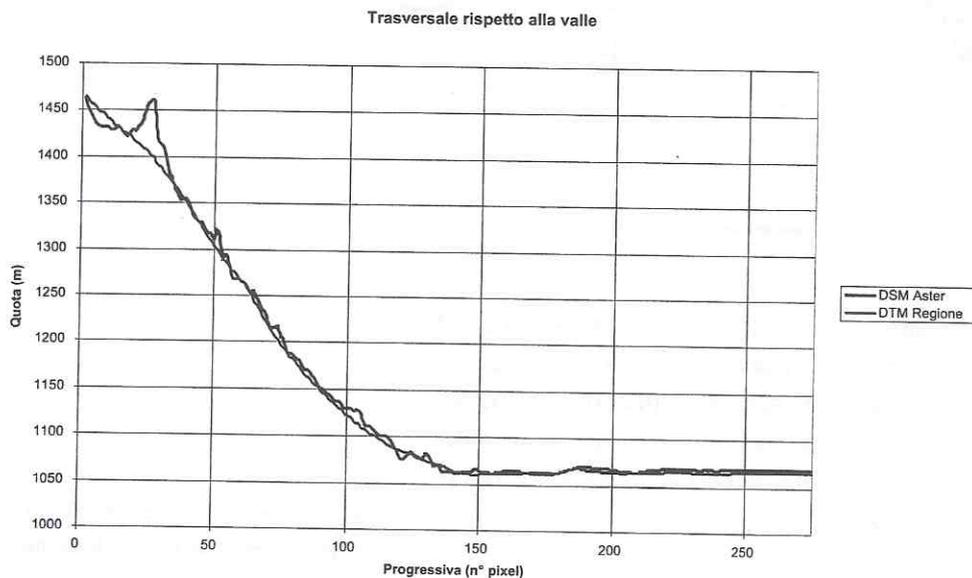
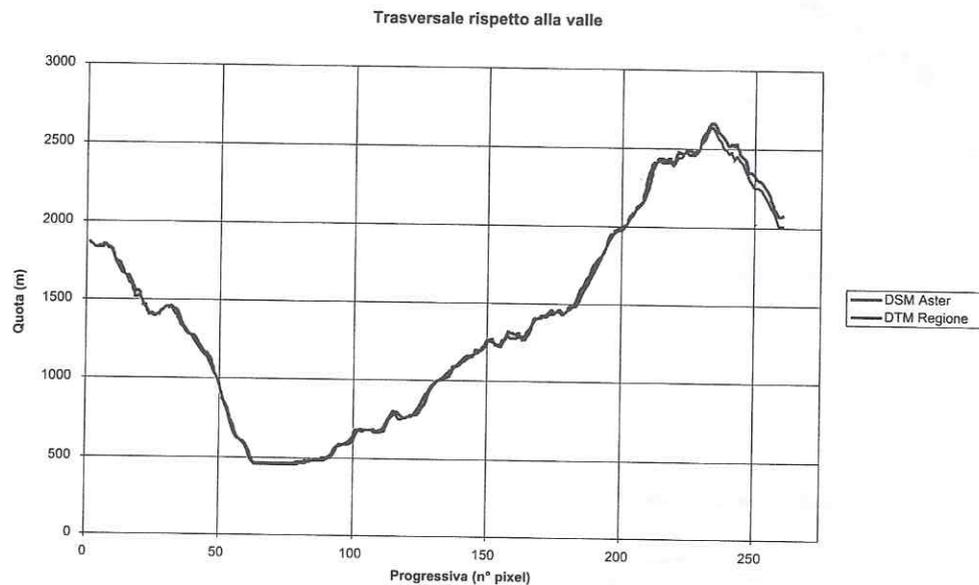
Ai fini della generazione dei DSM sono stati utilizzati due differenti software commerciali in riferimento alle due tipologie di dati sopra descritti. Per l'elaborazione delle immagini Aster è stato utilizzato AsterDTM, modulo aggiuntivo di ENVI, mentre le immagini Eros A1 sono state importate in SocetSet mediante l'apposito modulo ErosImport. Entrambi i software utilizzano per la determinazione delle quote algoritmi fotogrammetrici consolidati che possono essere schematizzati nei seguenti passaggi:

