

**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI SALERNO  
DIPARTIMENTO DI FISICA "E.R. CAIANIELLO"**



**Corso di Dottorato di Ricerca in  
"SCIENZE E TECNOLOGIE DELL'INFORMAZIONE,  
DEI SISTEMI COMPLESSI E DELL'AMBIENTE"**

**XII CICLO**

**TESI DI DOTTORATO IN**

**APPLICAZIONI GEOMORFOLOGICHE DI MODELLI DIGITALI DELLE ALTEZZE (DEM) DERIVATI  
DA IMMAGINI SATELLITARI GEOEYE-1 AD ALTA RISOLUZIONE**

**Il Coordinatore:**

**Chiar.mo Prof. Roberto Scarpa**

**I Tutor:**

**Chiar.ma Prof.ssa Antonella Amoruso**

**Chiar.ma Prof.ssa Margherita Fiani**

**Il dottorando:  
Dott. Cesarino Zollo**

**Anno Accademico 2014-2015**

Applicazioni geomorfologiche di modelli digitali delle altezze (DEM) derivati da immagini satellitari Geoeye-1 ad alta risoluzione

---

Copyright © 2015 Università degli Studi di Salerno – via Giovanni Paolo II, 132 – 84084 Fisciano (SA), Italy – web: [www.unisa.it](http://www.unisa.it)

Proprietà letteraria, tutti i diritti riservati. La struttura ed il contenuto del presente volume non possono essere riprodotti, neppure parzialmente, salvo espressa autorizzazione. Non ne è altresì consentita la memorizzazione su qualsiasi supporto (magnetico, magnetico-ottico, ottico cartaceo, etc.).

Benché l'autore abbia curato con la massima attenzione la preparazione del presente volume, Egli declina ogni responsabilità per possibili errori ed omissioni, nonché per eventuali danni dall'uso delle informazioni ivi contenute.

Finito di stampare il 21/05/2015

# INDICE

INTRODUZIONE.....	1
ABSTRACT .....	2
1. MISSIONI SATELLITARI PER IMMAGINI HR.....	3
1.1. Il telerilevamento.....	3
1.1.1. Utilizzo delle immagini satellitari .....	4
1.1.2. Orbite satellitari.....	4
1.1.3. Risoluzioni e dati.....	5
1.2. Missioni satellitari e sensori .....	5
1.2.1. Sensori a bassa risoluzione nel visibile e infrarosso.....	5
1.2.1.1. LANDSAT.....	5
1.2.1.2. AQUA E TERRA.....	6
1.2.1.3. SPOT .....	6
1.2.2. Sensori ad alta risoluzione nel visibile e infrarosso.....	6
1.2.2.1. IKONOS .....	6
1.2.2.2. PLEIADES.....	7
1.2.2.3. QUICKBIRD.....	7
1.2.2.4. WORLDVIEW.....	7
1.2.2.5. GEOEYE-1.....	8
1.3. Caratteristiche dell'immagine Geoeye-1 utilizzata in questa tesi .....	10
1.4. Stereoscopia.....	13
2. I MODELLI MATEMATICI PER IL TRATTAMENTO DI IMMAGINI HR.....	15
2.1. Equazioni di collinearità modificate.....	15
2.2. Modelli di georeferenziazione .....	16
2.2.1. Modello di Toutin .....	16
2.2.2. Correzione geometrica con metodi non parametrici.....	17
2.2.2.1. Funzioni razionali polinomiali RPF .....	17
2.2.3. Scelta dei GCPs e posizionamento. ....	19
2.2.4. Accuratezza della trasformazione .....	20
2.3. Software.....	21
2.3.1. Software commerciali.....	21
2.3.2. Software open source e scientifici .....	22
2.3.3. GEOMATICA e SOCET SET e i modelli implementati in essi .....	22
3. DEM E PRODOTTI DERIVATI .....	25
3.1. Modelli digitali del terreno .....	25

3.2.	Acquisizione e diffusione del dato .....	27
3.2.1.	TIN (Triangulated Irregular Network) .....	28
3.2.2.	GRID .....	29
3.2.3.	Formato dei dati digitali .....	30
3.2.4.	Ortofotocarte.....	31
3.3.	Direttive italiane europee e internazionali.....	32
3.3.1.	Intesa Stato Regioni Enti Locali .....	32
3.3.2.	INSPIRE.....	34
3.3.3.	USGS .....	37
4.	PRODUZIONE DI MODELLI DIGITALI DELLE ALTEZZE DA STEREOIMMAGINI GEOEYE-1 ...	39
4.1.	L'area di copertura Geoeeye-1 .....	40
4.2.	La campagna di rilievo GPS .....	41
4.2.1.	Individuazione delle zone da campionare.....	41
4.2.2.	Tecniche di rilievo GPS utilizzate .....	42
4.2.3.	Punti rilevati.....	43
4.2.4.	Fase di post elaborazione .....	45
4.3.	Georeferenziazione.....	51
4.3.1.	Individuazione dei punti migliori attraverso software PCI Geomatica .....	51
4.3.2.	Test sui valori di indeterminazione del software .....	55
4.3.3.	Test per errori planimetrici.....	59
4.4.	Residui di georeferenziazione da GPS .....	61
4.4.1.	Residui di georeferenziazione da software PCI Geomatica e SOCET SET.....	61
4.5.	Residui di georeferenziazione da CTR.....	63
4.6.	Creazione del modello digitale di elevazione .....	64
4.6.1.	PCI Geomatica .....	64
4.6.2.	SOCET SET .....	68
4.7.	Visualizzazione dei canali di correlazione.....	70
4.7.1.	Score channel per il software PCI Geomatica .....	70
4.7.2.	Figure of Merit per il software SOCET SET .....	70
4.7.3.	Visualizzazione delle differenze.....	73
4.8.	Verifica dei punti.....	81
4.9.	Analisi visiva dei modelli digitali delle altezze per l'area di frana .....	84
4.10.	Analisi visiva delle curve di livello per l'area di frana .....	86
4.10.1.	Filtraggio dei DEM.....	91
4.11.	Confronto tra il DEM scelto e DEM certificati .....	93

4.12. Ortofoto .....	95
5. APPLICAZIONI .....	97
5.1. Geologia del territorio .....	97
5.1.1. La zona della frana.....	97
5.2. Applicazioni geomorfologiche .....	100
5.2.1. Analisi degli indici geomorfometrici.....	101
5.2.2. Individuazione classica dei corpi di frana .....	108
5.3. Movimenti franosi.....	109
6. CONCLUSIONI .....	115
ALLEGATI.....	117
RPC ORIGINALI DA METADATI .....	117
PROVE ESEGUITE CON PCI .....	119
Modello matematico di Toutin da GPS - GEOMATICA.....	119
Modello matematico di Toutin da CTR - GEOMATICA.....	119
PARAMETRI UTILIZZATI NEL MODELLO DEFINITIVO .....	120
Modello matematico Toutin .....	120
Modello matematico RPF.....	120
Modello matematico Rigorous Simultaneous.....	120
RESIDUI DI GEOREFERENZIAZIONE MODELLO FINALE .....	121
PCI Geomatica Modello matematico di Toutin per GPS .....	121
PCI Geomatica Modello matematico RPF per CTR.....	122
SOCET SET Modello matematico di Rigorous Simultaneous GCP .....	124
BIBLIOGRAFIA .....	125



## INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 - Diverse porzioni dello spettro e uso nell'ambito del telerilevamento .....	3
Figura 2 - Modalità di acquisizione stereo per Geoeye-1.....	9
Figura 3 - Estensione dell'immagine Geoeye-1 .....	11
Figura 4 - Esempio di angoli di presa nella cattura di immagini satellitari.....	13
Figura 5 - Diversi tipi di distribuzione di GCPs; a) distribuzione lineare b) distribuzione disomogenea c) distribuzione omogenea .....	19
Figura 6 - Differenze tra DSM e DTM da INSPIRE D2.8.II.1 Specifiche sul dato di elevazione	26
Figura 7 - Rete di triangolazione irregolare tipica dei modelli TIN.....	28
Figura 8 - Informazioni legate ai pixel nei formati ASCII GRID .....	29
Figura 9 - Formato GRASS ASCII GRID .....	30
Figura 10 - Precisione altimetrica per la risoluzione spaziale e alla tipologia del terreno.....	33
Figura 11 - Precisione richiesta dal DEM per generare una ortofotocarta .....	33
Figura 12 - Intervalli di contour in funzione della tipologia di terreno .....	35
Figura 13 - Area di copertura per le immagini Geoeye-1 .....	40
Figura 14 - Griglia di campionamento e ipotesi di rilievo. In alto ipotesi di rilievo in ambito GPS; in basso ipotesi di rilievo per estrapolazione da CTR .....	41
Figura 15 - Punti misurati (Verde i GCP – giallo CP- rosso punti scartati). In alto i punti rilevati con rilievo GPS-NRTK, in basso i punti rilevati da Cartografia Tecnica Regionale .....	44
Figura 16 - Schermata di georeferenziazione del software PCI Geomatica. In alto le due modalità di visualizzazione dell'immagine, in basso la modalità di immissione e controllo valori. ....	52
Figura 17 - Residui di georeferenziazione iniziali del modello di Toutin.....	53
Figura 18 - Residui di georeferenziazione iniziali del modello RPF .....	54
Figura 19 – Test di indeterminazione utilizzando il modello RPF per 53 punti come GCP .....	57
Figura 20 - Test di indeterminazione utilizzando il modello di Toutin per 29 punti come GCP .....	58
Figura 21 – Errore volontariamente distribuito in modo disgiunto per le coordinate riga e colonna .....	59
Figura 22 - Residui di georeferenziazione definitivi per i due modelli rigorosi; differenze tra i due software.....	62
Figura 23 - Residui di georeferenziazione mediante modello RPF ottenuti dai punti rilevati da Cartografia Tecnica Regionale .....	63
Figura 24 - Software PCI Geomatica schermata creazione immagini epipolari .....	65
Figura 25 - Software PCI Geomatica schermata input parametri e processamento DEM.....	66
Figura 26 - Software SOCET SET, schermata inserimento punti di controllo e scelta della loro tipologia .....	68
Figura 27 - Software SOCET SET scelta dei parametri per la generazione dei DEM .....	69
Figura 28 - Score Channel DEM ottenuti con PCI Geomatica, a sinistra valori di correlazione per il DEM a risoluzione di 1m; a destra valori di correlazione per il DEM a risoluzione di 2 m ....	71
Figura 29 - FOM dei DEM ottenuti con SOCET SET, a sinistra valori di correlazione per il DEM a risoluzione di 1m; a destra valori di correlazione per il DEM a risoluzione di 2 m .....	72
Figura 30 – Aree campione.....	73
Figura 31 - Differenze tra i canali di correlazione e le curve di livello tra i due software per l'area pianeggiante .....	76

Figura 32 - Differenze tra i canali di correlazione e le curve di livello tra i due software per l'area collinare .....	78
Figura 33 - Differenze tra i canali di correlazione e le curve di livello tra i due software per l'area montana.....	80
Figura 34 - Accuratezza planoaltimetrica ottenuta per i DEM creati con PCI Geomatica e SOCET SET con ris. 2m.....	82
Figura 35 - Accuratezza planoaltimetrica ottenuta per i DEM creati con PCI Geomatica e SOCET SET con ris. 1m.....	83
Figura 36 - Accuratezza planoaltimetrica stereoscopica ottenuta per il DEM creato con PCI Geomatica con ris. 2m.....	84
Figura 37 – Modelli generati in visione shaded relief .....	85
Figura 38 - Curve di livello interdistanza di 2m; Prima riga prodotti da DEM PCI, seconda riga prodotti da DEM SOCET SET. ....	88
Figura 39 - Curve di livello interdistanza di 5m; Prima riga prodotti da DEM PCI, seconda riga prodotti da DEM SOCET SET. ....	89
Figura 40 - Zoom per curve di livello con interdistanza di 5m; Prima riga confronto tra curve di livello derivate da DEM con risoluzione di 1m, seconda riga confronto tra curve di livello derivate da DEM con risoluzione di 2m.....	90
Figura 41 - Curve di livello a interdistanza di 2 metri; Prima colonna (A) estratte dal DEM SOCET SET con risoluzione spaziale di 2 metri, seconda colonna (B) estratte dal DEM SOCET SET con risoluzione spaziale di 1m, prima riga curve senza filtraggio, seconda riga curve post filtraggio (raggio di ricerca 10x10m ed eliminazione delle altezze superiori a 5m rispetto al terreno) .	91
Figura 42 - Modelli ombreggiati per il DEM definitivo, il DEM prodotto da CTR e da LiDAR; in alto a sinistra (A) il DEM con risoluzione spaziale di 2 m prodotto da dati LiDAR e in basso a sinistra (B) il DEM con risoluzione spaziale di 5m prodotto da CTR Regione Campania e a destra (C) il modello prodotto da SOCET SET con risoluzione di 2m,.....	94
Figura 43 – Ortofotocarta prodotta con DEM a risoluzione spaziale di 2 metri .....	95
Figura 44 - Area di interesse; zona sud a confine tra i comuni di Ascea e di Pisciotta (SA).....	98
Figura 45 - Visione panoramica del versante in frana; risistemazione delle rocce al disopra della galleria ferroviaria. ....	98
Figura 46 - Serie storica di ortofotocarte; in giallo l'attuale posizione della viabilità provinciale. ....	99
Figura 47 – A sinistra: carta delle pendenze; a destra: istogramma dei valori di pendenza per la sola area di frana; .....	102
Figura 48 - A sinistra: Carta dell'esposizione dei versanti; a destra: istogramma dei valori esposizione dei versanti per la sola area di frana .....	103
Figura 49 - A sinistra la carta della curvatura planare; a destr l'istogramma dei valori esposizione dei versanti per la sola area di frana .....	104
Figura 50 - A sinistra la carta della curvatura di profilo; a destra l'istogramma dei valori per la sola area di frana .....	105
Figura 51 – A sinistra la carta della curvatura tangenziale o totale; a destra l'istogramma dei valori per la sola area di frana .....	106
Figura 52 - A sinistra la carta del Terrain Ruggedness Index; a destra l'istogramma dei valori per la sola area di frana .....	107
Figura 53 - Corpi di frana con sovrapposte le linee di sezione dei profili tracciati sui DEM da Geoye-1 e da CTR.....	108

Figura 54 -Sottrazione raster tra i due DEM, si può notare come la zona in rosso è quella con materiale mancante e le zone in viola e celeste quelle con maggiore afflusso di materiale.110

Figura 55 - Profili per i diversi corpi di frana; Geoeye-1 (linea tratteggiata) e da CTR (linea continua).....112



## INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 - Caratteristiche del sensore GEOEYE-1 .....	8
Tabella 2 - Accuratezze posizionali in funzione della tipologie di immagini Geoeeye-1 .....	9
Tabella 3 - Caratteristiche dell'immagine GEOEYE-1; A. Metadati riassuntivi per l'immagine ordinata, B. Coordinate dell'area l'area selezionata, C. Metadati per le singole immagini, D. Metadati delle componenti delle immagini. ....	12
Tabella 4 - Valori RMSE verticali secondo la direttiva USGS .....	37
Tabella 5 - Precisione ottenibile in funzione della modalità di rilievo .....	42
Tabella 6 – Tecnica di rilievo GPS utilizzata .....	45
Tabella 7 – Coordinate da rilievo GPS .....	49
Tabella 8 - Esempio di monografia ottenuta .....	50
Tabella 9 – Riepilogo dei test significativi per inserimento di errore volontario per il punto periferico e baricentrico. ....	60
Tabella 10 - Parametri utilizzati in PCI Geomatica per il processamento dei DEM.....	67



## INTRODUZIONE

L'obiettivo di questa tesi di dottorato è la creazione di modelli digitali delle altezze derivati da immagini stereoscopiche acquisite da sensori satellitari ad altissima risoluzione, la valutazione delle accuratèzze planoaltimetriche raggiungibili, nonché le possibili applicazioni. Grazie alle risoluzioni geometriche raggiunte, i satelliti ottici di ultimissima generazione sono paragonabili, in determinati ambiti applicativi, alla più costosa ed impegnativa fotogrammetria classica da aeromobile.

Poiché l'utilizzo di tali immagini è piuttosto recente, le informazioni relative agli impieghi e alla adattabilità in scale cartografiche più o meno spinte provengono da lavori di ricerca specifici sia in ambito scientifico che privato. Tra i diversi impieghi risulta di maggior interesse la possibilità di produzione di modelli digitali delle altezze (DEM) da immagini ad alta risoluzione con accuratèzze paragonabili alle metodiche classiche di rilievo. Proprio in questo ambito va a porsi la prima parte di questo lavoro di tesi utilizzando le immagini satellitari Geoeye-1 con risoluzione spaziale di 50 cm e in modalità stereo nonché le problematiche riscontrate. La seconda parte di questo lavoro di tesi si focalizza sulla possibilità di utilizzare il DEM prodotto da immagini satellitari in ambito geomorfologico, producendo da essi degli indici geomorfometrici per la valutazione di corpi di frana.

Il primo capitolo di questo lavoro di tesi introduce le peculiarità del telerilevamento satellitare, riporta le caratteristiche del sensore Geoeye-1 e le particolarità delle immagini utilizzate.

Il secondo capitolo tratta dei modelli matematici implementati nei software Geomatica della PCI Geomatics e SOCET SET della BAE System e le diversità tra essi.

Il terzo capitolo riporta le modalità di acquisizione e diffusione dei dati geografici, le accuratèzze posizionali da raggiungere per utilizzare tali prodotti in ambito cartografico.

Il quarto capitolo è interamente centrato sulla produzione dei DEM.

La prima parte è dedicata alla campagna GPS per il rilievo dei punti di controllo a terra (GCP), utilizzati poi per la fase di georeferenziazione delle immagini satellitari. La parte centrale affronta le problematiche riscontrate e i test di accuratèzza effettuati per i prodotti generati. Infine sono riportate le comparazioni tra il DEM creato e prodotti certificati.

Il quinto capitolo è dedicato alla creazione di indici geomorfometrici per un ambito di frana. Utilizzando tali indici e curve di livello derivate dal DEM prodotto, sono stati creati i contorni di frana. La parte conclusiva del capitolo invece riporta la valutazione dei movimenti avvenuti tra il 2004 e il 2012.

## ABSTRACT

The purpose of this doctoral thesis is to create digital elevation models derived from very high-resolution stereoscopic satellite imagery, besides the evaluation of planimetric and altimetric accuracies achievable, and their possible applications. Thanks to the geometric resolutions achieved, the latest generation of optical satellites are comparable, in certain parts of application, to the most expensive and demanding classic aircraft photogrammetry. The use of these images is fairly recent, and the information relating to its usage and adaptability for advanced maps scales comes from specific research works in both scientific and private sectors. Among its various functions, of particular interest is the possibility to produce digital elevation models (DEM) from high-resolution images with accuracies comparable to the classical methods of survey. The first part of this thesis just points to that research area using Geoeye-1 satellite images with spatial resolution of 50 cm and the same images in stereo modality. In addition to this, it analyses the problems encountered. The second part focuses on the possibility of using the produced DEM from satellite images in the field of geomorphology, producing from them geomorphometrics indices for evaluating landslide.

The first chapter of this thesis introduces the characteristics of remote sensing satellite, shows the characteristics of the sensor Geoeye-1 and the particularities of the images used.

The second chapter deals with the mathematical models implemented in software Geomatica of PCI Geomatics and Socet SET BAE System and the differences between them.

The third chapter contains the methods of acquisition and distribution of geographic data, the positional accuracies to achieve in order to use these products in cartography.

The fourth chapter is entirely centered on the production of DEMs.

The first part is on GPS surveying for of ground control points (GCP), which have been used for georeferencing of satellite images. The central part deals with the problems encountered and accuracy tests performed for the products generated. Finally it reports comparisons between the DEM created and certified DEM.

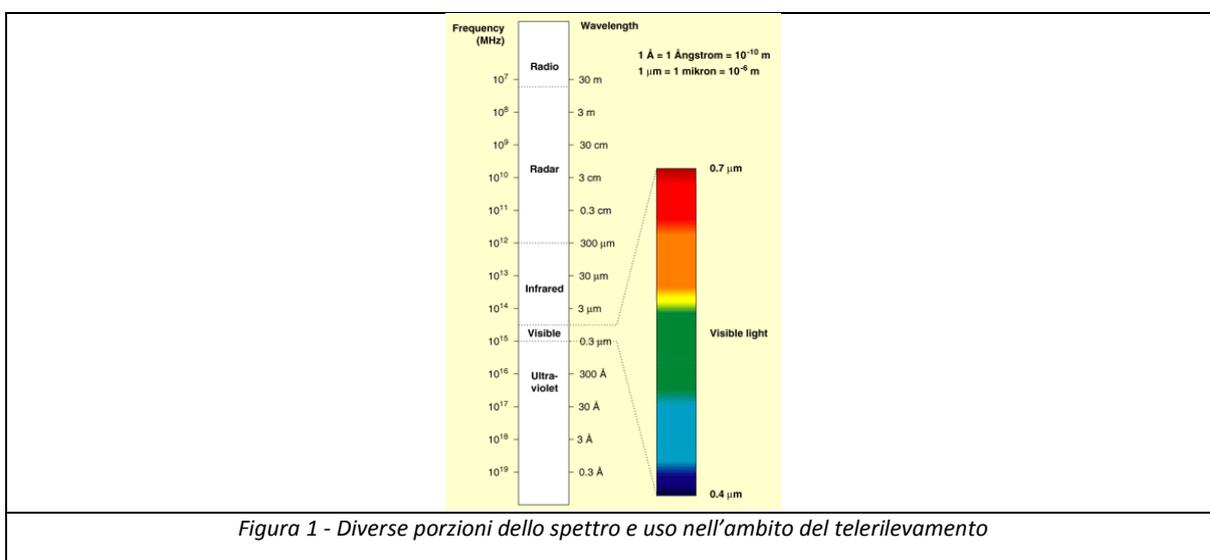
The fifth chapter is dedicated to create geomorphometrics indices for a landslide area.

Using these indices and contour lines derived from Geoeye-1 DEM, it has been possible to create the boundary of the landslide. The final part of the chapter relates the assessment of the changes that occurred between 2004 and 2012.

# 1. MISSIONI SATELLITARI PER IMMAGINI HR

## 1.1. Il telerilevamento

Il telerilevamento, corrispondente al termine inglese Remote Sensing, è l'acquisizione di informazioni riguardanti un oggetto attraverso uno o più sensori non in contatto diretto con esso. L'oggetto spesso volte è l'ambiente terrestre o parti specifiche di esso. Dato il contatto fra la sensoristica e l'oggetto da indagare, l'informazione acquisita è trasportata per mezzo di onde, spesso elettromagnetiche o anche acustiche. La determinazione e la misura delle caratteristiche dell'oggetto osservato si basano sulle proprietà del campo, ad esempio elettromagnetico, che ha interagito, con l'oggetto (emissione, diffusione, riflessione o propagazione) o messo dall'oggetto. Senza addentrarci nelle caratteristiche delle tecniche di telerilevamento, per brevità, e note anche per il forte sviluppo tecnologico avvenuto negli ultimi decenni, che ha permesso il passaggio di queste tecniche dal primario utilizzo a uso scientifico, a moltissimi campi commerciali, si accenna solo brevemente, in questo elaborato allo spettro elettromagnetico. Dato che a seconda della frequenza a cui opera il sistema ci sono interazioni diverse con l'oggetto da indagare, la scelta della frequenza di operazione è importantissima, soprattutto se legata ad una particolare informazione che si vuole acquisire ed applicazione che si vuole ottenere. Le bande dello spettro elettromagnetico maggiormente utilizzate nel telerilevamento sono generalmente quella del visibile, quelle dell'infrarosso vicino, termico e lontano e la banda delle microonde. Com'è possibile intuire, per misure nelle bande che vanno dal visibile all'infrarosso lontano si considerano radiazioni emesse spontaneamente dall'oggetto o dovute alla riflessione, diffusione o assorbimento della radiazione solare, per misure nella banda delle microonde abbiamo bisogno di un emettitore artificiale ad esempio il RADAR. Questo porta a classificare i sensori in due classi fondamentali: quelli passivi e quelli attivi. La Figura 1 mostra le diverse porzioni dello spettro utilizzate nell'ambito del telerilevamento.



Caso particolare tra i sensori attivi sono i LiDAR, che utilizzano impulsi laser, tra le più utilizzate ci sono le lunghezze d'onda ricadenti nelle bande dell'ultravioletto, della luce visibile o dell'infrarosso vicino (CNR, 2000).

#### 1.1.1. Utilizzo delle immagini satellitari

Le prime elaborazioni e studi di immagini satellitari furono condotte dal governo americano e dai suoi contraenti. Ad esempio la ESL Incorporated sviluppò una delle prime trasformate di Fourier in due dimensioni da applicare nell'elaborazione digitale delle immagini, in particolare di su immagini della NASA e della National Security Agency (NSA).

Le immagini satellitari ricoprono diversificate applicazioni in meteorologia, agricoltura, geologia, conservazione della biodiversità, pianificazione territoriale, educazione, "intelligence" e guerra. Sia nel caso della presa con sensori passivi che attivi, esiste la possibilità di riuscire ad ottenere da immagini acquisite in modalità stereo un modello digitale di elevazione (Digital Elevation Model - DEM). Esistono software dedicati all'interpretazione e l'analisi delle immagini satellitari e la generazione di prodotti derivati, tra essi quelli maggiormente utilizzati sia in ambito scientifico che commerciale troviamo PCI Geomatica, ERDAS IMAGINE, ENVI, SOCET SET ed altri, o tra quelli open source Orfeo Toolbox. In ambito scientifico le immagini satellitari possono essere inoltre utilizzate in ambiti diversi come la geodesia, la sismologia, la vulcanologia e l'oceanografia per dedurre cambiamenti nella superficie terrestre o del fondo degli oceani dovuti a terremoti, eruzioni vulcaniche e tsunami (Lovholt et al. 2006) e in campo archeologico per l'individuazione di siti sepolti (Lasaponara & Masini 1995 e 2002).

#### 1.1.2. Orbite satellitari

I sensori per il telerilevamento sono usualmente traspostati su satelliti che possono percorrere diverse orbite, le orbite geostazionarie, utilizzate principalmente dai numerosi satelliti di telecomunicazione, tra cui quelli televisivi, offrono il vantaggio di vedere la Terra sempre dalla stessa posizione, il che significa che è in grado di registrare immagini della stessa porzione di superficie terrestre a brevi intervalli di tempo. Questa caratteristica è particolarmente utile per osservazioni meteorologiche. Uno svantaggio delle orbite geostazionarie risiede nella grande distanza dalla Terra, che riduce la risoluzione spaziale raggiungibile. Per satelliti dotati di sistemi a sensore passivo, l'immagine registrata dipende dall'illuminazione solare e quindi dall'orbita del satellite stesso attorno alla Terra. Perché si possano effettuare confronti fra le immagini registrate in tempi successivi, le condizioni della luce devono essere sufficientemente identiche. Le registrazioni devono avvenire quindi alla stessa ora locale, affinché l'altezza del Sole sull'orizzonte sia la stessa e il piano dell'orbita satellitare abbia lo stesso angolo rispetto alla luce proveniente dal Sole. Questi requisiti si possono ottenere posizionando il satellite in un'orbita polare, inoltre il satellite esegue rivoluzioni intorno alla propria orbita, la Terra ruota sul proprio asse. Ogni volta che il satellite effettua una rotazione completa, viene effettuata una scansione di una nuova striscia della superficie terrestre. Dopo un certo numero di rotazioni si otterrà una scansione dell'intera superficie della Terra. Alcuni satelliti effettuano ogni volta una scansione ampia e possono, di conseguenza, ricoprire l'intera superficie della Terra in poche rotazioni; al contrario, i satelliti con elevata risoluzione che effettuano scansioni di porzioni piccole di superficie impiegano vari giorni per coprire l'intera superficie terrestre (ESA, web link).

### 1.1.3. Risoluzioni e dati

Quando si parla di risoluzioni nel campo dei dati prodotti da satelliti per telerilevamento, esistono ben quattro diverse risoluzioni (spaziale, spettrale, temporale e radiometrica), definite come segue (Campbell, J. B. 2002)

- risoluzione spaziale: ovvero il minimo angolo che un sistema ottico è in grado di distinguere, ovvero a quale dimensione corrisponde un pixel nell'immagine telerilevata, che rappresenta una certa superficie (ad esempio in m<sup>2</sup>) determinata dal Field of View (FOV) del sensore. Nei moderni satelliti commerciali si raggiungono risoluzioni radiometriche anche sotto il metro (ad esempio nel satellite GeoEye 1, un pixel corrisponde ad una superficie di 0.41m x 0.41m);
- risoluzione spettrale: ovvero la larghezza ed il numero di bande spettrali in cui l'immagine è registrata. Ciò dipende dal numero di bande spettrali del sensore, ad esempio il sensore Landsat 8 ha 11 bande spettrali, di cui alcune nella regione infrarossa, altre in quella del visibile;
- risoluzione radiometrica: solitamente questo valore spazia tra gli 8 e 16 bit, che corrispondono da 256 a 65535 livelli per ogni banda spettrale, ovvero la differenza di intensità minima della radiazione che il sensore è in grado di distinguere, in numero di livelli. L'effettiva risoluzione radiometrica dipende dal rumore dello strumento e può essere in qualche modo alterata con tecniche di elaborazione dell'immagine telerilevata, aumentandone il contrasto.
- risoluzione temporale: ovvero il tempo che intercorre prima che un satellite sorvoli nuovamente un determinato punto. Questa risoluzione può essere aumentata utilizzando costellazioni di satelliti.

## 1.2. Missioni satellitari e sensori

Di seguito vengono brevemente riassunte informazioni descrittive e tecniche riguardo alcune missioni satellitari e aerotrasportate e le caratteristiche proprie del sensore i cui prodotti sono utilizzati in questa tesi. (Richards et al. 2006).

### 1.2.1. Sensori a bassa risoluzione nel visibile e infrarosso

I sensori a bassa risoluzione generalmente vengono utilizzati per applicazioni su ampie porzioni di territorio ad esempio, per la protezione del suolo e del patrimonio boschivo, la localizzazione di risorse energetiche e minerarie, ambiti ambientali ecc. Di seguito è riportato un elenco dei sensori satellitari maggiormente utilizzati.

#### 1.2.1.1. LANDSAT

Tra i primi satelliti nati per il monitoraggio terrestre e la raccolta di informazioni del pianeta Terra si annovera LANDSAT. I primi tre satelliti del sistema LANDSAT avevano caratteristiche orbitali simili, con orbite polari ed eliosincrone. LANDSAT3 acquisiva dati termici durante la fase notturna in orbita ascendente, per i mesi durante i quali il sensore termico fu operativo. Le caratteristiche orbitali della seconda generazione del sistema LANDSAT, da LANDSAT4 per modalità di acquisizione delle immagini erano pressoché simile ma il satellite viaggiava ad una altitudine più bassa (705 km). Questa orbita bassa fornisce un

ciclo di ripetizione di 16 giorni compiendo 14,56 orbite per giorno, corrispondenti a un totale di 233 rivoluzioni per ogni ciclo. L'ultimo lanciato, nel 2013, è il LANDASAT 8 che ha la capacità di acquisire circa 400 scene giornaliere nelle bande del visibile, vicino infrarosso, medio infrarosso e infrarosso termico, con una risoluzione di 15m in pancromatico, 30 m in multispettrale e 100m in termico. Lo dimensione di swath invece è di 185 km.

#### 1.2.1.2. *AQUA E TERRA*

I satelliti AQUA e TERRA, che fanno parte del sistema di osservazione terrestre della NASA, sono stati lanciati nel 1999 e nel 2002, con una orbita eliosincrona comparabile a quella del LANDASAT 7. Questi satelliti sono conosciuti come EOS-PM e EOS-AM (Earth Observing System, notte e giorno), i principali sensori montati su TERRA sono il MODIS, ASTER, CERES, MISR e MOPITT invece su AQUA troviamo MODIS, un set di ricevitori acustici atmosferici, CERES e un radiometro a microonde. Maggiormente utilizzati in ambito del telerilevamento troviamo MODIS e ASTER, il primo con risoluzioni spaziali di 250m per le bande spettrali da 0.620–0.670 e 0.841–0.876  $\mu\text{m}$ , 500m per la banda spettrale da 0.459–2.155  $\mu\text{m}$  e di 1000m per le bande spettrali da 0.405–14.385  $\mu\text{m}$ . Aster invece ha risoluzioni spaziali di 15m per le bande spettrali da 0.52 a 0.86  $\mu\text{m}$ , 30m per le bande spettrali da 1.600 a 2.430  $\mu\text{m}$  e di 90m per le bande spettrali che vanno da 8.125 a 11650  $\mu\text{m}$ . Lo swath invece è di 2330 km per il sensore MODIS e di 60 km per il sensore ASTER.

#### 1.2.1.3. *SPOT*

Il satellite francese SPOT (Système Pour l'Observation de la Terre) è in grado di effettuare rilevamenti in tre bande spettrali (verde, rosso e infrarosso vicino) con una risoluzione di 20 metri. È dotato inoltre di uno scanner pancromatico con risoluzione spaziale di 10 metri, e per molti anni è stata la risoluzione più elevata di sensori per uso non militare. La dimensione di swath è variabile con 60 km per le acquisizioni multispettrali fino a 117 km per quelle pancromatiche. Può inoltre scansire la stessa striscia per due volte in due passaggi consecutivi: le due diverse angolazioni sulla stessa area creano un effetto stereoscopico che consente di effettuare rilievi altimetrici.

### 1.2.2. Sensori ad alta risoluzione nel visibile e infrarosso

I sensori ad alta risoluzione vengono principalmente utilizzati per il telerilevamento di dettaglio e nel corso degli ultimi anni il loro utilizzo ha aperto ulteriori scenari di applicazioni realizzabili a scala molto piccola in ambiti come la di topografia, cartografia e fotogrammetria numerica. Di seguito un breve elenco dei sensori satellitari maggiormente utilizzati.

#### 1.2.2.1. *IKONOS*

Il satellite IKONOS, lanciato nel 1999 in orbita eliosincrona ad un'altitudine di 681km, ha un ciclo di acquisizione di 3 giorni ma con la possibilità di acquisire ogni 1,5 giorni in modalità di puntamento off-nadir. Le risoluzioni spaziali raggiunte dal sensore sono di 4 metri per i canali RGB e termico con valori di bande spettrali compresi tra 0,45 e 0,90  $\mu\text{m}$ , e di 1 metro per il canale pancromatico, invece le dimensioni dello swath sono di circa 13 km al nadir. Ikonos come il satellite SPOT permette la generazione di modelli altimetrici grazie alla sua capacità di acquisizione stereoscopica, tali modelli riescono ad ottenere, senza l'ausilio di GCP, un errore circolare posizionale di 25 metri.

#### 1.2.2.2. PLEIADES

I satelliti PLEIADES 1A e 1B fanno parte della costellazione PLEIADES comprendente i due satelliti prima elencati e i due satelliti SPOT 6 e 7. I due Pleiades sono stati messi in orbita rispettivamente nel 2011 e nel 2012, hanno un'orbita eliosincrona ad una altitudine di 695 km con una frequenza di rivisitazione in nadir di 1 giorno per la costellazione intera. Le risoluzioni spaziali raggiunte dal sensore sono di 2 metri per i canali RGB e vicino infrarosso con valori di bande spettrali compresi tra 0,43 e 0,94  $\mu\text{m}$ , e di 70 cm ricampionati a mezzo metro per il canale pancromatico comprendendo i valori di banda spettrale compresa tra 0,47 e 0,83  $\mu\text{m}$ , invece le dimensioni dello swath sono di 20 km al nadir. Come per gli ultimi due sensori prima introdotti, anche PLEIADES è capace di acquisire immagini in modalità stereo fornendo fino a 3 coppie stereo per acquisizione potendo ricavare l'elevazione della superficie rilevata, tali modelli riescono ad ottenere, senza l'ausilio di GCP, un errore circolare posizionale dai 6 ai 10 metri.

#### 1.2.2.3. QUICKBIRD

Il satellite QUICKBIRD, lanciato nel 2001, orbita ad un'altezza di 600km con tempi di rivisitazione che variano tra i 3,5 giorni e all'occorrenza anche di un solo giorno. Le risoluzioni spaziali raggiunte dal sensore sono di 2,5 metri per i canali RGB e vicino infrarosso con valori di bande spettrali compresi tra 0,45 e 0,90  $\mu\text{m}$ , e di 61 cm ricampionati a 70 cm per il canale pancromatico, invece le dimensioni dello swath sono di 16,5 km al nadir. Come per gli ultimi tre sensori, anche QUICKBIRD è capace di acquisire immagini stereoscopiche dalle quali derivare l'altimetria della zona rilevata, tali modelli riescono ad ottenere, senza l'ausilio di GCP, un errore circolare posizionale di 23 ai 40 metri.

#### 1.2.2.4. WORLDVIEW

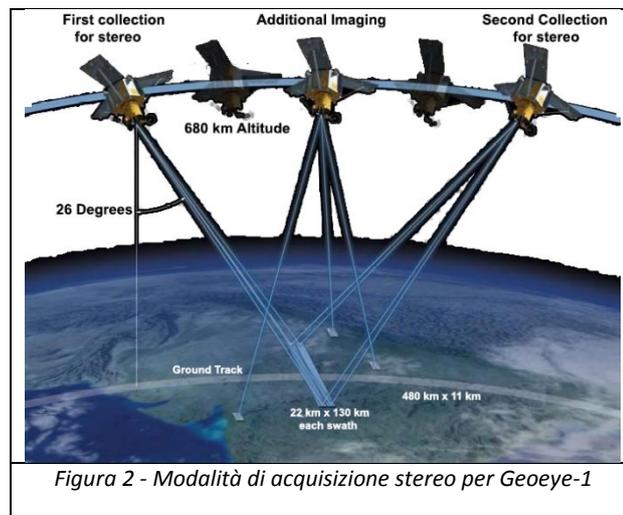
WORLDVIEW -1, in orbita nel 2007, WORLDVIEW-2, in orbita nel 2009, e dal 2014 WORLDVIEW-3. Tutti hanno un'orbita eliosincrona a 496 Km di altitudine per il primo, 770 km per il secondo e 617 km il terzo. La frequenza media di rivisitazione varia da meno di 1 giorno ai circa 1,7 giorni per la prima generazione del sensore. Le risoluzioni spaziali raggiunte dai sensori erano di 1,85 metri per i canali RGB e vicino infrarosso con valori di bande spettrali compresi tra 0,45 e 0,89  $\mu\text{m}$ , ad essi si accostano altre 4 bande spettrali, la banda costiera con risoluzione spettrale tra 0,40 e 0,45  $\mu\text{m}$ , la banda gialla con risoluzione spettrale tra 0,585 e 0,625  $\mu\text{m}$ , la banda "red-edge" con risoluzione spettrale tra 0,705 e 0,745  $\mu\text{m}$  e la banda del medio infrarosso "NIR2" con risoluzione spettrale tra 0,86 e 1,04  $\mu\text{m}$ . La banda pancromatica veniva resa disponibile inizialmente a una risoluzione spaziale di 50 cm ma attualmente è resa disponibile fino ai 31 cm. Le dimensioni dello swath invece sono di circa 17 km al nadir. Come per gli ultimi quattro sensori, anche QUICKBIRD è capace di acquisire immagini stereoscopiche da cui poi derivare l'altimetria, tali modelli riescono ad ottenere, senza l'ausilio di GCP, un errore circolare posizionale dai 4 ai 8 metri.

### 1.2.2.5. GEOEYE-1

Geoeeye-1 è un satellite ottico ad altissima risoluzione, lanciato nel 2008 per l'osservazione della terra, in un'orbita eliosincrona ad un'altezza di 684 km ed una inclinazione di 98 gradi con passaggio all'equatore alle 10:30. Riesce ad acquisire immagini fino a 35 gradi fuori dal nadir o, tramite acquisizione programmata può spingersi fino 60/72 gradi fuori dal nadir. La risoluzione spaziale è di 41cm in formato nativo con pixel di 50 cm per la modalità pancromatica e con risoluzione spaziale di 1,65 m in formato nativo con pixel di 2 m per le quattro bande multispettrali. E' dotato inoltre di una notevole agilità che gli consente di acquisire aree piuttosto ampie anche in modalità stereoscopica: in questo modo si ottengono coppie di immagini con condizioni simili di acquisizione, particolarmente valide per l'estrazione di Modelli Digitali di Elevazione (DEM). Punto di forza di Geoeeye-1 è anche la sua accuratezza planimetrica nativa senza utilizzo di punti di controllo a terra, consentendo di mappare oggetti naturali ed antropici direttamente sull'immagine acquisita con un errore circolare planimetrico di circa 5 metri per immagini singole e di 4 metri per quelle stereoscopiche, ottenendo per esse un errore circolare verticale di circa 6 metri. Il tempo di rivisitazione di Geoeeye-1 mediamente è di 3 giorni e varia in base all'angolo di acquisizione desiderato. Di seguito una tabella riepilogativa.

Scheduled Launch Date	2008		
Camera Modes	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Simultaneous panchromatic and multispectral (pan-sharpened)</li> <li>- Panchromatic only or Multispectral only</li> </ul>		
Resolution	0.41 m / 1.34 ft* panchromatic (nominal at Nadir) 1.65 m / 5.41 ft* multispectral (nominal at Nadir)		
Metric Accuracy/Geolocation	Mono: 5 m CE90 Stereo: 4 m CE90 Horizontal                      6 m LE90 Vertical These are specified as 90% CE (circular error) for the horizontal and 90% LE (linear error) for the vertical with no ground control		
Swath Widths & Representative Area Sizes	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nominal swath width - 15.2 km / 9.44 mi at Nadir</li> <li>- Single-point scene - 225 sq km (15x15 km)</li> <li>- Contiguous large area - 15,000 sq km (300x50 km)</li> <li>- Contiguous 1° cell size areas - 10,000 sq km (100x100 km)</li> <li>- Contiguous stereo area - 6,270 sq km (224x28 km)</li> </ul> (Area assumes pan mode at highest line rate)		
Imaging Angle	Capable of imaging in any direction		
Revisit Frequency at 681 km Altitude (40° Latitude Target)	Max Pan GSD	Off Nadir Look Angle	Average Revisit
	0.42 meters	10 deg	8.3 DAYS
	0.50	28	2.8
	0.59	35	2.1
Daily Monoscopic Area	Up to 700,000 sq km/day (270,271 sq mi/day) of pan-only area		
Collection Capacity	Up to 350,000 sq km/day (135,135 sq mi/day)		
Launch Vehicle	Delta II		
Launch Vehicle Manufacturer	Boeing Corporation		
Launch Location	Vandenberg Air Force Base, California		
Satellite Weight	1955 kg / 4310 lbs		
Satellite Storage	1 Terabit recorder; X-band downlink (at 740 mb/sec or 150 mb/sec)		
Operational Life	Fully redundant 7+ year design life; fuel for 15 years		
Satellite Modes of Operation	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Store and forward</li> <li>- Real-time image and downlink</li> <li>- Direct uplink with real-time downlink</li> </ul>		
Orbital Altitude	681 kilometers / 423 miles		
Orbital Velocity	About 7.5 km/sec or 17,000 mi/hr		
Inclination/Equator Crossing	98 degrees / 10:30am		
Orbit type/period	Sun-synchronous / 98 minutes		
<i>Tabella 1 - Caratteristiche del sensore GEOEYE-1</i>			

L'ente gestore delle immagini mette a disposizione dell'utente 3 diverse tipologie di immagini, Geo, Geoprofessional e Geostereo. La versione Geo è corretta radiometricamente e fornita con i metadati contenenti i coefficienti del polinomio razionale (Rational Polynomial Coefficients RPC) calcolati dal gestore utilizzando le informazioni di posizione del sensore, e quelle note di alcuni punti a terra. Gli RPC così ottenuti comportano errori circolari, come prima indicato, nell'ordine di decine di metri, come calcolare tali coefficienti sarà spiegato nel capitolo due. Quella Geoprofessional oltre alla correzione radiometrica e ai metadati RPC è ortorettificata con modelli di elevazione derivati da immagini precedenti e possiede una accuratezza che è funzione del DEM stesso, ma può essere richiesta anche una versione Precision con accuratezza migliorata. Il prodotto Geostereo, che è quello utilizzato per questa tesi, è fornito con tutte le caratteristiche della versione GEO ma come coppia di immagini acquisite con diverso angolo di vista come da Figura 2.



Questi prodotti forniti dal gestore delle immagini posseggono una accuratezza posizionale nativa, come riportato in tabella 2, che permette all'utente di poter utilizzare i prodotti anche senza un post processing mirato a migliorarne la precisione plano-altimetrica.

Geoeeye-1 0.50-Meter	Positional Accuracy			Ortho Corrected	Target Elevation Angle	Mosaics Available
	CE90	RMSE	NMAS			
Geo	5 meters	3 meters	N/A	No	>60°	No
GeoProfessional	10 meters	5 meters	1:12,000	Yes	>66°	Yes
Precision	4 meters	2 meters	1:5,000	Yes	>72°	Yes
	CE90	LE90	NMAS			
GeoStereo	4 meters	6 meters	1:5,000	No	>60°	No
Precision	2 meters	3 meters	1:2,500	No	>60°	No

*Tabella 2 - Accuratezze posizionali in funzione della tipologie di immagini Geoeeye-1*

Dato che le immagini utilizzate per questo lavoro provengono dal Geoeeye-1, nei paragrafi successivi vengono riportate dapprima le caratteristiche delle immagini acquisite con Geoeeye-1 riguardanti la zona di interesse, poi le caratteristiche di una presa stereoscopica.

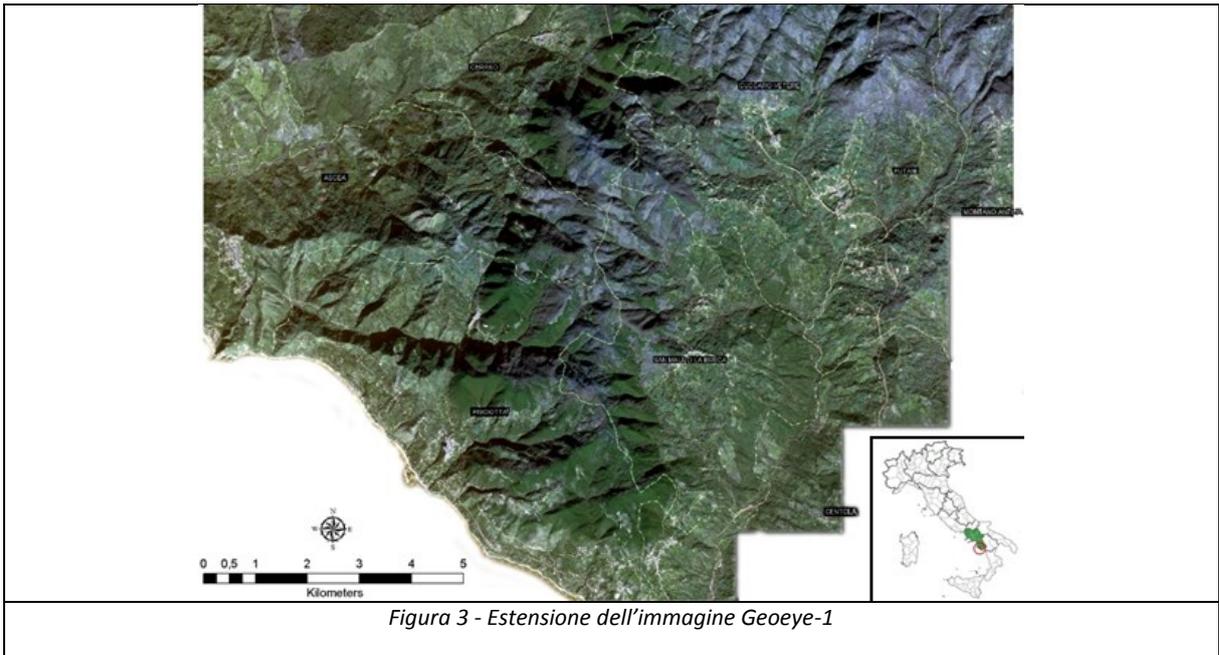
### **1.3. Caratteristiche dell'immagine Geoeye-1 utilizzata in questa tesi**

Al momento del ricevimento delle immagini stereoscopiche acquisite da sensore a bordo del satellite Geoeye-1, il gestore delle immagini fornisce già i dati di accuratezza stimata per le immagini utilizzabili, quindi anche senza una correzione geometrica. Dai parametri del gestore risulta che l'accuratezza planimetrica e di elevazione offerta da GeoEye-1 ha un errore inferiore ai 3 metri (Geoeye-1, 2010) che consentirebbe all'utente di mappare oggetti naturali ed antropici direttamente sull'immagine acquisita rispetto alla loro reale posizione sulla superficie terrestre senza l'utilizzo di punti di controllo a terra (Ground Control Points, GCPs) per ortocorreggere le immagini. In letteratura è possibile trovare pubblicazioni (Fraser & Ravanbakhsh, 2009; Meguro & Fraser 2010; Mitchell & Ehling, 2010) che testano l'errore circolare e l'errore lineare sul 90% dell'immagine (Circular Error CE90; Linear Error LE90). Nella maggior parte dei casi, il CE90 e il LE90 delle loro immagini è di 2m e di 3m rispettivamente, ma in realtà attraverso l'ausilio di punti di controllo gli autori riscontrano una accuratezza planimetrica che si attesta al di sotto del mezzo pixel e una accuratezza di elevazione di circa un pixel.