- orientamento interno (modello del sensore) ed esterno delle immagini attraverso procedure basate sull'individuazione di punti di appoggio a terra e punti di legame;
- generazione delle immagini "quasi-epipolari" (*quasi-epipolar*), cioè immagini in cui i punti omologhi giacciono sulla stessa riga;
- determinazione del maggior numero possibile di punti omologhi sulle immagini quasi-epipolari mediante tecniche di autocorrelazione;
- calcolo del valore di quota a partire dalla misura della parallasse ( $\Delta p$ ) lungo  $\xi$  (colonne) relative ai punti individuati nel passaggio precedente  $\rightarrow Q = (H/B)\Delta p$
- interpolazione dei valori di quota per ottenere un DSM sotto forma di grigliato regolare.

### Validazione dei DSM

Inizialmente è stata effettuata una valutazione qualitativa tra i dati di riferimento e quelli generati dalle immagini satellitari mediante la comparazione di profili altimetrici caratteristici (longitudinali e trasversali rispetto alla valle) di cui vengono riportati alcuni esempi nelle figure 5,6,7 e 8.

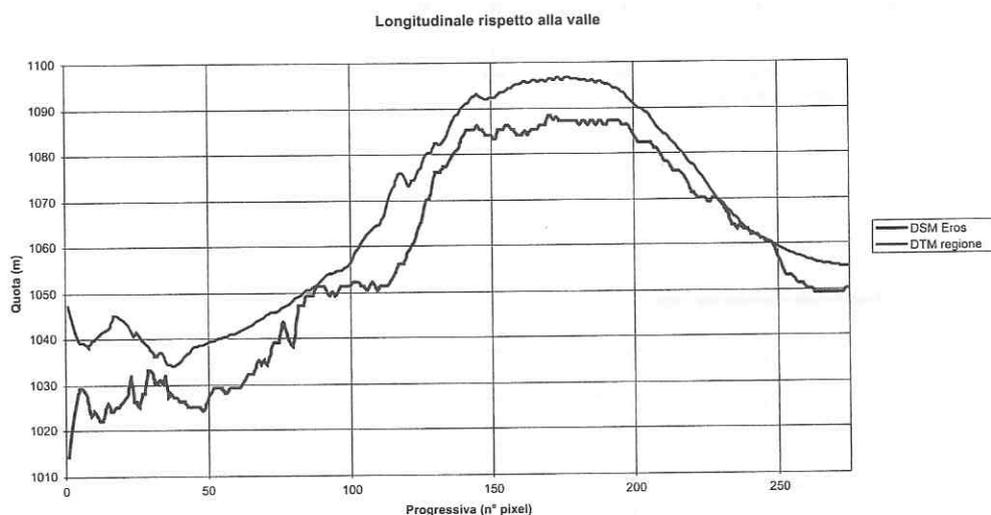
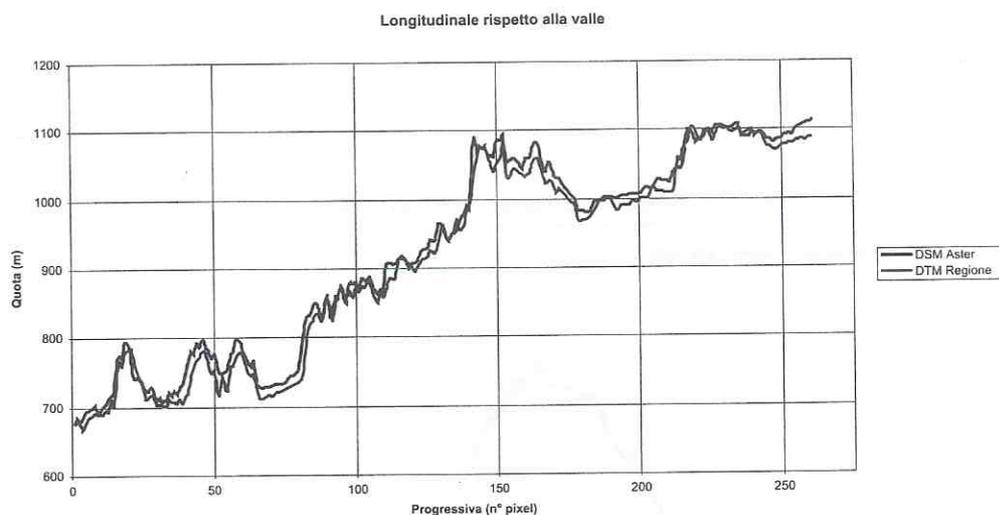
Figura 4 – Rappresentazione schematica dei concetti di superficie reale, DTM, DSM e punti quotati.



Le figure 5 e 6 permettono di evidenziare una sostanziale congruenza tra il dato di riferimento e quelli generati da satellite con limitate zone caratterizzate da sistematismi locali. Nelle figure 7 e 8 è invece evidente la presenza di un sistematismo in quota sebbene il profilo misurato e quello di confronto risultino caratterizzati da un andamento analogo. In termini quantitativi, la stima della precisione altimetrica è stata condotta mediante il calcolo delle differenze tra il DTM di riferimento e quelli ottenuti dalle immagini satellitari.

Figura 5 - Confronto tra profili altimetrici estratti dal DSM Eros e dal DTM di riferimento

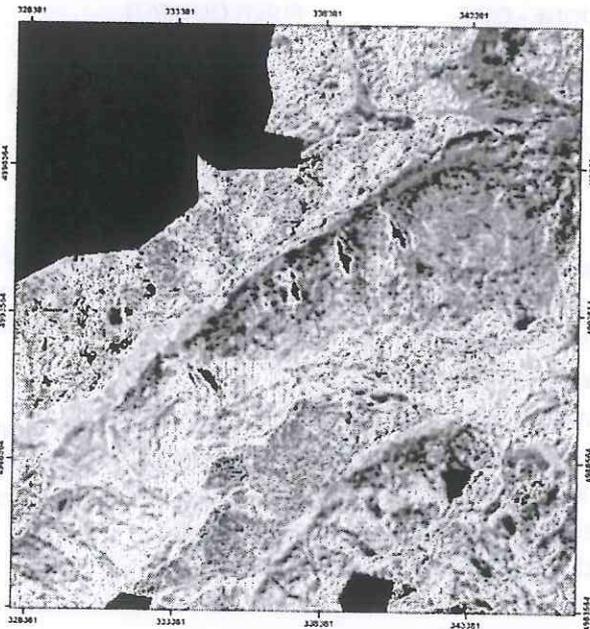
Figura 6 - Confronto tra profili altimetrici estratti dal DSM Eros e dal DTM di riferimento



Il corretto posizionamento planimetrico relativo tra i due set di dati, è stato verificato mediante una procedura di correlazione bidimensionale a pixel intero e sub-pixel ottenendo spostamenti correttivi sostanzialmente nulli ed un coefficiente di correlazione finale prossimo all'unità. Tale operazione è stata condotta utilizzando un software sviluppato in linguaggio IDL dagli autori.

Figura 7 - Confronto tra profili altimetrici estratti dal DSM Eros e dal DTM di riferimento

Figura 8 - Confronto tra profili altimetrici estratti dal DSM Eros e dal DTM di riferimento