Il sensore ha acquisito la stereocoppia utilizzata in questo lavoro di tesi il 1 gennaio 2012 alle ore 09:43 GMT, in assenza di nuvolosità. Com'è possibile immaginare una acquisizione nel periodo invernale a quell'ora del mattino comporta una posizione del Sole molto bassa che porterà sicuramente in alcune zone ad un notevole ingombro di ombre, molto accentuato nelle zone dove ci sono forti pendenze o salti di elevazione repentini nonché nei pressi di zone fortemente abitate. Questo grosso ingombro di ombre, porta con sé una mancanza di dato, che poi nella fase di costruzione stereoscopica porterà ad una mancanza o incertezza di dato di elevazione. I pixel mancanti verranno interpolati in automatico dal software per l'attribuzione del dato di elevazione.

Dai dati relativi ai canali di correlazione si noterà che il valore di correlazione per i pixel posizionati in zone in ombra sarà pari a 0; in generale i valori di correlazione permetteranno di valutarne la bontà del valore di elevazione attribuito al pixel stesso. Questa caratteristica, data la natura fortemente montana dell'area di interesse, ha influenzato in maniera negativa sia la scelta dei punti di appoggio per la georeferenziazione che la realizzazione dei modelli digitali di elevazione.

Il prodotto acquistato è in 5 canali separati (Pancromatico, RED, GREEN, BLU, NIR) con risoluzione spaziale ricampionata a 0,5 metri per il dato pancromatico e a 2m per i dati multispettrali. La modalità di acquisizione della camera è geo-stereo, ossia una coppia stereo di immagini fornite con il metadato di georeferenziazione. Questo metadato non è un classico world-file come nel caso delle immagini utilizzate in ambito GIS, ma fornisce i coefficienti del polinomio razionale generati dal gestore del dato, e che permettono, attraverso un software apposito, l'attribuzione delle coordinate planimetriche a partire da un pixel iniziale posto generalmente nell'angolo superiore sinistro. Oltre ai canali separati il gestore del dato ha fornito una immagine pansharpened, ossia fusione tra il dato pancromatico ad alta risoluzione (0,5 m) e quello multispettrale a bassa risoluzione (2 m) che conserva le caratteristiche di risoluzione geometrica dell'uno e di risoluzione spettrale dell'altro. Purtroppo però questa modalità di fusione di canali rende l'immagine inutilizzabile da parte di questi software per la generazione di DEM, in quanto riescono ad utilizzare un solo canale per volta. In Figura 3 è possibile vedere l'area di copertura dell'immagine proposta in modalità pansharpened.



La stereocoppia ha un angolo di divergenza di circa 85°, e il Nominal Collection Elevation per l'immagine di destra è di 64° e per l'immagine di sinistra è di 69°, ulteriori informazioni a corredo dell'immagine sono riportate nella Tabella 3 e negli allegati sono visibili i valori di RPC.

A	Product Order Metadata
	Creation Date: 01/01/12 Customer Project Name: Pisciotta Sensor Type: Satellite Sensor Name: GeoEye-1 Product Line: GeoStereo Processing Level: Standard Geometrically Corrected Image Type: PAN/MSI Map Projection: Universal Transverse Mercator UTM Specific Parameters Hemisphere: N Zone Number: 33 Datum: WGS84 Product Order Pixel Size: 0.5000000000 meters Product Order Map Units: meters MTFC Applied: Yes DRA Applied: No File Format: GeoTIFF Multispectral Files: Four Files Bits per Pixel per Band: 11 bits per pixel Multispectral Files: Four Files

B Product Order Area (Map Coordinates in Map Units)	
Coordinate: 1 Map X (Easting): 521628.3766089809 meters Map Y (Northing): 4436780.0463759527 meters	Coordinate: 2 Map X (Easting): 527208.9494781548 meters Map Y (Northing): 4443313.4005887583 meters
Coordinate: 3 Map X (Easting): 530825.6270215051 meters Map Y (Northing): 4448320.3605536278 meters	Coordinate: 4 Map X (Easting): 515244.0976006808 meters Map Y (Northing): 4448346.2869767258 meters
Coordinate: 5 Map X (Easting): 515274.7465908532 meters Map Y (Northing): 4441561.0063518155 meters	

<b>C</b>		<b>Source Image Metadata</b>	
Left image		Right image	
Product Image ID: 000	Product Image ID: 001	Product Image ID: 000	Product Image ID: 001
Acquired Nominal GSD	Acquired Nominal GSD	Acquired Nominal GSD	Acquired Nominal GSD
Pan Cross Scan: 0.4621783793 meters	Pan Cross Scan: 0.4624268115 meters	Pan Cross Scan: 0.4621783793 meters	Pan Cross Scan: 0.4624268115 meters
Pan Along Scan: 0.4398877025 meters	Pan Along Scan: 0.4845733643 meters	Pan Along Scan: 0.4398877025 meters	Pan Along Scan: 0.4845733643 meters
MS Cross Scan: 1.8487135172 meters	MS Cross Scan: 1.8497072458 meters	MS Cross Scan: 1.8487135172 meters	MS Cross Scan: 1.8497072458 meters
MS Along Scan: 1.7595508099 meters	MS Along Scan: 1.9382934570 meters	MS Along Scan: 1.7595508099 meters	MS Along Scan: 1.9382934570 meters
Scan Azimuth: 357.1557122213 degrees	Scan Azimuth: 0.6046953235 degrees	Scan Azimuth: 357.1557122213 degrees	Scan Azimuth: 0.6046953235 degrees
Scan Direction: Reverse	Scan Direction: Reverse	Scan Direction: Reverse	Scan Direction: Reverse
Panchromatic TDI Mode: 16			
Multispectral TDI Mode13: 10			
Multispectral TDI Mode24: 6			
Radiometry	Radiometry	Radiometry	Radiometry
Panchromatic	Panchromatic	Panchromatic	Panchromatic
Gain: 0.017786	Gain: 0.017786	Gain: 0.017786	Gain: 0.017786
Offset: 0.000	Offset: 0.000	Offset: 0.000	Offset: 0.000
Blue	Blue	Blue	Blue
Gain: 0.014865	Gain: 0.014865	Gain: 0.014865	Gain: 0.014865
Offset: 0.000	Offset: 0.000	Offset: 0.000	Offset: 0.000
Green	Green	Green	Green
Gain: 0.017183	Gain: 0.017183	Gain: 0.017183	Gain: 0.017183
Offset: 0.000	Offset: 0.000	Offset: 0.000	Offset: 0.000
Red	Red	Red	Red
Gain: 0.016194	Gain: 0.016194	Gain: 0.016194	Gain: 0.016194
Offset: 0.000	Offset: 0.000	Offset: 0.000	Offset: 0.000
Near Infrared	Near Infrared	Near Infrared	Near Infrared
Gain: 0.009593	Gain: 0.009593	Gain: 0.009593	Gain: 0.009593
Offset: 0.000	Offset: 0.000	Offset: 0.000	Offset: 0.000
Pan Line Rate: 10000			
Nominal Collection Azimuth: 65.3446 degrees	Nominal Collection Azimuth: 151.9583 degrees	Nominal Collection Azimuth: 65.3446 degrees	Nominal Collection Azimuth: 151.9583 degrees
Nominal Collection Elevation: 69.35349 degrees	Nominal Collection Elevation: 64.86915 degrees	Nominal Collection Elevation: 69.35349 degrees	Nominal Collection Elevation: 64.86915 degrees
Sun Angle Azimuth: 160.0611 degrees	Sun Angle Azimuth: 160.2717 degrees	Sun Angle Azimuth: 160.0611 degrees	Sun Angle Azimuth: 160.2717 degrees
Sun Angle Elevation: 24.20402 degrees	Sun Angle Elevation: 24.25851 degrees	Sun Angle Elevation: 24.20402 degrees	Sun Angle Elevation: 24.25851 degrees
Acquisition Date/Time: 2012-01-01 09:43 GMT	Acquisition Date/Time: 2012-01-01 09:44 GMT	Acquisition Date/Time: 2012-01-01 09:43 GMT	Acquisition Date/Time: 2012-01-01 09:44 GMT
Percent Cloud Cover: 0			

<b>D</b>		<b>Product Component Metadata</b>	
Left image		Right image	
Product Image ID: 000	Product Image ID: 001	Product Image ID: 000	Product Image ID: 001
Component File Name:	Component File Name:	Component File Name:	Component File Name:
po_3803955_pan_0000000.tif	po_3803955_pan_0010000.tif	po_3803955_pan_0000000.tif	po_3803955_pan_0010000.tif
po_3803955_red_0000000.tif	po_3803955_red_0010000.tif	po_3803955_red_0000000.tif	po_3803955_red_0010000.tif
po_3803955_grn_0000000.tif	po_3803955_grn_0010000.tif	po_3803955_grn_0000000.tif	po_3803955_grn_0010000.tif
po_3803955_blu_0000000.tif	po_3803955_blu_0010000.tif	po_3803955_blu_0000000.tif	po_3803955_blu_0010000.tif
po_3803955_nir_0000000.tif	po_3803955_nir_0010000.tif	po_3803955_nir_0000000.tif	po_3803955_nir_0010000.tif
Pixel Size X: 0.5000000000 meters			
Pixel Size Y: 0.5000000000 meters			
Product Order Map Units: meters			
Columns: 31164 pixels	Columns: 31164 pixels	Columns: 31164 pixels	Columns: 31164 pixels
Rows: 23136 pixels	Rows: 23136 pixels	Rows: 23136 pixels	Rows: 23136 pixels
Percent Component Cloud Cover: 0			

Tabella 3 - Caratteristiche dell'immagine GEOEYE-1; A. Metadati riassuntivi per l'immagine ordinata, B. Coordinate dell'area l'area selezionata, C. Metadata per le singole immagini, D. Metadati delle componenti delle immagini.

## 1.4. Stereoscopia

La modalità stereoscopica, prima di essere utilizzata in campo satellitare, è stata applicata nel campo fotografico per poi arrivare nel campo della geodesia in ambito fotogrammetrico. Negli ultimi anni, grazie alle camere digitali, si è passati all'utilizzo di immagini strutturate in una matrice di pixel. L'impiego di queste immagini ha dato luogo alla fase digitale della fotogrammetria che dapprima ha utilizzato camere aviotrasportate ed oggi utilizza sinergicamente anche le camere e sensori satellitari. Ad esempio, nel caso del sensore di tipo pushbroom in Geoye-1, l'angolo di convergenza, l'angolo di asimmetria e il bisector elevation angle (BIE), misurano le relazioni geometriche tra due raggi che intersecano un punto a terra comune alle due immagini. Due raggi omologhi definiscono un piano chiamato piano di convergenza (ISD 2011). Più in particolare, l'angolo di convergenza è l'angolo che due raggi omologhi formano sul piano di convergenza, l'angolo di asimmetria quello tra la proiezione sul piano di convergenza della verticale sul punto a terra e la bisettrice dell'angolo di convergenza, infine il BIE è l'angolo tra la bisettrice e la proiezione di questa sul piano orizzontale (Figura 4). Il più importante tra i tre angoli è l'angolo di convergenza, il cui valore ideale varia tra i 30 e i 60 gradi, altrimenti si avrà una bassa accuratezza stereo. È importante effettuare un'acquisizione asimmetrica, consente di discernere con maggiore accuratezza le caratteristiche a terra, ma l'angolo deve essere inferiore a 20 gradi (Deidda et al. 2012).

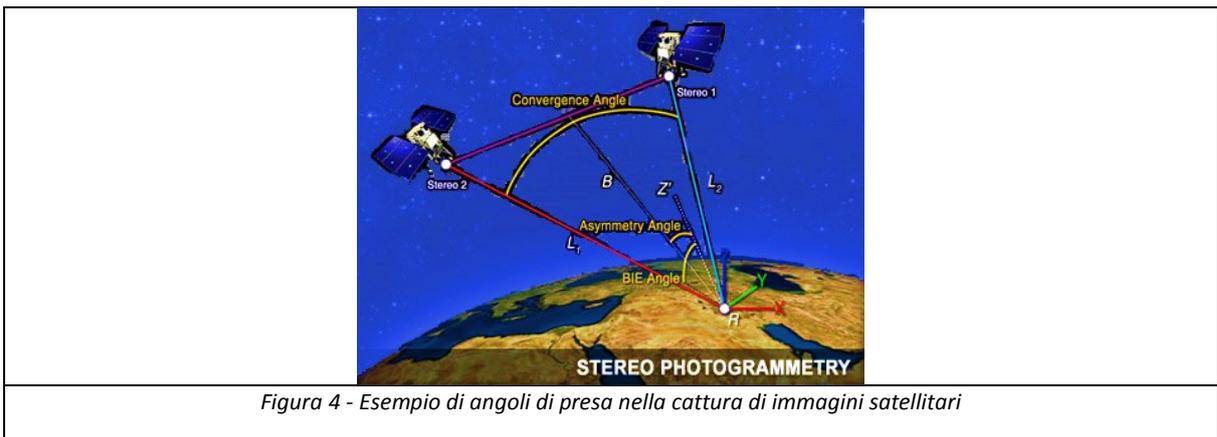


Figura 4 - Esempio di angoli di presa nella cattura di immagini satellitari

La possibilità di acquisire immagini ad alta risoluzione in stereoscopia permette di produrre un Digital Elevation Model (DEM) di dettaglio da utilizzare per scopi cartografici. Esistono diversi lavori di bibliografia che dimostrano che è possibile utilizzare immagini satellitari ad alta risoluzione per la realizzazione di DEM e mettono in relazione diversi fattori, quali ad esempio l'accuratezza raggiunta a seconda del quantitativo di GCPs utilizzati e il software usato (Ager 2003; Baiocchi et al. 2004; Baiocchi et al. 2005; Crespi et al. 2006; Lo Brutto & Pennacchio, 2006; Jacobsen & Karsten, 2013).



## 2. I MODELLI MATEMATICI PER IL TRATTAMENTO DI IMMAGINI HR

Nel capitolo precedente sono stati introdotti le caratteristiche principali del telerilevamento, le caratteristiche di alcuni sensori, nonché le specifiche delle immagini utilizzate per questo lavoro di tesi. In questo capitolo vengono riportati solo i modelli matematici utilizzati durante questo lavoro, ossia quello di Toutin e il modello delle funzioni polinomiali razionali (Rational Polynomial Function, RPF). Ci sarà poi una breve introduzione ai più comuni software utilizzati nell'ambito del telerilevamento, alla quale seguirà una comparazione tra quelli utilizzati in questo elaborato di tesi.

Per eseguire l'estrazione di modelli digitali di elevazione derivati da stereocoppie Geoeye-1 sono stati utilizzati due software che implementano diversi modelli matematici calibrati per i sensori satellitari da impiegare. Tutti i modelli matematici fanno parte di due macro classi, quella dei modelli parametrici e dei non parametrici.

I modelli parametrici sono noti in letteratura anche come modelli rigorosi, proprio perché mediante un approccio rigoroso (equazioni di collinearità) descrivono il processo fisico-geometrico di acquisizione di immagini, ricostruendo la geometria di presa attraverso la conoscenza del meccanismo di acquisizione. Per i modelli non parametrici si cerca di ricostruire una relazione matematica tra spazio-immagine e spazio-oggetto prescindendo dalle caratteristiche fisiche della presa, ovvero non prendendo in esame le caratteristiche del satellite e del sensore. Esistono molti modelli in letteratura, tra questi alcuni trovano ampia diffusione all'interno dei diversi software commerciali per l'elaborazione delle immagini satellitari. Dato il vasto numero dei modelli matematici presenti nei diversi software, di seguito si riportano solo i modelli prima citati, quello rigoroso di Toutin e il modello RPF.

### 2.1. Equazioni di collinearità modificate

Considerando un generico punto P sulla superficie terrestre con coordinate spaziali o oggetto (X, Y, Z) si possono calcolare le coordinate (x, y) dei pixel corrispondenti nell'immagine, ad esempio attraverso le equazioni di collinearità:

$$X = X_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{11}(x-x_0)+r_{12}(y-y_0)+r_{13}f}{r_{31}(x-x_0)+r_{32}(y-y_0)+r_{33}f}$$

$$Y = Y_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{21}(x-x_0)+r_{22}(y-y_0)+r_{23}f}{r_{31}(x-x_0)+r_{32}(y-y_0)+r_{33}f}$$

dove

- $(X_0, Y_0, Z_0)$  sono le coordinate oggetto del centro di presa del sensore
- $f$  è la lunghezza focale equivalente del sensore
- $(x_0, y_0)$  sono le coordinate immagine del centro di presa
- $r_{ij}$  sono gli elementi matrice di rotazione che descrive le rotazioni  $(\varphi, \omega, \kappa)$  del sensore rispetto ai 3 assi principali di un sistema along-track.

Come in fotogrammetria, si può distinguere fra i parametri di Orientamento interno  $(f, x_0, y_0)$  e parametri di orientamento esterno  $(X_0, Y_0, Z_0, \varphi, \omega, \kappa)$ .

Le equazioni di collinearità legano quindi la posizione di un punto nello spazio immagine alla posizione corrispondente nello spazio oggetto. Questo per i sensori whiskbroom. Per i sensori pushbroom l'immagine è composta da più linee di pixel e si hanno tanti centri di presa quante sono le linee dell'immagine, quindi le equazioni di collinearità sono applicate sui singoli frames.

## 2.2. Modelli di georeferenziazione

Per avere una corretta relazione matematica tra le coordinate tridimensionali dell'oggetto e le corrispondenti coordinate nel piano dell'immagine è necessario ricostruire la geometria di presa dei sensori. Di seguito sono esposti il modello parametrico rigoroso di Toutin e successivamente il modello non parametrico delle funzioni polinomiali fratte RPF.

### 2.2.1. Modello di Toutin

Tra i modelli parametrici uno dei più conosciuti e utilizzati è il modello sviluppato da Toutin (Toutin, 1983) per descrivere il funzionamento dei sensori installati sui satelliti Spot e successivamente esteso, con le opportune modifiche, a diversi satelliti e sensori ad uso civile comparsi sulla scena nel corso degli anni. Una delle principali cause della sua diffusione è il fatto che attualmente è implementato nel software PCI Geomatica OrthoEngine, uno dei primi software sviluppati per l'elaborazione di immagini satellitari, ed è quindi disponibile all'utenza in un pacchetto commerciale, a differenza di molti altri che sono utilizzati solo in ambito scientifico. Tale modello, particolareggiato e adattato nel tempo, trae le sue origini dalle equazioni di collinearità modificate al fine di tener in conto i nuovi fattori che entrano in gioco se si utilizzano sistemi di presa lineare. Tra questi, i principali elementi di interesse sono:

- posizione, velocità e orientamento della piattaforma,
- angolo di orientamento e IFOV del sensore,
- tempo di integrazione del segnale,
- tipologia di superficie rilevata.

Naturalmente, le equazioni di collinearità modificate tengono anche in conto le leggi dettate dalla meccanica celeste e le variazioni spazio temporali dei sistemi di riferimento coinvolti, allo scopo di stimare con precisione i parametri di orientamento esterno e le loro fluttuazioni. Le modifiche apportate da Toutin alle equazioni di collinearità per adattare il modello alle piattaforme satellitari sono note solo parzialmente, in quanto tale modello non è stato mai descritto integralmente in nessuna pubblicazione scientifica.

Ad esempio, la versione per il satellite SPOT sfrutta le informazioni dell'orbita del satellite quali l'inclinazione, l'apogeo, l'anomalia del perigeo e l'eccentricità per calcolare la posizione del satellite al momento dell'acquisizione dell'immagine. La posizione di fatto viene calcolata dall' algoritmo utilizzando sei parametri correlati all'immagine. Il punto di forza di tale modello matematico è che per il satellite SPOT bastano solo quattro punti d'appoggio di cui siano note le coordinate terreno.

### 2.2.2. Correzione geometrica con metodi non parametrici

Sempre più spesso le immagini telerilevate vengono utilizzate insieme a dati di altra origine, soprattutto all'interno dei Sistemi di Informazione Geografica (GIS), e per questo processo di integrazione fra dati di provenienza diversa si richiede che le immagini digitali siano congruenti dal punto di vista geometrico con il riferimento prescelto, sia esso una carta geografica una immagine satellitare. Si richiede di stabilire una precisa corrispondenza tra immagini e dati geografici in funzione degli elementi coinvolti si parla di raddrizzamento, registrazione, e georeferenziazione:

- raddrizzamento o rettificazione indica l'operazione di mettere in corrispondenza un'immagine telerilevata con una carta geografica in una nota proiezione a una data scala
- registrazione indica l'operazione di ricondurre due immagini ad un unico sistema, o di trasformare un'immagine in modo da renderla sovrapponibile ad un'altra immagine scelta come riferimento
- georeferenziazione indica l'operazione di associare le coordinate cartografiche in un dato sistema di riferimento ai pixel di una immagine. Per una immagine raddrizzata la georeferenziazione consiste nel definire le coordinate del primo pixel e le dimensioni delle celle di risoluzione a terra.

Per questi ed altri motivi, tali modelli vengono detti anche generalizzati, in quanto non sono dipendenti dal particolare tipo di sensore e/o piattaforma. Per tali modelli si cerca di ricostruire una relazione matematica tra spazio-immagine e spazio-oggetto prescindendo dalle caratteristiche fisiche della presa. Tale corrispondenza viene ottenuta tramite una relazione funzionale calcolata utilizzando informazioni aggiuntive fornite dai punti di controllo e tralasciano quindi le caratteristiche del satellite e del sensore.

A seconda della funzione matematica utilizzata per descrivere la relazione tra coordinate oggetto e coordinate immagine, viene introdotta un'ulteriore classificazione in sistemi Polinomiali e sistemi di Funzioni Razionali Polinomiali. Alla prima classe appartengono modelli generici, che utilizzano semplici funzioni polinomiali mentre della seconda classe fanno parte quei modelli che sfruttano sistemi funzionali a diverso grado di complessità.

#### 2.2.2.1. Funzioni razionali polinomiali RPF

Nell'ambito dei modelli non parametrici generalmente sono impiegate le Funzioni Polinomiali Razionali generalmente denominate Rational Polynomial Function (RPF) o anche Rational Function (RF). Tali funzioni sono costituite dal rapporto di due polinomi che esprimono le relazioni tra le coordinate immagine ( $x, y$ ) e le coordinate oggetto ( $X, Y, Z$ ) in rapporto ad un numero variabile di coefficienti, i quali possono essere sia direttamente forniti dalla società distributrice del dato, che indirettamente calcolati con l'ausilio di GCPs posizionati sull'immagine da georeferenziare.

Da un punto di vista strettamente matematico, possiamo distinguere nelle RF due distinte funzioni:

- le Upward RF, da cui è possibile determinare le coordinate immagine di un punto note le sue coordinate oggetto;
- le Downward RF, che permettono di compiere il passaggio inverso.

L'equazione generale della Upward RF model è

$$x = \frac{P_1(x, y, z)}{P_2(x, y, z)}$$

$$y = \frac{P_3(x, y, z)}{P_4(x, y, z)}$$

dove si indicano con:

- $P_1, P_2, P_3$  e  $P_4$  sono i polinomi di grado massimo pari a 3
- $x, y$  le coordinate immagine.
- $X, Y, Z$  le coordinate oggetto.

Il generico polinomio acquista la forma:

$$P_i(X, Y, Z) = \sum_{\alpha}^{m1} \sum_{\beta}^{m2} \sum_{\gamma}^{m3} a_{\alpha\beta\gamma} X^{\alpha} Y^{\beta} Z^{\gamma}$$

Il grado del polinomio viene generalmente limitato al terzo ordine di modo che i coefficienti risultano essere in numero pari a venti. In questo modo il polinomio assume la seguente forma:

$$P_n = a_0 + a_1X + a_2Y + a_3Z + a_4XY + a_5XZ + a_6YZ + a_7X^2 + a_8Y^2 + a_9Z^2 + a_{10}XYZ + a_{11}XY^2 + a_{12}YX^2 + a_{13}XZ^2 + a_{14}ZX^2 + a_{15}YZ^2 + a_{16}ZY^2 + a_{17}X^3 + a_{18}Y^3 + a_{19}Z^3$$

In modo esplicito, quindi, possiamo scrivere per esteso le equazioni delle Rational Polynomial Function:

$$x = \frac{a_0 + a_1X + a_2Y + a_3Z + a_4XY + a_5XZ + a_6YZ + a_7X^2 + a_8Y^2 + a_9Z^2 + \dots + a_{19}Z^3}{1 + b_1X + b_2Y + b_3Z + b_4XY + b_5XZ + b_6YZ + b_7X^2 + b_8Y^2 + b_9Z^2 + \dots + b_{19}Z^3}$$

$$y = \frac{c_0 + c_1X + c_2Y + c_3Z + c_4XY + c_5XZ + c_6YZ + c_7X^2 + c_8Y^2 + c_9Z^2 + \dots + c_{19}Z^3}{1 + d_1X + d_2Y + d_3Z + d_4XY + d_5XZ + d_6YZ + d_7X^2 + d_8Y^2 + d_9Z^2 + \dots + d_{19}Z^3}$$

dove compaiono trentanove coefficienti, per ciascuna coordinata. E' quindi necessario conoscere le coordinate oggetto di almeno trentanove punti di cui siano state misurate le corrispondenti coordinate immagine per stimare le incognite.

Nel problema inverso, noti i coefficienti e disponibile il DEM è possibile, per ogni punto immagine misurato, calcolare le coordinate oggetto X, Y. La formula generale per tale modello, noto in letteratura con il nome di Downward RF, è:

$$X = \frac{P_4(x, y, Z)}{P_5(x, y, Z)}$$

$$Y = \frac{P_6(x, y, Z)}{P_7(x, y, Z)}$$

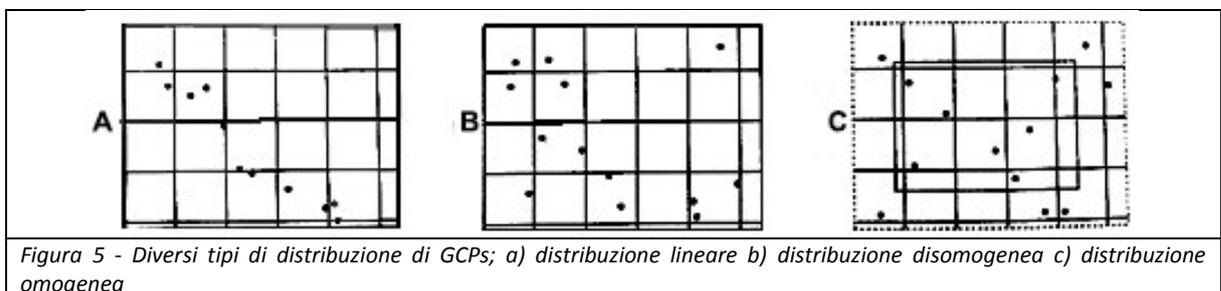
Le Downward RF sono scarsamente diffuse perché è appunto necessario disporre del DEM della zona. Per entrambe le funzioni, in base alla tipologia di territorio, c'è bisogno di un adeguato numero di GCPs, in quanto la correzione delle distorsioni avviene solo nell'intorno dei punti. Inoltre il modello risulta essere sensibile alla distribuzione dei GCPs, infatti una immagine molto estesa dovrà essere suddivisa in sottozone da correggere separatamente.

### 2.2.3. Scelta dei GCPs e posizionamento.

La caratteristica generale dei GCPs è di essere oggetti piccoli ma di alto contrasto in modo da essere identificabili e localizzabili con precisione sulle immagini e sulla carta. Altro elemento importante per la scelta dei punti di appoggio è quello di selezionare oggetti la cui posizione sia costante nel tempo. Spesso infatti la cartografia è più vecchia dell'immagine, per cui se sull'immagine vengono scelti elementi naturali la cui posizione può variare nel tempo, la loro posizione sulla carta potrebbe essere sbagliata. I migliori GCPs sono oggetti artificiali quali ad esempio: intersezioni di strade o canali, piccoli edifici o strutture isolate, difese costiere. E' consigliabile evitare invece elementi naturali quali ad esempio tratti naturali di fiume, come anse, isolette, meandri, angoli dei campi (a meno che coincidano con canali di irrigazione), parti naturali della linea di costa, in particolare in aree soggette a maree. I problemi maggiori si presentano in aree non antropizzate. Per esempio in zone di montagna talvolta le intersezioni di fiumi possono essere localizzate in modo sufficientemente accurato. L'altro criterio fondamentale è la distribuzione omogenea dei GCPs nell'area di studio; solo in tal modo si ottengono funzioni di mappatura valide per l'intera immagine. Nella pratica si possono verificare tre tipi di distribuzione dei GCPs (Figura 5):

- distribuzione lungo una direzione
- distribuzione disomogenea per l'alternarsi di aree urbanizzate con aree naturali
- distribuzione omogenea con punti localizzati anche all'esterno dell'area di studio per evitare errori di estrapolazione nelle zone di bordo.

Occorre infine osservare che poiché la carta è una rappresentazione astratta del territorio, risulta in genere più difficile identificare i corrispondenti GCPs su una immagine e su una carta, che non su due immagini.



#### 2.2.4. Accuratezza della trasformazione

Per valutare l'accuratezza delle correzioni geometriche si ricorre all'analisi dei residui. Si definisce residuo come la differenza fra valore  $(\hat{x}, \hat{y})$  stimato attraverso la funzione di mappatura e la posizione reale  $(x, y)$  sulla cartografia. L'analisi dei residui viene condotta sia sui GCPs sia su un insieme di punti di controllo CPs indipendenti rispetto a quelli utilizzati per definire la trasformazione, e permette di valutare sia l'accuratezza dei singoli punti GCPs o CPs, sia l'accuratezza globale, espressa come scarto o errore quadratico medio (RMSE). L'errore viene espresso o in unità cartografiche (metri, gradi) o in unità immagine (pixel). L'errore associato al singolo punto  $i$ -esimo è dato da:

$$R_i = \sqrt{(R_{x_i}^2 + R_{y_i}^2)}$$

L'accuratezza globale ossia lo scarto quadratico medio (RMSE) è dato da:

$$R_{tot} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_{x_i}^2 + R_{y_i}^2)}{n-1}}$$

E' possibile analizzare anche lo scarto quadratico medio nelle due direzioni X e Y:

$$R_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n R_{x_i}^2}{n-1}} \quad R_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n R_{y_i}^2}{n-1}}$$

L'accuratezza è accettabile quando l'errore RMSE è minore della dimensione di un pixel. Se non si è in queste condizioni, ci sono tre possibili scelte:

- altri GCPs: la disponibilità di un numero maggiore di GCPs permette di ottenere una migliore distribuzione e di diminuire l'effetto di eventuali punti errati nella determinazione della trasformazione polinomiale;
- eliminare i GCPs con accuratezza più bassa: questa procedura è consigliata per quei punti che hanno residuo molto maggiore rispetto al residuo medio. Per questa ragione è meglio selezionare un numero di GCPs abbastanza grande;
- usare una trasformazione di ordine superiore. Questa soluzione dovrebbe essere lasciata come ultima possibilità.

Occorre ricordare infine la procedura di ortorettificazione in cui l'immagine viene corretta per le distorsioni dovute alla topografia. Il risultato è una immagine in cui ogni pixel appare nella posizione come se fosse stato osservato secondo la sua verticale, per cui l'immagine risulta in una proiezione ortografica. Naturalmente questo tipo di correzione geometrica richiede la disponibilità del modello numerico del terreno (DEM) o la creazione di esso dalla immagini stesse tramite la stereoscopia digitale come nel caso di questa tesi.

## 2.3. Software

Nella parte successiva si riportano i software maggiormente utilizzati capaci di utilizzare i dati stereoscopici per estrapolarne un modello digitale del terreno. Generalmente le tecniche e le procedure operative variano fortemente da un pacchetto software, dall'altro variano anche i modelli matematici implementati. Inizialmente è stata eseguita una prima scrematura sui software disponibili, focalizzando l'attenzione su quelli che avessero almeno un modello rigoroso e, meglio ancora, implementassero anche un modello polinomiale fratto.

### 2.3.1. Software commerciali

Tra i software commerciali maggiormente utilizzati troviamo ENVI, ERDAS, PCI Geomatica, SOCET SET, Idrisi, Global Mapper, ER mapper, MIPS e sicuramente molti altri ancora. Data l'impossibilità sia economica che temporale per poter provare tutti i software, sono stati utilizzati solo ENVI, ERDAS, PCI Geomatica e SOCET SET. Il pacchetto ENVI della Exeliss utilizza il linguaggio IDL, ERDAS Imagine è della Intergraph-hexagongeospatial, PCI Geomatica è della PCI Geomatica (molto utilizzato sia in ambito scientifico che commerciale), SOCET SET della BAE Systems (usato perlopiù per la fotogrammetria aerea, ma propone un modulo satellitare di nicchia ma molto buono usato anche dalla US Navy a scopi militari). Di seguito un brevissimo resoconto dei modelli matematici implementati in ciascun software legati all'utilizzo della stereocoppia GEOeye-1 e alla possibilità di estrazione di DEM da essa:

- ENVI: la produzione di DEM da immagini GEOEYE-1 è legata esclusivamente agli RPCs da metadata, permettendone poi l'integrazione con i GCPs per le procedure di correzione geometrica; il modello matematico implementato per questo processo è proprietario e non si trovano dati in letteratura o nei manuali nel software stesso, l'unico riferimento nella manualistica è quello di Grodecki & Dial (2003).
- ERDAS Imagine: utilizza per Geoeeye-1 il modello rigoroso orbitale (Rigorous Orbital model) e l'integrazione di GCPs con gli RPCs da metadata e una trasformazione affine, i modelli matematici sono descritti da Wang et al. (2008).
- PCI Geomatica: per la produzione di DEM da immagini satellitari Geoeeye-1 propone il modello rigoroso di Toutin (Poli & Toutin, 2012), l'integrazione di GCPs ai metadata RPCs e la possibilità di creare RPCs utilizzando esclusivamente un set di GCPs
- SOCET SET: per la generazione di DEM da immagini GEOEYE-1 implementa il modello rigoroso, di cui è riportata nel manuale la parte matematica, il modello 3D polynomial (ossia l'utilizzo di GCPs a terra generando un modello polinomiale per la correzione dell'immagine) ed infine il modello Direct Line Trasformation (DLT) ad esempio si veda Grigillo (2011).

Per quanto riguarda i software PCI Geomatica e SOCET SET, si trovano in letteratura diversi lavori scientifici che confrontano le differenze sia procedurali di questi software fra loro che rispetto ad altri, nonché le caratteristiche dei prodotti finali, ad esempio Capaldo et al. (2010). Per quanto riguarda invece l'utilizzo specifico di immagini satellitari Geoeeye-1 si trovano una serie di lavori che utilizzano il software della PCI (Botti et al. 2010; Saldana et al. 2012;) nonché tutorial specifici, distribuiti della casa fornitrice del software, per l'estrazione di DEM e prodotti derivati. Per quanto riguarda il software SOCET SET, essendo molto di nicchia si trovano pochi lavori dedicati all'utilizzo delle immagini Geoeeye-1 o a sensori satellitari molto

simili (Kurt et al. 2006; Hobi & Gizler 2012). Date le sue potenzialità e l'implementazione interna di un proprio modello matematico rigoroso, è stato scelto come software di lavoro assieme al software della PCI, per confrontare i risultati ed avere come base una serie di lavori scientifici ai quali fare riferimento per almeno uno di essi.

### 2.3.2. Software open source e scientifici

Per quanto riguarda i software liberamente ottenibili con la capacità di generazione di DEM, troviamo perlopiù software o patch di algoritmi soprattutto creati ed utilizzati in ambito scientifico e non messi a disposizione della comunità scientifica se non richiedendo agli autori la possibilità di utilizzo. Tra i vari pacchetti software troviamo ILWIS (Integrated Land and Water Information System), un pacchetto misto tra un classico GIS e moduli che permettono il processamento raster per le più comuni immagini telerilevate via satellite ed una integrazione con dati vettoriali. Troviamo inoltre la libreria di strumenti Orfeo Tool Box che permettono l'uso di raster da immagini satellitari all'interno di software GIS più comuni e comunque liberi come ad esempio Grass, QuantumGIS o SagaGIS. Molto usato per la gestione dei dati di elevazione è anche il software SPRING, che permette l'elaborazione di modelli digitali di elevazione permette la loro elaborazione in base a diversi algoritmi riuscendo a gestire anche delle breaklines.

Tra i pacchetti software troviamo anche SISAR utilizzato per la generazione di DEM da immagini satellitari mediante l'utilizzo di punti di controllo a terra od anche attraverso dei coefficienti polinomiali fratti (RPC) forniti dalle immagini (Crespi et al. 2008), e BEAM che è strettamente legato all'utilizzo dei soli dati raster provenienti dai sensori satellitari proprietari della NASA, siano essi sensori radar, multispettrali o di altra tipologia.

### 2.3.3. GEOMATICA e SOCET SET e i modelli implementati in essi

Nei paragrafi del capitolo 4 sarà possibile visionare più dettagliatamente i diversi passaggi da seguire per portare a compimento la produzione di un DEM utilizzando le immagini ad alta risoluzione GEOEYE-1, per i soli pacchetti software Geomatica della PCI e a SOCET SET della BAE. Di seguito invece, verranno menzionati i modelli matematici in essi implementati.

Il software Geomatica della PCI, rende possibile generare modelli di elevazione, per le immagini prima citate, utilizzando il modello rigoroso di Toutin. Il modello di Toutin è un modello misto il cui punto di forza è l'utilizzo di pochi punti di controllo a terra, concedendo la possibilità all'utente di poter anche rigenerare e salvare in file testuali gli RPC scaturiti dalla modellazione matematica attraverso l'ausilio di diversi GCPs. Generalmente l'utente porta a compimento nel software stesso la generazione del DEM, ma l'operazione di esportazione degli RPCs, può permettere di correggere le immagini satellitari con il modello matematico di Toutin, che è risaputo essere molto affidabile, e utilizzare gli stessi parametri in un software differente. Questa operazione si ottiene modificando manualmente i valori di RPCs originali nel file di intestazione delle immagini, che diventano accessibili per un qualsiasi altro software capace di generare da esse un modello di elevazione o ortorettificarle od anche utilizzarli per altri scopi senza ulteriori processamenti, essendo già corrette geometricamente. Oltre al modello matematico di Toutin, il software permette la correzione delle immagini mediante il modello RPF fino al terzo grado e, come per il modello matematico di Toutin, anche in questo caso è possibile generare il DEM direttamente dal software o esportare gli RPCs.

Per quanto riguarda SOCET SET, come già citato nei paragrafi precedenti, esso permette la correzione delle immagini mediante tre modelli matematici, un modello rigoroso detto "rigorous simultaneous", il modello DLT e un modello polinomiale del terzo livello indicato nel software come "3D polynomial". Non è stato possibile riportare analiticamente il modello rigoroso "rigorous simultaneous" per diverse motivazioni. Una motivazione è che all'interno del materiale informativo allegato al software, il modello viene solo menzionato ma non si ritrovano chiare indicazioni alla componente analitica dello stesso, e anche contattando il fornitore statunitense non è stato possibile ricevere tali informazioni. Ulteriore motivo è il fatto che si ritrovano in letteratura scientifica solo approfondimenti parziali per tale modello. Dalle poche informazioni a disposizione si può presumere che sia un modello matematico derivante dalla aerofotogrammetria aerea sviluppato dalla collaborazione tra il centro per lo sviluppo aereo Italiano e quello statunitense (RADC 1969). Per quanto riguarda la possibilità di esportazione degli RPCs post correzione geometrica per SOCET SET, contrariamente a Geomatica, non esiste tale possibilità per nessuno dei 3 modelli matematici.



## 3. DEM E PRODOTTI DERIVATI

### 3.1. Modelli digitali del terreno

Per definizione un modello digitale delle altezze è un insieme di dati che permette il calcolo per interpolazione della quota di un punto arbitrario del terreno con precisione assegnata. In questo senso, quindi, il DEM si distingue nettamente dalle curve di livello di una carta. Una curva di livello fornisce informazioni di quota solo lungo la linea stessa; inoltre il disegno delle curve di livello deve far percepire la morfologia del terreno. Le curve di livello devono rappresentare piccoli dettagli geomorfologici con la loro tipica forma, rendendoli immediatamente percepibili. Questo richiede talvolta l'accentuazione di certe forme del terreno. Le curve di livello sono quindi destinate principalmente alla visualizzazione del terreno, mentre i dati per la produzione di un DEM sono destinati a fornire informazioni di quota sull'intero territorio rappresentato, in un formato adatto al trattamento numerico. Le curve di livello derivate da un DEM non mostreranno pertanto la morfologia del terreno allo stesso modo di quelle disegnate dall'utente.

Pertanto i modelli altimetrici rappresentano, nei confronti delle tradizionali curve di livello, un'alternativa alla descrizione dell'altimetria del terreno cartografato che presenta vantaggi e svantaggi. E' innegabile che le curve di livello costituiscano una rappresentazione sovrapponibile alla planimetria. I modelli altimetrici, invece, sono in grado di fornire una descrizione visiva della morfologia solo se si disegna in assonometria (o prospettiva) il grigliato che essi definiscono, e non sono pertanto sovrapponibili alla planimetria. Esistono numerosi software in grado di trasformare un tipo di rappresentazione nell'altro, con inevitabile decadimento di precisione delle informazioni originali, decadimento che tuttavia può essere contenuto in limiti accettabili purché la densità delle curve di livello (o dei punti del modello altimetrico integrati con breakline) sia sufficiente. In molti casi, in particolare quando si disponga di modelli altimetrici "densi", le curve di livello derivabili sono praticamente identiche a quelle disegnate direttamente da un restituita fotogrammetrico.

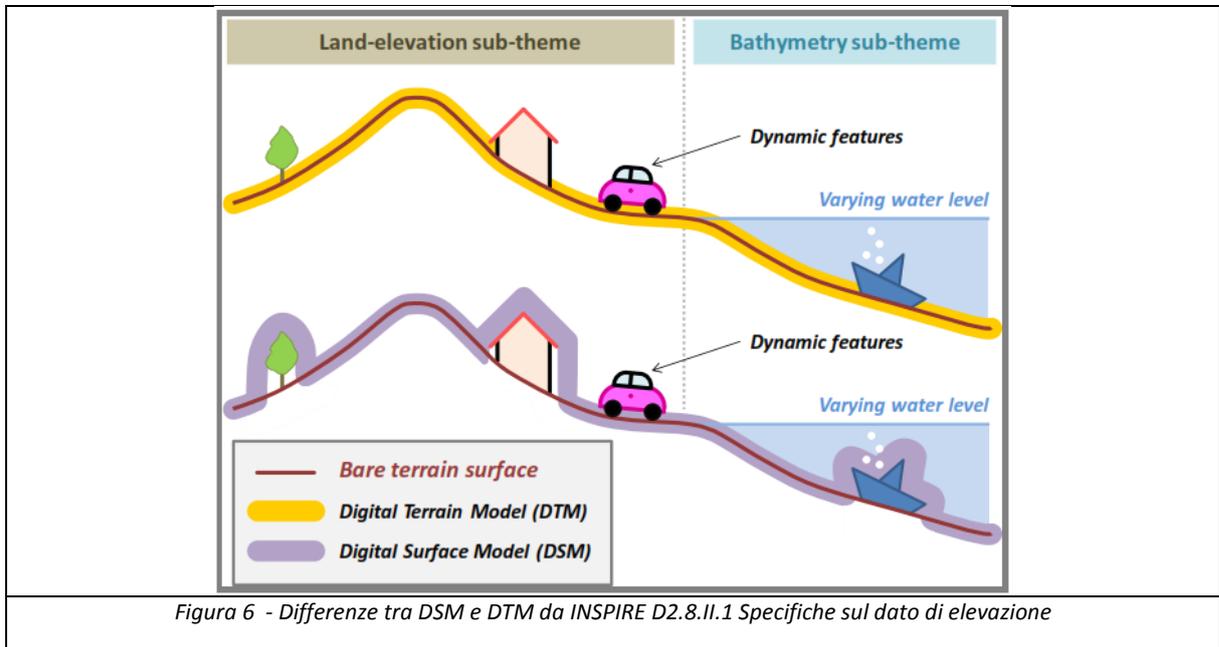
I modelli altimetrici del terreno possono essere classificati in funzione del contenuto in:

- Modelli digitali di quota (Digital Elevation Model, DEM), in cui si descrive la superficie del terreno o una specifica superficie di elevazione; tali modelli spesso indicati anche con il termine modelli digitali del terreno (Digital Terrain Model, DTM);
- Modelli digitali di superficie (Digital Surface Model, DSM) in cui si descrive la superficie fisica del territorio, compresi gli edifici, le strutture artificiali che su di esso sono presenti, gli alberi e tutti gli oggetti presenti sul territorio.

I dati necessari per descrivere un modello altimetrico sono costituiti da:

- un seminato di punti disposti in modo regolare o irregolare;
- le linee caratteristiche del terreno (DTM), degli edifici e della superficie descritta (DSM) che vengono descritti come linee di rottura (o di discontinuità "breakline", ovvero linee che uniscono i punti della superficie descritta caratterizzati da brusche variazioni di pendenza);

- le linee e i punti di descrizione di elementi corografici come le creste, gli impluvi, le vette e quant'altro;
- le delimitazioni di aree non incluse nei modelli altimetrici, le cosiddette "zone morte";
- i limiti dell'area rappresentata.



Qualora si raggiunga una densità sufficiente dei punti di tipo 1 (modelli altimetrici densi) che permetta di descrivere la superficie del territorio in modo corretto e completo, è possibile semplificare i tipi di dati contenuti nei modelli altimetrici: in questo caso, infatti, non è necessario descrivere direttamente le discontinuità e i dettagli corografici, che vengono correttamente descritti grazie all'elevata densità dei punti costituenti il modello altimetrico. Si definiscono in analogia con le tipologie elencate in precedenza:

1. il modello digitale denso di elevazione (Dense Digital Elevation Model, DDEM) detto anche modello digitale denso del terreno (Dense Digital Terrain Model, DDTM);
2. il modello digitale denso di superficie (Dense Digital Surface Model, DDSM);

Non si può trascurare, anche nel caso dei modelli densi, la definizione delle linee di delimitazione delle "zone morte" e di descrizione dei limiti dell'area rappresentata. Nel corso degli ultimi anni sono stati rilasciati e continuamente aggiornati DEM derivati da sensori satellitari: in particolare il DEM SRTM, costantemente disponibile su una larga parte della Terra e i DEM ASTER, che sono disponibili su richiesta. Inoltre, la continuamente crescente disponibilità di sensori satellitari ad alta (da 2.5 m a 1 m) e altissima risoluzione (da 1 m a 0.5 m) in grado di acquisire coppie stereo mette a disposizione una ulteriore possibilità di generazione di DEM da moltissimi sensori satellitari (Worldview, Quickbird, Ikonos, Cartosat-1, SPOT5, Alos-Prism, Kompsat, EROS A e EROS B, Pleiades, Geoeye-1). Si tratta in questi casi di DEM che possono validamente sostituire le riprese aeree per la produzione di DSM/DEM, rivelandosi particolarmente adatta su aree locali ove la pianificazione e realizzazione di un volo aerofotogrammetrico può risultare eccessivamente onerosa. Il paragrafo successivo ha l'obiettivo di illustrare le caratteristiche dei DEM da stereocoppie satellitari ad alta e altissima risoluzione.

## 3.2. Acquisizione e diffusione del dato

Le procedure descritte di seguito sono un sunto delle linee guida indicate dal Centro Interregionale di Coordinamento e documentazione per le Informazioni territoriali (CISIS) secondo l'Intesa Stato Regioni per le procedure di diffusione dei dati. Tali procedure si applicano a immagini almeno radiometricamente corrette, o comunque a livelli di preprocessamento che non includano l'ortorettifica.

Nella fase di acquisizione devono essere considerate le seguenti caratteristiche:

- assenza di copertura nuvolosa
- rapporto base di presa (B)/altezza media di volo del satellite (H) (dipende dagli angoli off-nadir delle due immagini che costituiscono la stereocoppia)
- epoche delle immagini costituenti la stereocoppia (contemporanee o relative a epoche diverse)
- metadati allegati

Il primo aspetto è ovvio e non sarà ulteriormente commentato. Per il secondo aspetto si ricorda che, da un lato, la precisione della quota migliora all'aumentare del rapporto B/H, dall'altro un rapporto B/H elevato può causare notevoli problemi nel "matching" tra le due immagini per occlusioni e ombre molto diverse, soprattutto in ambito urbano. E' quindi necessaria una conveniente mediazione, con B/H indicativamente non superiori a 0.5-0.6. Si segnalano alcuni risultati particolarmente interessanti anche con piccoli (0.2) valori di B/H. Il terzo aspetto è molto importante per la qualità del "matching", dal quale dipende la qualità del DEM sia in termini di accuratezza che, soprattutto, di completezza: immagini contemporanee, che devono necessariamente essere acquisite in modalità stereo "along track" sono notevolmente più costose ma garantiscono risultati generalmente migliori e sono più semplici da usare anche con software commerciali; immagini singolarmente acquisite in passaggi orbitali diversi sono, viceversa, notevolmente più economiche ma richiedono generalmente un pretrattamento per migliorare il "matching" o l'impiego di software scientifico che implementa strategie di "matching" più raffinate. Infine i metadati relativi alle caratteristiche del sensore e alla presa dell'immagine saranno utilizzati sia durante le procedure di ortorettifica sia come base per definire i nuovi metadati da allegare al prodotto finale.