### Differenze di quota



Projection UTM  
Datum WGS 1984  
Zone 32N

#### Legenda (m)

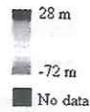
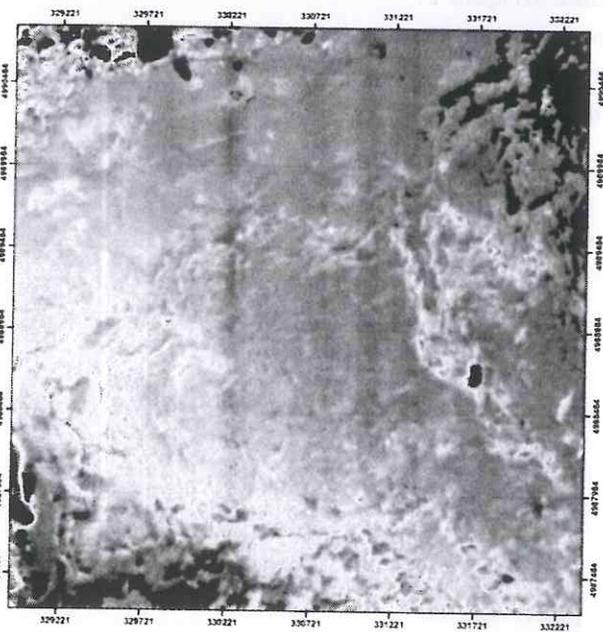


Figura 9 - Differenze di quota CE95 (DTM Regione Piemonte - DSM ASTER).

Figura 10 - Differenze di quota CE95 (DTM Regione Piemonte - DSM EROS A1).

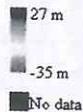


### Differenze di quota



Projection: UTM  
Datum: WGS 1984  
Zone: 32N

#### Legenda (m)



Successivamente sono state ricavate le differenze in quota (riportate in Figure 9 e 10) e calcolati i valori di media e deviazione standard della distribuzione (escludendone le code al 2% e 5%, Tabella 4 e 5) per valutare rispettivamente la presenza di eventuali sistematismi ed una stima della precisione altimetrica. La stessa procedura è stata utilizzata mantenendo come riferimento i punti quotati (Tabella 4 e 5). Per generare le statistiche di supporto alla valutazione in modo automatico, è stato implementato, sempre in linguaggio IDL, un software di confronto dedicato.

DEM REGIONE - CE98		DEM REGIONE - CE95		PUNTI QUOTATI	
Soglia superiore (m)	+42	Soglia superiore (m)	+28	Numero punti	
Soglia inferiore (m)	-84	Soglia inferiore (m)	-72	141	
Media differenze (m)	-19.202	Media differenze (m)	-19.509	Media differenze (m)	-12.75
Sqm (m)	26.485	Sqm (m)	23.835	Sqm (m)	22.52

DEM REGIONE - CE98		DEM REGIONE - CE95		PUNTI QUOTATI	
Soglia superiore (m)	+46	Soglia superiore (m)	+27	Numero punti	
Soglia inferiore (m)	-40	Soglia inferiore (m)	-35	4 <sup>(1)</sup>	
Media differenze (m)	-1.65	Media differenze (m)	-1.85	Media differenze (m)	-3.11
S.q.m. (m)	13.07	S.q.m. (m)	11.69	S.q.m. (m)	8.61

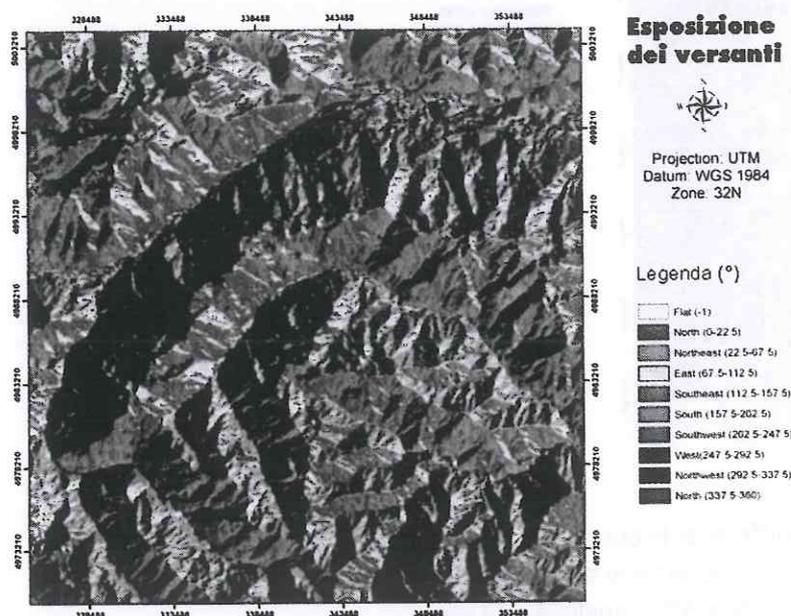
Le medie delle differenze riportate in Tabella 4 (dato Aster) sono sempre negative e di entità paragonabile a quelle dello S.q.m.: risultando pertanto significative denunciando una effettiva sovrastima sistematica delle quote. Il dato Eros (Tabella 5) è invece caratterizzato da una media sostanzialmente nulla in relazione alla risoluzione a terra del sensore e non significativa in relazione allo s.q.m.

Osservando l'immagine delle differenze di quota relative al sensore Aster è inoltre possibile notare una evidente dipendenza delle differenze in quota dalla morfologia del territorio. Al fine di analizzare tali dipendenze l'immagine delle differenze è stata confrontata con le immagini dell'esposizione dei versanti e delle pendenze ottenute dall'elaborazione del DTM della Regione Piemonte e riportate in Figure 11 e 12. In questo modo è stato possibile ricalcolare i parametri statistici, utilizzati per la stima della precisione, separatamente per un certo numero di classi di pendenza ed esposizione, come riportato nei due grafici di Figure 13 e 14.

Tabella 4 – Media e deviazione standard delle differenze tra i dati di riferimento e quelli ottenuti dalle immagini satellitari ASTER (CE98 e CE95)

Tabella 5 – Media e deviazione standard delle differenze tra i dati di riferimento e quelli ottenuti dalle immagini satellitari Eros A1 (CE98 e CE95)

Figura 11 - Carta dell'esposizione dei versanti (8 classi).



<sup>(1)</sup>Dato statisticamente non significativo.

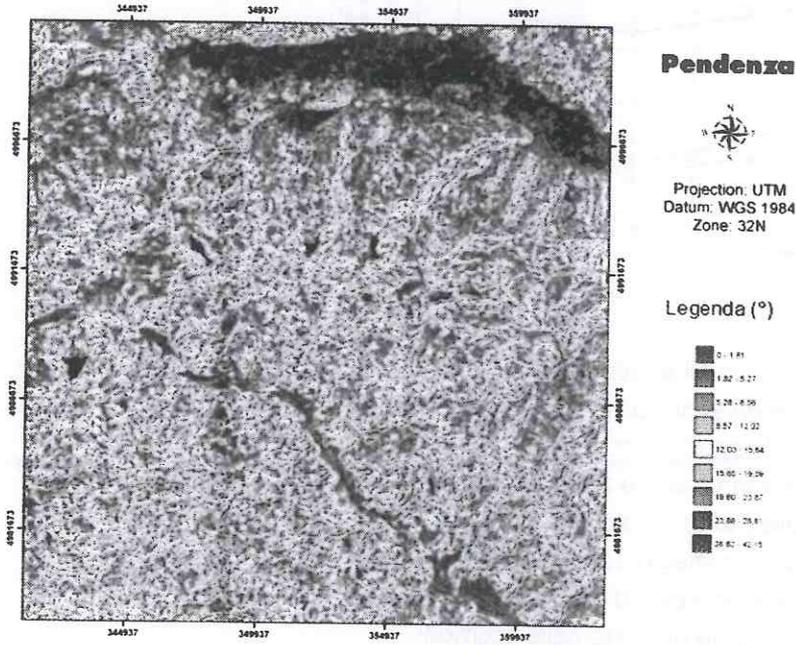
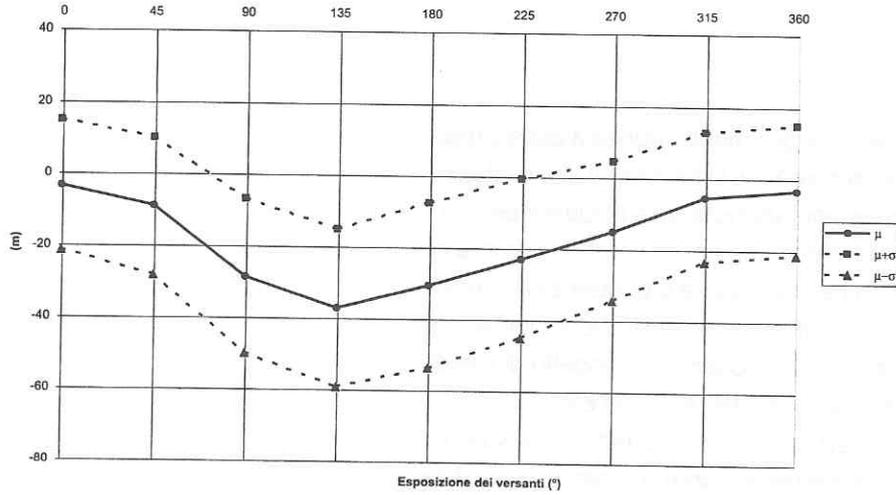