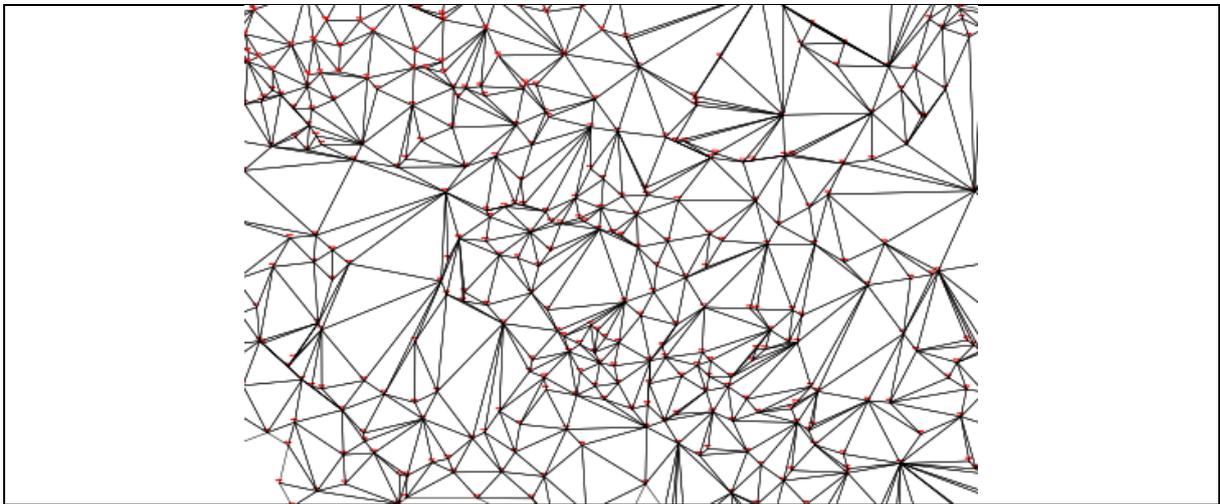
Questi prodotti generalmente vengono forniti in formati di interscambio che possono variare in funzione delle richieste dell'utente finale o in dipendenza del software da adottare per effettuare un determinato processamento. È consuetudine ottenere o richiedere modelli digitali di elevazione in formato raster e poco spesso in formato vettoriale come i "point cloud" e tra i formati di interscambio maggiormente utilizzati e indicati anche in direttive europee e internazionali troviamo i formati TIN (Triangulated Irregular Network) o formati di tipo GRID, entrambi aventi estensioni del file differenti da software a software.

### 3.2.1. TIN (Triangulated Irregular Network)

Un TIN è un modello altimetrico formato da un insieme di triangoli adiacenti e non sovrapposti, determinato a partire da un insieme di punti quotati disposti planimetricamente in modo irregolare. La struttura di un TIN memorizza:

- i punti quotati disposti irregolarmente;
- le linee di descrizione dei lati dei triangoli;
- i poligoni di rappresentazione dei triangoli interpretati come "breakline";
- le relazioni topologiche tra triangoli adiacenti.

Un modello altimetrico di tipo TIN come in Figura 7, deve essere generato in modo che i lati dei triangoli non attraversino le "breakline" presenti sul territorio, ma le descrivano mediante i propri lati. Perciò un TIN è preferibile a un modello regolare quando sono presenti sul territorio linee di discontinuità molto frequenti, che richiederebbero una descrizione vettoriale particolarmente onerosa. I triangoli che compongono i TIN vengono generalmente definiti, a partire da un insieme di punti quotati, per mezzo della triangolazione di Delaunay. Si ricorda che dato un seminato di punti non è univoca la realizzazione della maglia di triangoli, ovvero in funzione del primo triangolo definito e delle regole applicate nella triangolazione si possono ottenere triangoli differenti: per realizzare un modello altimetrico univoco è necessario definire anche i vari triangoli che lo compongono. All'interno di ogni triangolo la superficie descritta viene interpretata, ai fini dell'interpolazione, come un piano passante per i tre vertici del triangolo.



*Figura 7 - Rete di triangolazione irregolare tipica dei modelli TIN*



Di seguito la matrice delle NROWS x NCOLS quote del modello, separate da uno spazio (" "), i valori delle quote sono rappresentate in metri con al più due cifre decimali (singola precisione), il separatore decimale è il punto ("."). In Figura 9 è visibile un esempio di formato GRASS ASCII GRID avente 10 righe e 5 colonne

```
north: 3451250
south: 3438850
east: 298960
west: 290860
rows: 10
cols: 5
10.01 11.02 12.12 10.56 16.3
11.01 13.02 15.17 18.51 19.21
... (per altre 8 righe)
```

Figura 9 - Formato GRASS ASCII GRID

### 3.2.3. Formato dei dati digitali

Nel caso di dati raster di tipologia grid, come le ortofoto o i modelli digitali del terreno, possono essere utilizzati anche altri, ad esempio:

1. il formato più diffuso e consigliato è il formato standard Geo-Tiff, nella versione Baseline.
2. il formato TIFF, con associato il file di georeferenziazione avente stesso nome dell'immagine digitale ma estensione TFW;
3. il formato JPEG, con associato il file di georeferenziazione avente stesso nome dell'immagine digitale ma estensione JGW;
4. il formato ECW (Enhanced Compression Wavelets);
5. il formato JPcG2000.

Nella scelta del formato si tenga presente che:

- I formati 1,4,5 memorizzano all'interno dello stesso file sia la matrice immagine digitale sia le informazioni per una corretta georeferenziazione: sono pertanto auto-consistenti e preferibili agli altri;
- i formati 2,3 sono molto comuni ma le informazioni di georeferenziazione sono contenute in un file esterno all'immagine digitale: se si perde l'associazione tra questi due file si perde il corretto posizionamento cartografico dell'immagine;
- i formati 1,2, 5 possono essere compressi senza perdita di informazioni e quindi senza decadimento nella qualità del dato memorizzato;
- i formati 1,2,3 possono essere compressi con tecnica DCT (Discrete Cosine Transformation) che determina una perdita d'informazione in fase di memorizzazione dell'immagine digitale: al fine di limitare tale decadimento di qualità, il rapporto di compressione deve essere minore di 8;
- il formato 4 e la versione contenente l'informazione del formato 5 sono compressi con tecnica basata sulla DWT (Discrete Wavelet Transformation) che determina una perdita d'informazione in fase di memorizzazione dell'immagine digitale: al fine di limitare tale decadimento di qualità il rapporto di compressione deve essere minore di 10.

Ovviamente, come detto prima, il formato di interscambio utilizzato dipende dal software utilizzato dall'utente finale.

#### 3.2.4. Ortofotocarte

Una ortofotocarta è una proiezione della immagine aereofotografica su un piano di riferimento. Secondo Dequal et al. (2003) una ortofoto di precisione è corretta dalle deformazioni prospettiche residue dovute a discontinuità dell'oggetto mediante un modello digitale denso (DDEM = Dense Digital Elevation Model), spesso acquisito con scansioni laser e un approccio multimmagine (in modo da ricercare l'informazione cromatica delle zone defilate in un'immagine all'interno delle altre immagini dell'intero blocco fotogrammetrico). L'ortofotocarta è semplicemente visualizzabile mediante PC ed è immediatamente comprensibile dagli esperti di settore, che possono utilizzarla secondo i propri fini. Il limite dell'ortofoto di precisione risiede nel contenuto metrico che è in grado di racchiudere: rigoroso, uniforme su tutta l'immagine (risoluzione costante e precisione definita), ma solamente bidimensionale.

La memorizzazione dell'informazione tridimensionale per mezzo di una rappresentazione in forma di immagine digitale è stata proposta da Bornaz et al. (2006) con il nome di immagine solida: in essa, ad un'immagine digitale classica (prospettica, non ortorettificata, RGB) viene aggiunta una matrice numerica (avente la stessa dimensione e la stessa risoluzione) che contiene l'informazione metrica tridimensionale ottenuta mediante laser scanner terrestre. La visualizzazione dell'immagine solida appare all'utente come una semplice immagine fotografica dell'oggetto rilevato, e pertanto non sono necessarie strumentazioni speciali né addestramenti specifici per essere in grado di interpretarla correttamente. L'informazione tridimensionale nascosta appare solamente quando si muove il cursore all'interno dell'immagine digitale rendendo disponibili, mediante semplici funzioni, la misurazione di angoli, distanze aree e volumi e quant'altro. L'idea dell'ortofoto solida di precisione nasce dall'immagine solida, tentando di colmarne l'unico limite apparente: la visualizzazione prospettica che nasconde la terza dimensione, in certi casi, può trarre in inganno l'operatore in quanto non contiene informazioni sulle zone nascoste e il livello di dettaglio varia in funzione della distanza della porzione di oggetto considerata e il centro di presa dell'immagine fotografica.

### 3.3. Direttive italiane europee e internazionali

Con l'avvento dei dati digitali nell'ambito della geomatica, sempre più in campo internazionale si è cercato oltre che di omogeneizzare i formati di interscambio utilizzati dagli utenti anche definire le accuratèzze intrinseche alle cartografie generate in funzione degli ambiti di applicazione. In Italia i primi passi per ottenere una omogeneizzazione di file di interscambio digitali si sono avuti intorno al 1998 facendo nascere le specifiche definite dall'Intesa Stato Regioni Enti Locali, basate sugli standard ISO/TC211. Ad esempio la definizione di errore di graficismo, che con l'avvento dell'era digitale e quindi con la possibilità di non stampare più le cartografie, il documento riporta una prima comparazione tra la stampa e il digitale introducendo il termine "accuratèzza di georeferenziazione":

Gli oggetti rappresentati a misura devono avere una accuratèzza planimetrica di 0,04 millimetri alla scala di rappresentazione ovvero una accuratèzza di georeferenziazione di  $\pm 2$  m per le CTR 1:5.000 e di  $\pm 80$  cm per le CTC 1:2.000.

#### 3.3.1. Intesa Stato Regioni Enti Locali

L'intesa Stato Regioni Enti locali, ha esteso alla geomatica tutta una serie di standard di qualità per produrre cartografie con determinate accuratèzze alla scala da utilizzare. Dato l'enorme mole di dati, e non potendoli elencare e riassumere tutti di seguito verrà riportato sola l'accuratèzza planimetrica e di elevazione indicate dalle prescrizioni tecniche per la produzione di i dati di elevazione e per le ortofotocarte.

Per quanto riguarda i modelli di elevazione, il documento ([http://www.centrointerregionale-gis.it/public/DTM/DTM16I\\_Spec\\_Apr01\\_it.pdf](http://www.centrointerregionale-gis.it/public/DTM/DTM16I_Spec_Apr01_it.pdf)) definisce accuratamente tutte le fasi di generazione e di verifica finale del dato, per le accuratèzze da ottenere in funzione della spaziatura del dato finale segue quanto:

- la determinazione della distanza tra i nodi della griglia dove sono riportate le funzioni di risoluzione planimetrica in dipendenza della scala di creazione della carta finale, ovviamente una spaziatura elevata è adatta per i livelli di precisione più bassi. Al contrario, quando si impiegano dati da altimetro laser per un DEM di alta precisione, si impone una riduzione mirata dei dati, raccomandando il valore minimo di 5m della distanza tra i nodi della griglia. Il documento riporta che, in funzione del livello di precisione, si possono pertanto adottare i seguenti passi di griglia che sono nella maggior parte dei casi adeguati anche a terreni accidentati:
  - Precisione in quota tra  $\pm 0.15$ m e  $\pm 1$ m: passo della griglia 5m;
  - Precisione in quota tra  $\pm 1$  m e  $\pm 2.5$ m: passo della griglia 10m;
  - Precisione in quota  $\pm 3$ m ed inferiore: passo della griglia 20m; (sarebbe possibile impiegare spaziature maggiori per precisioni inferiori a  $\pm 7$ m ed oltre; tuttavia per semplicità di gestione dei dati si raccomanda di conservare un passo di 20m).

In Figura 10 un riepilogo più generalizzato a quanto detto prima.

Precisione altimetrica del DTM (m)	Distanza tra i nodi della griglia in funzione del tipo di terreno		
	piano (m)	ondulato (m)	accidentato (m)
10	131	82	47
4	66	41	23
2	41	26	15
0.8	20	13	7
0.4	13	8	5
0.2	8	5	3

*Figura 10 - Precisione altimetrica per la risoluzione spaziale e alla tipologia del terreno*

Queste indicazioni di accuratezza vengono anche estese alle carte a curve di livello che devono seguire gli standard di precisione altimetrica adottati nelle Carte Tecniche Italiane, indicano le tolleranze (t):

- Scala della carta 1:10.000:  $t(cl) = 3.5 \text{ m}$  t (per i punti quotati) =  $1.8 \text{ m}$   $\Delta(cl) = 10 \text{ m}$
- Scala della carta 1:5.000:  $t(cl) = 2.2 \text{ m}$  t (per i punti quotati) =  $1.2 \text{ m}$   $\Delta(cl) = 5 \text{ m}$
- Scala della carta 1:2.000:  $t(cl) = 0.9 \text{ m}$  t (per i punti quotati) =  $0.6 \text{ m}$   $\Delta(cl) = 2 \text{ m}$
- Scala della carta 1:1.000:  $t(cl) = 0.6 \text{ m}$  t (per i punti quotati) =  $0.4 \text{ m}$   $\Delta(cl) = 1 \text{ m}$
- Scala della carta 1:500:  $t(cl) = 0.4 \text{ m}$  t (per i punti quotati) =  $0.25 \text{ m}$   $\Delta(cl) = 0.5 \text{ m}$

con (cl) = curve di livello e  $\Delta(cl)$ = equidistanza

Per le ortofotocarte, il documento non riporta le specifiche ma si focalizza sulle precisioni richieste per il prodotto DEM da utilizzare per la loro produzione, come da Figura 11. Il documento, anche se risalente al 2001, riporta già la possibilità di produzione di ortofotocarte tramite immagini satellitari con un esempio pratico riguardante il satellite IKONOS avente una risoluzione spaziale di 1m e con possibilità di produrre ortofotocarte a colori 1:10.000 e, con una piccola perdita di qualità, anche 1:5.000.

Scala Ortofoto	Precisione planimetrica	Precisione richiesta al DTM	Precisione richiesta al DTM
	corrispondente a 0.13 mm	Grandangolare (WA)	Campo Normale (NA)
		f=153 mm	f=300mm
	(m)	(m)	(m)
1:25000	3.25	4.88	9.8
1:10000	1.30	1.95	3.9
1:5000	0.65	0.98	2.0
1:2000	0.26	0.39	0.8
1:1000	0.13	0.20	0.4
1:500	0.07	0.10	0.2

*Figura 11 - Precisione richiesta dal DEM per generare una ortofotocarta*

### 3.3.2. INSPIRE

La direttiva Europea INSPIRE (INfrastructure for SPatial InfoRmation in Europe) (<http://www.amfm.it/>), entrata in vigore il 15 maggio 2007, istituisce un'infrastruttura per l'informazione territoriale, che intende creare, grazie a norme comuni di attuazione integrate da misure comunitarie, una struttura comune che renda l'informazione territoriale dei vari stati compatibile e utilizzabile in un contesto transfrontaliero, in modo da superare i problemi riguardo alla disponibilità, alla qualità, all'organizzazione e all'accessibilità dei dati. Quando sarà pienamente operativa permetterà, teoricamente, di combinare dati transfrontalieri da uno Stato Membro all'altro con continuità e condividerli con le applicazioni e tra gli utilizzatori. Tra gli standard considerati ci sono principalmente quelli del ISO/TC211 e dell'Open Geospatial Consortium ed attualmente le diverse linee guida per i vari ambiti applicativi indicati dalla Direttiva sono disponibili all'indirizzo <http://inspire.ec.europa.eu/index.cfm> (2014).

Queste direttive, come per le indicazioni dell'Intesa Stato Regioni, riportano tutta una serie di informazioni riguardo tutto il campo della geomatica ed oltre. Quindi, data l'enorme mole di dati, ci focalizzeremo solo sulla parte dei modelli di elevazione e sulle ortofotocarte. Diversamente dall'intesa Stato Regioni, le linee guida della Direttiva non impongono o indicano strette procedure di verifica del dato finale senza le quali è consigliabile non distribuirlo, ma si limita solo a definire le tipologie di standard in forma matematica lasciando agli Stati o alle congregazioni territoriali la definizione dei valori minimi per la distribuzione del dato stesso. Infatti nelle linee guida troviamo indicazioni riguardo a:

- tolleranza nella connettività tra i vettori, il tasso di errore tra i vettori e definendo l'accuratezza nella posizione per i vettori secondo gli standard ISO/DIS 19157:2012 come:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(x_{mi} - x_t)^2 + (y_{mi} - y_t)^2]}$$

dove si indicano con:

- $x_t$  e  $y_t$  il valore reale delle coordinate X e Y
- $x_{mi}$  e  $y_{mi}$  il valore misurato delle coordinate X e Y

- errore quadratico medio RMSE per i vettori come:

$$\sigma_z = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Z_{mi} - z_t)^2}$$

dove si indicano con:

- $z_t$  il valore reale della coordinata Z
- $z_{mi}$  il valore misurato della coordinata Z

- l'accuratezza di posizione secondo gli standard ISO 19157:2012 per i dati di tipo raster GRID, definendo l'errore quadratico medio planimetrico come per l'accuratezza nella posizione per i vettori, ossia :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(x_{mi} - x_t)^2 + (y_{mi} - y_t)^2]}$$

A questo segue la parte dei prodotti derivati da dati di elevazione come le curve di livello, definendo per esse che la relazione tra equidistanza delle curve di livello e la scala della carta prende in considerazione i differenti tipi di terreno (pianeggiante, collinare, montano). Come regola generale per qualsiasi scala, l'intervallo di curve di livello in metri deve essere approssimativamente il denominatore della scala di mappa diviso 1000. Un esempio in Figura 12 dove si definiscono gli intervalli di contour anche in funzione della tipologia di terreno.

**Table 8– Vertical interval of contour lines for different levels of detail (map scales)**

<b>Topographic map 1:10 000 (1:5 000)</b>	
1.25 m	terrain: flat (with slopes < 2 degrees) und undulating (with slopes 2 - 6 degrees)
2.5 m	terrain: hilly (with slopes 6 – 12 degrees)
5 m	terrain: mountainous (with slopes > 12 degrees)
<b>Topographic map 1:25 000</b>	
1.25 m	terrain: flat (with slopes < 2 degrees)
2.5 m	terrain: undulating (with slopes 2 - 6 degrees)
5 m	terrain: hilly (with slopes 6 – 12 degrees)
10 m	terrain: mountainous (with slopes > 12 degrees)
<b>Topographic map 1:50 000</b>	
2.5 m	terrain: flat (with slopes < 2 degrees)
5 m	terrain: undulating (with slopes 2 - 6 degrees)
10 m	terrain: hilly (with slopes 6 – 12 degrees)
20 m	terrain: mountainous (with slopes > 12 degrees)
<b>Topographic map 1:100 000</b>	
10 m	terrain: flat (with slopes < 2 degrees)
20 m	terrain: undulating (with slopes 2 - 6 degrees)
20 m	terrain: hilly (with slopes 6 – 12 degrees)
40 m	terrain: mountainous (with slopes > 12 degrees)
<b>Topographic map 1:200 000</b>	
20 m	terrain: flat (with slopes < 2 degrees)
20 m	terrain: undulating (with slopes 2 - 6 degrees)
40 m	terrain: hilly (with slopes 6 – 12 degrees)
40 m	terrain: mountainous (with slopes > 12 degrees)
<b>Topographic map 1:500 000</b>	
20 m	terrain: flat (with slopes < 2 degrees)
50 m	terrain: undulating (with slopes 2 - 6 degrees)
100 m	terrain: hilly (with slopes 6 – 12 degrees)
100 m	terrain: mountainous (with slopes > 12 degrees)

Figura 12 - Intervalli di contour in funzione della tipologia di terreno

Anche per le ortofotocarte, le linee guida non forniscono i valori di riferimento per la distribuzione del dato, che tocca alle nazioni definire, ma definiscono solo l'accuratezza di posizione, definita come errore quadratico medio in planimetria, ossia il valore reale delle coordinate X e Y osservate sulla carta, secondo la formula:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(x_{mi} - x_t)^2 + (y_{mi} - y_t)^2]}$$

dove si indicano con:

- $x_t$  e  $y_t$  il valore reale delle coordinate X e Y
- $x_{mi}$  e  $y_{mi}$  il valore misurato delle coordinate X e Y

In aggiunta definisce degli standard da seguire per effettuare una eventuale mosaicature di esse.

### 3.3.3. USGS

Le Direttive statunitensi, sono molto sceve di definizioni e procedure lasciando così all'utente la possibilità di produrre diverse cartografie e modelli digitali di elevazione secondo qualsiasi processo. Agiscono nella parte finale andando a definire molto bene i valori di accuratezza e precisione per i diversi prodotti nonché le tipologie di file di interscambio. Senza riportare la parte riguardo la definizione degli errori planimetrici e di elevazione, perché sono identici a quelli utilizzati nelle direttive prima descritte, vengono di seguito riportate solo i parametri per i modelli digitali di elevazione.

Per i modelli digitali di elevazione le Direttive USGS non riportano come le INSPIRE dei valori tabellari ai quali l'utente può fare riferimento, ma, proprio perché lascia libertà nella fase di produzione dei modelli di elevazione, accosta ad essi dei livelli di qualità, dal primo al terzo. Di seguito e in Tabella 4 vengono riportate le informazioni caratteristiche che contraddistinguono ogni livello:

- Il primo livello è quello con più bassa qualità e con un RMSE verticale raccomandato di 7m ma comunque con massimo permesso di 15m. Oltre a questo, la direttiva impone un limite di contiguità per i valori di elevazione, indicando che per 49 celle contigue non ci sia un RMSE in elevazione superiore ai 21 metri.
- Il secondo livello incorpora tutti quei DEM che hanno subito un processo di elaborazione statistica per renderne più omogenea la superficie, in questo caso l'RMSE verticale non è associato al valore di elevazione delle celle ma all'intervallo di curve di livello generabile attribuendo come valore massimo di errore verticale la metà dell'interdistanza delle curve di livello da generare.
- Il terzo livello segue le linee guida del secondo e attribuisce all'RMSE verticale il valore massimo di 1/3 dell'intervallo di contour delle curve generate da esso.

Per i livelli 2 e 3, quanto sopra porta non a discriminare il DEM in funzione del suo grado di accuratezza ma a discriminarlo in funzione degli ambiti applicativi per i quali sarà impiegato, infatti proprio in ambito delle applicazioni geomorfologiche e identificazione delle frane, la direttiva indica un DEM almeno di livello 2.

	RMSE verticale	RMSE verticale permesso rispetto l'intervallo usate per le curve di livello
1° LIVELLO	<15m	/
2° LIVELLO	/	1/2
3° LIVELLO	/	1/3

Tabella 4 - Valori RMSE verticali secondo la direttiva USGS



#### 4. PRODUZIONE DI MODELLI DIGITALI DELLE ALTEZZE DA STEREOIMMAGINI GEOEYE-1

La generazione di modelli digitali del terreno e prodotti derivati a partire da immagini satellitari è oggi una pratica molto diffusa sia in ambito professionale che scientifico. In letteratura si ritrovano moltissimi lavori che descrivono le fasi procedurali per ottenerli, i software utilizzati, le accuratezze raggiunte in funzione dei punti di controllo utilizzati e della pendenza del territorio, nonché gli ambiti applicativi. Generalmente la costruzione di un modello di elevazione digitale consta in una serie di fasi, iniziando dalla fase dove si individuano e campionano i possibili punti di appoggio rilevabili a terra o su cartografia esistente e concludendosi con la procedura di controllo del modello. In questo capitolo si descriveranno le diverse fasi compiute, le problematiche affrontate e risultati ottenuti. Si incomincerà col descrivere la fase di appoggio a terra sia tramite rilievo GPS sia misurata su cartografia tecnica regionale (CTR), alla quale seguirà la fase di processamento ed elaborazione attraverso due software specializzati per la creazione di DEM a partire da immagini satellitari. Si analizzeranno i residui di georeferenziazione per i due software e i valori di accuratezza posizionale ottenuti.

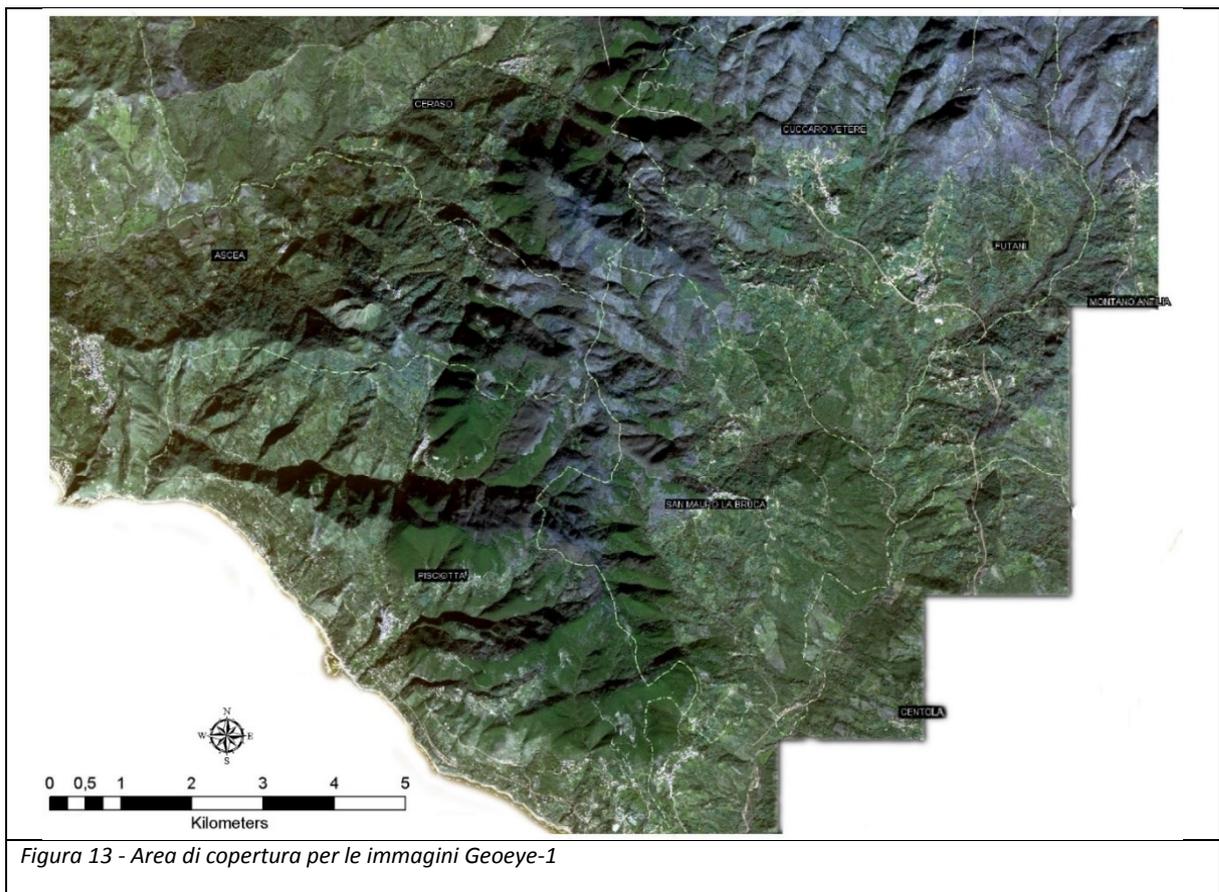
## 4.1. L'area di copertura Geoeye-1

L'immagine acquisita con il sensore Geoeye-1 copre una porzione di territorio di circa 150kmq di un'area a sud della Campania, nella provincia di Salerno e circoscritta al territorio Cilentano e Lucano occidentale.

I comuni coperti dall'immagine sono otto: Ascea, Centola, Ceraso, Cuccaro Vetere, Futani, Montano Antilia, Pisciotta e San Mauro la Bruca. Il territorio è pressoché montano, con alternanza di valli fluviali caratterizzate da salti repentini di elevazione, che sono caratteristici del territorio sia nella porzione continentale che nella parte adiacente al mare. Dalla Figura 13, che mostra l'area rilevata, è possibile subito notare come la zona sia a tendenza pressoché montana e che pochissime zone hanno un andamento meno acclive.

La forte acclività del territorio, data l'ora di acquisizione dell'immagine, genera moltissime zone in ombra per i versanti esposti a Nord e in tutti i casi di ostacoli con forte elevazione rispetto al suolo. Queste zone in ombra potrebbero produrre errori in fase di correlazione dei punti omologhi tra le stereocoppie e portare quindi a una difficile interpretazione del software delle elevazioni reali.

Dalla figura si può notare inoltre come la maggior parte del territorio sia vegetata e che le zone urbanizzate si limitano a piccoli spot dislocati in modo eterogeneo. Questa caratteristica, come per il caso precedente, potrebbe portare in queste aree ad ulteriori indeterminazioni in fase di correlazione dei punti omologhi.



## 4.2. La campagna di rilievo GPS

La campagna di rilievo GPS è stata pianificata per la primavera dell'anno 2012 ponendosi come obiettivo l'acquisizione di un congruo numero di punti ben distribuiti sull'intera immagine. Il primo passo è stato quindi costruire una griglia di campionamento, sufficientemente fitta in modo da individuare zone di facile accesso e con punti ben riconoscibili.

### 4.2.1. Individuazione delle zone da campionare

In prima approssimazione è stata creata una maglia rettangolare con passo di 1,5 km e si è cercato di adattarla alla morfologia del territorio come da Figura 14 spostandola sull'immagine in modo da trovare la migliore collocazione. Nell'intorno dei vertici della maglia sono state individuate 31 zone di campionamento per le quali sono stati misurati più punti, in modo tale da discriminarli a posteriori in base alla loro accuratezza topologica e di misura.

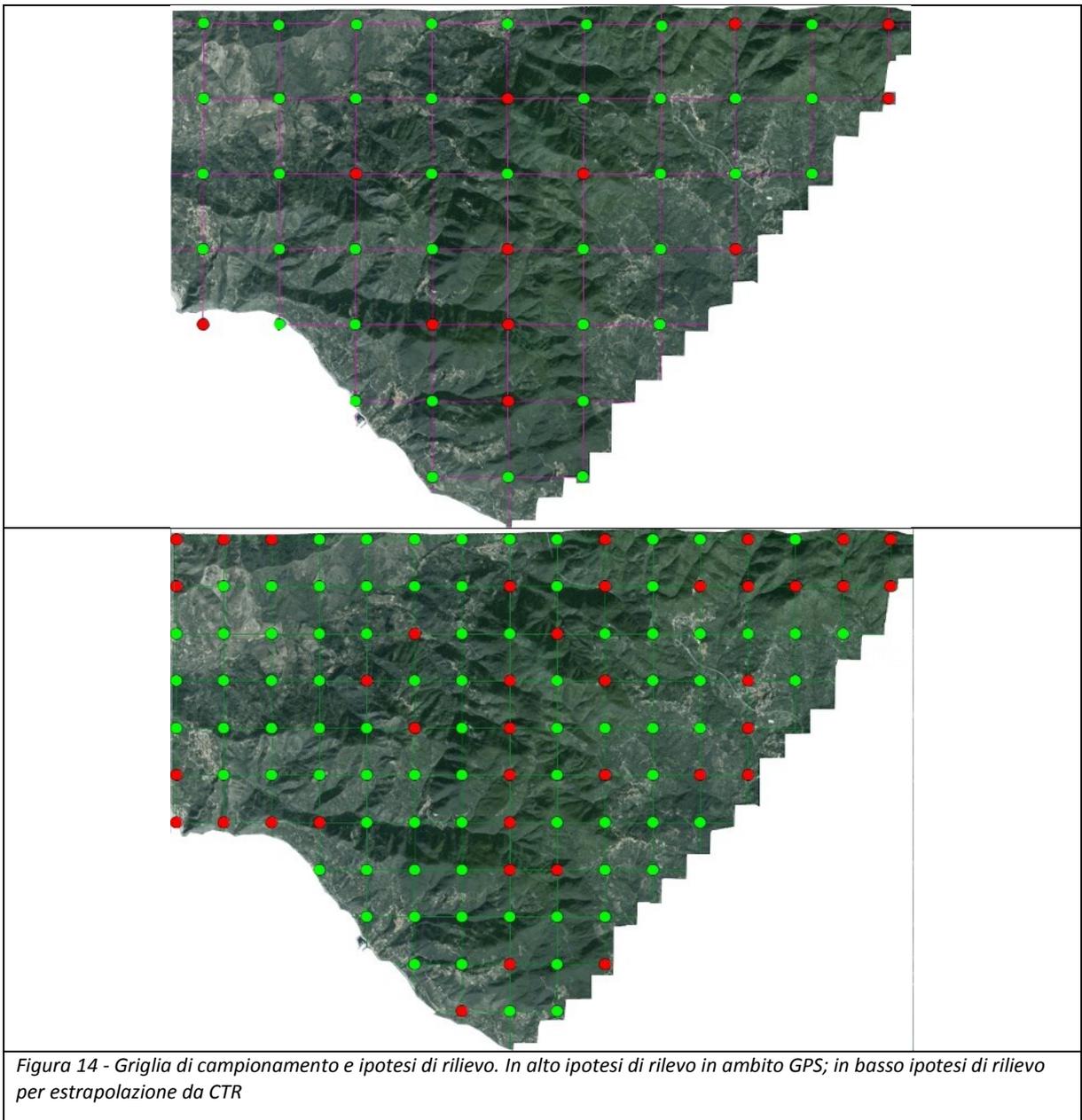


Figura 14 - Griglia di campionamento e ipotesi di rilievo. In alto ipotesi di rilievo in ambito GPS; in basso ipotesi di rilievo per estrapolazione da CTR

#### 4.2.2. Tecniche di rilievo GPS utilizzate

Come modalità operativa di rilievo è stata scelta la tecnica GPS-NRTK, per la possibilità di acquisire punti topografici molto accurati e in tempi brevi, come già dimostrato da studi precedenti (Barbarella et al. 2007). Un confronto con altre tecniche di acquisizione GPS è riportato in Tabella 5. È stata posta particolare attenzione in questa fase di rilievo, seguendo gli standard dall'Intesa Stato Regioni e imponendo ad ogni punto rilevato i seguenti parametri:

- una deviazione standard in fase di rilievo centimetrica;
- ogni punto misurato deve essere distante da manufatti e possibilmente in zone con contrasti cromatici marcati;
- qualora ci si ritrovasse in una zona con mancanza di copertura di rete, il rilievo dovrà essere eseguito in modalità fast-static con durata di stazionamento non inferiore ai 30 minuti.

Procedure operative	Tempi di osservazione (correlati alla lunghezza della baseline)	Precisione della baseline	Limitazioni
Statica	da 15' a più di 1h	da 0.2 a 10 ppm	Utilizzo di ricevitori a doppia frequenza per baseline di lunghezza > 10km
Statica veloce (Fast-static)	Da 5' a 20' (il tempo effettivo dipende oltre che dalla lunghezza della baseline anche dalla configurazione dei satelliti)	da 1 a 10 ppm	Necessità di ricevitori adatti alla procedura.
Pseudo-statica	Circa 20' (richiede però due serie di osservazioni di 10 minuti ciascuna)	da 2 a 20 ppm	Richiede due interventi su ciascun punto, intervallati da un periodo di minimo di un'ora e non superiore a 4 ore.
Cinematica	2' o meno	da 10 a 20 ppm	Richiede l'inizializzazione del rilievo ed il mantenimento del contatto con almeno 4 satelliti per tutta la durata della sessione del rilievo, anche durante gli spostamenti fra i punti.
RTK	Da 30" a 5'	da 10 a 20 ppm	Utilizzo di ricevitori a doppia frequenza; registrazione dei dati ad intervalli $\leq 1''$ ; lunghezza della baseline tra stazione fissa e punto da rilevare $\leq 15$ km.

Tabella 5 - Precisione ottenibile in funzione della modalità di rilievo

Le reti di stazioni permanenti GNSS (Global Navigation Satellite System) sono state realizzate con lo scopo di favorire l'utilizzo delle diverse tecniche di rilievo anche agli utenti con un solo ricevitore col quale si occupano i soli punti da rilevare ottenendo un evidente beneficio economico. La sigla GNSS (Global Navigation Satellite System) si riferisce ai tre sistemi satellitari GPS, GLONASS e Galileo, che possono essere utilizzati congiuntamente ottenendo significativi benefici, in particolare nelle zone in cui le operazioni sono limitate da ostacoli naturali o artificiali, questo si ha solo in teoria perché il sistema satellitare Galileo non è operativo. Ciascuna stazione permanente GNSS è dotata di un ricevitore/antenna di alte prestazioni e acquisisce con continuità tutti i segnali trasmessi dai satelliti tracciabili dalla stessa stazione, per tutti i giorni dell'anno, trasmettendoli poi a un centro di coordinamento della rete dal quale diventano accessibili a tutti gli utenti iscritti al servizio. L'acquisizione delle informazioni da parte della stessa utenza può avvenire mediante collegamento GSM o via Internet mediante connessione al server della rete. In molti casi le reti di stazioni permanenti GNSS funzionano anche come NRTK (Network Real Time Kinematic) in quanto trasmettono le osservazioni satellitari dalle varie stazioni riferimento al server centrale (network server), in cui è presente un software per reti RTK. Senza addentrarci nel metodo di acquisizione in NRTK,

questo metodo di acquisizione ha bisogno di almeno due ricevitori, uno su di un vertice di riferimento con posizione nota e uno sul punto da misurare. Il vertice di posizione nota calcola le correzioni di PRC (Pseudo Range Correction) e le loro variazioni nel tempo dette RRC (Range Rate Correction) ed entrambe vengono trasmesse al ricevitore nel punto di misura. L'invio di questo messaggio, conosciuto come messaggio RTCM 10403.1 (Radio Technical Commission for Maritime Services Protocoll), che gestisce lo streaming su internet dei dati per il GNSS, viene effettuato in real-time sfruttando un collegamento internet ad un server dedicato oppure creando un ponte radio tra le due stazioni in Campania, i messaggi RTCM utilizzano i parametri provenienti dal server remoto Caster NTRIP della Regione o della rete privata ItalPOS della Leica Geosystems. Il ricevitore remoto applica le correzioni di pseudorange e calcola le posizioni con queste osservazioni corrette, migliorando la precisione delle coordinate. Questo tipo di rete ha lo scopo di minimizzare, entro i suoi confini, l'influenza degli errori dipendenti dalla distanza sul calcolo della posizione del rover. Il server centrale fissa le ambiguità dei satelliti osservati da tutte le stazioni di riferimento e genera delle correzioni da inviare al rover il quale può calcolare la propria posizione. Durante il rilievo GPS, per la correzione in tempo reale della misura, si è deciso di usare come rete di appoggio la rete Leica SmartNet ItalPoS e, in assenza di copertura di quest'ultima, è stata utilizzata la rete permanente della regione Campania. La strumentazione normalmente utilizzata è costituita da un modulo antenna GPS (rover) a cui è collegato un modulo ricevitore con modem integrato.

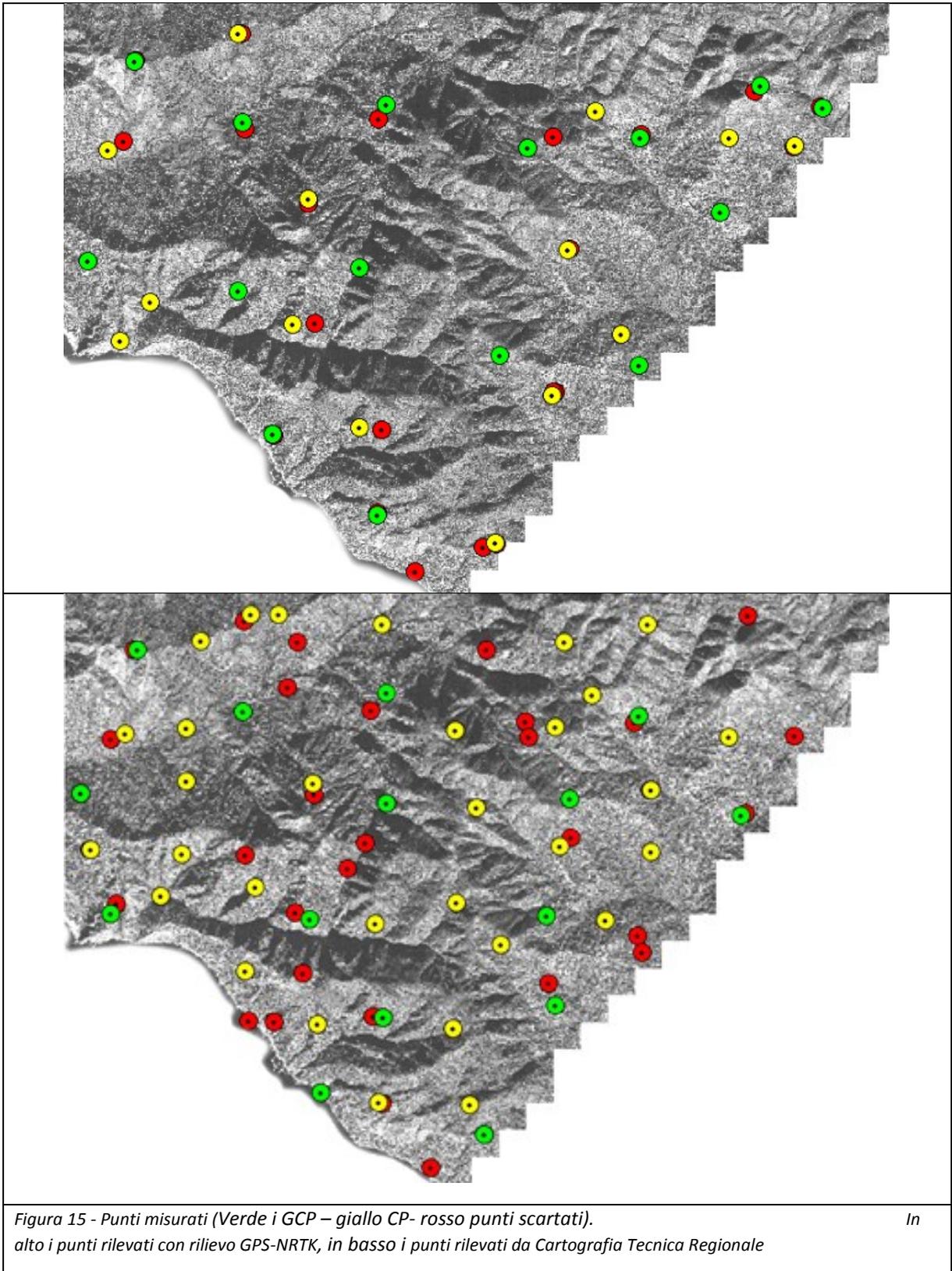
Nel nostro caso l'apparecchiatura impiegata è la GS15 della Leica Geosystems capace di leggere e combinare i segnali d'onda GPS, GLONASS e GALILEO e in statico rapido misurare con precisione di  $5\text{mm}+0.5\text{ ppm}$  (RMS). Tale strumentazione, durante il rilievo NRTK, ha utilizzato la modalità VRS e la iMAX in dipendenza del Caster NTRIP interrogato, in Tabella 6 un riepilogo delle modalità utilizzate durante il rilievo.

In campagna, le fasi di rilievo consistono in: fare stazione nel punto da rilevare; collegarsi al server; aspettare il tempo adeguato per ottenere la precisione voluta, normalmente dalla decina di secondi ad alcuni minuti. Il sistema di riferimento preso in considerazione è quello utilizzato come standard internazionale per i sistemi GPS, ossia basato sul WGS84 (World Geodetic System 1984).

#### 4.2.3. Punti rilevati

Dopo la pianificazione prima descritta, si è svolta la vera campagna di rilievo. Durante questa fase si sono avvicendate tutta una serie di problematiche operative, delle quali non si era potuto tenere conto durante la fase di pianificazione, tra le quali troviamo la non copertura di segnale telefonico per eseguire la connessione ai Caster NTRIP della Italpos o della Regione Campania, o punti in zone estremamente vegetate con la possibilità quindi di indurre problemi di multipath o anche impraticabilità della viabilità di accesso ai punti. Proprio per questo ultimo caso non è stato possibile rilevare il punto individuato per la zona 19. Durante il rilievo GPS sono stati misurati a terra 61 punti per 31 differenti zone. Sono stati successivamente scartati i punti ricadenti in 2 zone a causa dei loro alti valori di deviazione standard. Oltre ai punti rilevati mediante GPS sono stati misurati sulla Carta Tecnica Regionale (CTR) a scala 1:5000 edita nel 2008 (dal volo del 2004-2005), 75 punti visibili sull'immagine satellitare e ben riconoscibili nelle zone omologhe della CTR. Per questi punti il dato di elevazione è stato calcolato interpolando i valori di elevazione da curve di livello e dei punti quotati della cartografia. Di seguito è possibile prendere visione della disposizione dei punti misurati con

rilievo GPS e da cartografia CTR, in figura 15 si possono vedere in verde i punti utilizzati come GCPs, in giallo quelli utilizzati come CP e in rosso quelli scartati.



Punto	Giorno	Modalità	Server	Mount point	Punto	Giorno	Modalità	Server	Mount point
P1	09-mag	RTK	ItalPoS	MAX3-IGM95	P15	15-mag	RTK	ItalPoS	MAX3-IGM95
P1A	09-mag	RTK	ItalPoS	MAX3-IGM95	P15A	15-mag	RTK	ItalPoS	MAX3-IGM95
P2	09-mag	RTK	ItalPoS	MAX3-IGM95	P16	15-mag	RTK	ItalPoS	MAX3-IGM95
P2A	09-mag	RTK	ItalPoS	MAX3-IGM95	P16A	15-mag	RTK	ItalPoS	MAX3-IGM95
P2B	09-mag	RTK	ItalPoS	MAX3-IGM95	P17	09-mag	RTK	ItalPoS	MAX3-IGM95
P3	17-mag	RTK	ItalPoS	MAX3-IGM95	P17B	17-mag	Fast-Statico		
P3A	17-mag	RTK	ItalPoS	MAX3-IGM95	P18	17-mag	RTK	ItalPoS	MAX3-IGM95
P4	15-mag	RTK	ItalPoS	MAX3-IGM95	P18A	17-mag	RTK	ItalPoS	MAX3-IGM95
P5	15-mag	RTK	Reg. Campania	Sapri	P20	16-mag	RTK	ItalPoS	MAX3-IGM95
P5A	15-mag	RTK	Reg. Campania	Sapri	P21	16-mag	RTK	ItalPoS	MAX3-IGM95
P5B	15-mag	RTK	ItalPoS	MAX3-IGM95	P21A	16-mag	RTK	ItalPoS	MAX3-IGM95
P6	15-mag	RTK	ItalPoS	MAX3-IGM95	P22	09-mag	RTK	ItalPoS	MAX3-IGM95
P6A	15-mag	RTK	ItalPoS	MAX3-IGM95	P22A	09-mag	RTK	ItalPoS	MAX3-IGM95
P7	09-mag	RTK	ItalPoS	MAX3-IGM95	P23	16-mag	RTK	ItalPoS	MAX3-IGM95
P7A	09-mag	RTK	ItalPoS	MAX3-IGM95	P23A	16-mag	RTK	ItalPoS	MAX3-IGM95
P8	16-mag	RTK	ItalPoS	MAX3-IGM95	P24	16-mag	RTK	ItalPoS	MAX3-IGM95
P8B	16-mag	RTK	ItalPoS	MAX3-IGM95	P24A	16-mag	RTK	ItalPoS	MAX3-IGM95
P9	15-mag	RTK	ItalPoS	MAX3-IGM95	P24B	16-mag	RTK	ItalPoS	MAX3-IGM95
P9A	15-mag	RTK	ItalPoS	MAX3-IGM95	P25	16-mag	RTK	ItalPoS	MAX3-IGM95
P10	15-mag	RTK	ItalPoS	MAX3-IGM95	P25A	16-mag	RTK	ItalPoS	MAX3-IGM95
P11	15-mag	RTK	ItalPoS	MAX3-IGM95	P26	16-mag	RTK	ItalPoS	MAX3-IGM95
P11A	15-mag	RTK	ItalPoS	MAX3-IGM95	P26B	16-mag	RTK	ItalPoS	MAX3-IGM95
P12	09-mag	RTK	ItalPoS	MAX3-IGM95	P27	16-mag	RTK	ItalPoS	MAX3-IGM95
P12A	09-mag	RTK	ItalPoS	MAX3-IGM95	P28	17-mag	RTK	ItalPoS	MAX3-IGM95
P13	17-mag	RTK	ItalPoS	MAX3-IGM95	P28A	17-mag	RTK	ItalPoS	MAX3-IGM95
P14	16-mag	Fast-Statico							

Tabella 6 – Tecnica di rilievo GPS utilizzata

#### 4.2.4. Fase di post elaborazione

Alla fase di rilievo segue la fase di elaborazione dati. In questo caso la post elaborazione non è effettuata per tutti i punti rilevati poiché per la modalità di acquisizione NRTK vengono già calcolate in real-time tutte le correzioni sulle misure e le baselines tra punto misurato e stazioni permanenti. Può capitare però che non sempre vengano raggiunte le precisioni imposte per il rilievo, per svariati motivi come, interferenza del segnale internet/radio per l'invio del messaggio RTCM, distanza elevata rispetto alla stazione permanente di appoggio e non ultimo il multipath, molto frequente se si acquisisce in zone con ostacoli vicini.

In post elaborazione, visionando i valori di deviazione standard per ogni punto, Tabella 7, è possibile notare come per la maggior parte dei punti siano stati raggiunti valori di Deviazione Standard che rientrano negli standard imposti in precedenza, ma avendo punti con valori non accettabili, si è deciso di rielaborare tutti utilizzando effemeridi precise e dati provenienti dalle stazioni permanenti. Così si ottengono valori di precisione nell'ordine di pochi centimetri o inferiori al centimetro.