Figura 12 - Carta delle pendenze (9 classi)

Figura 13 - Dipendenza della media e dello S.q.m. delle differenze di quota dall'esposizione dei versanti (8 classi).



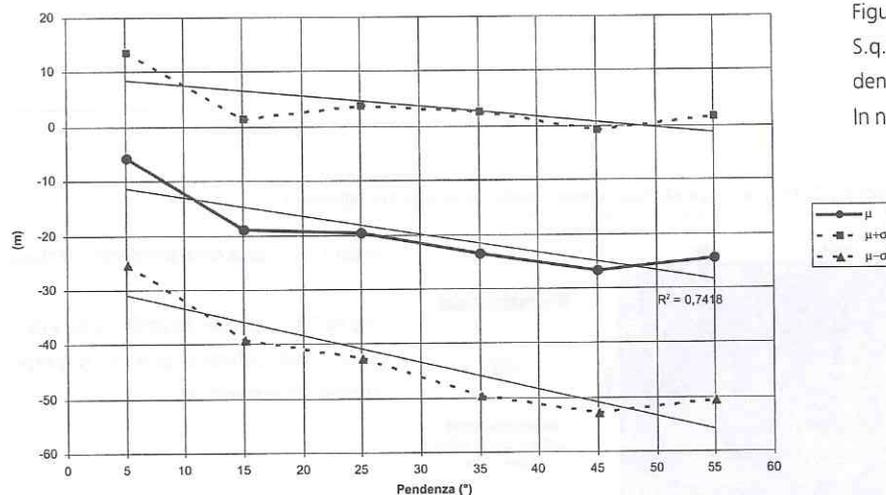


Figura 14 - Dipendenza della media e dello S.q.m. delle differenze di quota dalla pendenza del terreno (6 classi). In nero rette di regressione.

Un decremento della precisione era atteso all'aumentare della pendenza, come evidenziato dalle rette di regressione di figura 14, mentre risulta interessante la dipendenza dall'esposizione: in particolare il sistematico risulta più evidente nelle zone esposte a sud-est mentre tende ad annullarsi per esposizioni nulle (nord). Analisi condotte in tal senso mediante fotointerpretazione delle immagini satellitari escludono effetti dovuti alla presenza di vegetazione, neve ed ombre. Una possibile causa di questo andamento può essere ricercata nelle posizioni relative versante/piattaforma satellitare e versante/azimut solare, che per essere verificata richiede l'analisi di un ampio set di immagini acquisite in periodi e zone differenti.