Il calcolo delle coordinate è stato fatto con il software LGO della Leica. Una volta importati i dati grezzi all'interno del software, si è assegnato il punto fisso cioè quello a coordinate note. Nei rilievi in Fast-Statico come punto fisso è stato utilizzato una stazione permanente della regione Campania situata a Sapri poiché, tra le più vicine, era l'unica funzionante in quel periodo. Per i punti acquisiti in NRTK come stazione permanente è stata usata la stazione della rete ItalPoS individuata con il codice RTCM-Ref 0079 che si trova a Prignano (SA).

L'elaborazione delle basi è stata fatta in maniera automatica dal software il quale ha generato tutte le baseline tra i punti che hanno occupazione contemporanea. In questo modo tutti i punti della rete sono stati collegati e inquadrati in un unico sistema di riferimento ed è stata effettuata la compensazione della rete.

Ultimo passaggio è la conversione dei valori di elevazione da quota ellissoidica  $h$  a quota ortometrica  $H$  utilizzando il modello di ondulazione del geoide Italgeo95. Conoscendo i valori di ondulazione del geoide  $N$  per ogni punto rilevato questi si sottraggono all'altezza ellissoidica. I valori di ondulazione del geoide per quest'area vanno da un minimo di 47.402 metri a un massimo di 48.017 metri. Oltre alla conversione della quota, sono state convertite le coordinate ottenute da LGO sia in coordinate sessagesimali, sia in coordinate cartografiche in UTM WGS 84.

ID	COORDINATE E QUOTA	SD	ID	COORDINATE E QUOTA	SD
P1	40°10'31.60423" 15°11'42.92106" 265,3299	N 0.0148 m E 0.0094 m m 0.0238 m	P1A	40°10'31.19834" 15°11'42.29829" 264,6285	N 0.0112 m E 0.0067 m m 0.023 m
P2	40°10'47.76351" 15°13'06.69604" 325,3227	N 0.0074 m E 0.0066 m m 0.0201 m	P2A	40°10'47.59834" 15°13'07.19133" 325,4853	N 0.0046 m E 0.0041 m m 0.0117 m
P2B	40°10'47.65223" 15°13'05.22231" 324,5176	N 0.0033 m E 0.0029 m m 0.0083 m			
P3	40°10'03.97282" 15°15'03.22936" 446,1069	N 0.0049 m E 0.0044 m m 0.0132 m	P3A	40°09'55.02706" 15°14'56.97069" 460,2278	N 0.0064 m E 0.0056 m m 0.0125 m
P4	40°09'59.25129" 15°17'50.02850" 733,7935	N 0.0058 m E 0.004 m m 0.0119 m			
P5	40°10'14.94045" 15°20'00.99133" 1.068,2164	N 0.007 m E 0.0058 m m 0.0125 m	P5A	40°10'11.56810" 15°19'56.88169" 1.048,0212	N 0.0037 m E 0.003 m m 0.0067 m
P5ABIS	40°10'11.56799" 15°19'56.88242" 1.048,0071	N 0.007 m E 0.0056 m m 0.0126 m	P5B	40°09'42.99272" 15°19'36.00816" 699,4797	N 0.0068 m E 0.0058 m m 0.0131 m
P6	40°10'00.89022" 15°20'51.32853" 647,4876	N 0.0052 m E 0.006 m m 0.0167 m	P6A	40°10'01.51447" 15°20'49.30598" 658,6215	N 0.0041 m E 0.0049 m m 0.0132 m
P7	40°09'41.58816" 15°11'32.94041" 97,0796	N 0.0121 m E 0.0096 m m 0.0197 m	P7A	40°09'36.39626" 15°11'20.99589" 82,5131	N 0.0056 m E 0.0043 m m 0.0092 m
P8	40°09'03.22928" 15°14'00.64651" 634,7881	N 0.0138 m E 0.0091 m m 0.0451 m	P8B	40°09'06.14224" 15°14'00.30484" 612,5924	N 0.0076 m E 0.0056 m m 0.0191 m
P8BIS	40°09'03.22924" 15°14'00.64729" 636,6850	N 0.0088 m E 0.0053 m m 0.0285 m	P8TRIS	40°09'03.22899" 15°14'00.64741" 636,7577	N 0.0124 m E 0.0073 m m 0.0401 m
P9	40°09'37.14200" 15°16'55.90753" 790,8202	N 0.0122 m E 0.0116 m m 0.0215 m	P9A	40°09'43.81761" 15°17'15.99959" 746,1725	N 0.0061 m E 0.0051 m m 0.0094 m
P9R	40°09'37.14190" 15°16'55.90780" 790,8053	N 0.0049 m E 0.0045 m m 0.0086 m			
P10	40°09'44.75991" 15°18'25.71259" 662,0763	N 0.3442 m E 0.257 m m 0.679 m	P10A	40°09'43.03707" 15°18'25.63463" 650,5490	N 0.0066 m E 0.0047 m m 0.0156 m

P11	40°09'37.80391" 15°20'28.43543" 648,3935	N 0.0055 m E 0.0057 m m 0.0142 m	P11A	40°09'37.41105" 15°20'27.67724" 648,6778	N 0.0057 m E 0.0056 m m 0.0129 m
P11Abis	40°09'37.41044" 15°20'27.68338" 648,3546	N 0.0109 m E 0.0105 m m 0.0242 m			
P12	40°08'28.07613" 15°11'04.32809" 257,7813	N 0.0403 m E 0.046 m m 0.1252 m	P12A	40°08'27.98972" 15°11'04.18671" 257,7239	N 0.0234 m E 0.0266 m m 0.0736 m
P13	40°08'09.80324" 15°13'04.34053" 394,7778	N 0.0062 m E 0.0074 m m 0.0201 m			
P14STAT	40°08'23.74029" 15°14'41.17358" 557,7473	N 0.0149 m E 0.0115 m m 0.0354 m			
P15	40°08'34.74770" 15°17'28.95703" 550,9872	N 0.0048 m E 0.0046 m m 0.0142 m	P15A	40°08'34.21822" 15°17'27.58955" 549,8661	N 0.0061 m E 0.0065 m m 0.0164 m
P16	40°08'57.46069" 15°19'28.84279" 497,4042	N 0.2164 m E 0.146 m m 0.4355 m	P16A	40°08'57.24454" 15°19'28.99583" 497,3262	N 0.0088 m E 0.0062 m m 0.0195 m
P17	40°07'39.43644" 15°11'29.77646" 203,4456	N 0.0131 m E 0.0128 m m 0.0323 m	P17B	40°08'03.11632" 15°11'54.31734" 147,5996	N 0.0039 m E 0.0035 m m 0.0086 m
P18	40°07'49.58220" 15°14'05.35391" 488,3962	N 0.0073 m E 0.0053 m m 0.0125 m	P18A	40°07'49.04498" 15°13'47.69776" 467,6501	N 0.0074 m E 0.0069 m m 0.0168 m
P18bis	40°07'49.58208" 15°14'05.35401" 488,3903	N 0.0072 m E 0.0054 m m 0.0126 m			
P20	40°07'29.51205" 15°16'32.55395" 572,0776	N 0.013 m E 0.0143 m m 0.0283 m			
P21	40°07'23.23231" 15°18'23.99673" 340,0575	N 0.0082 m E 0.006 m m 0.0131 m	P21A	40°07'42.19960" 15°18'09.71941" 373,1213	N 0.0075 m E 0.0058 m m 0.0134 m
P22	40°06'41.52004" 15°13'31.62454" 248,5723	N 0.0116 m E 0.0085 m m 0.0265 m	P22A	40°06'41.03815" 15°13'32.34805" 249,9924	N 0.0058 m E 0.0046 m m 0.0139 m
P23	40°06'44.20177" 15°14'58.34807" 492,3739	N 0.0072 m E 0.0072 m m 0.0158 m	P23A	40°06'45.70248" 15°14'41.23294" 429,2048	N 0.0104 m E 0.0101 m m 0.0191 m

P24	40°07'07.34294" 15°17'17.32673" 408,6049	N 0.0166 m E 0.0146 m m 0.0519 m	P24AA	40°07'07.00006" 15°17'15.52619" 407,8848	N 0.0181 m E 0.0163 m m 0.0479 m
P24B	40°07'05.41593" 15°17'14.75416" 407,9615	N 0.01 m E 0.0089 m m 0.0241 m			
P25	40°05'53.34937" 15°14'54.50959" 414,5774	N 0.0076 m E 0.0054 m m 0.0169 m	P25BIS	40°05'53.34976" 15°14'54.51015" 414,5625	N 0.0104 m E 0.0075 m m 0.0235 m
P25A	40°05'52.16624" 15°14'54.99073" 415,6491	N 0.0062 m E 0.0048 m m 0.0145 m			
P26	40°05'31.98812" 15°16'19.01409" 415,6955	N 0.004 m E 0.0049 m m 0.0132 m	P26B	40°05'34.00503" 15°16'29.43871" 455,9648	N 0.0051 m E 0.0052 m m 0.0125 m
P26TRIS	40°05'53.35009" 15°14'54.51014" 414,5176	N 0.0066 m E 0.0049 m m 0.015 m			
P27	40°05'17.21145" 15°15'25.24597" 131,8490	N 0.0067 m E 0.0048 m m 0.0124 m	P27bis	40°05'17.21159" 15°15'25.24617" 131,8862	N 0.0065 m E 0.0044 m m 0.0118 m
P28	40°09'48.86035" 15°13'09.57719" 201,5296	N 0.0057 m E 0.004 m m 0.0116 m	P28A	40°09'53.27016" 15°13'08.16692" 172,5432	N 0.0115 m E 0.008 m m 0.0299 m

Tabella 7 – Coordinate da rilievo GPS

In campagna sono stati disegnati gli schizzi monografici per ogni singolo punto, poi in laboratorio sono state create le monografie definitive. Di seguito un esempio di monografia.

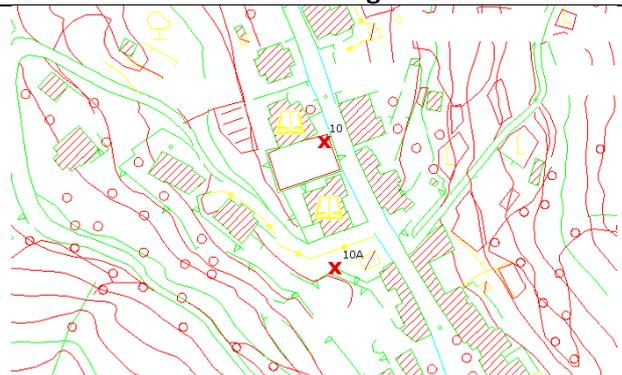
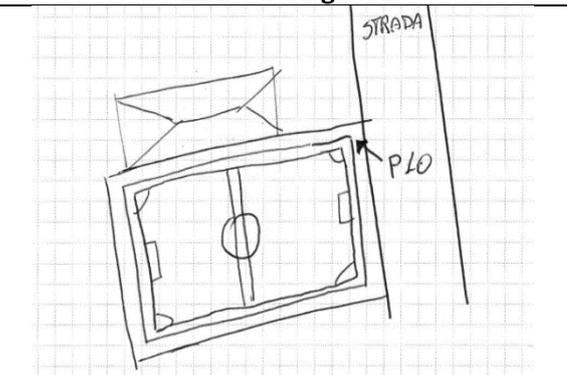
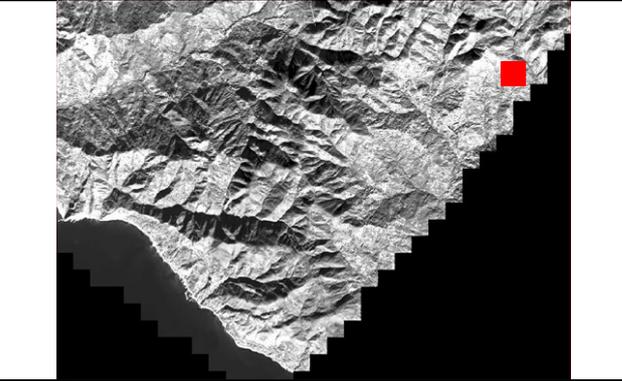
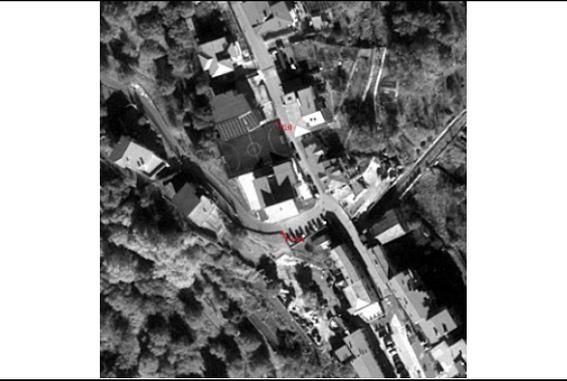
VERTICE N°	PROVINCIA	COMUNE	DATA MISURE
P10	Salerno	Futani	16/05/2011
LOCALITÀ	Nei pressi della piazza centrale del Comune di Futani		
Accesso:	Area a nord dalla piazza centrale del Comune, distante 100m circa		
Ubicazione:	Il vertice Nord del campo di calcetto; esterno linea del calcio d'angolo.		
Materializzazione:	Spray sul muro esterno		
Note:			
<b>Stralcio cartografico</b>		<b>Schizzo monografico</b>	
			
<b>Posizionamento su immagine satellitare</b>		<b>Posizionamento su immagine satellitare (ZOOM)</b>	
			
<b>VISIONE D'INSIEME (FOTO)</b>		<b>PARTICOLARE DEL PUNTO (FOTO)</b>	
			
<b>COORDINATE</b>			
WGS 84 φ 40° 09' 44.75991" λ 15° 18' 25.71259"	UTM (WGS 84) N 4445831.189 E 526155.376	Coordinate img sx X 21632.1875 Y 5113.8750	Coordinate img dx X 21703.1316 Y 4790.3947
Quota ellissoidica: 662.0763 m; Quota ortometrica: 614.1220 m			
<b>IL RESPONSABILE DEL RILIEVO</b>		<b>Zollo Cesarino &amp; Gallo Luciano</b>	

Tabella 8 - Esempio di monografia ottenuta

## 4.3. Georeferenziazione

Per ottenere una buona georeferenziazione, che poi possa produrre un accurato geoposizionamento del DEM, nonché delle ortofotocarte prodotte da esso, sono state fatte tutte una serie di prove per minimizzare i residui di georeferenziazione per poi produrre il DEM di riferimento per le applicazioni seguenti. La fase di georeferenziazione, è stata eseguita con il software Geomatica della PCI e successivamente il software SOCET SET per effettuare un confronto tra essi.

Sarà illustrata prima la fase di individuazione della miglior soluzione di georeferenziazione, riportando solo i test più significativi (in tutto circa 160 test generando circa 600 elaborazioni), poi l'utilizzo della soluzione di georeferenziazione definitiva per il software SOCET SET, ed infine la generazione per entrambi i software dei modelli digitali delle altezze a diversa risoluzione spaziale.

### 4.3.1. Individuazione dei punti migliori attraverso software PCI Geomatica

Tutti i punti misurati sono stati inseriti in toto nel software della PCI. L'inserimento dei punti avviene individuando il punto di riferimento a terra e inserendo per esso i valori delle coordinate planimetriche e della quota e vengono visualizzate in automatico le coordinate pixel per quel punto. Oltre a questi passaggi basilari, simili in tutti i software che permettono la georeferenziazione, è possibile indicare la tipologia del punto. La tipologia varia tra GCP quindi che parteciperà al calcolo del modello matematico o come CP per il quale il software ci fornirà solo il residuo di georeferenziazione. È possibile anche indicare il valore di indeterminazione da associare alle coordinate pixel o terreno, in modo da pesare le coordinate del punto. Nel paragrafo 4.3.2 si vedrà, dai test eseguiti, come facendo variare i valori di indeterminazione il calcolo del modello matematico non subirà variazioni né nella creazione dei valori di RPC né per i valori di georeferenziazione, tranne in determinati casi.

Di seguito un estratto della schermata di georeferenziazione per il software della PCI, dov'è possibile vedere la modalità di inserimento pixel e la schermata dei residui di georeferenziazione.

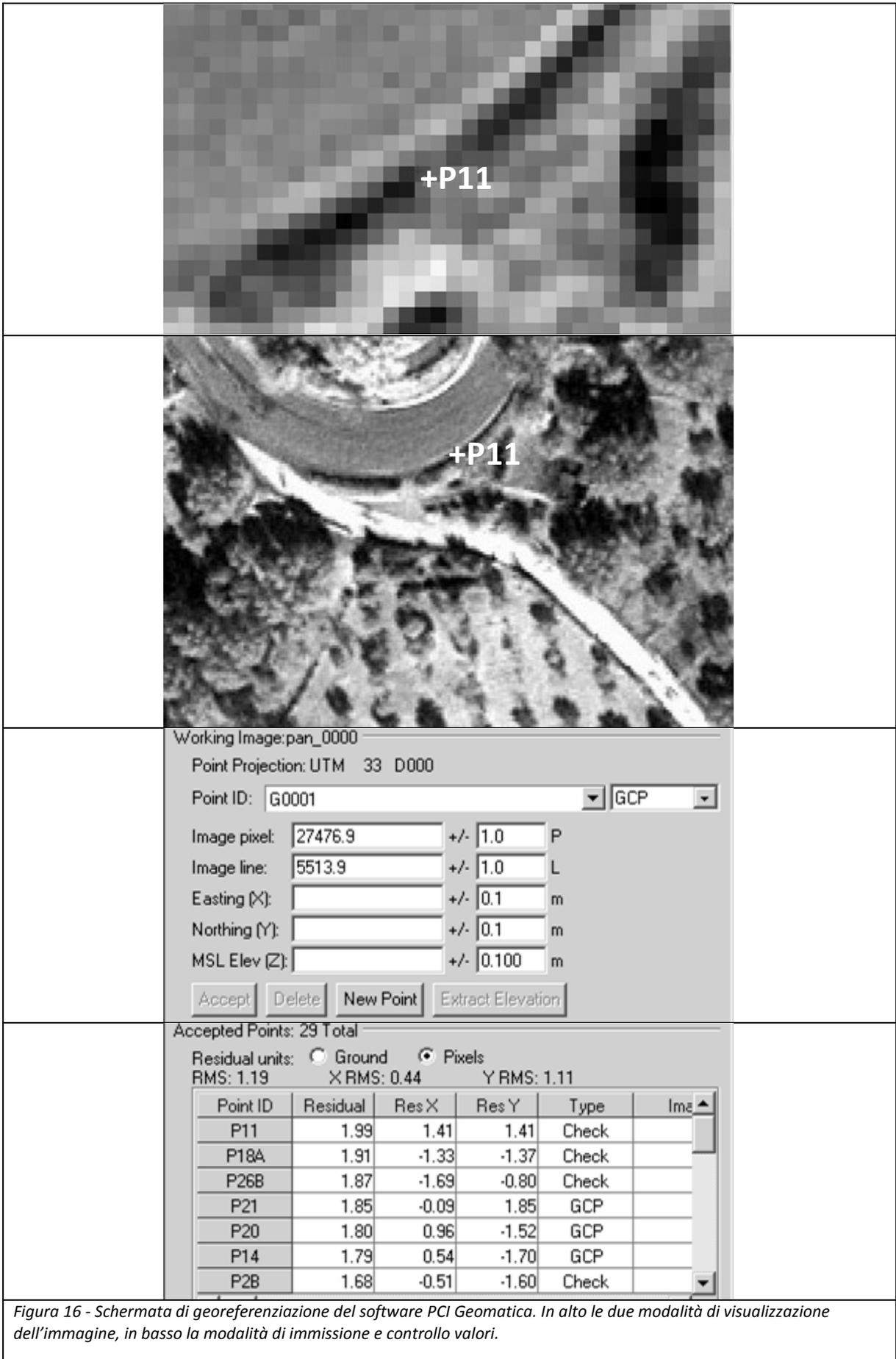
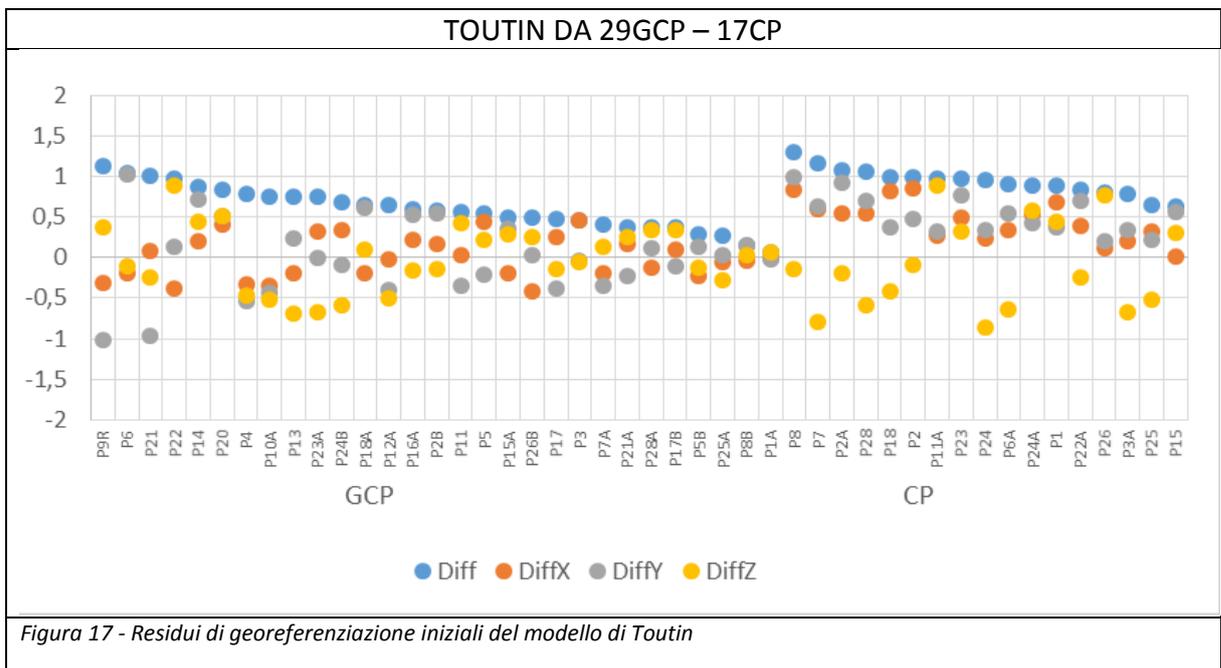


Figura 16 - Schermata di georeferenziazione del software PCI Geomatics. In alto le due modalità di visualizzazione dell'immagine, in basso la modalità di immissione e controllo valori.

Inserendo dapprima tutti i punti disponibili per le diverse zone è stata eseguita la fase di collocazione e una prima rozza georeferenziazione per valutare i residui ottenuti. Questa valutazione ha portato a escludere, tra i punti della stessa zona, alcuni punti misurati via GPS, discriminandoli in base alla distanza l'uno dall'altro e alla deviazione standard tra punti misurati nella stessa zona. In tale modo sono stati scelti prima 53 punti buoni su 61 totali e dopo una ulteriore scrematura si è deciso di utilizzare solo 46 punti, in ogni caso ridondanti rispetto al numero necessario opportuno. La scelta di quale tipologia attribuire al punto è stata effettuata posizionando prima tutti i punti sull'immagine come GCP e poi variando la tipologia solo per i punti ricadenti nella stessa zona. La scelta della tipologia da assegnare per ogni punto è stata eseguita visualizzando il residuo di georeferenziazione per ogni zona e cambiando la tipologia al punto con residuo più elevato. I residui per questa prova sono visibili in Figura 17.



L'individuazione dei punti migliori tra le diverse aree è stata eseguita oltre che per il modello matematico di Toutin anche per il modello matematico RPF utilizzando, come per il caso precedente, solo i 46 punti e ponendoli in questo caso tutti come GCP per poter eseguire una modellazione matematica RPF di terzo ordine. I residui per questa prova sono visibili in Figura 18.

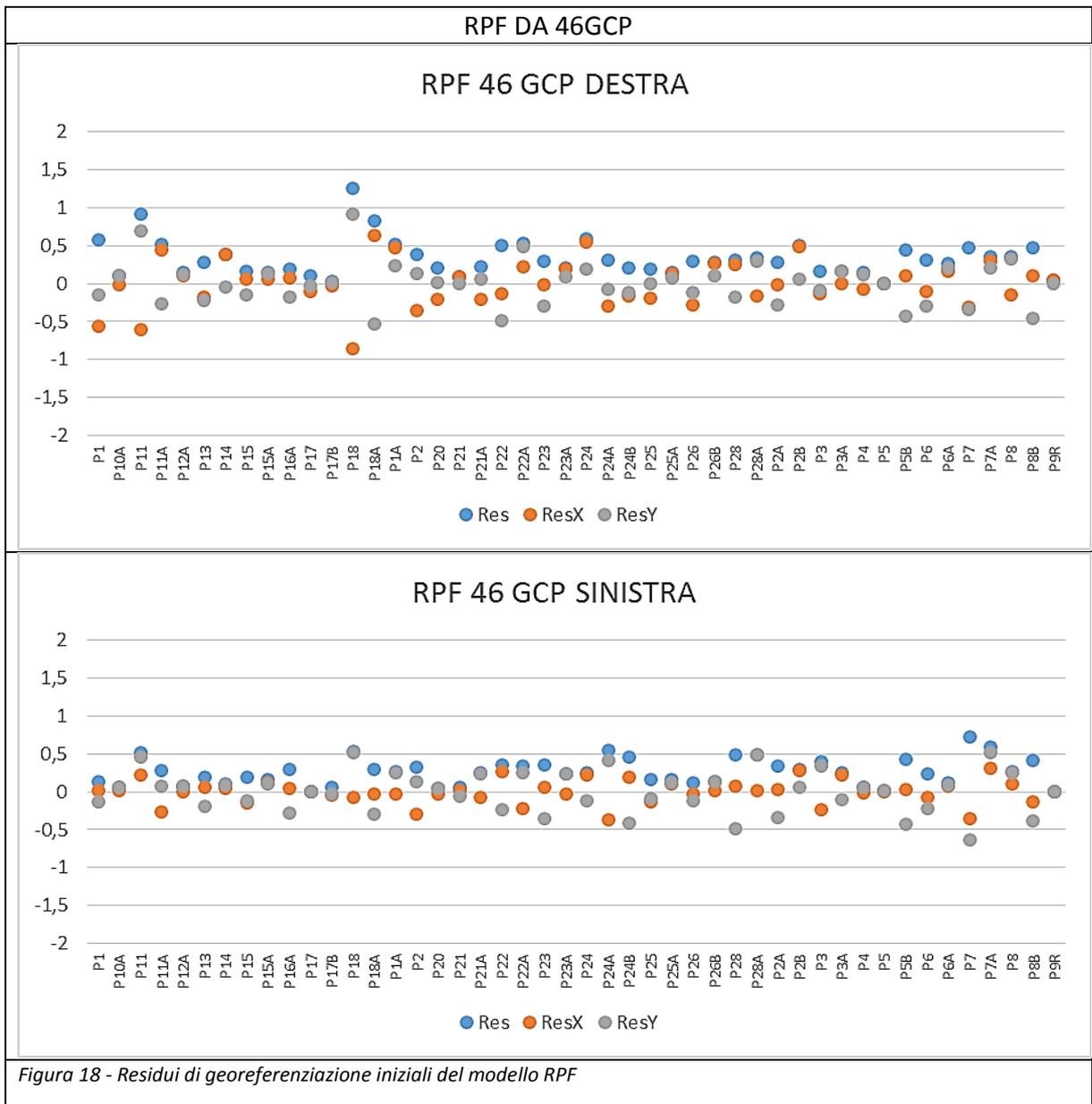


Figura 18 - Residui di georeferenziazione iniziali del modello RPF

#### 4.3.2. Test sui valori di indeterminazione del software

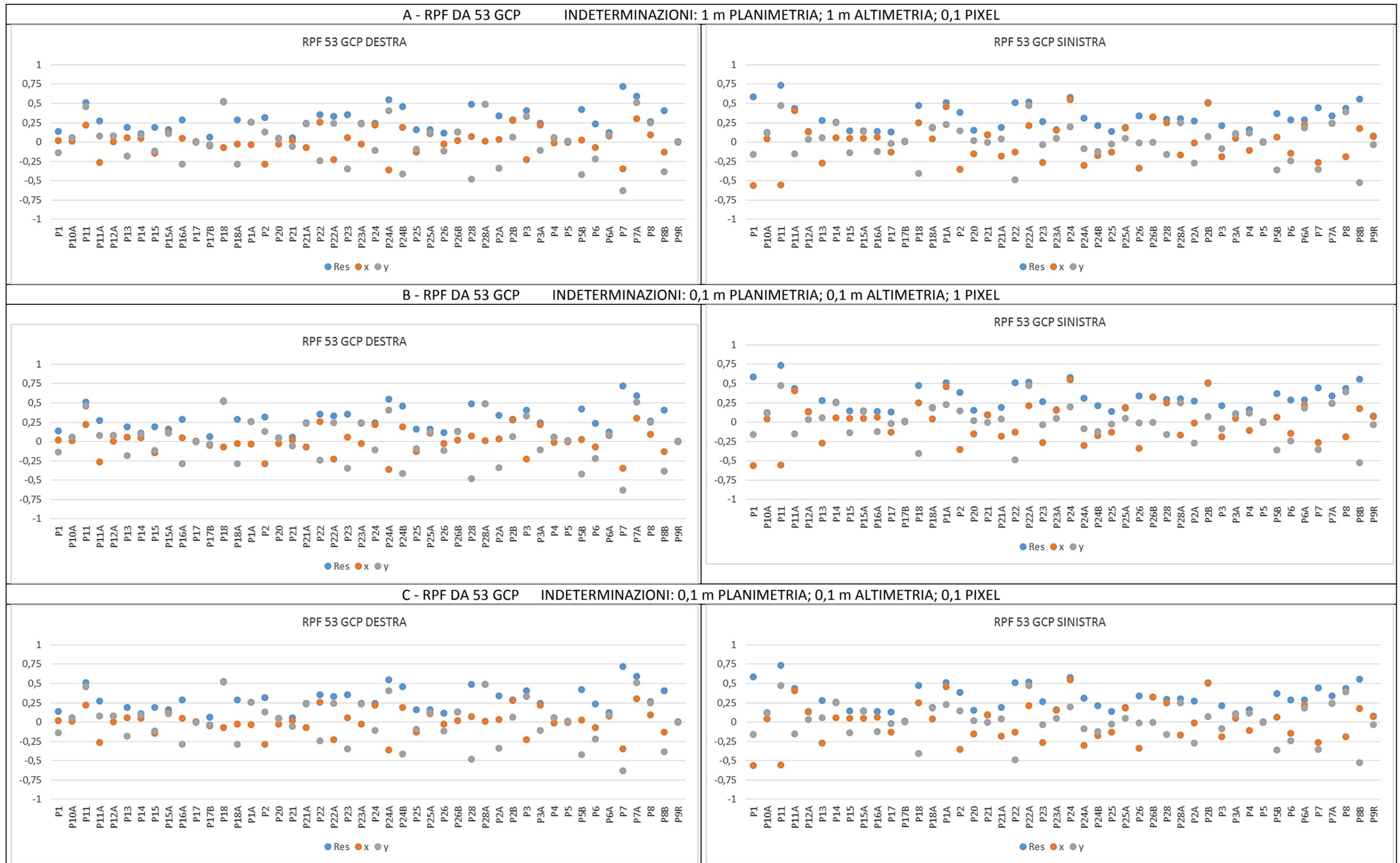
Dopo la fase georeferenziazione bisogna valutare la bontà dei punti acquisiti. Il primo approccio è stato di valutare l'associazione di un peso ad ogni singolo punto. Il software permette di associare un valore di indeterminazione per le coordinate planoaltimetriche del punto oggetto e per le coordinate del punto immagine analogo.

Tale valutazione è stata effettuata con il modello delle RPF perché, a differenza di quello di Toutin, che genera i residui di georeferenziazione utilizzando le informazioni a corredo dell'immagine e migliorandole con l'ausilio dei GCP, l'RPF utilizza solo ed esclusivamente i punti di appoggio. Sono stati utilizzati i 53 punti ai quali sono stati associati diversi valori di indeterminazione. Un test con indeterminazione di 1 m in planimetria e altimetria e di 0,1 pixel in coordinate immagine, un altro test con indeterminazione a 0,1 m in planimetria ed elevazione e di 1 pixel in coordinate immagine, infine un ulteriore test con indeterminazione di 0,1 m in planimetria ed elevazione e di 0,1 pixel in coordinate immagine.

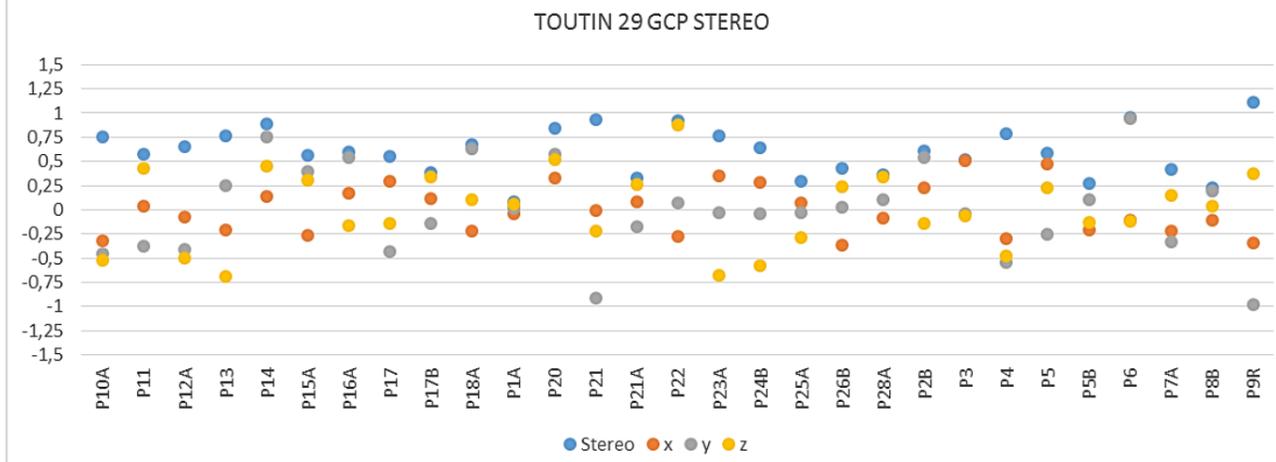
I grafici di Figura 19 A, B e C mostrano i residui di georeferenziazione calcolati con tali prove; è possibile notare che variando il valore di indeterminazione o in coordinate pixel o in coordinate terreno il valore di residuo di georeferenziazione non varia: in pratica il software per valori come in questo caso riesce ad attribuire un peso alle misure o le misure variano di valori talmente piccoli che il modello finale non risente di una variazione di indeterminazione.

Dopo il test effettuato con il modello delle RPF si è ritenuto opportuno eseguire i test con le stesse modalità anche per il modello di Toutin. Com'è possibile notare dai grafici di Figura 20 A, B e C i residui di georeferenziazione anche in questo caso non variano e si può dunque affermare che il software non tiene conto dei valori di indeterminazione. Si sottolinea che i test sono stati effettuati con la versione 2013 del software; tale problematica sembrerebbe essere stata risolta per la versione 2014 ma non è possibile fornire valutazioni.

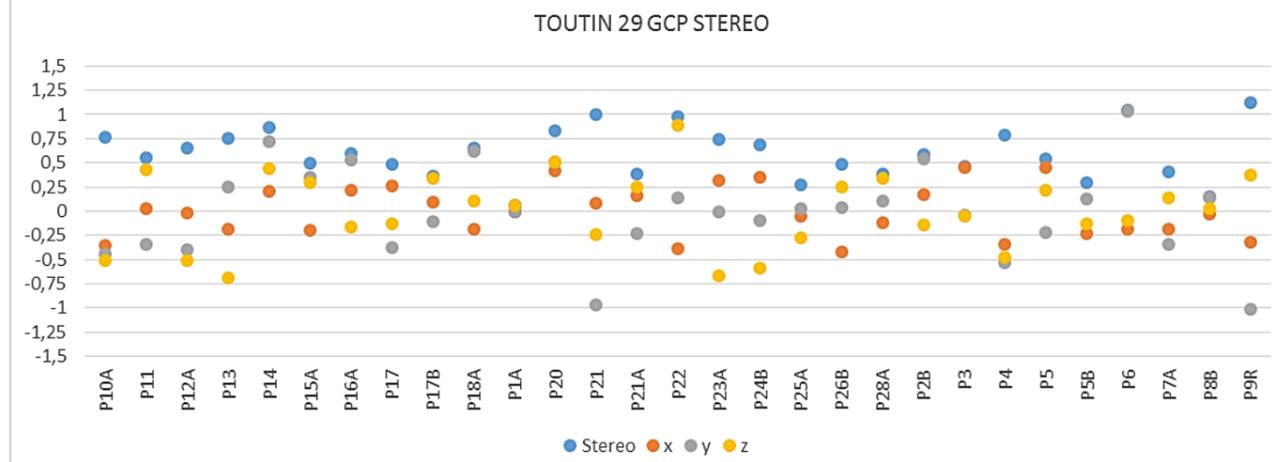




A – TOUTIN DA 29 GCP INDETERMINAZIONI: 1 m PLANIMETRIA; 1 m ALTIMETRIA; 0,1 PIXEL



B – TOUTIN DA 29 GCP INDETERMINAZIONI: 0,1 m PLANIMETRIA; 0,1 m ALTIMETRIA; 1 PIXEL



C – TOUTIN DA 29 GCP INDETERMINAZIONI: 0,1 m PLANIMETRIA; 0,1 m ALTIMETRIA; 0,1 PIXEL

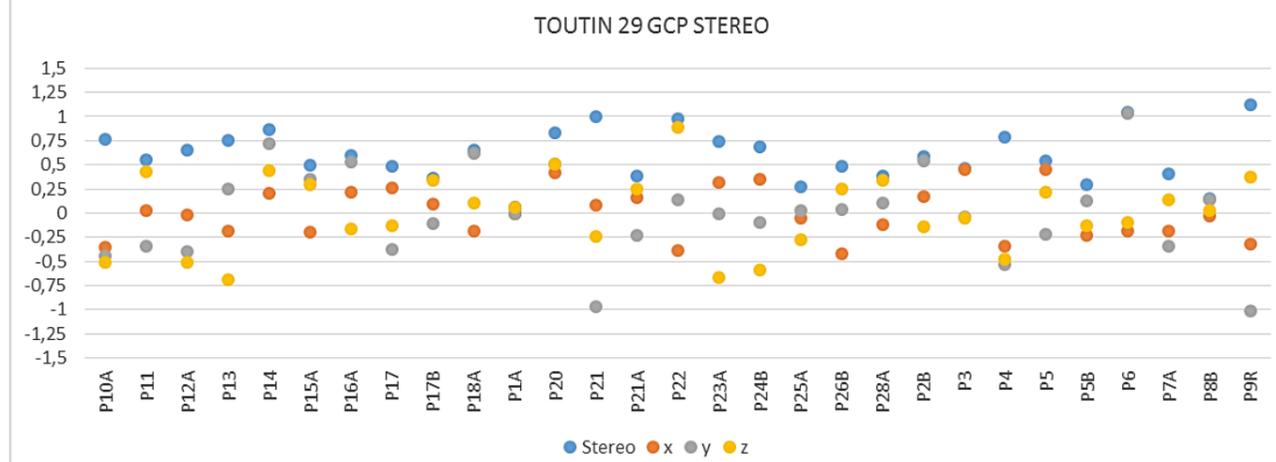


Figura 20 - Test di indeterminazione utilizzando il modello di Toutin per 29 punti come GCP

### 4.3.3. Test per errori planimetrici

Appurato che, al variare dei valori di indeterminazione, i residui di georeferenziazione risultavano non subire variazione, è stata eseguita una ulteriore serie di test inserendo dei valori di coordinate immagine e terreno appositamente non corretti in diversi punti. Questi test avevano lo scopo di capire se il software associasse il residuo di georeferenziazione più alto al punto con l'errore maggiore e se nel calcolo del modello matematico distribuisse l'errore sui punti circostanti rendendo impossibile l'identificazione del punto errato e quindi la sua identificazione e conseguente esclusione dal calcolo del modello.

La procedura seguita per questi test è stata quella di individuare un punto centrale all'immagine, in questo caso il punto P14 e un punto periferico all'immagine come il P1A. Sono stati immessi degli errori grossolani sul singolo punto e in coppia inserendo errori sulle coordinate pixel nell'ordine di 3 pixel e 50 pixel e poi errori grossolani in planimetria di 100 e 500 metri. Nel caso degli errori di 50 pixel, sia planimetrici che in pixel, il software ha restituito sempre il residuo di georeferenziazione più alto congiunto al punto o ai punti ai quali era stato inserito volontariamente. Nel caso di errori di piccola entità distribuiti sul punto baricentrico dell'immagine il software ha restituito sempre il residuo di georeferenziazione più alto congiunto al punto con il valore di errore immesso e stessa cosa anche per il punto periferico. Nel caso di errore distribuito disgiuntamente sulla coordinata riga o colonna il software, solo nel caso del punto periferico, non ha associato al punto affetto da errore il residuo di georeferenziazione più alto come da Figura 21. Di seguito viene riportata la figura prima citata e in Tabella 9 A e B un riepilogo dei test più significativi

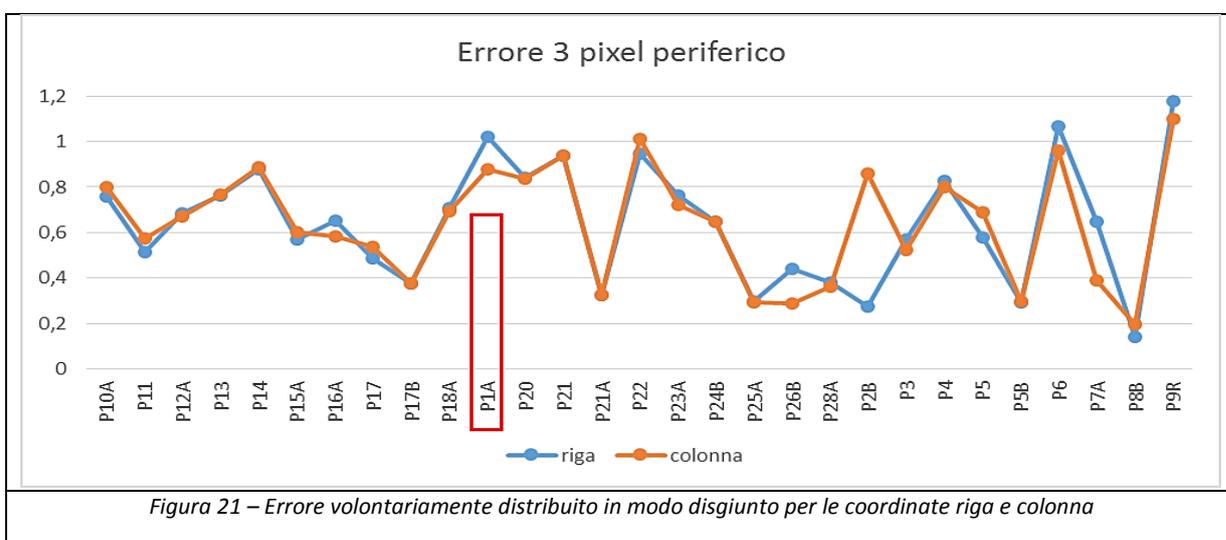


Figura 21 – Errore volontariamente distribuito in modo disgiunto per le coordinate riga e colonna

P14				Residui senza errori In coordinate immagine	PIA			
res	X	Y	Z		res	X	Y	Z
0,892	0,142	0,757	0,45		0,079	-0,039	0,019	0,066
residui punto baricentrico					residui punto periferico			
				3 pixel di errore su				
2,101	<u>0,139</u>	2,045	<u>0,459</u>	riga	1,02	<u>-0,038</u>	1,018	<u>0,062</u>
1,435	-1,134	<u>0,757</u>	<u>0,448</u>	colonna	<u>0,88</u>	<u>-0,878</u>	<u>0,02</u>	<u>0,064</u>
2,384	-1,137	2,045	<u>0,457</u>	riga+colonna	1,345	<u>-0,877</u>	1,018	<u>0,059</u>
				50 pixel di errore su				
22,229	<u>0,097</u>	22,221	<u>0,608</u>	riga	16,74	<u>-0,018</u>	16,74	<u>-0,006</u>
21,149	-21,132	<u>0,754</u>	<u>0,418</u>	colonna	14,116	-14,115	<u>0,024</u>	<u>0,026</u>
30,705	-21,173	22,231	<u>0,575</u>	riga+colonna	21,956	-14,173	16,768	<u>-0,045</u>
				3 pixel di errore su entrambi				
2,085	<u>0,139</u>	2,029	<u>0,459</u>	riga	1,004	<u>-0,037</u>	1,001	<u>0,059</u>
1,454	-1,158	<u>0,757</u>	<u>0,447</u>	colonna	<u>0,905</u>	<u>-0,903</u>	<u>0,019</u>	<u>0,063</u>
2,382	-1,161	2,029	<u>0,457</u>	riga+colonna	1,349	<u>-0,901</u>	1,002	<u>0,056</u>
				50 pixel di errore su entrambi				
21,962	<u>0,098</u>	21,954	<u>0,604</u>	riga	16,469	<u>-0,005</u>	16,469	<u>-0,049</u>
21,566	-21,549	<u>0,754</u>	<u>0,413</u>	colonna	14,55	-14,55	<u>0,024</u>	<u>0,02</u>
30,804	-21,581	21,974	<u>0,567</u>	riga+colonna	22,033	-14,59	16,509	<u>-0,093</u>

P14				Residui senza errori In coordinate terreno	PIA			
res	X	Y	Z		res	X	Y	Z
0,892	0,142	0,757	0,45		0,079	-0,039	0,019	0,066
residui punto baricentrico				100 m di errore su	residui punto periferico			
121,398	85,027	86,64	1,163	XY	86,849	55,704	66,633	<u>-0,103</u>
82,154	<u>0,057</u>	<u>0,511</u>	-82,152	Z	65,887	3,27	<u>0,214</u>	-65,806
				500 m di errore su				
603,52	423,833	429,635	4,04	XY	433,971	276,316	334,632	<u>-0,909</u>
359,794	-1,93	<u>-0,65</u>	-359,788	Z	323,418	16,228	1,877	-323,005
				100 m di errore su entrambi				
121,744	86,562	85,6	1,167	XY	87,19	57,468	65,571	<u>-0,255</u>
78,877	<u>-0,811</u>	<u>0,488</u>	-78,871	Z	64,545	3,118	<u>0,283</u>	-64,469
				500 m di errore su entrambi				
608,866	436,038	424,935	4,342	XY	436,033	285,213	329,812	-1,635
305,652	-6,032	-1,204	-305,59	Z	310,943	16,361	2,345	-310,503

Tabella 9 – Riepilogo dei test significativi per inserimento di errore volontario per il punto periferico e baricentrico.

Oltre a questi test sono stati eseguiti ulteriori prove di inserimento di errore per diversi punti in diverse posizioni dell'immagine o replicando lo stesso punto più di una volta, ma non si ritiene opportuno riportare tali esiti in questo elaborato di tesi. In conclusioni sia nel caso di errori di piccola che di grossa entità il software non sempre restituisce un residuo elevato, questo porta l'utente finale a non riuscire sempre a discriminare un probabile errore legato al punto o magari effettuato in fase di inserimento.

## 4.4. Residui di georeferenziazione da GPS

Dopo la serie di prove eseguite per la scelta del miglior pattern di punti da utilizzare, dei valori di indeterminazione da adoperare e del miglior modello matematico da adottare, di seguito vengono riportati i residui di georeferenziazione finali. In questo paragrafo si mostreranno i risultati sia per i punti rilevati da GPS che per quelli misurati da CTR.

Per la scelta dei punti misurati da CTR ci si è avvalsi dei test e delle metodiche di scelta prima illustrate. Per i punti misurati da CTR, meno accurati rispetto a quelli misurati con GPS, è stato eseguito solo il modello delle RPF non utilizzando quello di Toutin perché tale modello matematico ha bisogno di punti molto accurati.

Nel proseguo del paragrafo si mostreranno anche i risultati di georeferenziazione ottenuti con il software SOCET SET con il modello Rigorous Simultaneous per il quale non sono stati eseguiti test prima descritti.

### 4.4.1. Residui di georeferenziazione da software PCI Geomatica e SOCET SET

Le modalità operative dei software, come già visto, sono all'incirca le stesse, ma variando i modelli matematici dei due diversi software ci si aspettano valori sicuramente differenti tra loro. La scelta della tipologia dei punti è stata eseguita partendo dal pattern dei 29 punti individuati come GCP e riportati nel paragrafo 4.3.1. Questi 29 punti sono stati ulteriormente diversificati in base alla loro distribuzione sull'immagine e ai loro residui di georeferenziazione fino ad arrivare a 15 punti come GCP e i restanti 14 come CP, come suggerito da Toutin (2004) servono un minimo di 6 punti fino a un massimo di 15, per valutare il grado di accuratezza raggiunto in questa fase.

In Figura 22 vengono riportati i residui di georeferenziazione per il software PCI con il modello di Toutin e i residui di georeferenziazione per il software SOCET SET utilizzando il modello matematico Rigorous Simultaneous per i medesimi punti GCP e CP.

È possibile notare come i residui di georeferenziazione per il software PCI Geomatica sono tutti compresi tra gli estremi 1 e -1 metri. Situazione diversa si ha per il software SOCET SET dove i residui di georeferenziazione si pongono tutti tra gli estremi 2 e -2 metri e con un valore isolato, il punto di tipologia Check Point P17B, che raggiunge un valore residuo di georeferenziazione per l'elevazione di circa 3 metri in valore assoluto. Va puntualizzato che il software SOCET SET, a differenza di PCI Geomatica, come si vedrà in un paragrafo dedicato, non genera un vero e proprio DEM ma effettua una prima eliminazione di picchi di elevazione, e proprio il punto P17B è stato campionato su la parte terminale di un muretto con una differenza di elevazione di circa 3m rispetto alla parte bassa dello stesso.

Proprio questa capacità di filtrare i picchi di elevazione, porterà nei paragrafi successivi a valutare in modo migliore il prodotto generato da questo software. Di fatto nella parte di verifica delle bontà dei due diversi DEM il prodotto generato dal software SOCET SET, pur avendo residui con valore doppio rispetto a quelli di PCI Geomatica, otterrà una coerenza con la reale topografia del territorio maggiore rispetto al modello di elevazione elaborato con PCI Geomatica.

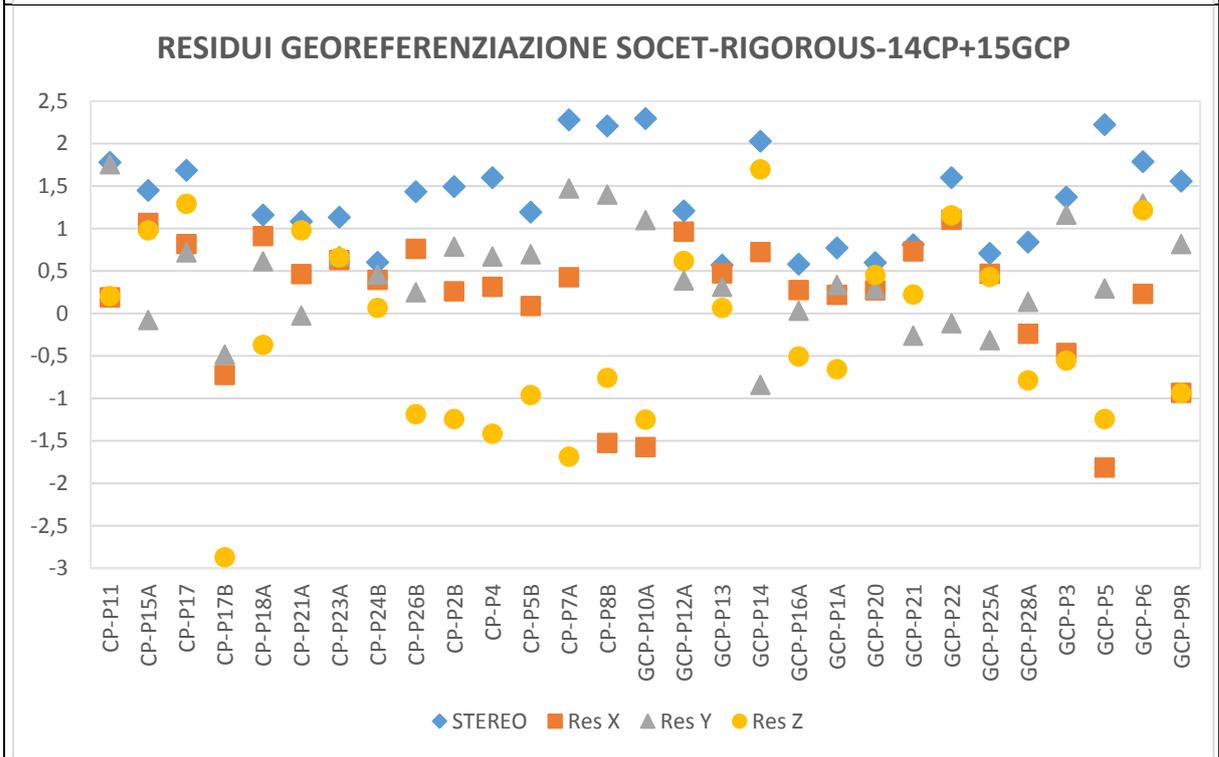
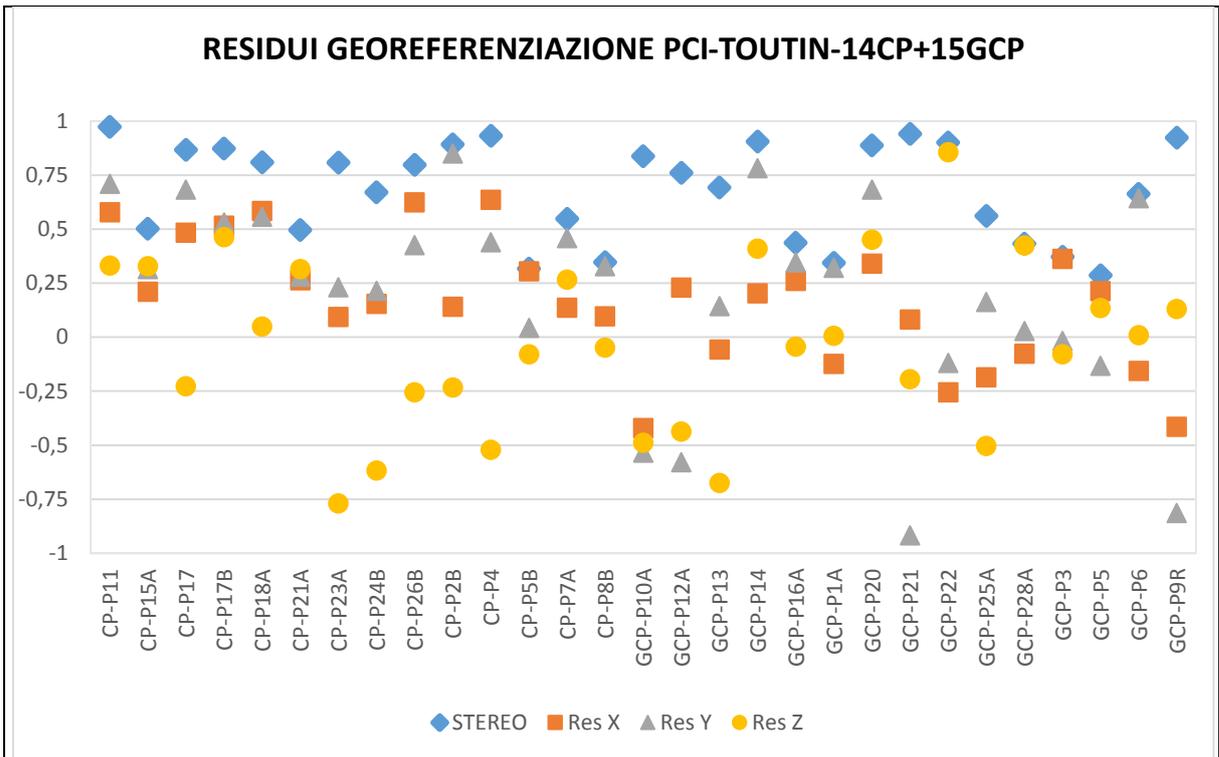


Figura 22 - Residui di georeferenziazione definitivi per i due modelli rigorosi; differenze tra i due software.

## 4.5. Residui di georeferenziazione da CTR

Come già introdotto nel paragrafo precedente, per i punti misurati da CTR è stata eseguita una georeferenziazione tramite il modello delle RPF. Come per i punti da GPS è stata effettuata una scrematura dai 75 punti iniziali, introdotti nel paragrafo 4.2.3, fino ad utilizzarne 53 come tipologia di GCP, di seguito chiamati Mapping Ground Control Point (MGCP) e di 20 come CP, di seguito Mapped Control Point (MCP).

La georeferenziazione eseguita attraverso questa tipologia di punti non ha dato luogo a prodotti digitali di elevazione data la sua iniziale accuratezza posizionale di certo peggiore rispetto a un rilievo sul campo tramite GPS. Questo lavoro è stato eseguito per effettuare un confronto per valutare le accuratezze raggiunte nei DEM così prodotti con quelle raggiunte con punti GPS.

Di seguito vengono riportati i residui di georeferenziazione per il software PCI Geomatica utilizzando i punti misurati da CTR elaborati con il modello matematico delle Rational Polynomial Function (RPF). I punti sono stati suddivisi in 20 come Check Point e 53 come Ground Control Point.

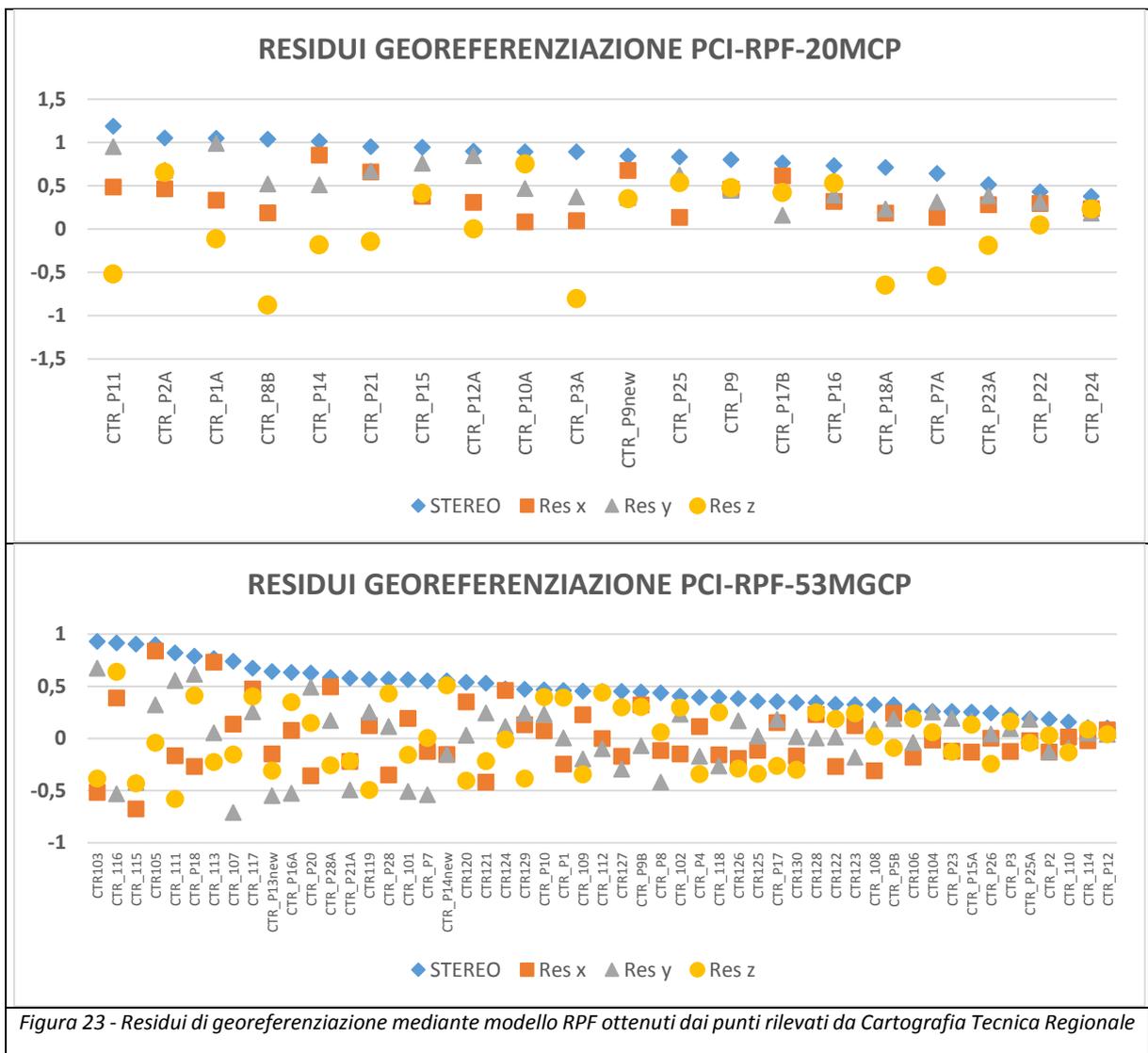


Figura 23 - Residui di georeferenziazione mediante modello RPF ottenuti dai punti rilevati da Cartografia Tecnica Regionale

È possibile notare come i residui di georeferenziazione sono compresi tra gli estremi 1 e -1 metri sia per i GCP che per i CP. Il DEM prodotto da questa elaborazione non è stato mai utilizzato né comparato analiticamente ma solo visivamente perché in realtà per il DEM generato da punti misurati da una carta a scala 1:5000 esiste già la possibilità di ottenere un prodotto direttamente dalla carta stessa e quindi privo di ulteriori errori che l'utente restituitista può immettere nella fase stessa di campionamento e immissione sull'immagine satellitare. Senza dubbio l'utilità di usare punti da cartografia è che se ne possono acquisire molti e in breve tempo o se non si può effettuare un rilievo a terra. Un DEM così generato è pur sempre utilizzabile perché è comunque un prodotto aggiornato.

## **4.6. Creazione del modello digitale di elevazione**

Il modello digitale di elevazione può essere creato con diversi software sia commerciali che di ambito scientifico, da modalità operative per i software PCI Geomatica e SOCET SET.

### 4.6.1. PCI Geomatica

Il modulo OrthoEngine della PCI Geomatica permette l'inserimento dei punti sulla coppia di immagini stereo al fine di poter ottenere il modello stereografico delle due immagini. Nella fase d'inserimento del punto, è possibile inserire il punto in posizioni diverse del pixel, ossia nell'incrocio dei pixel o nel centro del singolo pixel. Durante l'inserimento dei punti è possibile inserire un valore di indeterminazione, in questo caso sono stati utilizzati 10 cm in planimetria e in elevazione e di 1 pixel per le coordinate pixel. La fase successiva è quella di generare prima le immagini epipolari e successivamente il DEM. Nel caso delle immagini da satellite il software crea una geometria per la visione stereoscopica, utilizzando i singoli punti e fondendoli assieme in modo tale da impostare relazioni e vincoli geometrici che legano due immagini prese in 2D da un sensore con posizione ed orientamento distinto portando alla generazione di una vista digitale 3D. Il software dà la possibilità di scegliere il fattore di sotto campionamento, ossia di generare una vista 3D che utilizzi 1 o più pixel dell'immagine 2D, ovviamente questo comporterà poi una scelta anche sulla risoluzione finale del DEM.

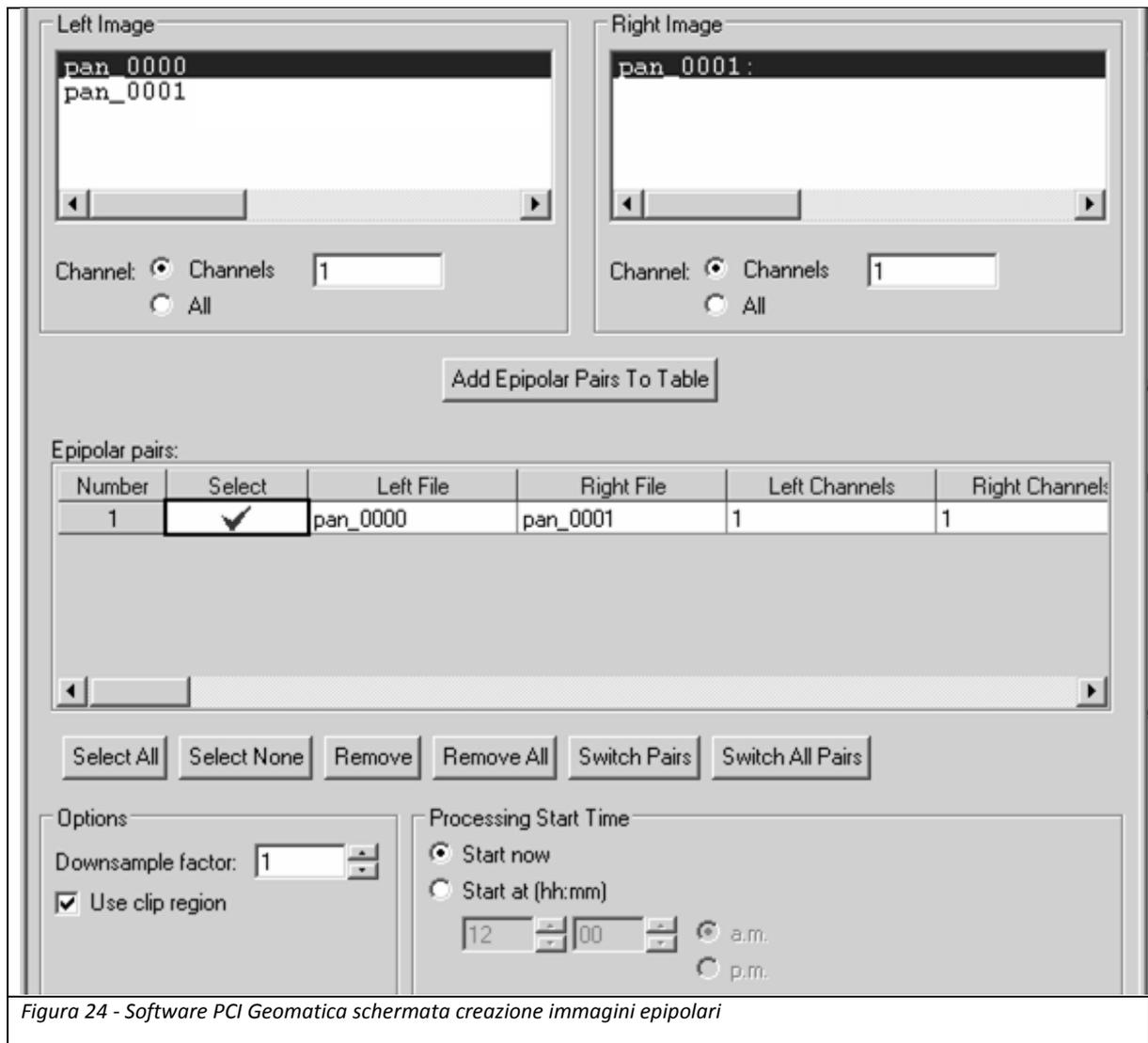


Figura 24 - Software PCI Geomatica schermata creazione immagini epipolari

Successivamente si passa alla schermata di generazione del DEM, Figura 25, dove si sceglie una serie di parametri tra i quali:

- il dettaglio del DEM che indica il livello di correlazione raggiunta nel DEM prodotto. Durante la fase di “matching” il software crea una scala gerarchica di correlazione, la scelta del dettaglio a cui fermarci indica fermarci a un livello più basso dove il “matching” tra le due immagini avviene per grandi finestre di ricerca, oppure scegliere un livello di dettaglio più elevato spingendo la fase di “matching” ad utilizzare una finestra di ricerca più piccola. I livelli di dettaglio che si possono scegliere, partendo dal basso, sono: low, medium, high, extra high.
- La tipologia di terreno per il quale generare il DEM, che varia tra terreno pianeggiante, collinare e montuoso.
- Se riempire i buchi di informazione attraverso una interpolazione con un filtro dei dati. Questa scelta consente di migliorare la qualità del DEM, riempiendo i buchi che si sono creati durante l'estrazione dello stesso, tramite un algoritmo d'interpolazione. Quando è attivato il filtro, si può scegliere se eseguire lo “smoothing” che può essere di tre tipi: Low che utilizza un “filtro media”; Medium che utilizza un “filtro media e un filtro mediana” con finestra di ricerca di piccole dimensioni; High è un “filtro media e

un filtro media” di grandi dimensioni. Purtroppo le dimensioni non sono specificate dal produttore del software.

- L'utilizzo o meno del filtro Wallis, che opera nelle regioni dove ci sono molte ombre. Questo filtro ha lo scopo di forzare il contrasto (range dinamico) di un'immagine per adattarla a un valore dato, esso quindi agisce sull'immagine epipolare prima che venga estratto il DEM ed è utile nelle zone ricche di ombra.
- La possibilità di creare un canale detto di Score, dove salvare i valori di correlazione ottenuti per ogni singolo pixel.
- Se creare un DEM georeferenziato e la risoluzione alla quale ottenerlo.

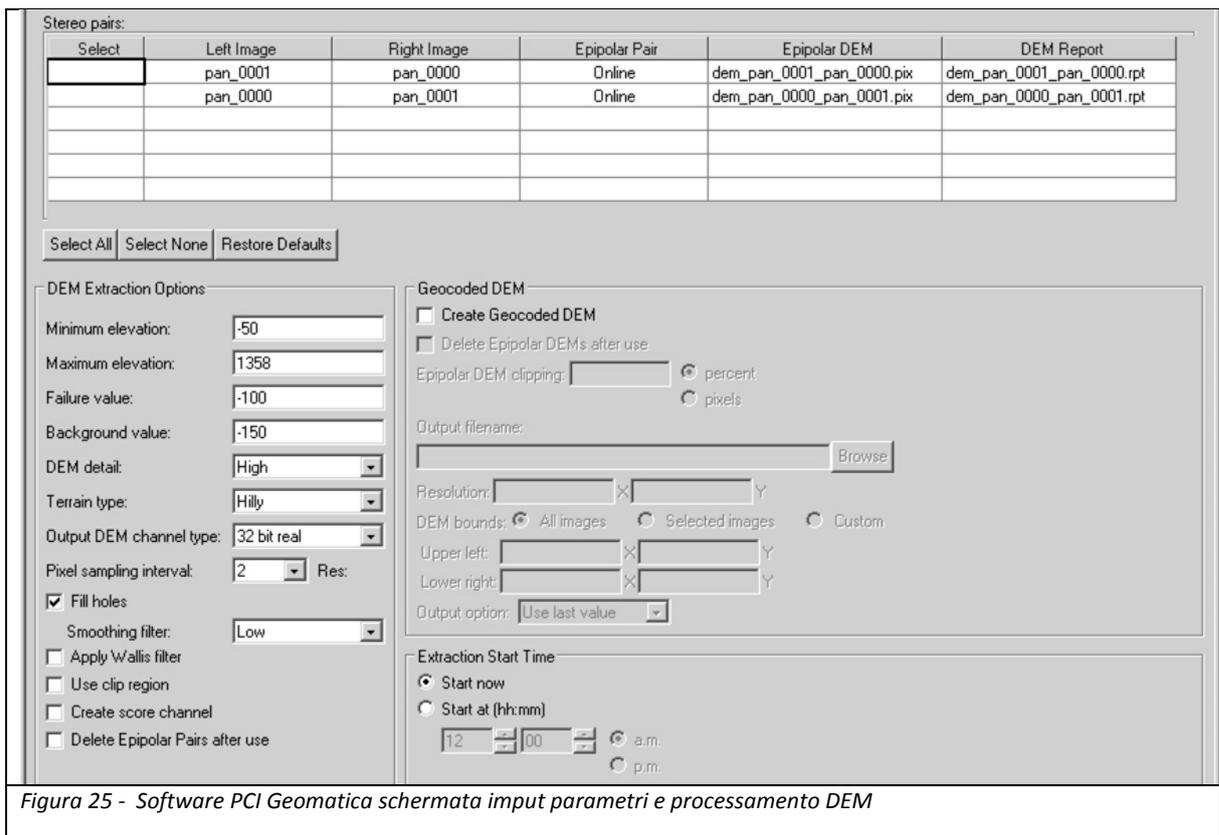


Figura 25 - Software PCI Geomatica schermata input parametri e processamento DEM

I parametri utilizzati per la generazione del DEM sono stati vari per discriminare tutte le possibilità di elaborazione e per valutare la bontà del dato finale, ma in ultima fase, sono stati scelti i seguenti parametri perché il risultato sembrava più aderente alla reale topografia del terreno:

DEM DETAIL	EXTRAHIGH
TERRAIN TYPE	MOUNTAINOUS
OUTPUT DEM CHANNEL	32BIT
FILL HOLES	YES
SMOOTHING FILTER	HIGH
WALLIS FILTER	YES
SCORE CHANNEL	YES
RESOLUTION	1M

NOME: DEM\_1m\_ExtraHigh\_Mountainous\_32bit\_FillHolesLow\_Wallis\_ScoreChanne1

DEM DETAIL	HIGH
TERRAIN TYPE	MOUNTAINOUS
OUTPUT DEM CHANNEL	32BIT
FILL HOLES	YES
SMOOTHING FILTER	HIGH
WALLIS FILTER	YES
SCORE CHANNEL	YES
RESOLUTION	1M

NOME: DEM\_1m\_High\_Mountainous\_32bit\_FillHolesLow\_Wallis\_ScoreChanne1

DEM DETAIL	MEDIUM
TERRAIN TYPE	MOUNTAINOUS
OUTPUT DEM CHANNEL	32BIT
FILL HOLES	YES
SMOOTHING FILTER	HIGH
WALLIS FILTER	YES
SCORE CHANNEL	YES
RESOLUTION	1M

NOME: DEM\_1m\_medium\_Mountainous\_32bit\_FillHolesLow\_Wallis\_ScoreChannel

DEM DETAIL	LOW
TERRAIN TYPE	MOUNTAINOUS
OUTPUT DEM CHANNEL	32BIT
FILL HOLES	YES
SMOOTHING FILTER	HIGH
WALLIS FILTER	YES
SCORE CHANNEL	YES
RESOLUTION	1M

NOME: DEM\_1m\_low\_Mountainous\_32bit\_FillHolesLow\_Wallis\_ScoreChannel

*Tabelle 10 - Parametri utilizzati in PCI Geomatica per il processamento dei DEM*

#### 4.6.2. SOCET SET

SOCET SET della BAE system, come PCI Geomatica è un software per la generazione di DEM da immagini satellitari oltre che da fotogrammetria aerea. Come per Geomatica, anche per SOCET SET si devono inserire i punti sulle immagini satellitari, ma a differenza di PCI rende possibili l'inserimento anche durante la visione stereoscopica dell'immagine dopo aver individuato dei punti di legame (Tie Points). È possibile anche qui scegliere la tipologia da assegnare ad ogni singolo punti, ossia CP o GCP, ma in questo caso esiste anche la possibilità di scindere la tipologia di punto diversificandolo per la planimetria o per l'elevazione anche per lo stesso punto. Di seguito una schermata del software.

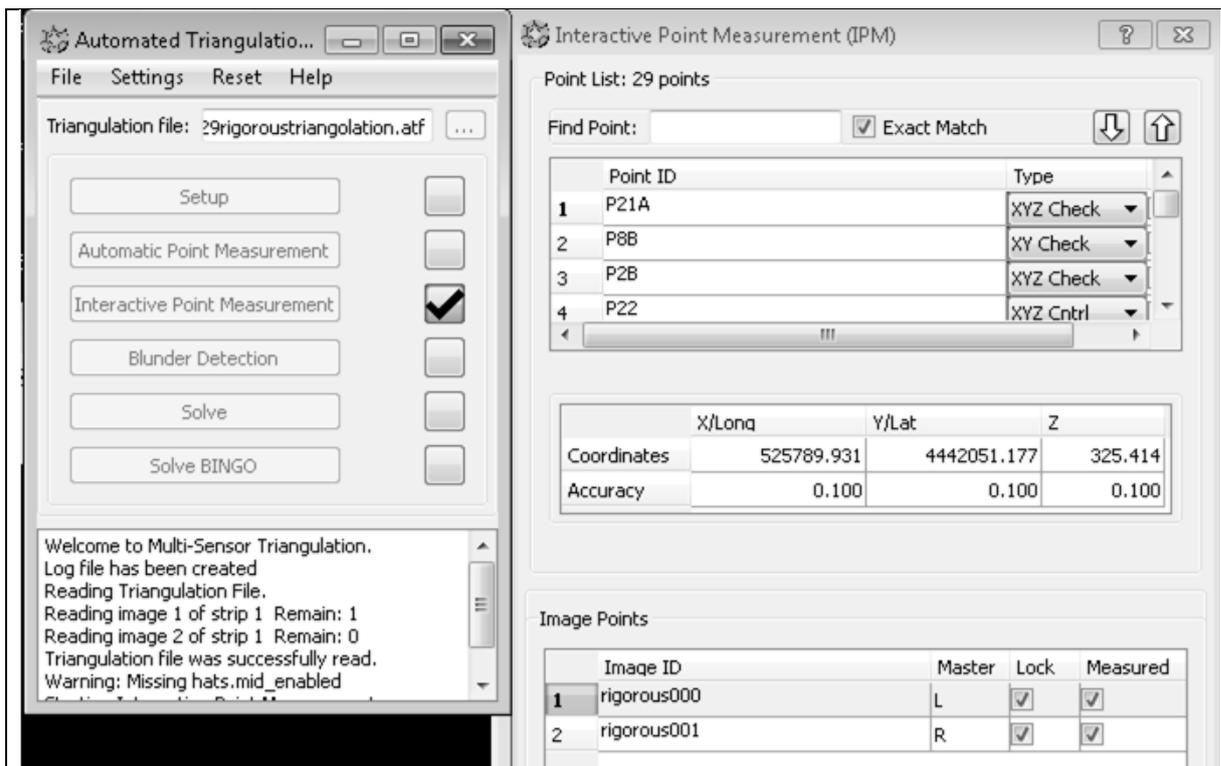


Figura 26 - Software SOCET SET, schermata inserimento punti di controllo e scelta della loro tipologia

Il software da di output i residui di georeferenziazione; successivamente è possibile attivare lo strumento Terrain Extraction per generare il prodotto DEM. In figura 27 è possibile visionare le finestre presenti in questa schermata e le opzioni per la generazione del DEM. È possibile scegliere il formato di uscita tra GRID o TIN e la risoluzione nella prima schermata; nella seconda l’algoritmo per la generazione del DEM scegliendo tra adattativo o non adattativo, e se utilizzare un filtro per la generazione del DEM. In questo caso, anche non scegliendo un determinato filtro, il software effettuerà comunque una pulizia del dato finale per eliminare eventuali dati di elevazione errati rispetto alla elevazione del terreno, questo comporta una generazione di una superficie smussata anche in zone montuose.

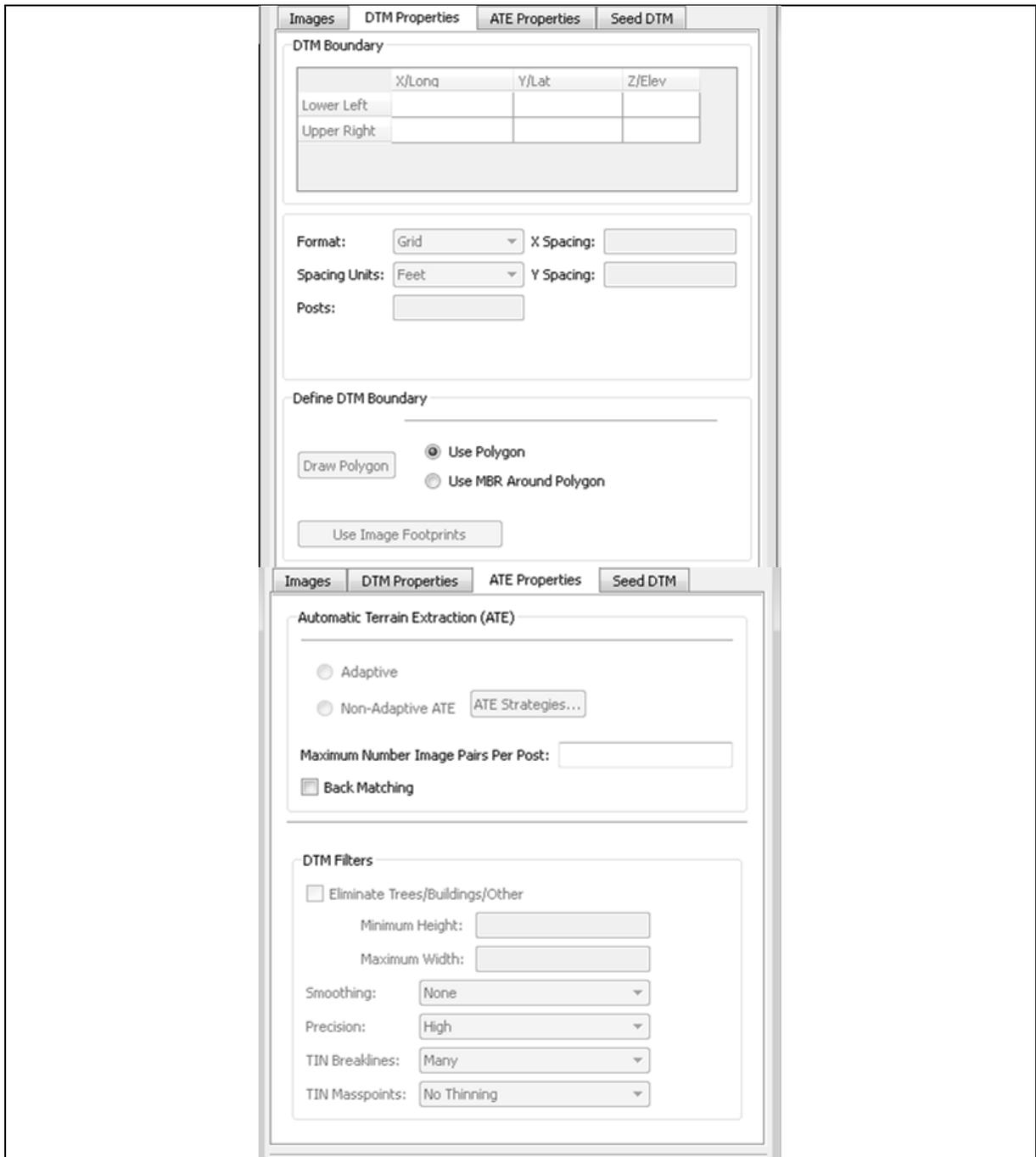


Figura 27 - Software SOCET SET sctela dei parametri per la generazione dei DEM

## 4.7. Visualizzazione dei canali di correlazione

Entrambi i software, durante la generazione dei modelli digitali di elevazione, hanno la possibilità di generare, in un canale dedicato o in file separato, valori di correlazione associati ai valori di elevazione. Questi valori portano con sé l'informazione di qualità raggiunta durante la fase di interpolazione e attribuzione del valore di elevazione. Com'è possibile immaginare, aree con forte pendenza, caratterizzate da zone fortemente ombreggiate e fortemente accidentate, non permettono una perfetta individuazione di punti omologhi tra le due coppie di immagini e questo comporta, proprio per queste aree, valori di correlazione molto bassi o nulli. Di fatto anche aree fortemente alberate comportano valori di correlazione molto bassi. Al contrario, generalmente tutte le aree pianeggianti o edificate permettono un migliore riconoscimento tra i pixel portando per queste aree una correlazione migliore. Di seguito vengono riportati i valori di correlazione generati dal software Geomatica che corrispondono al canale di "score" e i valori ottenuti dal software SOCET SET indicati come FOM (Figure of Merit).

### 4.7.1. Score channel per il software PCI Geomatica

Il canale di score è generato dal software PCI Geomatica e mostra la correlazione raggiunta durante la fase di "matching" dell'immagine. Questo canale permette all'utente di visualizzare quali aree hanno ottenuto una correlazione migliore per quanto riguarda l'attribuzione dei valori di elevazione generati dal software e fornisce quindi un indice della bontà del DEM. Nella Figura 28 è possibile visionare una vista di tutta l'immagine dei valori del canale di Score per i DEM a risoluzione di 1m e 2m; è possibile vedere come la catena montuosa centrale abbia valori di correlazione bassissimi e in determinate zone uguali a zero. Inoltre è possibile notare come all'aumentare della risoluzione del DEM diminuiscano i valori di correlazione.

### 4.7.2. Figure of Merit per il software SOCET SET

Il software SOCET SET non permette di generare il canale di FOM né lo rende disponibile in modo immediato all'utente, di fatto il software immagazzina nel suo database tale canale e ne permette la generazione e la visualizzazione a posteriori utilizzando comandi specifici. Nella Figura 29 è possibile visionare una vista d'insieme del canale di FOM per i DEM a risoluzione di 1m e 2m dove è possibile notare sempre la catena montana nella parte centrale dell'immagine che però ha associato valori di correlazione bassissimi per il DEM con risoluzione spaziale di 1m e invece fornisce valori maggiori in quello da 2m. Infatti i due software producono risultati estremamente diversi; in questo caso all'aumentare della risoluzione del DEM i valori di correlazione aumentano, come ci si aspetterebbe.

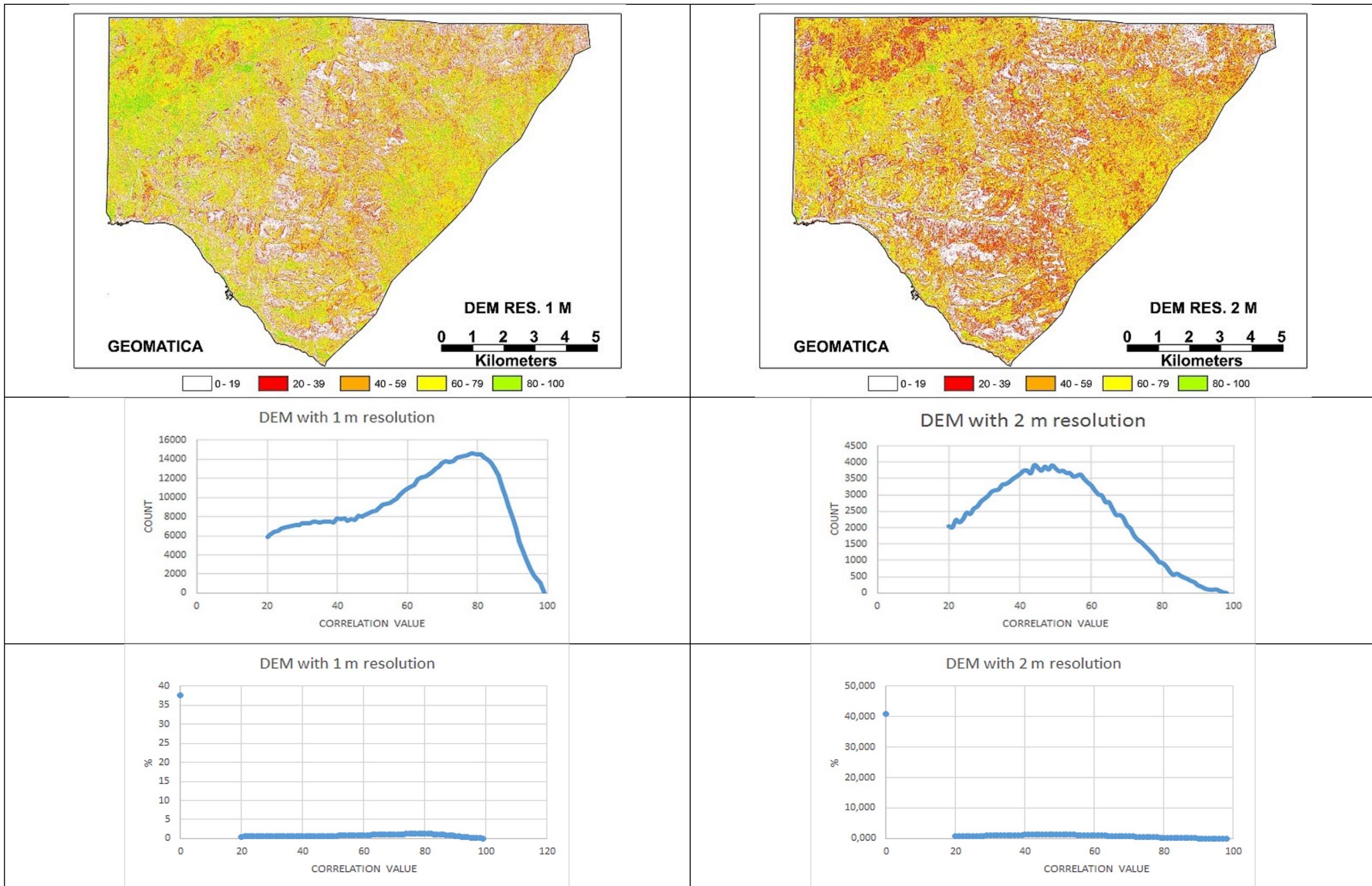


Figura 28 - Score Channel DEM ottenuti con PCI Geomatica, a sinistra valori di correlazione per il DEM a risoluzione di 1m; a destra valori di correlazione per il DEM a risoluzione di 2 m

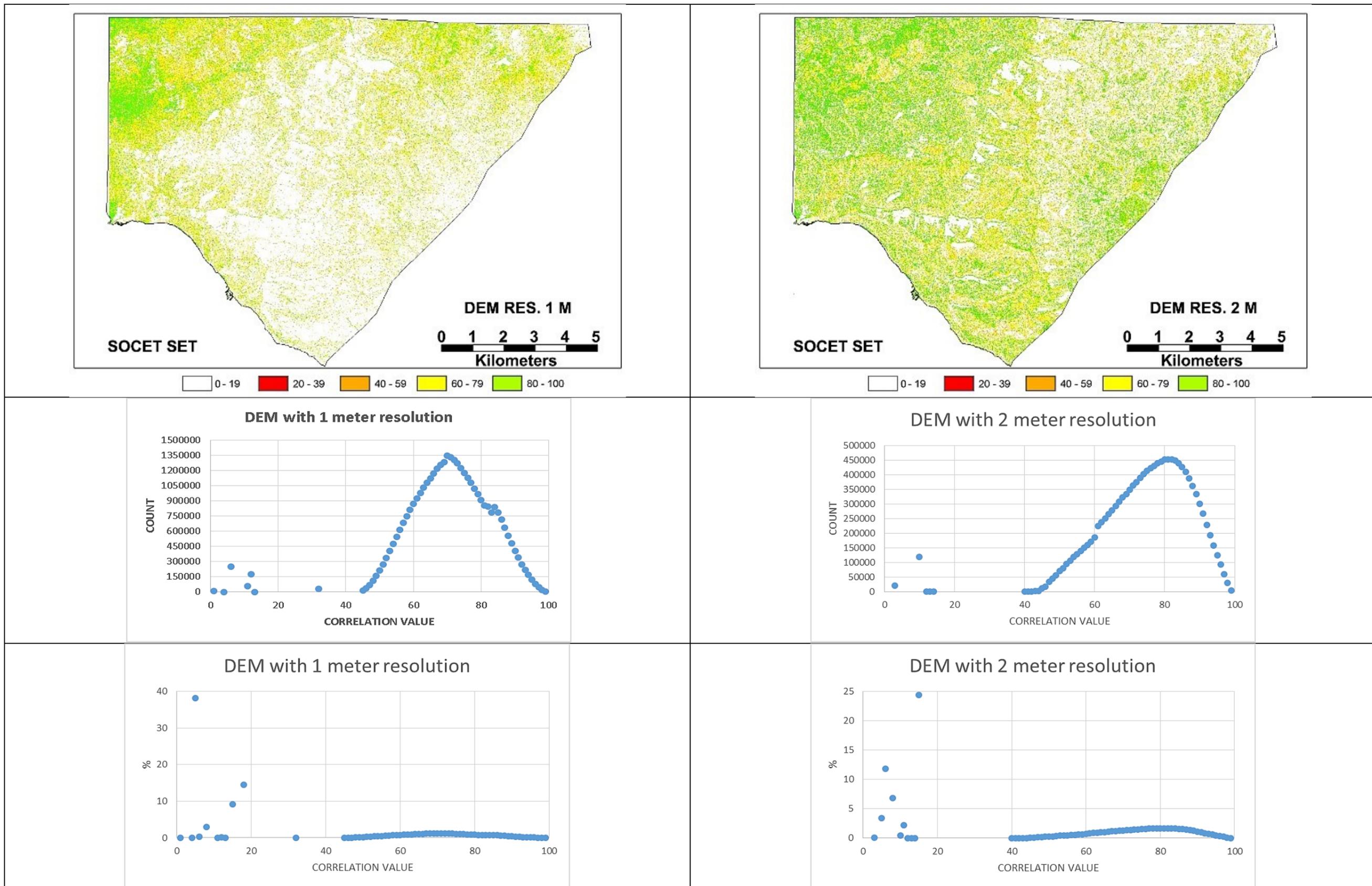


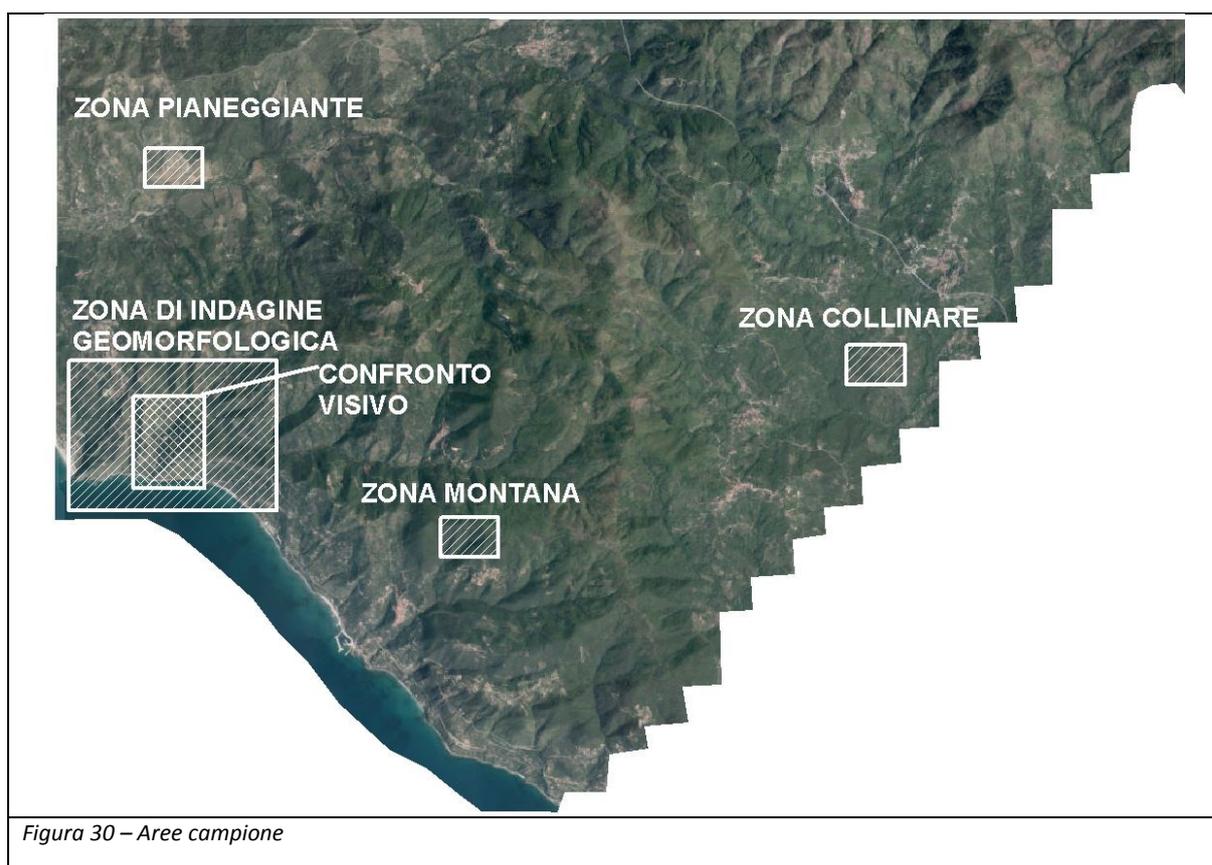
Figura 29 - FOM dei DEM ottenuti con SOCET SET, a sinistra valori di correlazione per il DEM a risoluzione di 1m; a destra valori di correlazione per il DEM a risoluzione di 2 m

#### 4.7.3. Visualizzazione delle differenze

Nelle figure 31, 32 e 33 vengono confrontate 3 aree campione con caratteristiche di pendenza differenti: una zona in area pressappoco pianeggiante in prossimità di un'asta fluviale, una zona collinare con edifici sparsi e scarsamente vegetata, ed infine una zona montana fortemente vegetata senza abitazioni.