### Considerazioni applicative

Attualmente l'ambito applicativo maggiormente idoneo a questa tipologia di DSM è l'ortoproiezione di immagini satellitari ad alta risoluzione. Al fine di valutare se la precisione ottenuta sia sufficiente per l'ortoproiezione di una determinata immagine ad una scala prefissata in figura 15, è riportato un grafico che evidenzia la dipendenza dell'errore di posizionamento planimetrico sull'ortofoto in funzione dell'angolo di off-nadir del sensore e dell'errore in quota del modello di elevazione (sono riportati i valori ottenuti con i dati Aster ed Eros). Considerando, ad esempio, un errore massimo ammissibile sull'ortofoto pari a 1 m è facilmente definibile il valore massimo consentito dell'angolo di *off-nadir*, riportato in tabella 6.

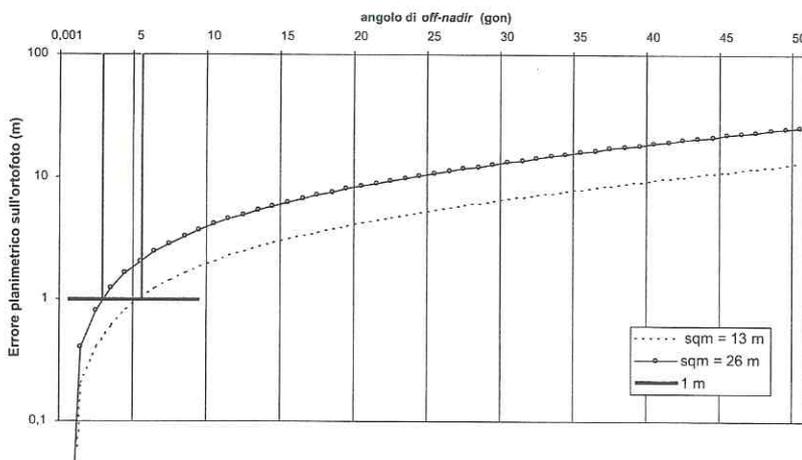


Figura 15 - Entità dell'errore di posizionamento planimetrico (indotto dall'errore in quota in funzione dell'angolo di off-nadir.

Tabella 6 – Limiti di variabilità dell'angolo di off-nadir

Precisione in quota (m)	Limite massimo angolo di off-nadir (gon)
13 (Eros)	~5
26 (Aster)	~3

### Conclusioni

I risultati ottenuti dal dato ASTER evidenziano precisioni prossime a quelle attese mentre quelle relative al dato Eros A1 evidenziano precisioni superiori a quelle del dato ASTER, ma inferiori a quelle attese, confermando la non completa idoneità della relazione [1] applicata ad immagini acquisite con tecnologia pushbroom.

Considerando la mancanza di trasparenza dei software utilizzati per la generazione dei DSM, è attualmente in fase di studio ed implementazione una procedura autonoma per l'estrazione delle quote basata sulle funzioni polinomiali fratte (RFM), ovvero su modelli non rigorosi (black-box). In questo modo sarà possibile un'analisi maggiormente approfondita delle dipendenze individuate nel presente lavoro, essendo la procedura basata non sulla determinazione della parallasse orizzontale bensì sul concetto di intersezione in avanti applicato al caso delle funzioni polinomiali fratte.

Attualmente il software implementato è in grado di determinare le coordinate oggetto (Est, Nord, Quota) a partire da coppie di coordinate immagine relative a punti omologhi individuati dall'utente: verrà in seguito sviluppata la fase di ricerca automatica di punti omologhi per la successiva interpolazione di un DSM.

### Bibliografia

- AA.VV. (2002), Socet Set User's Manual, BAE Systems, 31/1-31/10
- AA.VV. (2003), AsterDTM 2.0. Installation and user's guide, SulSoft Ltda, 7-24
- K. Kraus (1994), Fotogrammetria. Vol. 1 – Teoria e applicazioni, Levrotto e Bella
- E. Borgogno Mondino, F. Giulio Tonolo, A. Lingua (2003), "Produzione di ortofoto di precisione a media scala da immagini satellitari ad alta risoluzione", Atti VII Conferenza Nazionale ASITA.
- K. Jacobsen (2003), Dem generation from satellite data, EARSeL Ghent 2003, Remote Sensing in Transition, Millpress, ISBN 90-77017-71-2, 273-276