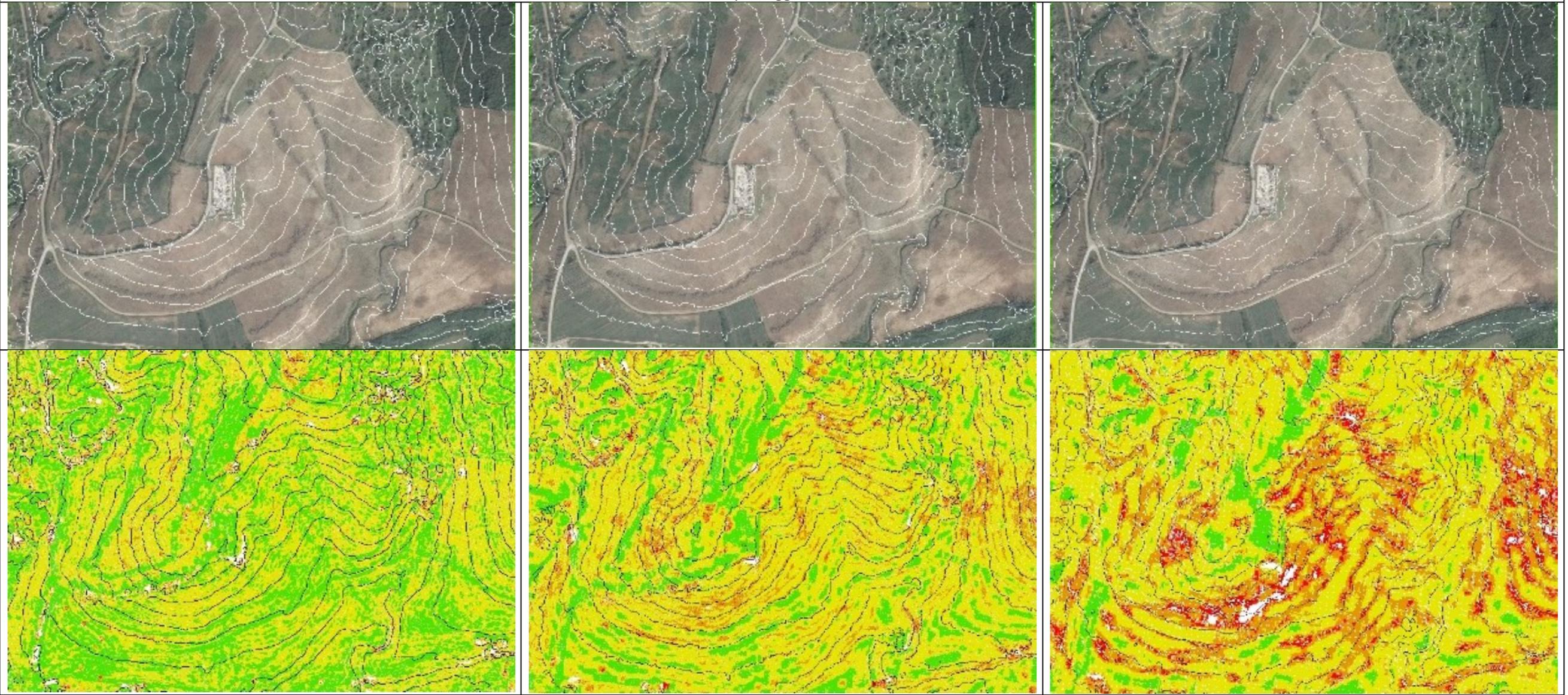
Nelle figure successive si porrà particolare attenzione alla congruenza tra le curve di livello ed il territorio, nonché ai valori di correlazione raggiunti per le diverse risoluzioni dei DEM per i due software. Si anticipa che è possibile notare un diverso comportamento nei valori di correlazione tra i due software, infatti ci si aspetta che all'aumentare della dimensione della cella del pixel, derivante dall'accoppiamento dei pixel iniziali, debbano aumentare le aree con valore di correlazione sempre più crescente. Difatti questo avviene per il software SOCET SET ma non per Geomatica con il quale si ha il comportamento opposto: minori valori di correlazione all'aumentare della risoluzione spaziale, cosa tra l'altro strana dato che all'aumentare della risoluzione aumenta anche la congruenza tra le curve di livello e la reale topografia del territorio.

La figura 30 mostra il posizionamento delle aree campione, dell'area per la quale seguirà un confronto visivo dei DEM e delle curve di livello e della zona di indagine geomorfologica.





Zona pianeggiante – PCI



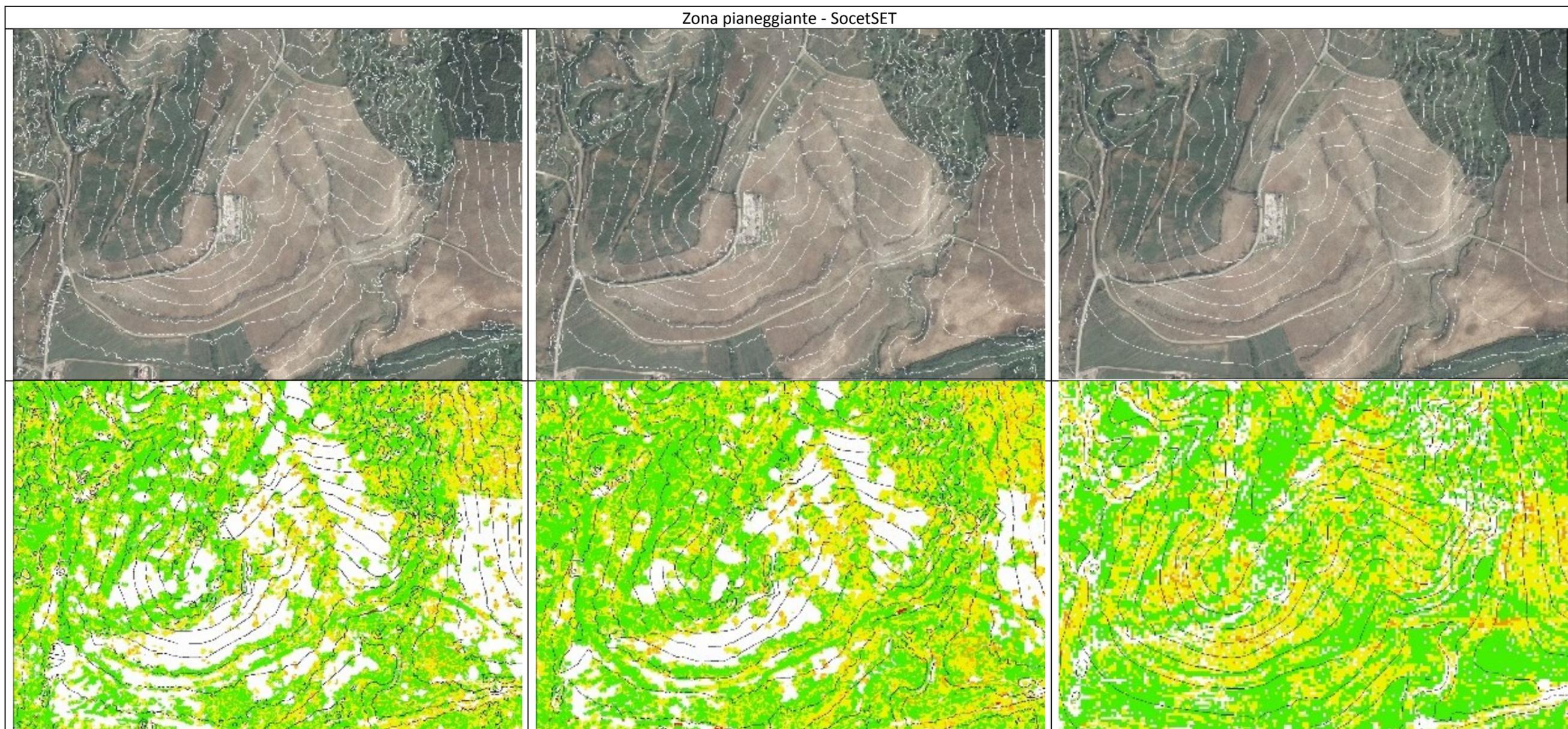
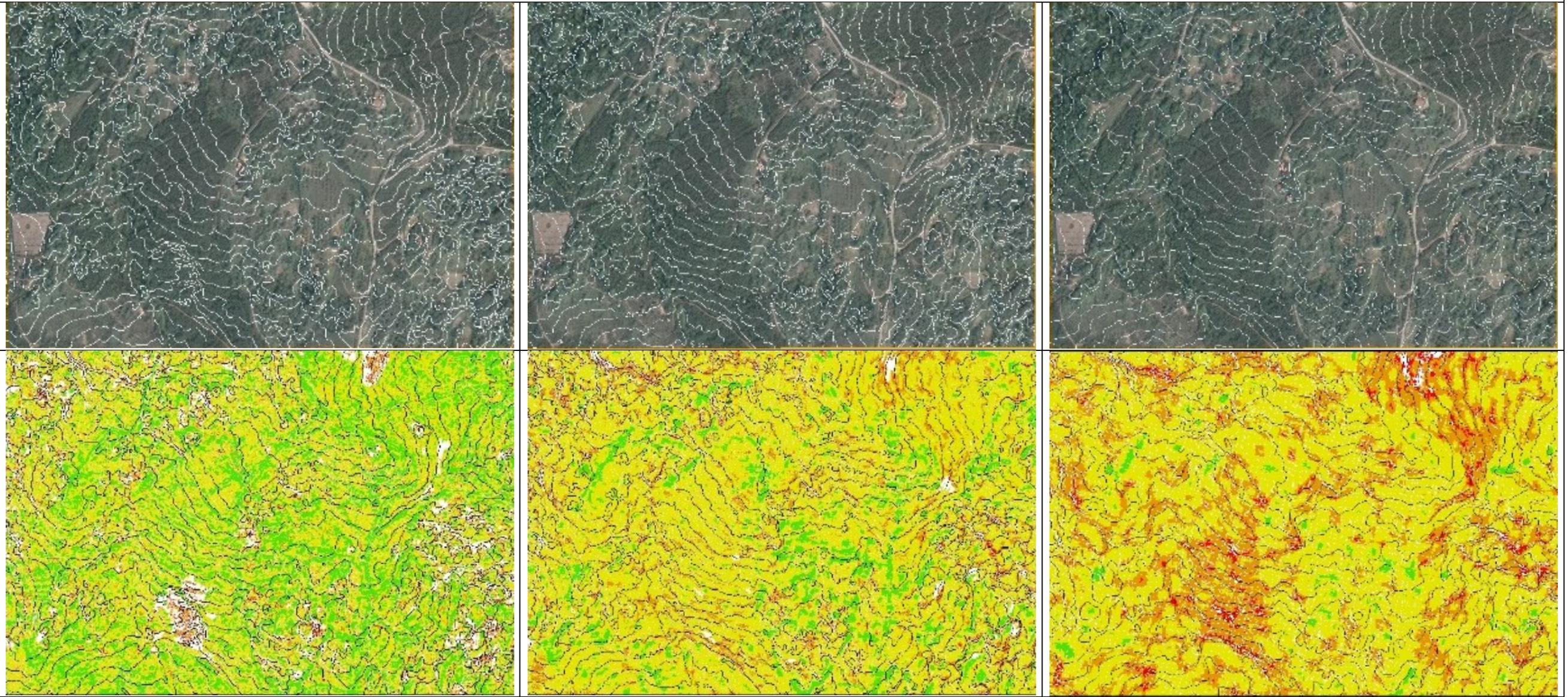


Figura 31 - Differenze tra i canali di correlazione e le curve di livello tra i due software per l'area pianeggiante

Com'è possibile notare, la zona pianeggiante per entrambi i software mostra curve di livello ampiamente congruenti con il territorio a partire già da una risoluzione del DEM molto spinta ed è possibile osservare che si trovano ampie zone con valori di correlazione elevati.

Zona collinare - PCI



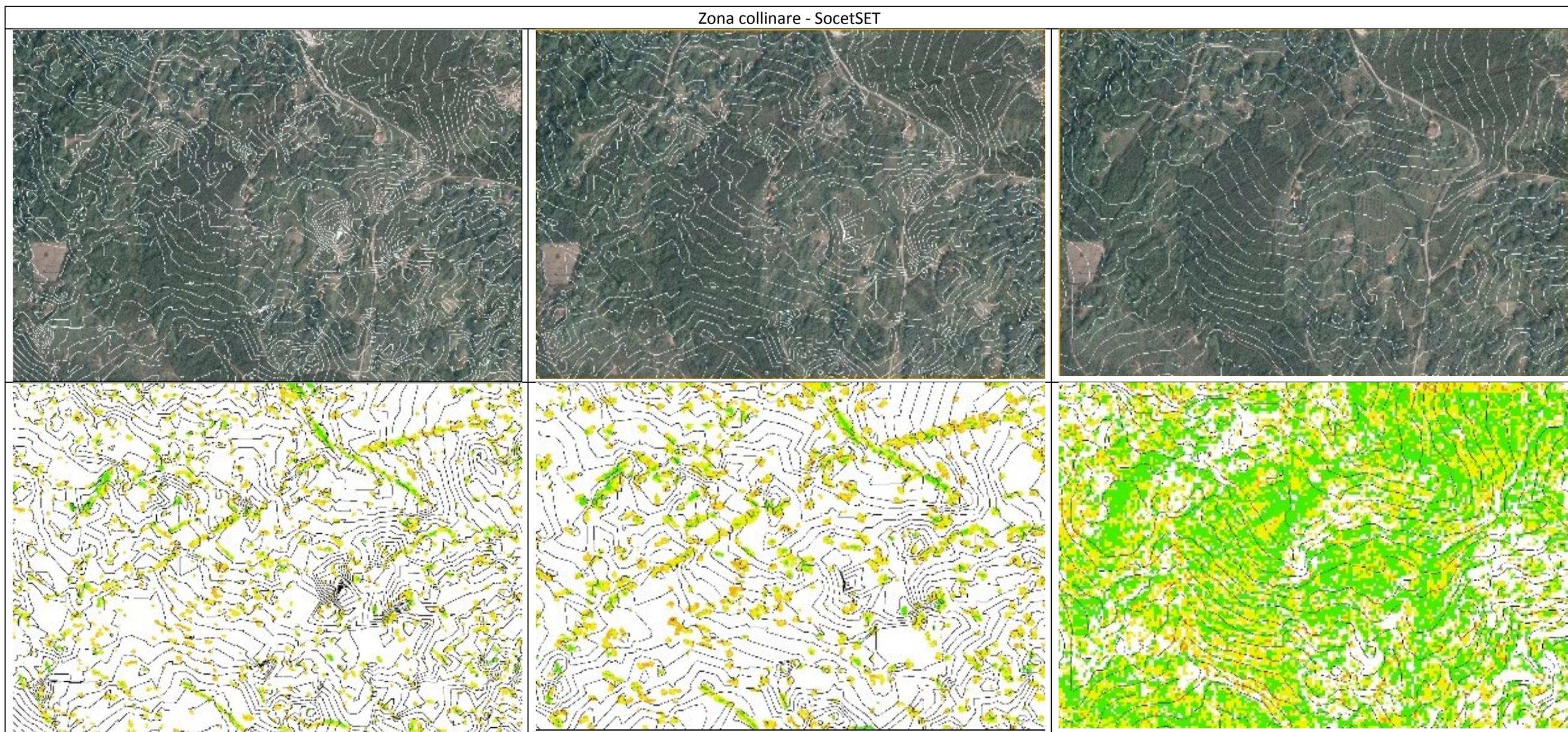
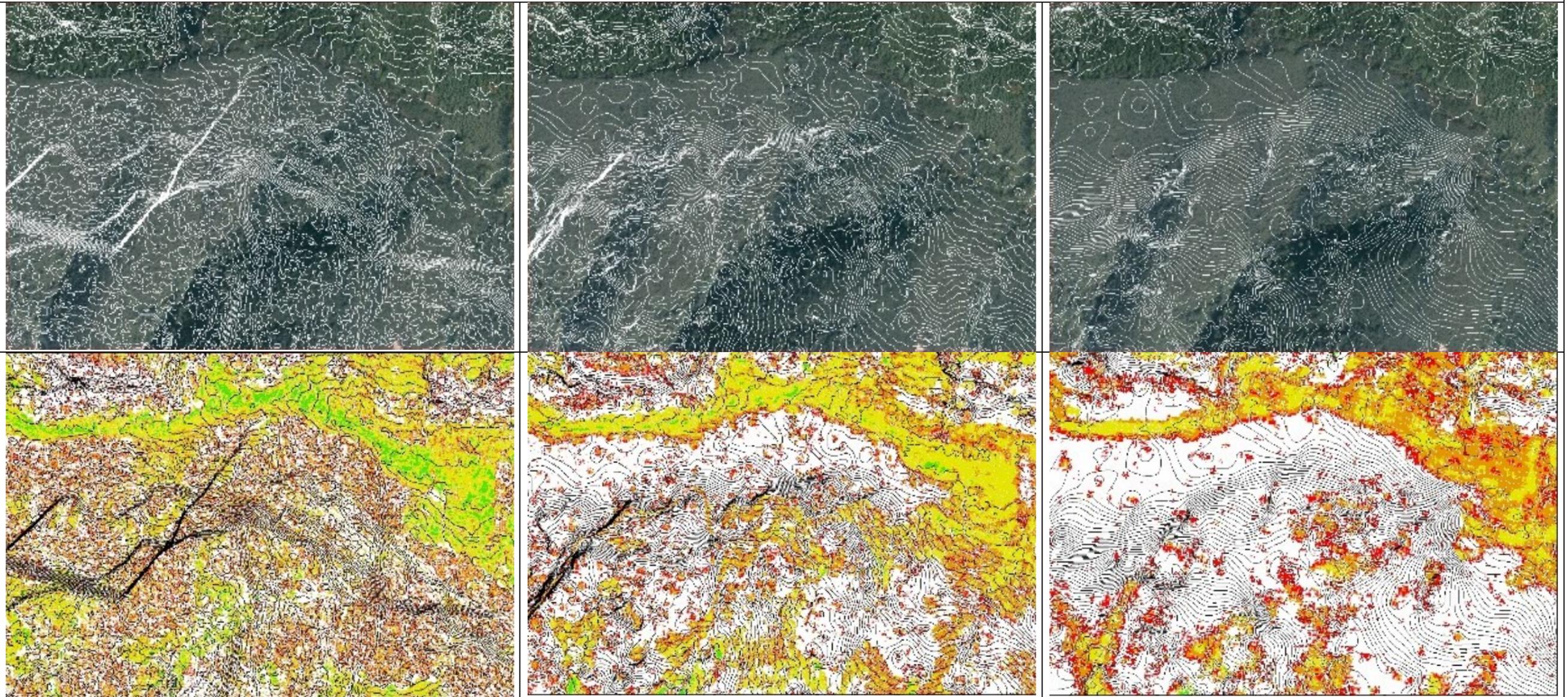


Figura 32 - Differenze tra i canali di correlazione e le curve di livello tra i due software per l'area collinare

In questo caso troviamo che delle grosse porzioni di territorio hanno una forte congruenza con le curve di livello derivanti da un DEM a risoluzione di 1m, ma nel contempo le zone rimanenti trovano una forte congruenza tra il territorio e le curve di livello generate dai DEM con risoluzione spaziale di 2m. E' possibile notare poi come per i valori di correlazione generati dal DEM di risoluzione spaziale di 2m generato da SOCET SET ci sia un vero e proprio ampliamento areale, che porta a una ottima congruenza tra curve di livello e territorio.

Zona montana - PCI



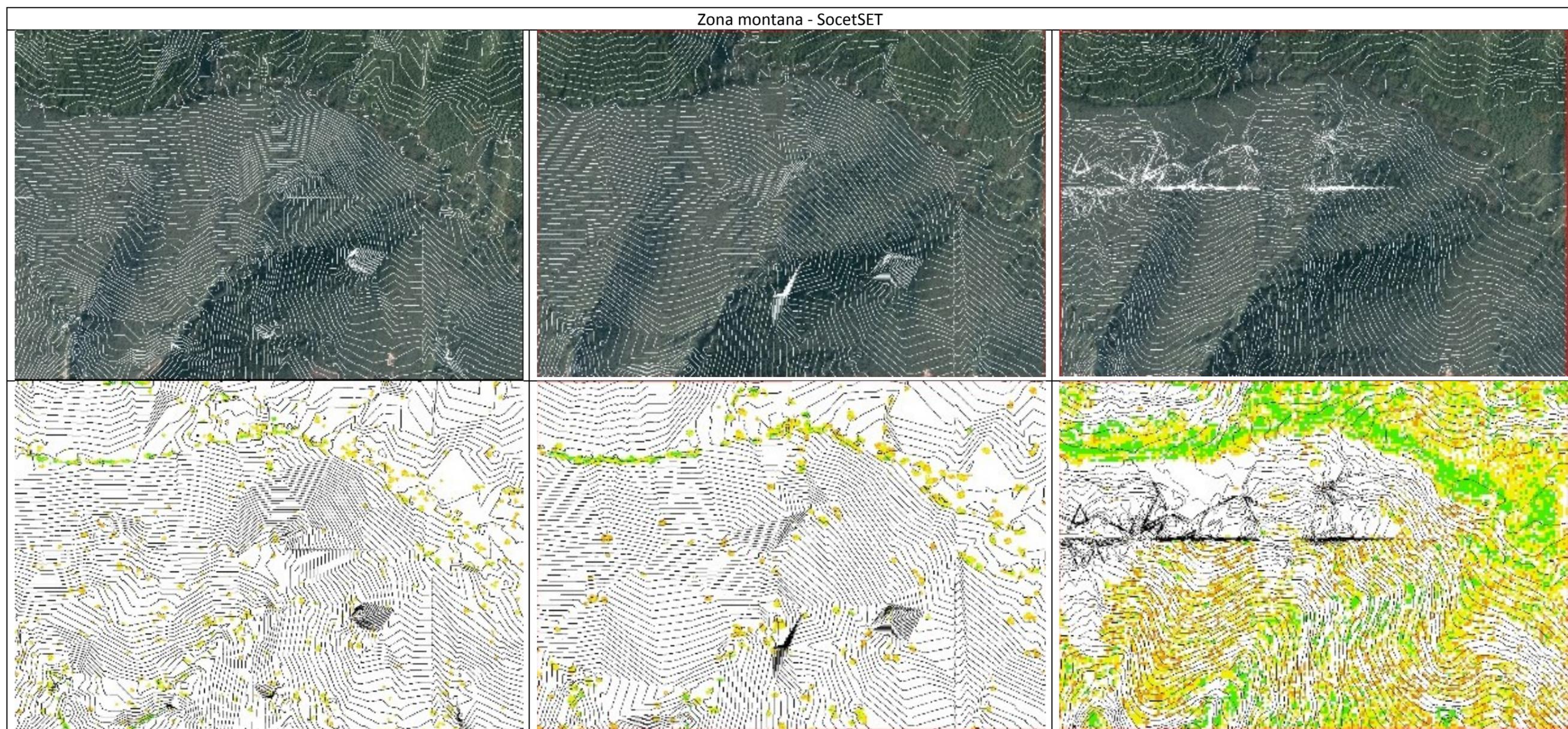


Figura 33 - Differenze tra i canali di correlazione e le curve di livello tra i due software per l'area montana

È possibile notare come la struttura delle curve di livello sia fortemente frammentata per tutti i DEM generati da Geomatica, e invece nel caso di SOCET SET questo sia pressappoco accettabile per il DEM a risoluzione spaziale di 2m.

## 4.8. Verifica dei punti

Nella fase di post-produzione l'utente deve valutare la bontà del modello creato, basandosi su diversi fattori. In letteratura (K. Deilami & M. Hashim, 2011; Aguilar 2014) il metodo maggiormente utilizzato è la comparazione tra le coordinate reali dei punti a terra e le coordinate di quegli stessi punti rilevate sul modello digitale. Ma basta solo questa operazione per capire se un DEM restituisce la reale topografia del territorio? Di fatto un territorio montano si presta di più a una comparazione visuale che ad una comparazione statistica, proprio perché il territorio tende ad amplificare e quindi a mostrare meglio delle eventuali aberrazioni topografiche.

Il modus operandi per la determinazione delle differenze di coordinate sono stati diversi in dipendenza del software che ha generato i DEM, ma il metodo utilizzato in questo caso per entrambi i software ha seguito le linee guida indicate dalle direttive INSPIRE, ossia che il punto sia riconoscibile in cartografia ortorettificata dal modello digitale stesso. Così facendo sono state create ortofoto, come in figura 43, utilizzando il modello generato e associando ad esso una delle immagini della coppia stereo. Successiva alla generazione dell'ortofoto è seguita l'individuazione in ambiente GIS dei punti misurati a terra, quindi sono state registrate le coordinate finali del punto. Per individuare invece il valore di altimetria, i punti rilevati dall'ortofoto sono stati sovrapposti al layer DEM per poterne catalogare in tal modo il valore relativo.

Oltre questa modalità è stata utilizzata una seconda opzione, ossia la visualizzazione in stereoscopia digitale seguita dall'individuazione dei punti. Tale modalità è stata effettuata solo per i prodotti generati dal Software PCI Geomatica in quanto il software stesso rende possibile tale visione per i propri prodotti, mentre SOCET SET, permette sì la visualizzazione in stereoscopia digitale ma solo ma solo nella fase di individuazione e posizionamento dei punti antecedente alla fase di georeferenziazione. Tale modalità di visualizzazione invece risulta non essere sfruttabile dopo la generazione del modello digitale

Di seguito vengono mostrati i grafici di comparazione per i modelli digitali del terreno creati con PCI Geomatica e con il software SOCET SET.

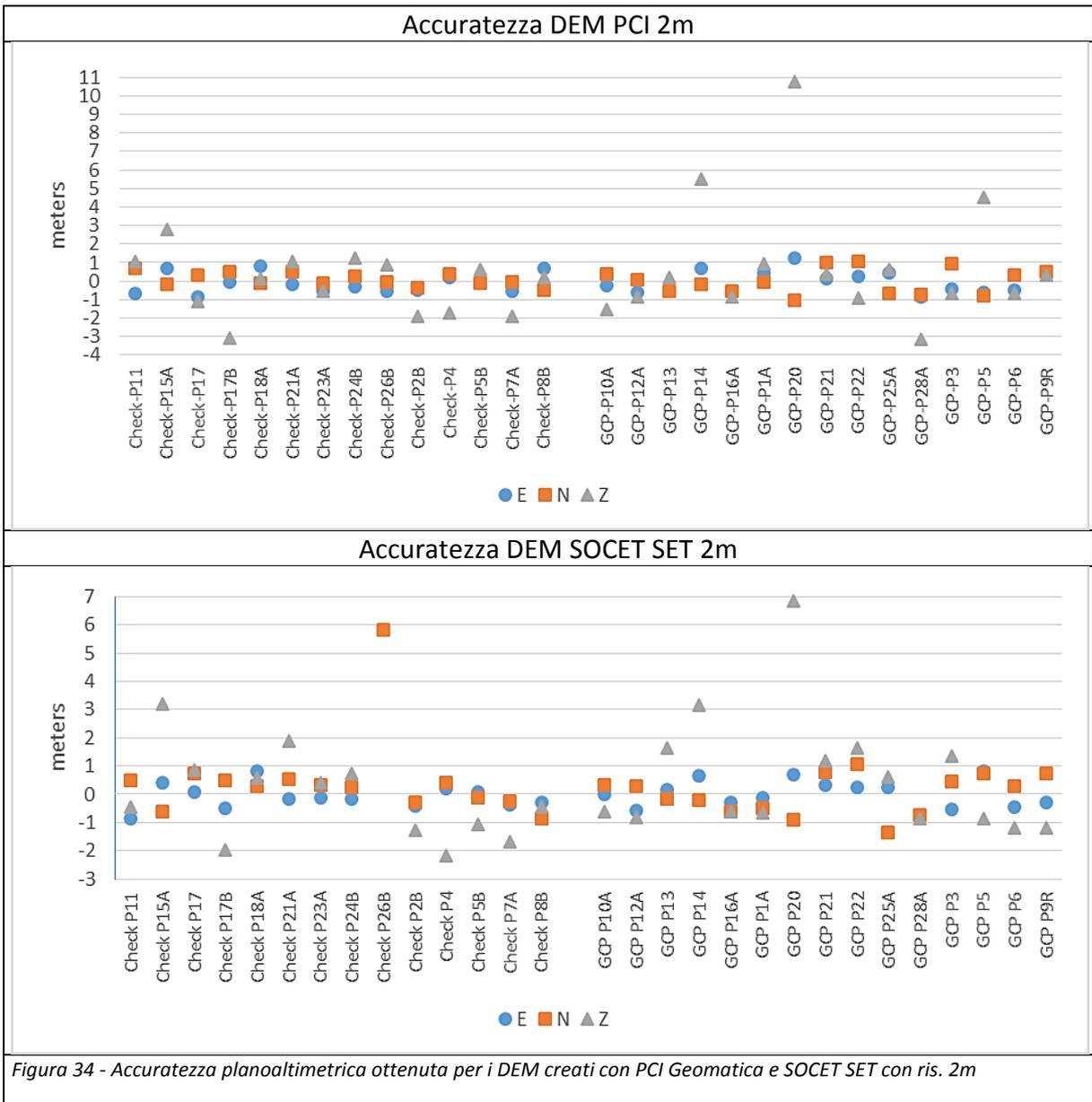


Figura 34 - Accuratezza planaltimetrica ottenuta per i DEM creati con PCI Geomatica e SOCET SET con ris. 2m

È possibile notare come per entrambi i modelli digitali la maggior parte dei valori è compresa tra 1m e -1m e con diversi valori di outlier che hanno come valore massimo +10,75m nel caso del modello generato da PCI e che invece raggiungono il valore di -51,89m nel caso del modello generato da SOCET SET; quest'ultimo valore è stato tagliato dal grafico per non appiattare tutti i restanti valori. C'è da dire inoltre che il valore di -51,89m è registrato per un punto che è praticamente a margine dell'immagine e che nel caso di PCI non è stato tagliato in automatico dal software cosa che invece è accaduta nel caso di SOCET SET.

Di seguito invece vengono mostrati i valori di accuratezza calcolati per i modelli digitali con risoluzione di 1m.

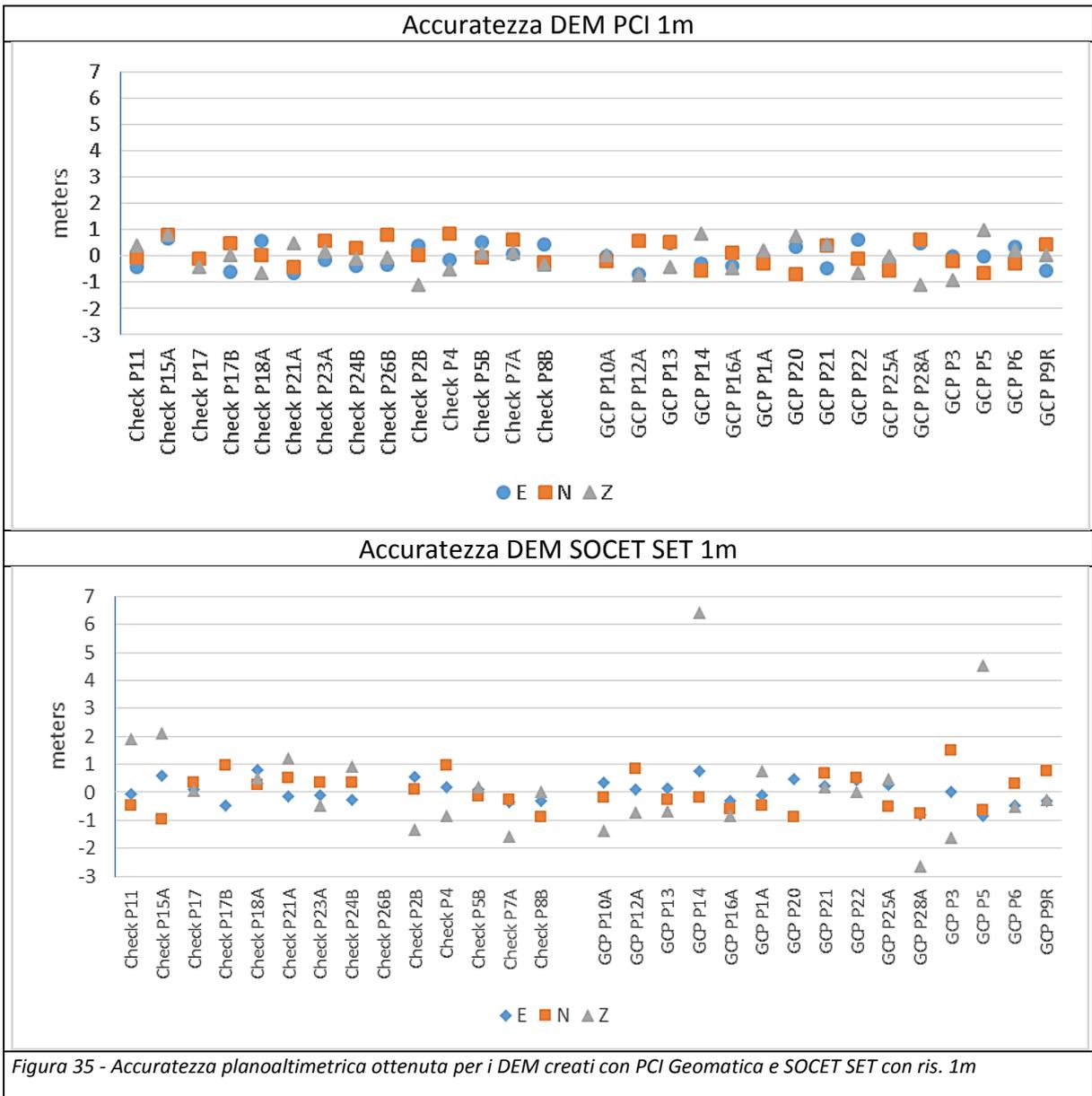
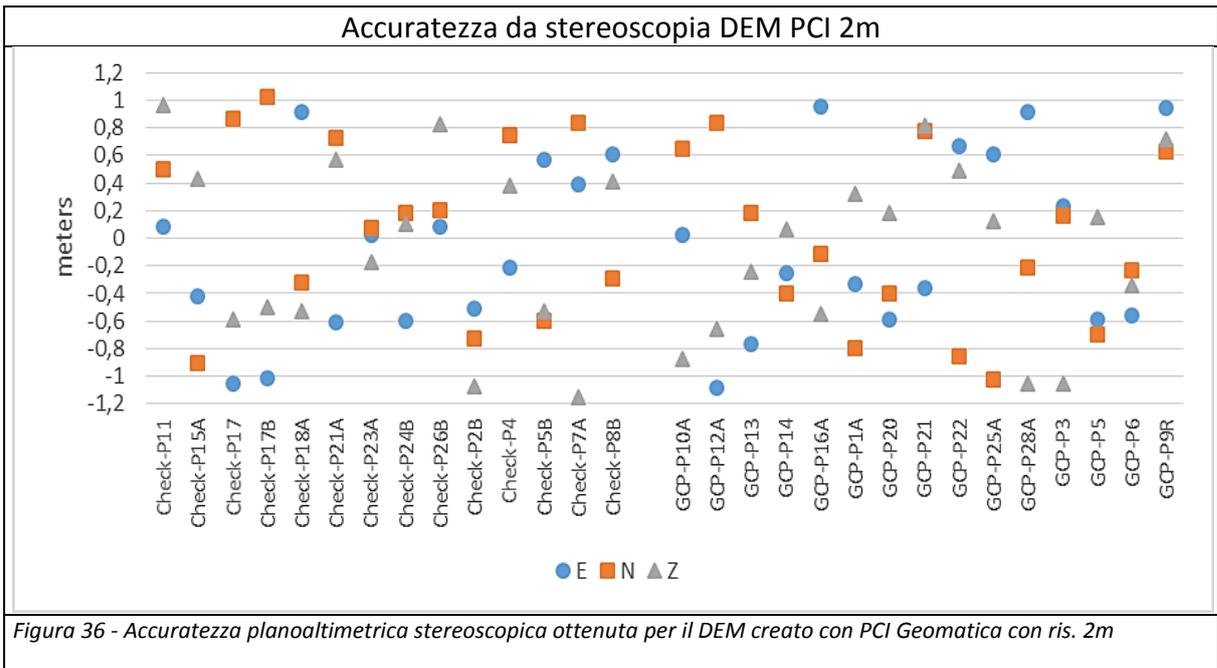


Figura 35 - Accuratezza planoaltimetrica ottenuta per i DEM creati con PCI Geomatica e SOCET SET con ris. 1m

Come per il caso precedente è possibile notare come per entrambi i modelli digitali la maggior parte dei valori è compresa tra 1m e -1m. Anche in questo caso abbiamo un punto a margine del modello generato, ma diversamente da prima questa volta il modello generato da SOCET SET risulta eliminare la zona del punto P26B, difatti non è possibile registrare per esso nessun valore planoaltimetrico.

Di seguito invece viene mostrato il grafico con i valori di accuratezza calcolati in visualizzazione stereoscopica digitale per il modello digitale con risoluzione di 2 m creato con Geomatica. Per esso è possibile notare che, data la possibilità di posizionamento più accurata del punto, tutti i valori registrati sono nel range di 1,2 m e -1,2 m.



La valutazione delle accuratezze planoaltimetriche raggiunte difatti però non è il solo indice attraverso il quale è possibile determinare la bontà del prodotto generato. Per questo motivo, oltre a una valutazione di tipo numerico appena illustrata e a una valutazione dei canali di score valutata nei capitoli precedenti, sono state effettuate valutazioni visive sui DEM creati per una porzione di territorio in frana oggetto di approfondimento geomorfologico nel capitolo 5.

## 4.9. Analisi visiva dei modelli digitali delle altezze per l'area di frana

Riguardo una prima analisi visiva, in Figura 37 sono presentati i DEM visualizzati in modalità "shaded relief", con istogramma di frequenza bloccato su valori fissi, per visualizzare la stessa tipologia di colore associata alla medesima elevazione. Si noti come non sia possibile discriminare le differenze tra i DEM, ma è possibile solo notare come all'aumentare della risoluzione ci sia una ovvia perdita di dettagli. Tra i due software si nota come SOCET SET ottiene una qualità migliore per le zone molto pendenti, ad esempio il versante verso il mare ha sempre superfici continue e mai frammentate. Sempre SOCET SET ottiene risultati positivi con risoluzioni superiori al metro ed è possibile notare come per la risoluzione a 1m ed anche in quella di 2 m sia nettamente visibile la viabilità provinciale. Per valutare in modo più approfondito le reali corrispondenze dei DEM con il suolo si è quindi deciso di effettuare una ulteriore valutazione visiva sulle curve di livello, come da paragrafo successivo.

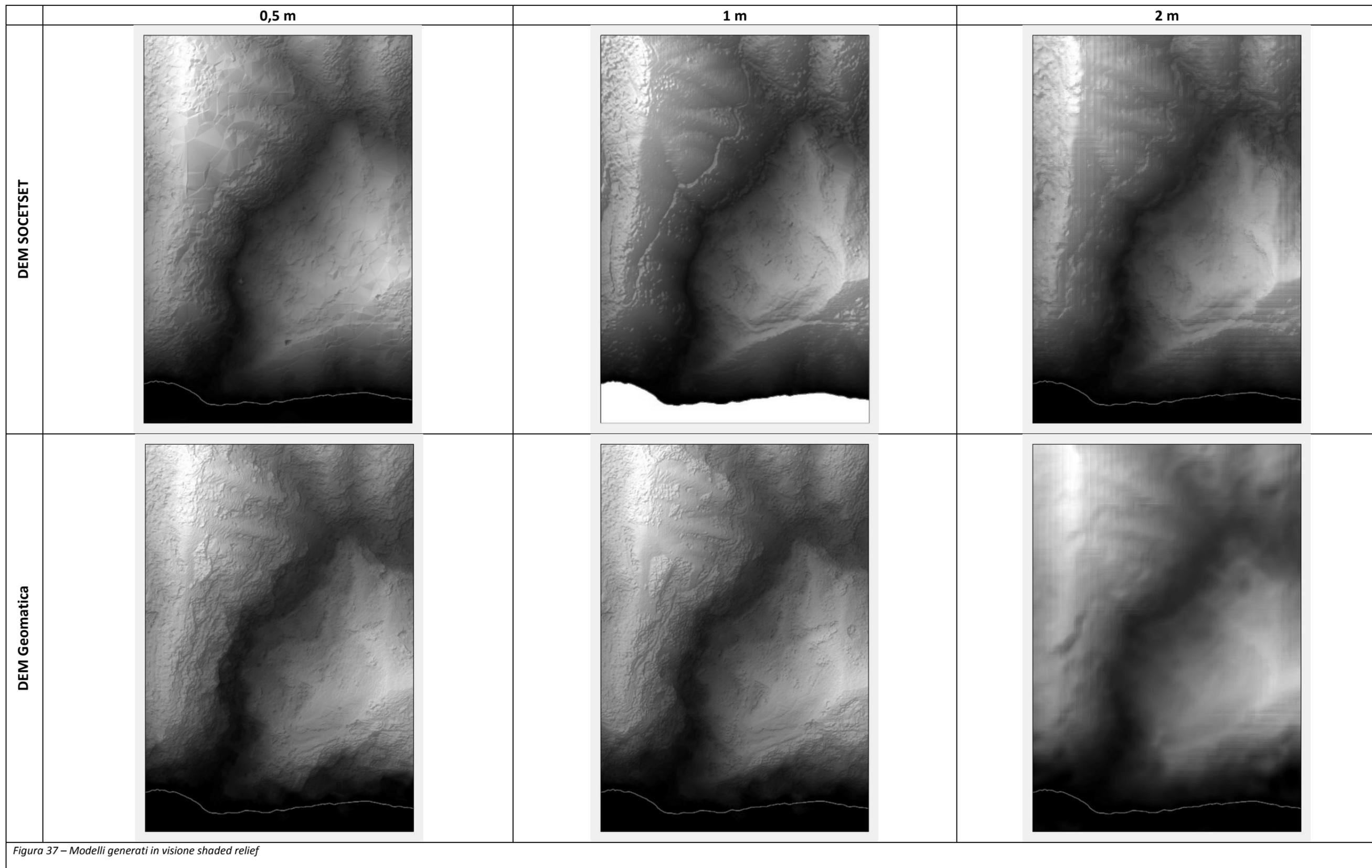


Figura 37 – Modelli generati in visione shaded relief

## **4.10. Analisi visiva delle curve di livello per l'area di frana**

Si è deciso di generare dal DEM una serie di curve di livello a diversa interdistanza, per eseguire una analisi mirata per l'area in frana. Questa analisi visiva dettagliata, nasce dal fatto che l'obbiettivo finale legato alla generazione del DEM sia una analisi geomorfologica della zona. Di seguito vengono mostrate le curve di livello con interdistanza di 2 metri e 5 metri per i DEM di risoluzione spaziale di 0,5 metri, 1 metri e 2 metri e uno zoom per le curve di livello con interdistanza di 5m derivate dai DEM alle risoluzioni spaziali di 1m e 2m.

La porzione di territorio mostrata per le Figura 38 e Figura 39 riguarda l'ambito di frana e il versante opposto stabile. La Figura 38 mostra le curve di livello con interdistanza di 2 metri e possiamo notare complessivamente che, come nel paragrafo precedente, i prodotti derivati dai DEM generati da SOCET SET sembrano mostrare in modo più adeguato e con meno frammentazione l'andamento del territorio. In special modo è possibile notare come le curve derivate dal DEM di risoluzione di 1m facciano addirittura notare l'andamento della viabilità provinciale e dei crinali utili ad esempio per definire i contorni di frana e come la stessa peculiarità si ritrovi anche nelle curve derivate dal DEM con risoluzione di 2m. Si può notare inoltre come le curve generate da PCI sembrano in tutti i casi molto frammentate o mostrano delle forti aberrazioni che non ritrovano un riscontro reale del territorio. Un'ulteriore nota è da farsi per le curve di livello generate con SOCET SET dal DEM con risoluzione spaziale di 0,5 m; si noti come il software abbia generato un modello molto "cattivo" anche rispetto a PCI.

La Figura 39 mostra le curve di livello con interdistanza di 5 metri e, come nel caso precedente, i prodotti derivati dai DEM generati da SOCET SET sembrano mostrare in modo più adeguato e con meno frammentazione l'andamento del territorio, ma in questo caso fino alle curve generate dal DEM con risoluzione spaziale di 1m. Infatti si può notare come nel caso delle curve derivate dal modello digitale di risoluzione di 2m sembrano quasi equivalersi su quasi la totalità della porzione di immagine scelta. A uno sguardo più approfondito notiamo però come risulti ancora esserci per PCI l'aberrazione nella parte verso il mare e in altre piccole zone sia nel versante in frana che in quello stabile. Anche se l'interdistanza è maggiore rispetto a prima continuano a distinguersi i crinali, maggiormente nelle curve derivate dal DEM con risoluzione di 2m.



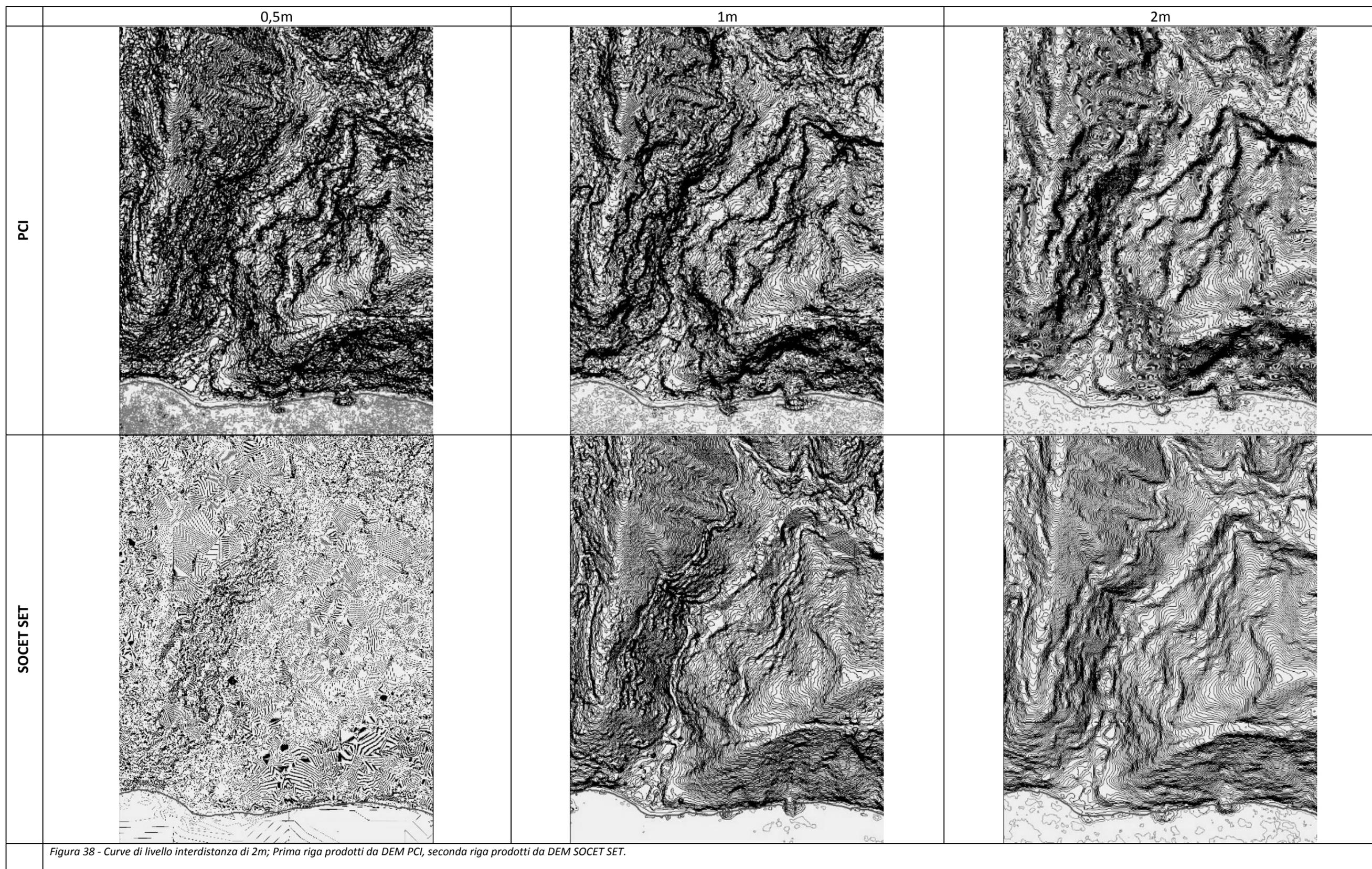


Figura 38 - Curve di livello interdistanza di 2m; Prima riga prodotti da DEM PCI, seconda riga prodotti da DEM SOCET SET.

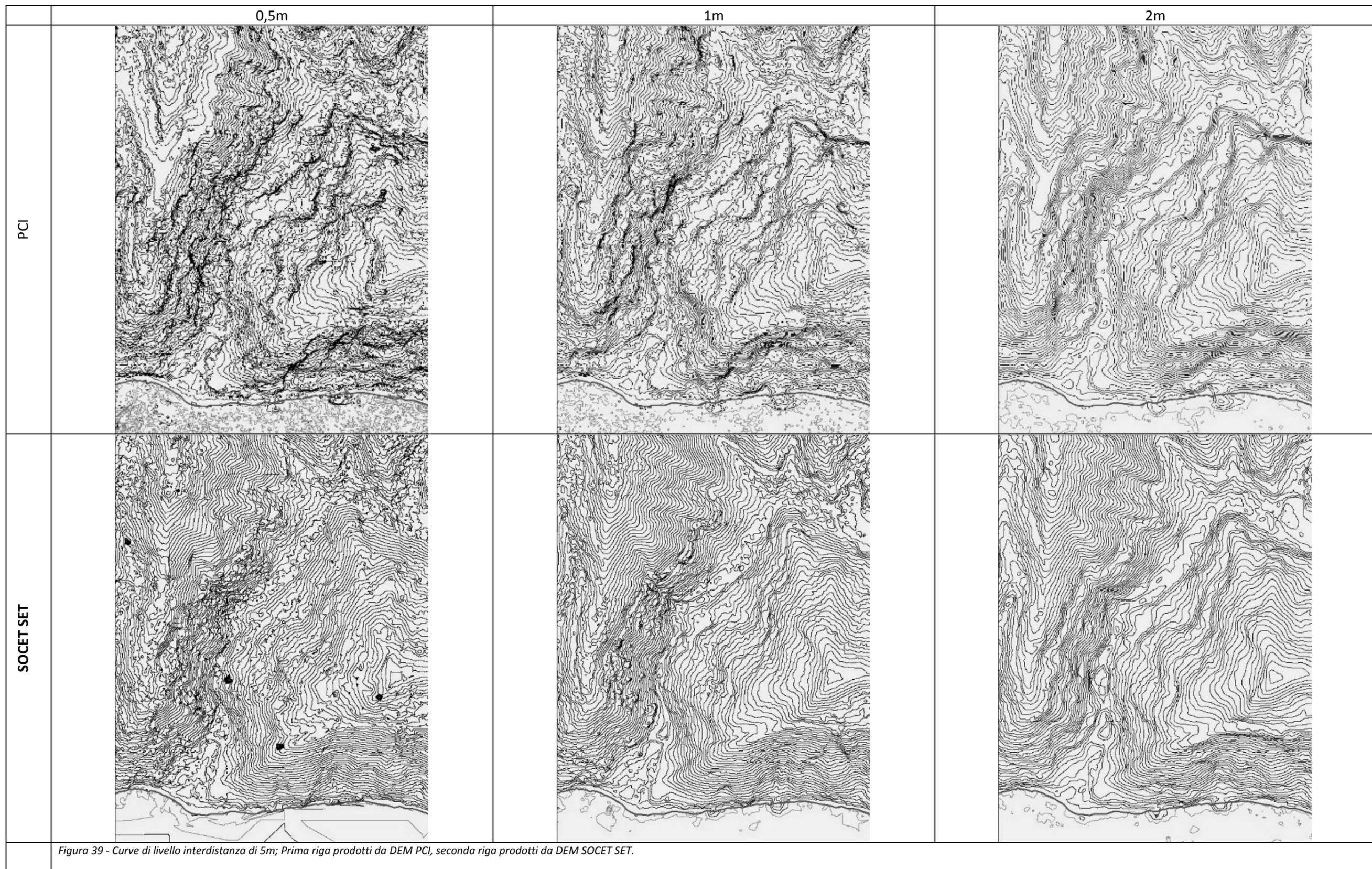


Figura 39 - Curve di livello interdistanza di 5m; Prima riga prodotti da DEM PCI, seconda riga prodotti da DEM SOCET SET.

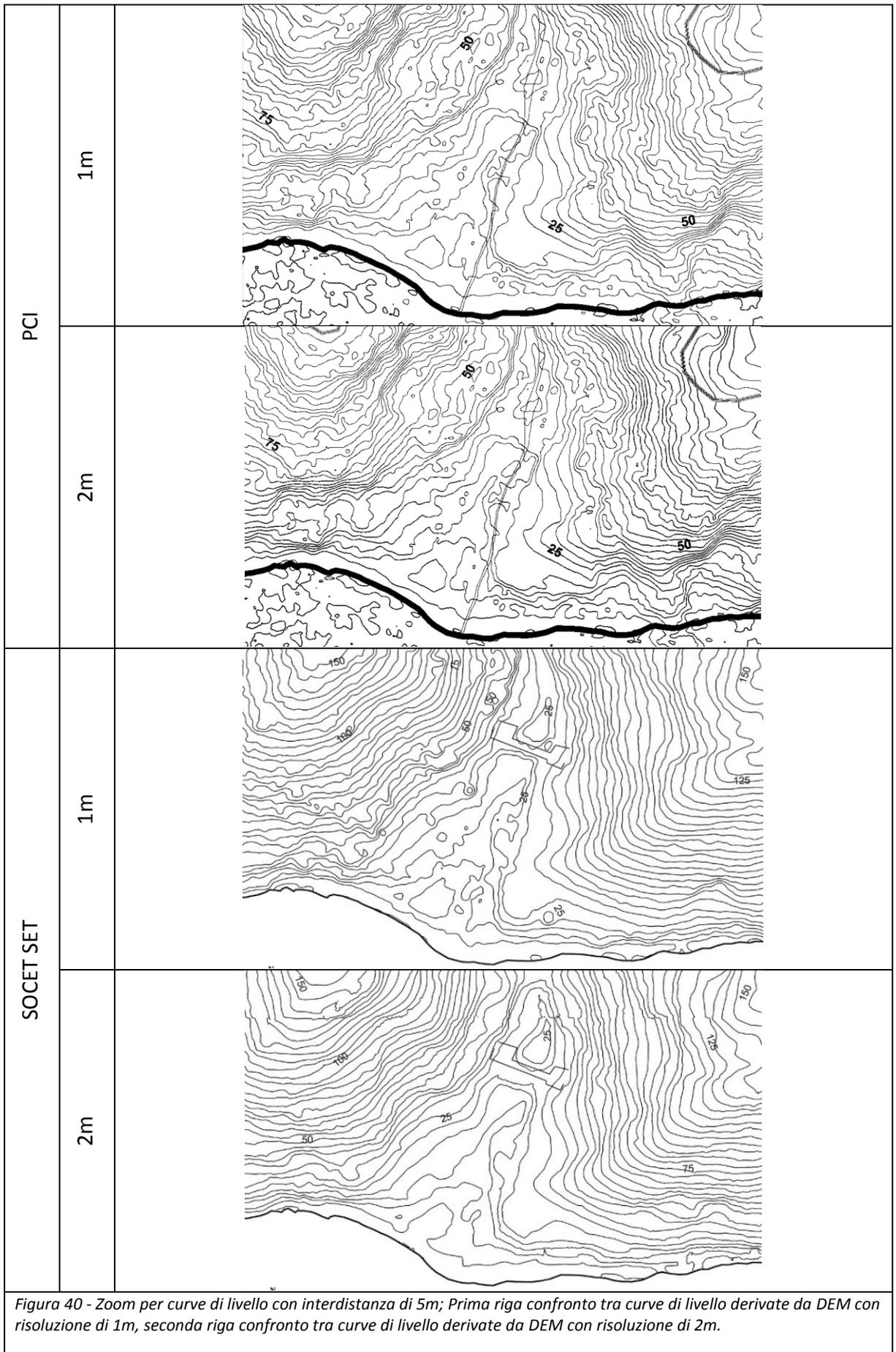
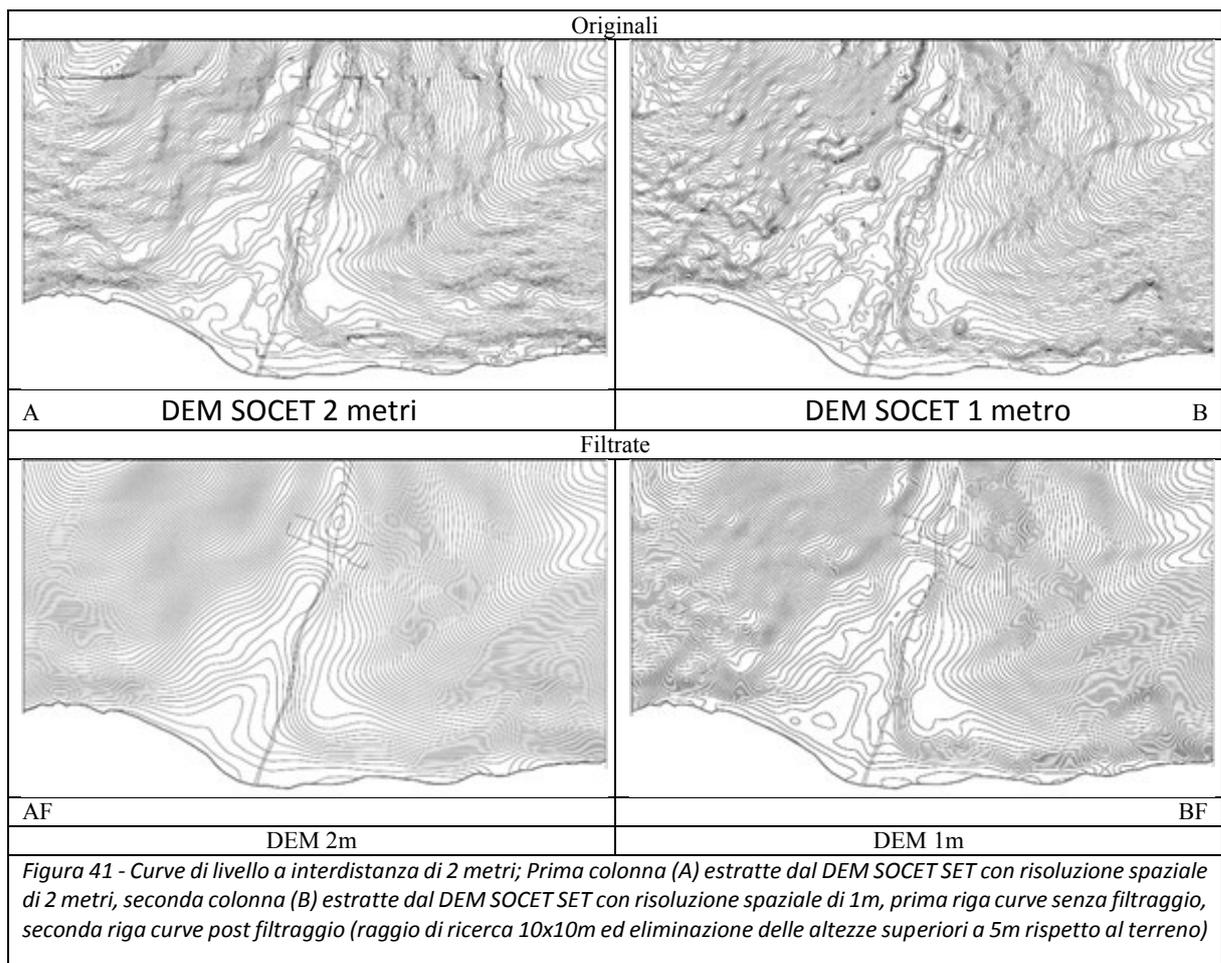


Figura 40 - Zoom per curve di livello con interdistanza di 5m; Prima riga confronto tra curve di livello derivate da DEM con risoluzione di 1m, seconda riga confronto tra curve di livello derivate da DEM con risoluzione di 2m.

Nello zoom di figura 40, si è posta l'attenzione sulla zona a sud della frana limitrofa al mare dove si notano diverse aberrazioni del terreno sia sul versante in frana che per quello stabile. Comparando in modo più approfondito le curve di livello dei due modelli con risoluzione di 1 metro notiamo come quelle generate dal DEM scaturito da SOCET SET mostrano un andamento più regolare rispetto a quello di Geomatica che per la zona che si getta in mare, al disotto della frana, si nota una forte aberrazione non congrua alla reale topografia, mostrando una lingua di terreno che si rialza dal fianco del pendio che si getta in mare, cosa che non accade con il modello generato da SOCET SET. Nelle curve di livello da modelli con risoluzione a 2 metri si nota come le isoipse derivate dal modello di SOCET SET risultano avere una maggiore fluidità mostrando curve più lisce rispetto al modello di PCI, il quale risulta essere in determinati ambiti più irregolare e mostrando ancora le zone di aberrazione. Per questo motivo e per i motivi prima esposti, per la continuazione del lavoro di identificazione dei corpi di frana è stato scelto il modello elaborato con il software SOCET SET.

#### 4.10.1. Filtraggio dei DEM

Prima di estrarre le curve di livello, si è applicato al DEM un filtro spaziale con dimensione di finestra di ricerca di 10x10 metri per eliminare manufatti e alberi sparsi, imponendo di eliminare tutto ciò che risultasse superiore ai 5 m rispetto alla media del terreno.



La figura 41 mostra nel riquadro A e B le curve di livello con interdistanza di 2m generate dal DEM con risoluzione spaziale di 2 metri e di 1 metro, i riquadri AF e BF mostrano le curve di

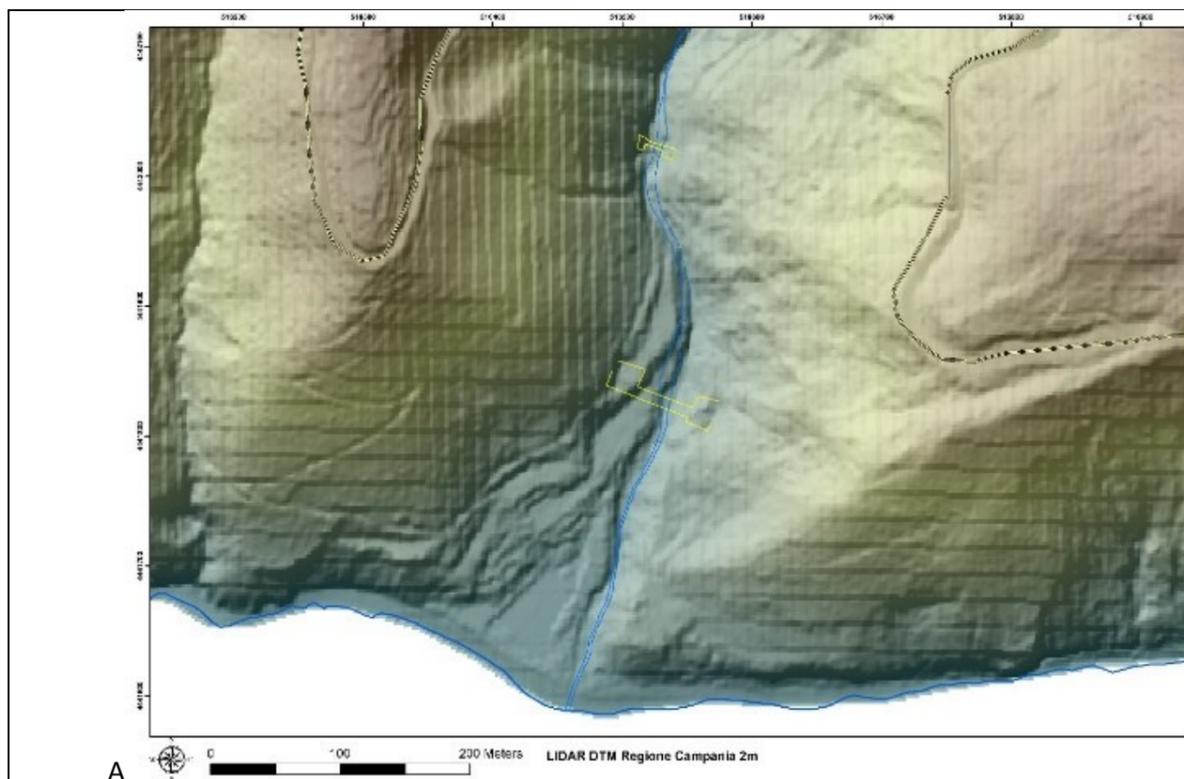
livello con la stessa interdistanza usata prima ma derivate da un DEM filtrato secondo quanto prima riportato. Andando ad analizzare le figure notiamo come le curve del riquadro A, che derivano dal DEM scelto per le analisi geomorfologiche, seguono molto bene l'andamento topografico reale del terreno e seppur mostrando alcuni picchi di elevazione non sembrano incidere per una analisi geomorfologica. Il riquadro B mostra invece le curve di livello derivate dal DEM con risoluzione spaziale di 1m, corrispondano in modo adeguato al reale andamento topografico ma forse forniscono troppi dettagli che potrebbero portare una valutazione errata nell'attribuzione delle forme di frane. Il riquadro AF fa notare come il filtraggio eseguito sul DEM con risoluzione spaziale di 2m porta a degradare troppo le forme del territorio e quindi lo rende poco utilizzabile per una applicazione geomorfologica di dettaglio ma semmai potrebbe essere utilizzato per la generazione di ortofoto. L'ultimo riquadro BF mostra le curve di livello derivate dal DEM di risoluzione spaziale di 1m, che dopo il filtraggio restituisce un DEM che assomiglia molto al riquadro A ed eliminando poche zone con salti di elevazione. Per i motivi sopra elencati, assieme all'aiuto del gruppo di geomorfologia, si è deciso di utilizzare il DEM prodotto a risoluzione spaziale di 2 metri senza filtraggio, ritenendolo migliore rispetto a tutte le altre ipotesi prima formulate e molto performante per l'individuazione dettagliata di alcune forme morfometriche.

## 4.11. Confronto tra il DEM scelto e DEM certificati

Dopo aver scelto il DEM a risoluzione spaziale di 2m generato con il software SOCET SET come prodotto da utilizzare per le fasi successive sono state effettuate due ulteriori analisi visive su prodotti certificati. Uno dei prodotti certificati è il DEM della Regione Campania con risoluzione spaziale di 5 metri, generato da curve di livello a interdistanza di 5m disponibili come file vettoriali associati alla Carta Tecnica Regionale. Questa tipologia di cartografia tecnica per la Regione Campania attualmente risulta essere distribuita dal 2008 ma derivate da un rilievo aerofotogrammetrico tra il 2004 e il 2005. Un'ulteriore analisi visiva è stata eseguita su di un DEM derivato da dati LiDAR acquisiti dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare nell'ambito del Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale (PST-A) e della sua Estensione (PST-A Estensione 2008) in risoluzione 1:5000. Tali prodotti sono distribuiti liberamente dal Portale Cartografico Nazionale e visualizzabili e interrogabili in ambiente GIS sotto forma di layer Web Map Service (WMS), ossia un layer remoto che permette esclusivamente la visualizzazione e l'interrogazione ma non la manipolazione.

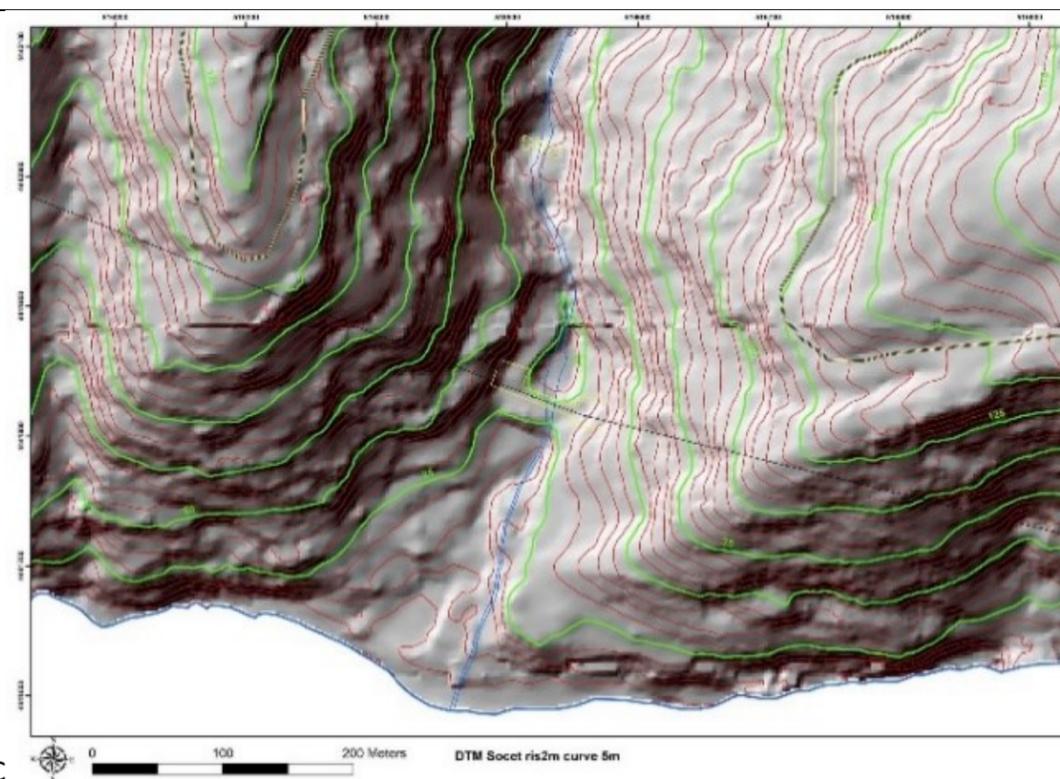
In Figura 42 è possibile visionare i due modelli generati ai quali sono state sovrapposte le curve di livello native e il modello da dati LiDAR. I modelli B e C risaltano congruenti sia nella parte a monte della frana che a valle di essa e che il modello di elevazione della Regione Campania ha meno ruvidezza. Nel DEM prodotto da SOCET SET si vedono molte più rugosità del terreno data la sua risoluzione spaziale più spinta rispetto al prodotto Regione Campania. Questa rugosità è un punto di forza perché ci fa capire che il prodotto è conforme alla realtà e quindi capace di evidenziare particolari specifici così da ottenere una analisi di tipo geomorfologico più spinta nel dettaglio. Esiste certo la possibilità di lisciare il modello prodotto da SOCET SET utilizzando filtri adeguati per eliminare le elevazioni di zone vegetate, ma per le analisi geomorfologiche presentate nel capitolo 5 si è deciso di operare sul modello non filtrato. Ritornando ai modelli, quello generato da SOCET SET rispetto al modello generato da CTR Campania, si nota ben visibile il ponte ferroviario e la depressione dovuta alla strada provinciale che essendo ben identificabile e marcabile, sarà utile poi per la fase di identificazione geomorfologica.

Contrassegnato con la lettera A è possibile visionare il modello derivante da dati LiDAR. Il DEM di produzione LiDAR risulta essere stato privato della copertura vegetale attraverso l'ausilio di filtri passa basso e ulteriori filtri che utilizzano i valori dell'ultimo impulso acquisito dal sensore. Si nota immediatamente la forte continuità superficiale nel versante in frana data la sua scarsa vegetazione; nel contempo è ben visibile il filtraggio per l'eliminazione dell'alberato effettuato sul versante stabile. Nel confronto si notano inoltre sempre le asperità presenti nel modello generato da SOCET SET e il netto ingombro della strada provinciale impresso sul DEM da dati LiDAR. Nel complesso i due modelli sembrano essere concordi dal punto di vista della morfologia del terreno, ciò a dimostrare che il prodotto elaborato è molto performante e riesce a competere con prodotti derivati da campagne di rilievo molto più complesse e costose.



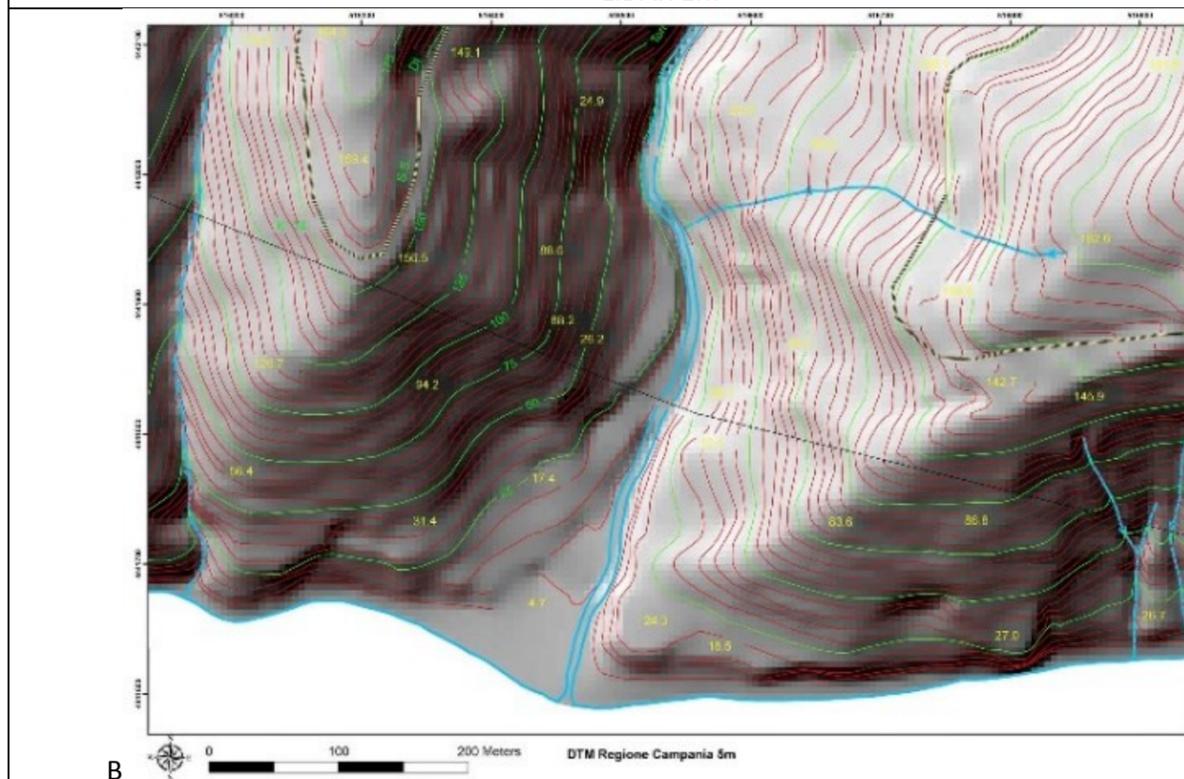
A

LiDAR 1m



C

SOCET SET 2m



B

Regione Campania 5m

Figura 42 - Modelli ombreggiati per il DEM definitivo, il DEM prodotto da CTR e da LiDAR; in alto a sinistra (A) il DEM con risoluzione spaziale di 2 m prodotto da dati LiDAR e in basso a sinistra (B) il DEM con risoluzione spaziale di 5m prodotto da CTR Regione Campania e a destra (C) il modello prodotto da SOCET SET con risoluzione di 2m,

## 4.12. Ortofoto

Scelto il modello digitale delle altezze da utilizzare per la produzione di indici geomorfometrici ed analisi geomorfologiche si è prodotta una ortofotocarta. In Figura 43 è riportata l'ortofotocarta prodotta per l'ambito esteso di frana.





## 5. APPLICAZIONI

Le applicazioni riportate in questo capitolo sono state eseguite con l'aiuto di un geomorfologo esperto che ha indicato le metodologie da seguire per la creazione di determinati indici geomorfometrici nonché la valutazione dei risultati ottenuti. Il criterio utilizzato è stato di individuare prima i contorni di frana utilizzando le curve di livello e carte derivate per poi eseguire una analisi statistica utilizzando degli indici geomorfometrici. Tale sistema è volto a verificare la possibilità di discordanze nel versante in frana e in quello stabile, utilizzando poi tali discordanze degli indici geomorfometrici per caratterizzare frane diversi ambiti.

### 5.1. Geologia del territorio

La geologia del territorio è conseguenza di una sequenza di eventi tettonogenetici succedutisi in un arco temporale compreso tra il Miocene inferiore ed il Pleistocene. La zona più vicina al mare è composta dall'unità pre-orogene interna mentre l'area interna che interessa i comuni di Futani e San Mauro la Bruca è formata dall'unità sin-orogene. La prima unità è rappresentativa di domini paleogeografici in cui la sedimentazione in facies bacinale pelagica è avvenuta su crosta oceanica o continentale assottigliatasi. Gli affioramenti si hanno in maniera estesa nel Cilento e in Lucania e sono caratterizzati da limiti tettonici spesso di difficile interpretazione a causa della tettonica polifasica che li ha interessati. Largamente diffusa nell'area è l'unità tettonica Nord Calabrese che è costituita da una successione bacinale, caratterizzata da calciliti e argilliti spesso silicizzate, con apporti torbiditici calcarei. L'unità sin-orogene è costituita da depositi di "thrust-top" cioè depositi in bacini più o meno confinati formati al di sopra del cuneo di accrezione al quale afferisce un ciclo sedimentario del Miocene medio, definito come Gruppo del Cilento, depositosi al di sopra dell'unità interne già deformati, sulle quali poggia in discordanza per contatto stratigrafico non conforme. Il gruppo, tra le diverse successioni terrigene, comprende: le arenarie di Pollica, costituite da torbiditi arenaceo-pelitici con sottili intercalazioni pelitiche e intervalli di arenarie di spessore anche metrico, e la formazione di San Mauro, formata alla base da torbiditi arenaceo-pelitici da fini a grossolane, mentre verso l'alto prevalgono i termini arenacei, caratterizzati dalla presenza di olistostromi e di magastrati marnosi-calcarei

#### 5.1.1. La zona della frana.

L'area di studio interessa una porzione di territorio Cilentano a confine tra i Comuni di Ascea e Pisciotta nella zona costiera della provincia di Salerno. In particolar modo per questo ambito applicativo l'area di interesse è il versante sinistro del torrente Fiumicello che risulta essere caratterizzato da una ampia superficie con un evidente fenomeno franoso. Il fenomeno franoso è attivo da diversi anni e causa continue deformazioni superficiali; tali alterazioni interessano oltre la strada provinciale SS-447 anche l'unica infrastruttura ferroviaria di collegamento dell'area tirrenica meridionale, quindi una area di forte interesse logistico. In Figura 44 è possibile vedere la porzione di area interessata dal movimento franoso.

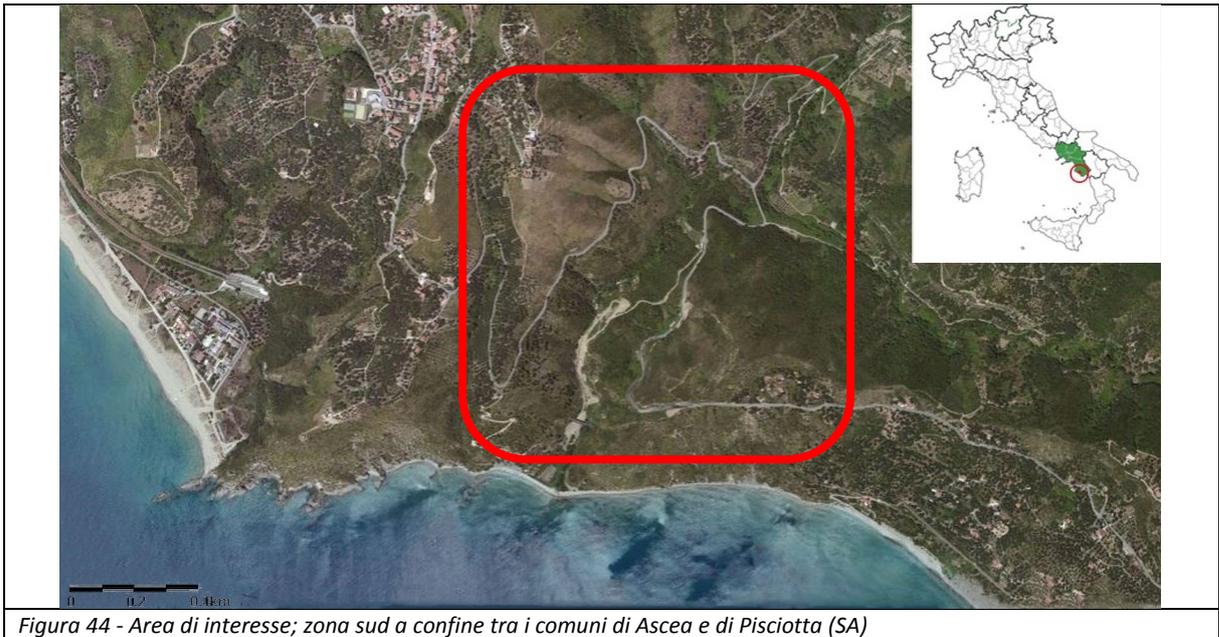


Figura 44 - Area di interesse; zona sud a confine tra i comuni di Ascea e di Pisciotta (SA)

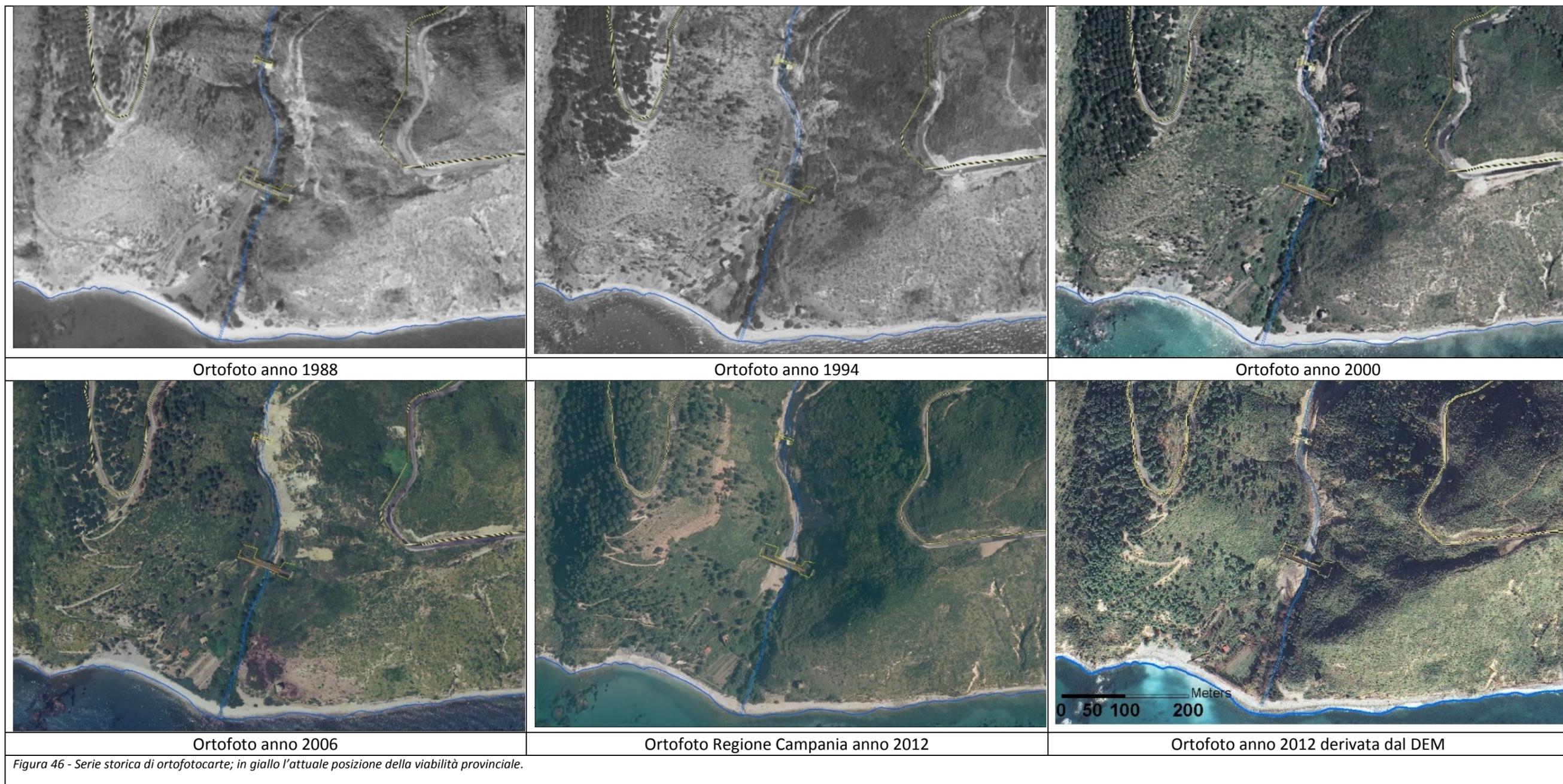
Questi movimenti franosi si distribuiscono lungo l'intero versante e si protraggono fino a valle del costone interessando l'alveo fluviale. Questo continuo movimentarsi di volumi rocciosi ha portato con il passare degli anni a un innalzamento dell'alveo fluviale portandolo pericolosamente al disotto dell'infrastruttura ferroviaria e causando sporadicamente anche allagamenti della rete ferroviaria, con conseguente chiusura della stessa.

La frana è di tipo a scorrimento rotazionale con superfici profonde lungo le quali avviene un lento scivolamento per gravità delle rocce con un volume coinvolto nell'ordine dei 2-4 milioni di metri cubi. La stratigrafia del versante è rappresentata da alternanze di rocce arenarie, marnose, calcaree ed argillose del Flish del Cilento. La Figura 45 mostra una visione d'insieme del versante in frana durante un rilievo laser scanner (Barbarella et al. 2012) interessato da un sistema franoso composto da diverse frane che differiscono per tipologia, età e stadio di attività. Una parte di queste frane ha un movimento roto traslativo lento e profondo che, verso valle, evolve secondo meccanismi più accelerati in forma di scorrimento colata e vere e proprie colate detrito-fangose.



Figura 45 - Visione panoramica del versante in frana; sistemazione delle rocce al disopra della galleria ferroviaria.

Prossimo a questo movimento franoso, se ne trova un altro che interessa la zona ad ovest del versante in questione che va a gettarsi in mare; questo movimento riguarda una paleo frana riattivata, con una nicchia di distacco prossima alla frana prima citata e con un terrazzo di frana su cui scorre la strada provinciale. Nella serie storica (1988-2012) delle ortofoto di figura 46, è possibile vedere l'evoluzione della frana.



In giallo è indicata la posizione attuale della strada provinciale: si noti come la via di collegamento segue il movimento franoso e che dal 1988 al 2012 la viabilità provinciale sia stata spostata più a valle di circa 20 metri in planimetria.

## **5.2. Applicazioni geomorfologiche**

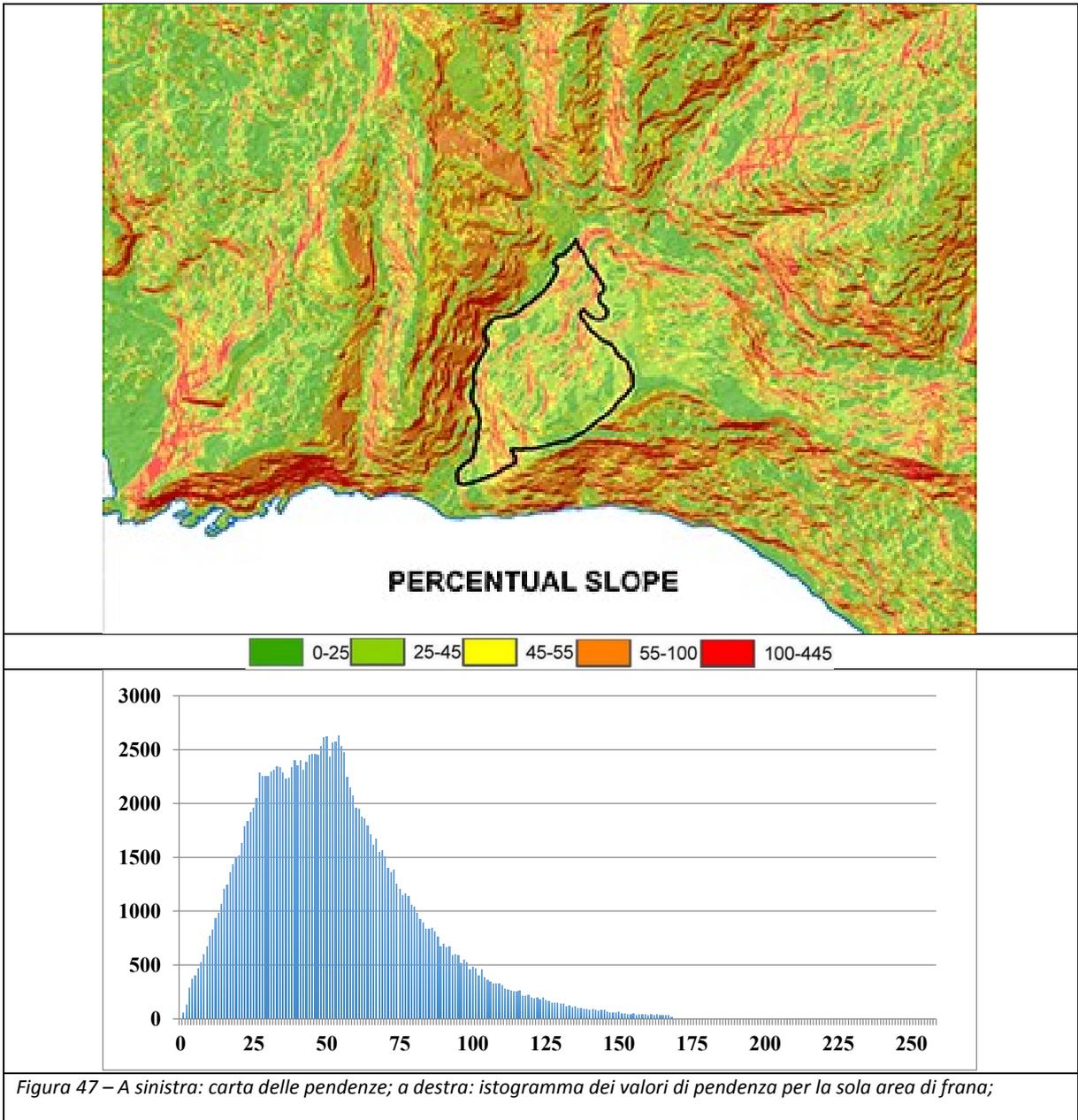
Utilizzando il modello digitale creato si è fatta una applicazione di tipo geomorfologico sull'area in frana prima indicata. È stata scelta tale area perché, come introdotto in precedenza, risulta essere di forte interesse scientifico ed esistono diverse pubblicazioni che descrivono in modo dettagliato tale ambito di frana (Barbarella et al. 2012, 2013; De Vita et al. 2011; Guida et al. 2014; Barbarella et al. 2015). L'analisi geomorfologica è stata inizialmente fatta da un geomorfologo esperto con la metodologia classica, ossia utilizzare una carta a curve di livello per discriminare e definire in modo manuale i limiti di una frana e poi digitalizzarli (Korup, 2005; Guida et al. 2011). Tali limiti di frana sono stati utilizzati assieme a degli indici geomorfometrici generati in ambiente GIS a partire dal DEM prodotto. Per ogni corpo di frana è stata eseguita una statistica descrittiva per capire se è possibile riscontrare tra essi diversità geomorfometriche e poi utilizzarle per individuare eventuali fenomeni franosi attraverso un approccio digitale automatizzato (Tarolli et al. 2012; Miet et al. 2012). Nei paragrafi successivi vengono illustrati i passaggi eseguiti, il capitolo si concluderà mostrando dei profili verticali eseguiti tra il modello digitale prodotto e uno antecedente per valutare non tanto i volumi di roccia movimentatisi negli ultimi anni ma per avere una visione degli spostamenti di essi.

### 5.2.1. Analisi degli indici geomorfometrici

Utilizzando il DEM è possibile realizzare diversi prodotti derivati e indici tra i quali alcune carte tematiche utili per l'indagine geomorfologica e geomorfometrica. Per tali analisi è stato utilizzato in ambiente GIS un tool specifico "Spatial Analyst PLUS" che aggiunge script specifici per l'analisi delle relazioni spaziali dei dati raster e che contiene strumenti di analisi speciali per le analisi geomorfometriche. In particolare sono state realizzate le carte delle pendenze, la carta dell'esposizione, le carte della curvatura planare, quella della curvatura di profilo, della curvatura totale e infine dell'indice di rugosità topografica. Per tutti gli indici viene riportato anche l'istogramma di frequenza ristretto solo ai valori utili alla classificazione, inoltre tale istogramma è relativo solo alla zona in frana.

La carta delle pendenze di Figura 47 è stata ottenuta tramite la funzione "slope" la quale attribuisce a ciascun pixel un valore di pendenza in funzione del dislivello in quota che si ha all'interno della matrice 3X3 centrata sul pixel in esame. La classificazione è stata effettuata in funzione della distribuzione dei valori di ciascun pixel. Sono state individuate 4 aree con andamento costante e di conseguenza la carta delle pendenze è stata divisa in 5 classi, aventi come estremi i valori in gradi:

- 0-25: trend crescente (verde scuro)
- 25-45: trend crescente ma minore inclinazione (verde chiaro)
- 45-55: trend decrescente (giallo)
- 55-100: coda positiva della curva (arancione)
- 100-445: coda positiva della curva (rosso)



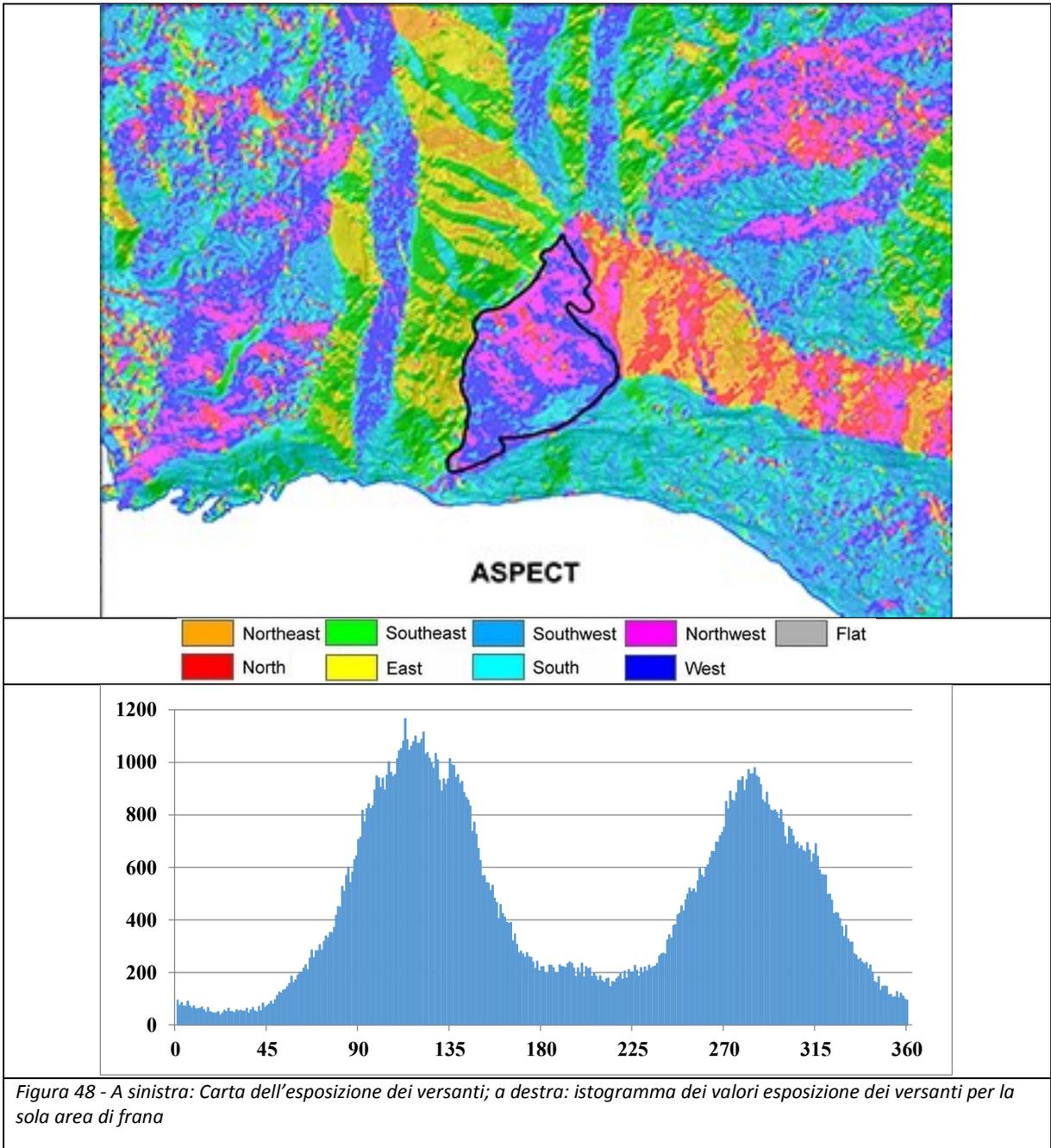
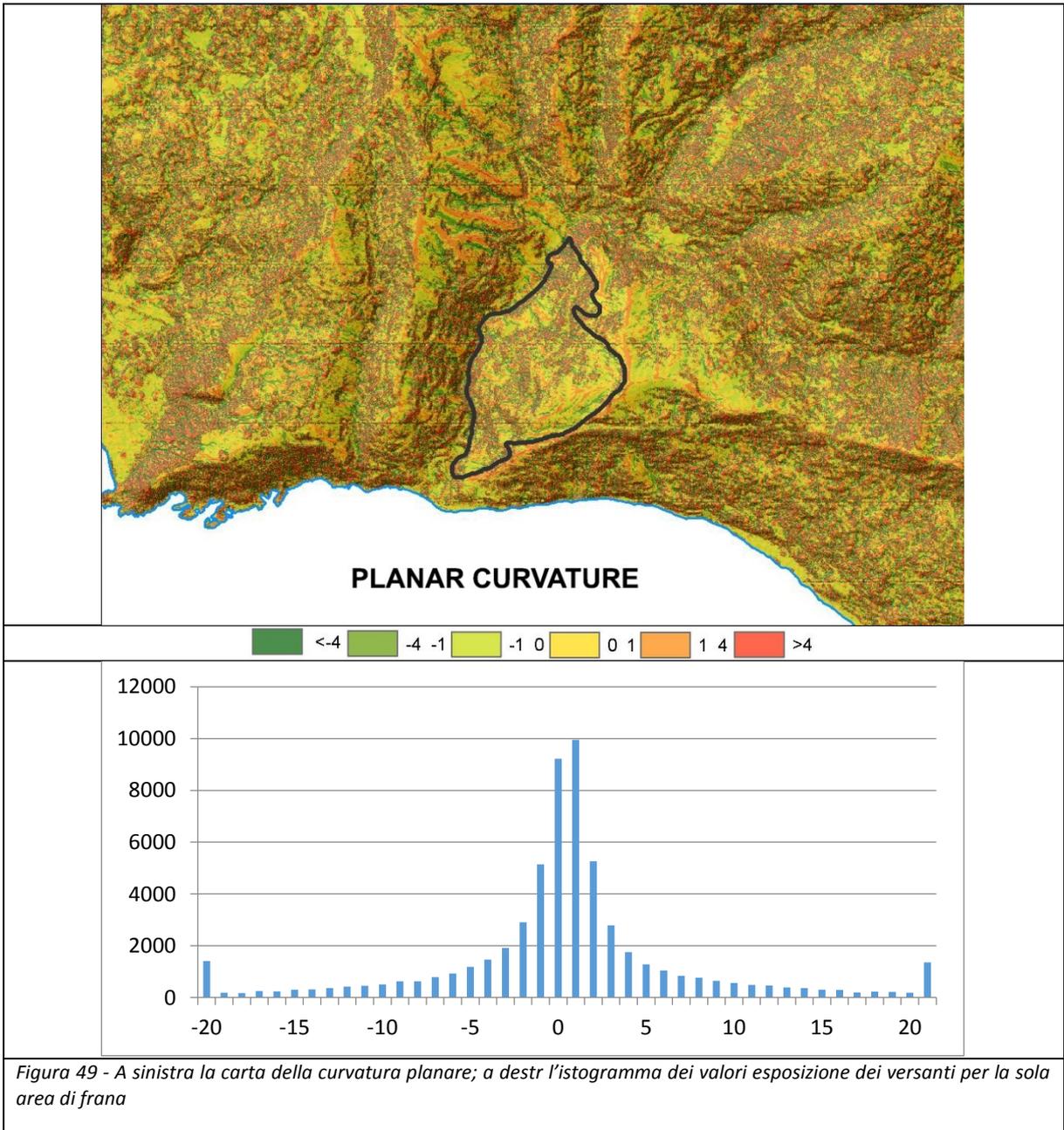


Figura 48 - A sinistra: Carta dell'esposizione dei versanti; a destra: istogramma dei valori esposizione dei versanti per la sola area di frana

La carta dell'esposizione di figura 48 è stata calcolata tramite la funzione "aspect", che attribuisce il valore di direzione ad un pixel in funzione ai valori di elevazione dei pixel vicini (maschera 3x3). La direzione viene espressa in gradi spostandosi in senso orario a partire dal Nord che ha valore 0 e i pixel che si trovano in area pianeggiante assumono valore -1 poiché non presentano direzione. La carta dell'esposizione è stata divisa in 9 classi in modo da distinguere valori negativi che indicano zone pianeggianti e poi le direzioni cardinali N, NE, E, SE, S, SW, W e NW.



Per quanto riguarda i tre tipi di curvatura sono stati calcolati tramite la funzione “curvature” che esegue la derivata seconda del DEM attraverso una maschera di dimensione standard 3X3. Per classificare i valori è stato anche qui utilizzato l’istogramma di frequenza relativo alla zona in frana; esso presenta code molto lunghe sia a destra che a sinistra rispetto all’area centrale. Dalla distribuzione si nota che il maggior numero di dati è nell’intorno dello 0 quindi si è deciso di classificare il raster in sei aree (dal minimo a -4; -1; 0; +1; +4 al massimo) ottenendo la carta riportata in figura 49. Con i colori arancione e rosso si indica una convergenza, quindi la presenza di creste o crinali, mentre le diverse sfumature di verde rappresentano una divergenza e quindi indicano le valli. Si nota che sul versante destro i crinali e le valli sono ben definiti e presentano dimensioni maggiori rispetto al versante sinistro e inoltre, su entrambi i versanti, nelle area con forti pendenze si hanno brusche variazioni tra curvatura concava e convessa.

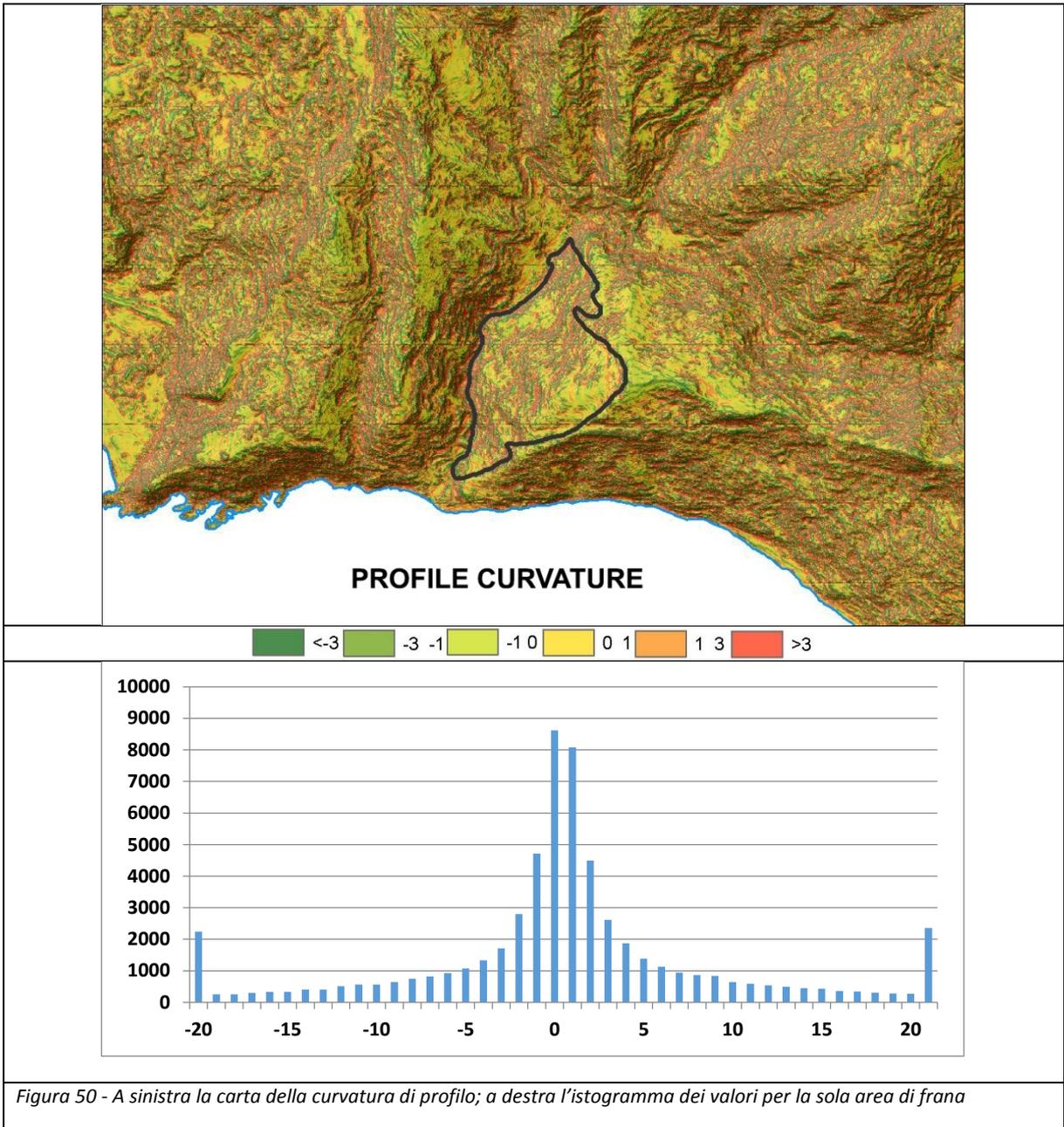
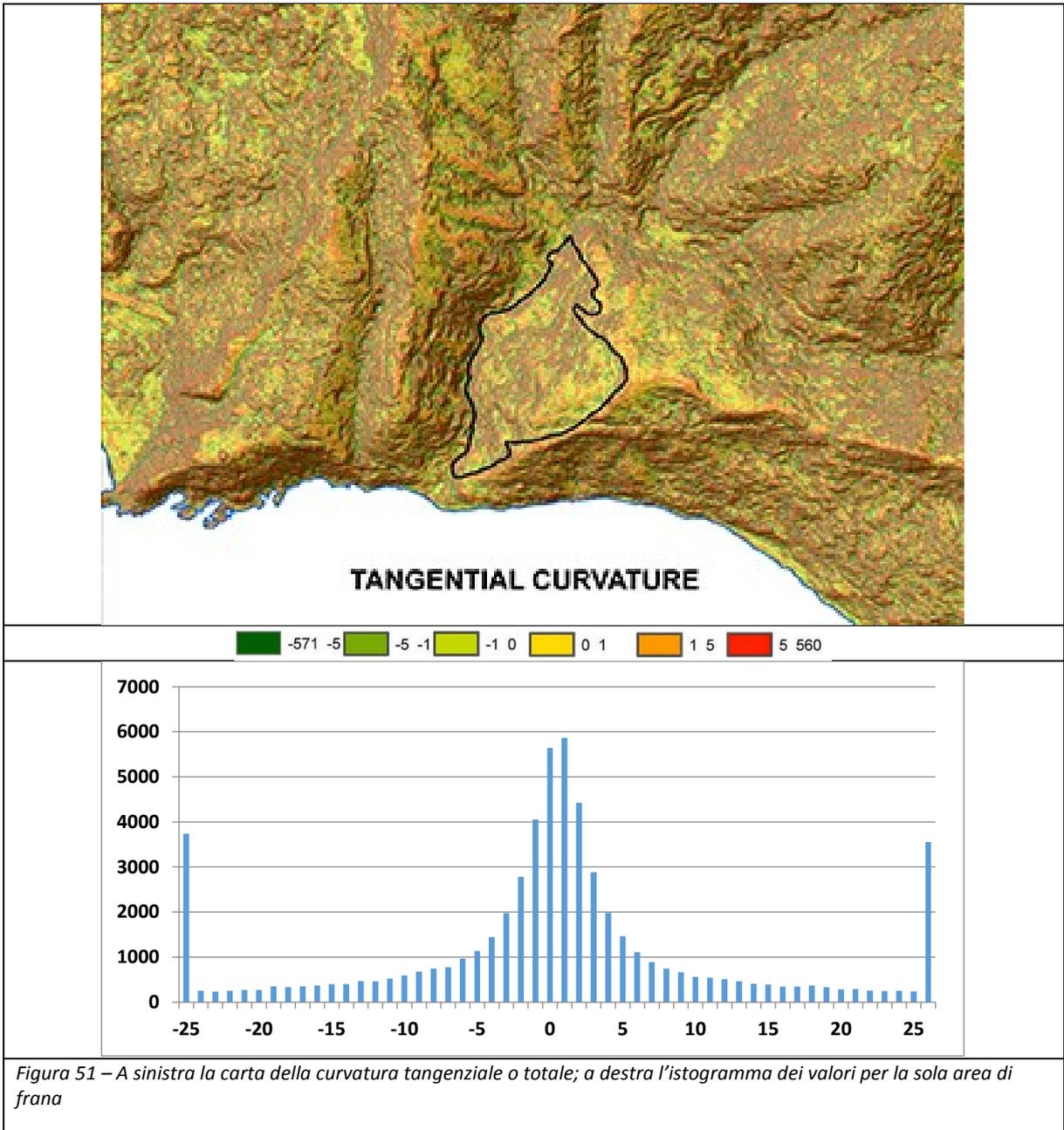


Figura 50 - A sinistra la carta della curvatura di profilo; a destra l'istogramma dei valori per la sola area di frana

L'istogramma della curvatura di profilo ha un andamento molto simile a quello ottenuto per la curvatura planare. Viste le somiglianze degli istogrammi, si è deciso di effettuare una classificazione simile a quella precedente, variando di poco gli intervalli. La classificazione usata consiste in una divisione in 6 classi (dal minimo a -3; -1; 0; +1; +3 al massimo) ottenendo la carta rappresentata in figura 50 dove si nota sul versante destro un'alternanza regolare di aree con valori negativi (giallo arancione e rosso) e positivi (sfumature di verde) che fanno presupporre la presenza di terrazzamenti. Sul versante sinistro invece c'è un'alternanza più "confusa" di valori positivi e negativi che fa pensare a mutamenti dovuti a cause non antropiche.



Nella carta della curvatura totale di figura 51 come per le precedenti, sono state usate 6 classi (dal minimo a -5; -1; 0; +1; +5 al massimo), si noti sul versante stabile (destra orografica) la presenza di terrazzamenti, indicata dall'alternarsi regolare di valli (colorate in sfumature di verde) e crinali (colorati in arancio-rosso). Anche nella zona nord-ovest è ben visibile il passaggio tra i picchi e le valli. Sul versante instabile viceversa, l'alternarsi di valli e picchi è molto più 'confuso' e si distinguono diversi picchi di piccola dimensione circondati da avvallamenti.

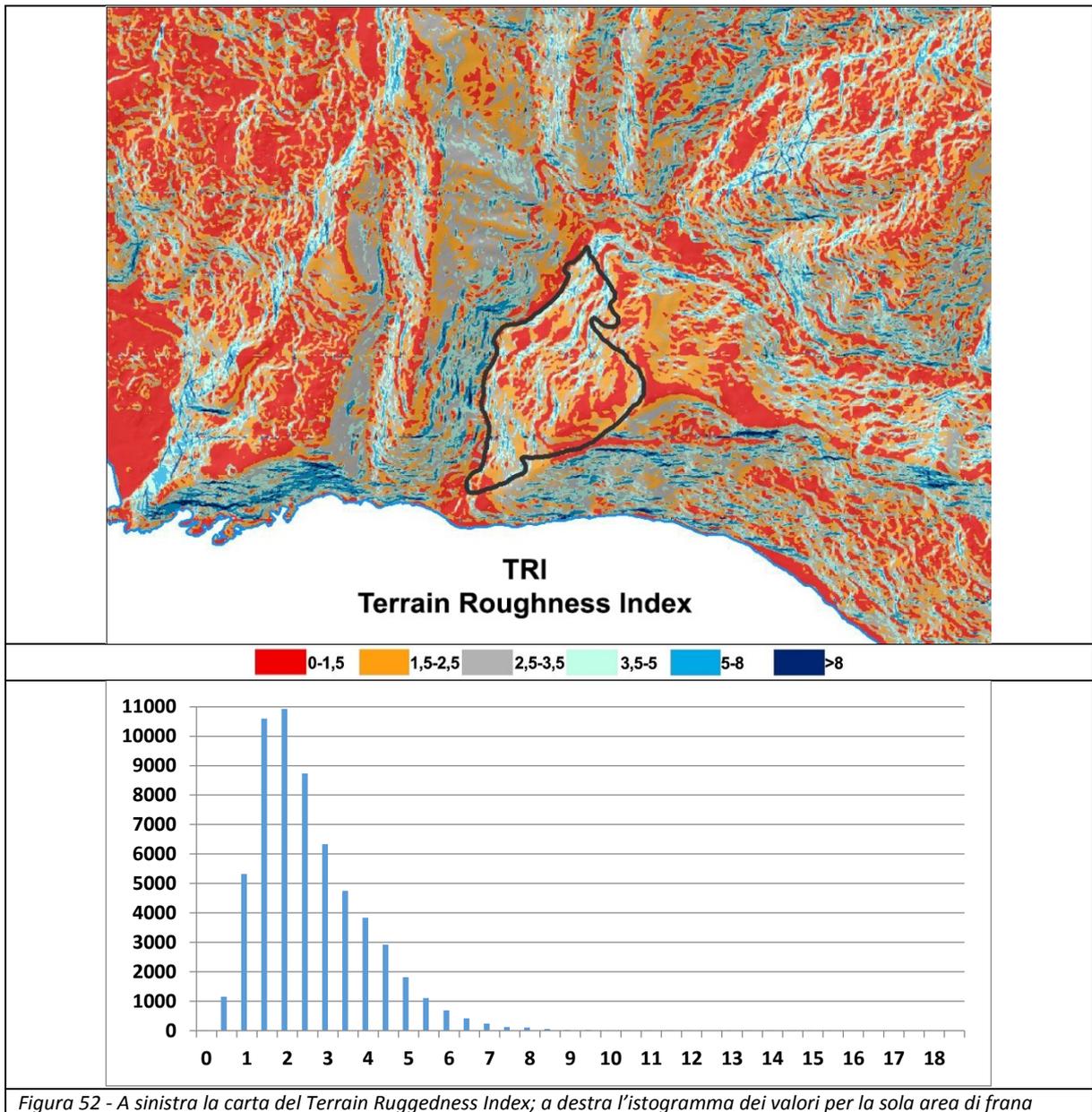


Figura 52 - A sinistra la carta del Terrain Ruggedness Index; a destra l'istogramma dei valori per la sola area di frana

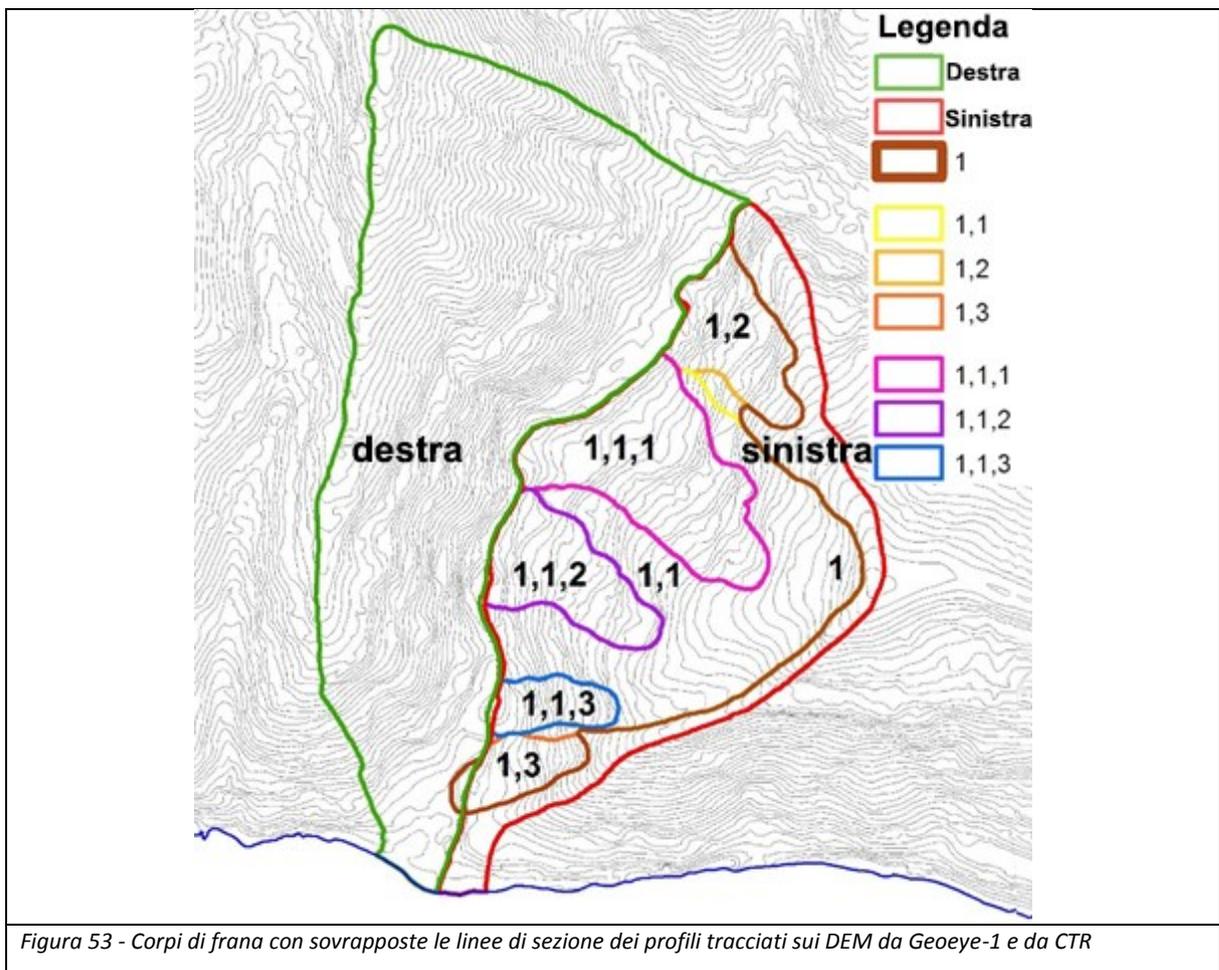
Nella carta di figura 52 sono visibili in rosso le zone con poche asperità quindi molto omogenee e, con colori variabili fino al blu scuro, le zone con cambiamenti repentini di quota.

Oltre ai parametri geomorfometrici considerati in precedenza si è calcolato anche il Terrain Roughness Index (TRI), un indice che descrive la rugosità del terreno, tramite il calcolo delle differenze di elevazione tra un punto centrale e il suo intorno dove generalmente al valore 0 si associa una superficie senza rugosità e al crescere del valore numerico aumenta la rugosità. Per questo indice esistono in letteratura diverse formulazioni (Melton, 1965; Hobson 1972; Nelleman and Thomsen 1994; Jenness 2004; Berry 2007; Grohmann et al. 2011). Queste dipendono dalla tipologia di terreno, ad esempio ghiaccio, od anche se le mappe derivano da curve di livello o da raster grid. Sono stati eseguiti gli indici ritenuti più significativi per la nostra area (Nelleman and Fry 1995; Riley et al. 1999; Nelleman et al. 2007), infine è stato scelto l'indice di Riley perché meglio discriminava la zona della frana. Dato che questa funzione non è implementata nei software GIS si è usata l'equazione:  $TRI = Y[\sum(x_{ij} - x_{00})^2]^{1/2}$ . Dove  $x_{ij}$  sono l'elevazione di ogni cella vicina e  $x_{00}$  è la cella presa in considerazione

### 5.2.2. Individuazione classica dei corpi di frana

Sulla base della carta a curve di livello e utilizzando gli indici geomorfometrici è stata eseguita una interpretazione geomorfologica atta a definire i contorni dei diversi corpi di frana per l'area presa in considerazione. I fenomeni franosi individuati differiscono per tipologia, età e stadio di attività, infatti sono state distinte in frane di prima, seconda e terza generazione. La parte superiore è caratterizzata da una deformazione dovuta ad un movimento roto traslativo lento, poi scendendo lungo i fianchi, si trasforma in una frana "strike-slip kinematics" (Fleming and Johnson, 1989). Il fianco sinistro e quello destro sono caratterizzati da una linea di rottura netta che si protrae fino a valle. Il piede di frana ha portato a un aumento di pendenza nella parte frontale della frana portando oltre che all'innescarsi di altre frane superficiali anche al fenomeno detto "denutational process". I limiti dei corpi di frana sono stati poi digitalizzati in ambiente GIS e corrispondono alle forme mostrate in figura 53 (Guida 2013, comunicazione personale), è possibile identificare nove poligoni che rappresentano:

- il versante destro contornato in verde;
- il versante sinistro contornato in rosso;
- il corpo di frana principale indicato con l'abbreviazione '1', contornato in marrone;
- le tre frane di seconda generazione, indicate con le abbreviazioni '1,1', '1,2' e '1,3', contornate rispettivamente in giallo, arancione chiare e arancione più scuro;
- le tre frane di terza generazione, indicate con le abbreviazioni '1,1,1', '1,1,2' e '1,1,3', contornate rispettivamente in viola, fucsia e blu.

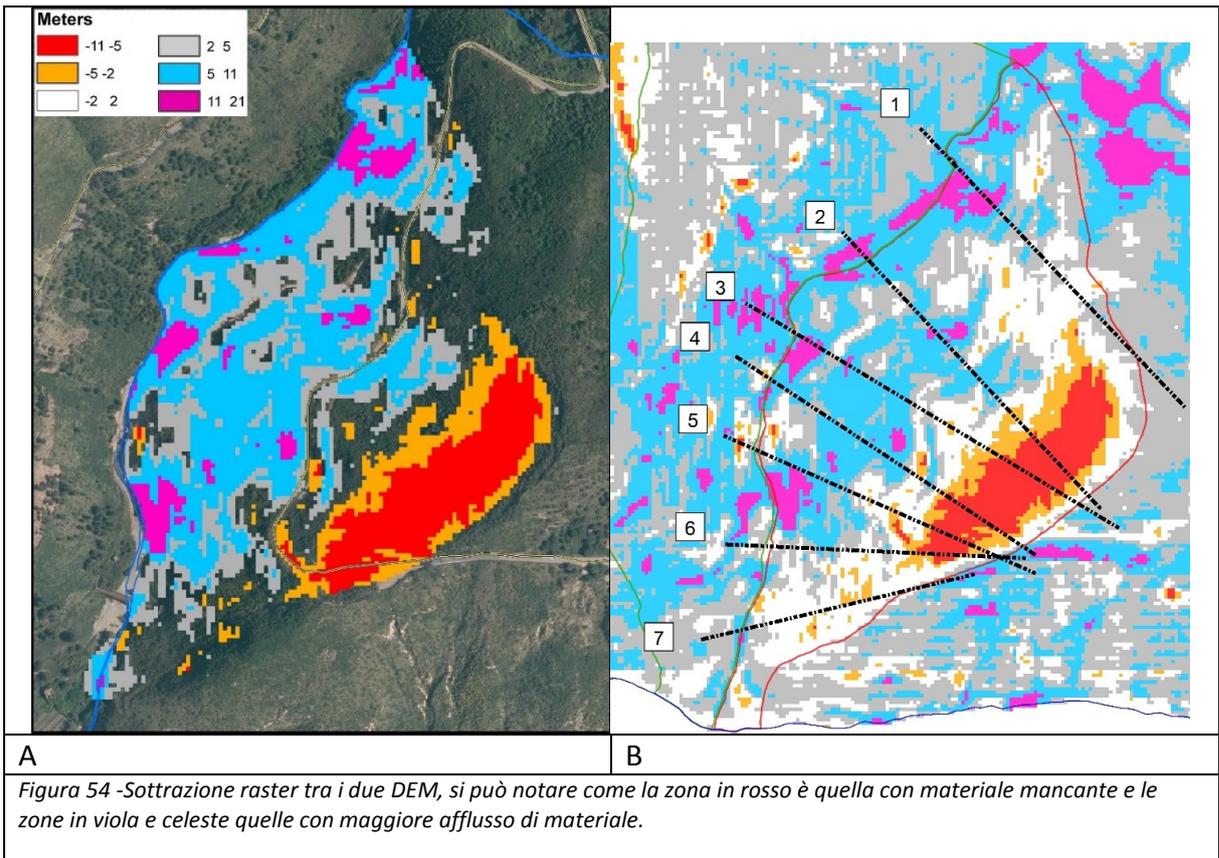


### 5.3. Movimenti franosi

Alla fase di analisi statistica degli indici geomorfometrici è seguita una fase di stima dei volumi dei movimenti franosi. L'obiettivo non è stata una stima quantitativa dei volumi di rocce coinvolte ma una stima qualitativa delle movimentazioni di materiale, ossia valutare se si riscontrano movimenti da monte a valle.

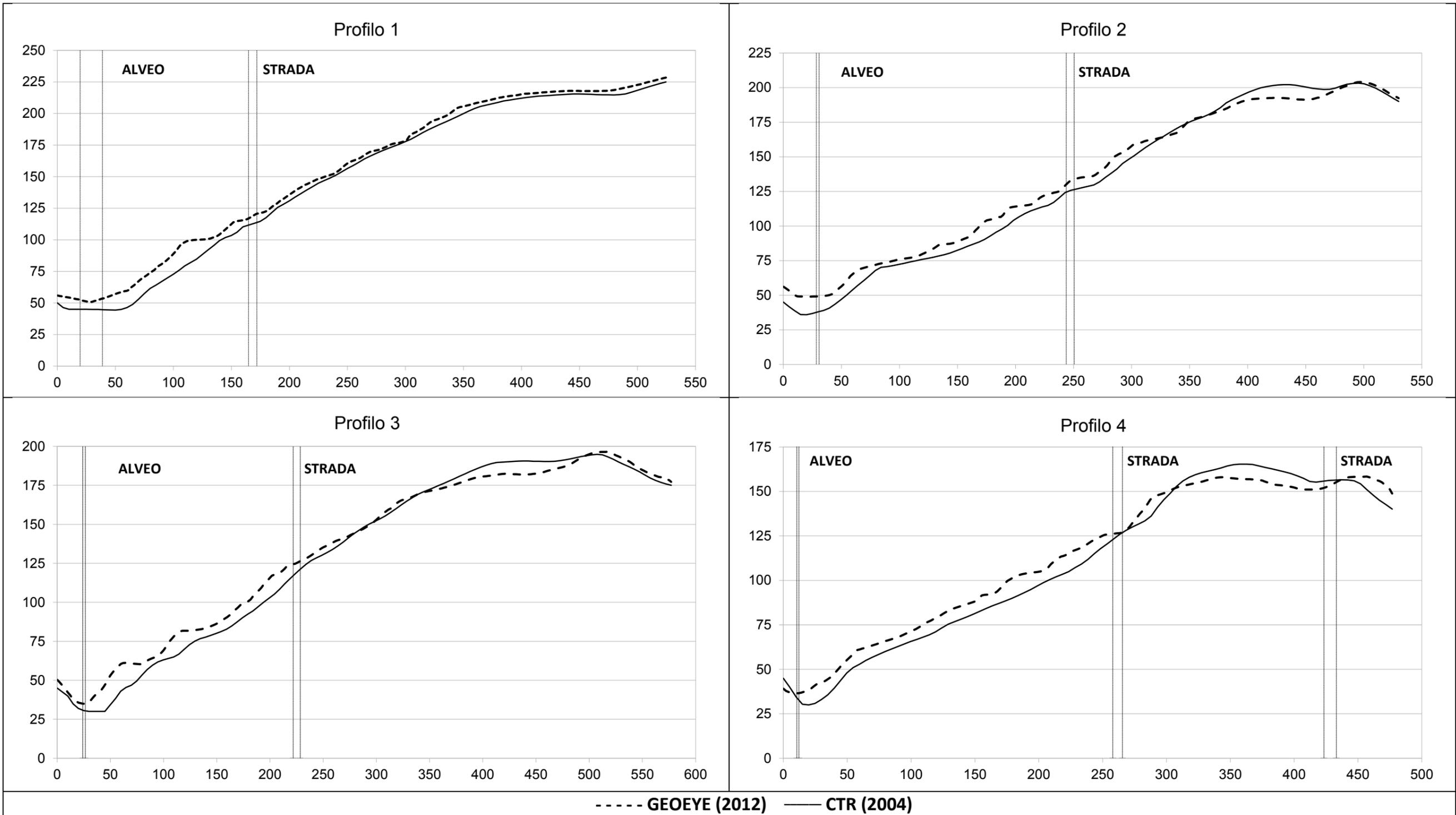
Nello studio di una frana, l'evoluzione del terreno mobilizzato durante un certo periodo è molto importante, ma non disponendo di un altro DEM derivato da immagini satellitari acquisite in epoca diversa da quelle elaborate, si è provato a confrontare il DEM prodotto con uno derivato dalle curve di livello della Carta Tecnica Regionale a scala 1:5000. Per effettuare tale analisi è stato usato lo strumento di calcolo raster presente in tutti gli ambienti GIS per eseguire una sottrazione pixel-pixel sul dato di elevazione. I modelli presi in considerazione sono stati quello generato dalle immagini ad alta risoluzione Geoeye-1 con il software SOCET SET a risoluzione spaziale di 2 metri, utilizzato in questo lavoro di tesi, e il modello digitale di elevazione prodotto dalla Regione Campania con risoluzione spaziale di 5 metri. Il primo DEM deriva da immagini acquisite agli inizi del 2012, invece il secondo deriva da una acquisizione aerofotogrammetrica eseguita circa 8 anni prima della ripresa satellitare, pressappoco nell'anno 2004-2005.

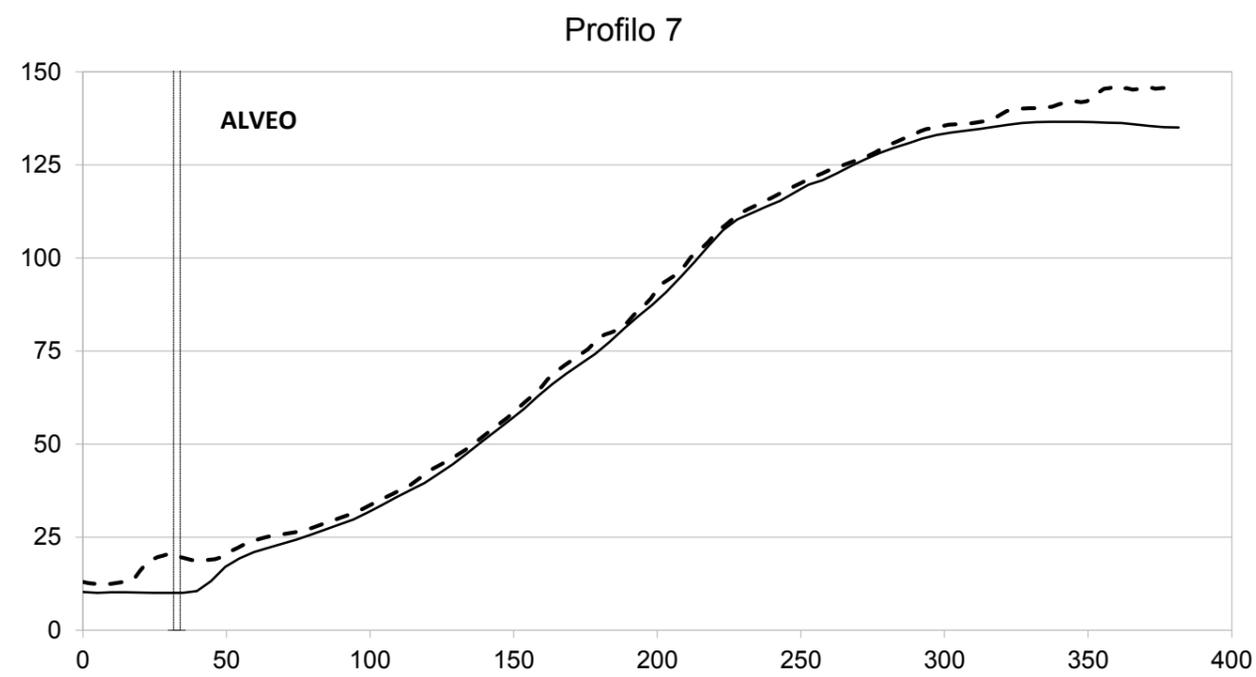
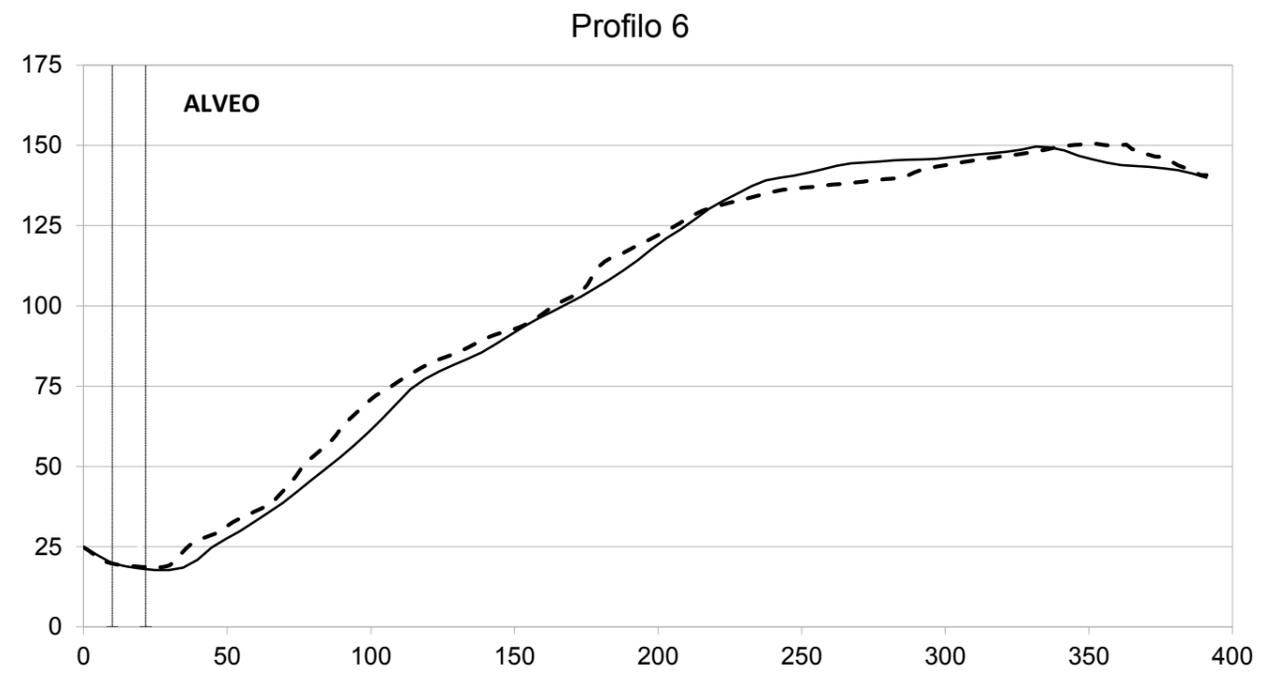
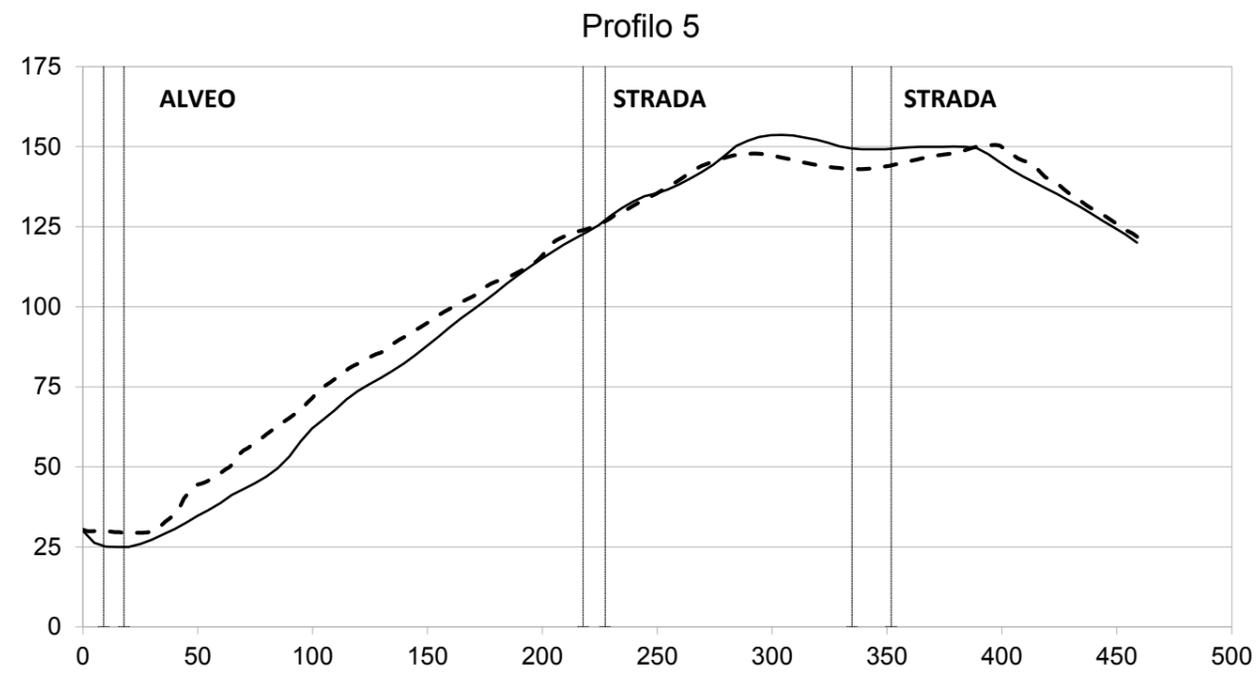
La figura 54 mostra l'elaborazione scaturita dal calcolo raster e si possono notare in rosso molte aree nella parte alta del versante per le quali risulta esserci un ammanco di terreno che per gravità si è trasferito nelle zone a valle, mentre di colore viola troviamo le aree dove si è verificata aggiunta di terreno. Questa prima analisi ci mostra la situazione avvenuta per l'area presa in considerazione, di fatto la parte superiore rispetto agli anni passati risulta essere scivolata a valle per molti metri e di contempo l'alveo fluviale (zone viola), risulta essersi alzato riempito e quindi essersi rialzato di diversi metri, come mostrato anche da De Vita et al. (2013). L'accumulo di materiale è presente principalmente tra le due gallerie (tra i corpi '1,1,2' e '1,1,3') e in corrispondenza del 'Corpo 1,2'. Il 'Corpo 1,3' anche in questo caso si differenzia dagli altri corpi di frana, non presentando variazioni nel tempo tranne nell'ultimo tratto in prossimità del torrente.



Per meglio identificare le aree con mancanza o accumulo di terreno e verificare i cambiamenti avvenuti nell'arco temporale all'interno di ogni poligono di frana, sono stati estratti alcuni profili lungo le direttrici dei vari corpi di frana.

Le linee di sezione sono visibili in figura 54B, e nella serie figura 55 sono graficati i profili corrispondenti.





----- GEOEYE (2012) — CTR (2004)

Figura 55 - Profili per i diversi corpi di frana; Geoeye-1 (linea tratteggiata) e da CTR (linea continua)

Nel profilo 1 troviamo differenze di quota nell'area al disotto della strada provinciale e nel piede di frana dove si nota che la quota del 2012 è aumentata, congruentemente al reale andamento. I profili 2,3,4,5 e 6 mostrano nettamente il fenomeno dello scivolamento, infatti nella zona alta i valori di elevazione del 2004 sono maggiori rispetto a quelli del 2012. Percorrendo il profilo verso la valle troviamo valori di elevazione pressoché simili tra le due date restando simili anche in prossimità del torrente tranne che per i profili 4 e 5 dove si trova una zona di accumulo di materiale. Questi due profili mostrano inoltre come il fondo stradale abbia subito forti modifiche in quota compromettendo la sua efficienza durante gli anni. Il profilo 7 non mostra nessuna differenza di quota se non in prossimità del torrente Fiumicello; ciò fa immaginare che nel corso degli anni si sia avuto un accumulo di materiale all'interno dell'alveo. Quest'accumulo di materiale non è riscontrabile in tutti i profili poiché nel corso degli anni sono stati svolti una serie d'interventi che prevedevano la pulizia dell'alveo al fine di evitarne l'ostruzione.



## 6. CONCLUSIONI

Il principale scopo della sperimentazione condotta è stato di studiare la possibilità di produrre, da immagini satellitari ad alta risoluzione, modelli digitali delle altezze con risoluzioni spaziali elevate e accuratissime congrue per l'utilizzo in ambito cartografico.

L'analisi dei risultati ottenuti dai test effettuati ha consentito di confrontare le procedure per la produzione di DEM con due tra i software (Geomatica della PCI Geomatics e SOCET SET della BAE System) maggiormente utilizzati in ambito aerofotogrammetrico, valutandone le criticità e i punti di forza dei due software utilizzati.

Utilizzando lo stesso pattern di punti di controllo si sono ottenuti residui di georeferenziazione molto diversi, il software SOCET SET restituisce valori doppi rispetto al software PCI Geomatica, ma che comunque restano al sotto i 2 metri.

Per i due DEM sono stati eseguiti i test di valutazione delle accuratissime, ottenendo per entrambi valori inferiori al mezzo metro in planimetria ed al metro in elevazione.

I test di accuratezza visiva, unitamente a quelli analitici, hanno dimostrato però come il software SOCET SET, pur avendo residui di georeferenziazione più elevati rispetto a quelli ottenuti dal software PCI Geomatica, riesce a produrre un DEM congruente con la reale topografia del territorio, soprattutto nelle aree con forte pendenza.

Tali caratteristiche permettono di includere entrambi i DEM nei modelli di livello 2 indicati dalle direttive USGS e adatti ad applicazioni geomorfologiche, od anche per la redazione di carte topografiche fino a scala 1:2000, come indicato dalle direttive INSPIRE.

Proprio in ambito geomorfologico è stata effettuata una applicazione in un ambito di frana utilizzando, in modo combinato, indici geomorfometrici e curve di livello derivati dal DEM prodotto. Il test ha mostrato come tali prodotti derivati possono essere impiegati sinergicamente, da un esperto geomorfologo, per individuare e delimitare dei corpi di frana. Disponendo di un DEM precedente è stato eseguito un confronto in ambiente GIS valutando le differenze in quota tra essi. La comparazione mostra una frana attiva che coinvolge un grosso volume di rocce che negli anni ha portato all'innalzamento dell'alveo fluviale. Infine dai profili creati si riscontrano aree di lisciviazione e di accumulo di materiale lapideo.

Gli sviluppi futuri di questo elaborato di tesi possono essere vari, ad esempio la generazione di DEM con diversi sensori satellitari a risoluzione spaziale più spinta, infatti ad oggi sono disponibili acquisizioni satellitari con risoluzioni spaziali fino ai 30 centimetri. Tali modelli digitali porterebbero ad analisi geomorfologiche sempre più di dettaglio ma anche ad analisi in diversi ambiti applicativi come quelli di protezione civile o di "disaster management".



# ALLEGATI

## RPC ORIGINALI DA METADATI

I valori dei metadata sono riportati parzialmente poiché non è possibile renderli pubblici

Native Rpc metadata	
Left image	Right image
LINE_OFF: +011568.00 pixels	LINE_OFF: +011568.00 pixels
SAMP_OFF: +015582.00 pixels	SAMP_OFF: +015582.00 pixels
LAT_OFF: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	LAT_OFF: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
LONG_OFF: +015.27050000 degrees	LONG_OFF: +015.27050000 degrees
HEIGHT_OFF: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	HEIGHT_OFF: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
LINE_SCALE: +011568.00 pixels	LINE_SCALE: +011568.00 pixels
SAMP_SCALE: +015582.00 pixels	SAMP_SCALE: +015582.00 pixels
LAT_SCALE: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	LAT_SCALE: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
LONG_SCALE: +000.09180000 degrees	LONG_SCALE: +000.09180000 degrees
HEIGHT_SCALE: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	HEIGHT_SCALE: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
LINE_NUM_COEFF_1: +5.632797461389952E-03	LINE_NUM_COEFF_1: -9.088599869461389E-03
LINE_NUM_COEFF_2: -4.125713000109297E-03	LINE_NUM_COEFF_2: -3.952585902828115E-03
LINE_NUM_COEFF_3: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	LINE_NUM_COEFF_3: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
LINE_NUM_COEFF_4: +2.572718498938571E-02	LINE_NUM_COEFF_4: -6.672457186875017E-02
LINE_NUM_COEFF_5: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	LINE_NUM_COEFF_5: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
LINE_NUM_COEFF_6: +2.473198889007620E-05	LINE_NUM_COEFF_6: +1.211667517570856E-03
LINE_NUM_COEFF_7: +3.790176580704486E-03	LINE_NUM_COEFF_7: -6.954076005672071E-03
LINE_NUM_COEFF_8: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	LINE_NUM_COEFF_8: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
LINE_NUM_COEFF_9: -2.168232581277696E-03	LINE_NUM_COEFF_9: +5.106948349819300E-03
LINE_NUM_COEFF_10: -1.069191489625244E-04	LINE_NUM_COEFF_10: -4.666526812563497E-04
LINE_NUM_COEFF_11: -2.145712233448149E-05	LINE_NUM_COEFF_11: +4.492441137072165E-06
LINE_NUM_COEFF_12: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	LINE_NUM_COEFF_12: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
LINE_NUM_COEFF_13: +1.343344330820891E-05	LINE_NUM_COEFF_13: -5.041198208330600E-05
LINE_NUM_COEFF_14: +6.957569821954697E-08	LINE_NUM_COEFF_14: -1.640984596161999E-06
LINE_NUM_COEFF_15: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	LINE_NUM_COEFF_15: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
LINE_NUM_COEFF_16: -5.266560224228956E-05	LINE_NUM_COEFF_16: -1.851647722157594E-05
LINE_NUM_COEFF_17: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	LINE_NUM_COEFF_17: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
LINE_NUM_COEFF_18: +2.385724700009928E-06	LINE_NUM_COEFF_18: -4.762795682560616E-06
LINE_NUM_COEFF_19: +1.376280251091388E-05	LINE_NUM_COEFF_19: -9.478881270441959E-05
LINE_NUM_COEFF_20: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	LINE_NUM_COEFF_20: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
LINE_DEN_COEFF_1: +1.000000000000000E+00	LINE_DEN_COEFF_1: +1.000000000000000E+00
LINE_DEN_COEFF_2: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	LINE_DEN_COEFF_2: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
LINE_DEN_COEFF_3: +2.149780418330181E-03	LINE_DEN_COEFF_3: -5.078861953766840E-03
LINE_DEN_COEFF_4: -7.567435706519009E-03	LINE_DEN_COEFF_4: +3.541141832720650E-03
LINE_DEN_COEFF_5: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	LINE_DEN_COEFF_5: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
LINE_DEN_COEFF_6: +2.476838052411721E-05	LINE_DEN_COEFF_6: +6.587356326424252E-05
LINE_DEN_COEFF_7: -2.638912265143100E-05	LINE_DEN_COEFF_7: +1.224470695937807E-04
LINE_DEN_COEFF_8: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	LINE_DEN_COEFF_8: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
LINE_DEN_COEFF_9: +5.235072918295039E-05	LINE_DEN_COEFF_9: +1.844136279180545E-05
LINE_DEN_COEFF_10: +1.666411773086458E-05	LINE_DEN_COEFF_10: -3.164080971447059E-05
LINE_DEN_COEFF_11: +2.690081537494109E-08	LINE_DEN_COEFF_11: -2.189871878105213E-08
LINE_DEN_COEFF_12: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	LINE_DEN_COEFF_12: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
LINE_DEN_COEFF_13: -6.887710196811208E-09	LINE_DEN_COEFF_13: +1.949699941174648E-08
LINE_DEN_COEFF_14: -2.460750023221328E-08	LINE_DEN_COEFF_14: -5.857597697952754E-08
LINE_DEN_COEFF_15: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	LINE_DEN_COEFF_15: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
LINE_DEN_COEFF_16: +1.806691397389746E-08	LINE_DEN_COEFF_16: +1.353236003156377E-08
LINE_DEN_COEFF_17: +3.925037331221747E-08	LINE_DEN_COEFF_17: -2.148583674251431E-07
LINE_DEN_COEFF_18: +2.547201796521791E-08	LINE_DEN_COEFF_18: -8.548291164939514E-08
LINE_DEN_COEFF_19: -1.235330047280024E-07	LINE_DEN_COEFF_19: +2.955969561139788E-08
LINE_DEN_COEFF_20: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	LINE_DEN_COEFF_20: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
SAMP_NUM_COEFF_1: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	SAMP_NUM_COEFF_1: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx

SAMP_NUM_COEFF_2: +1.004102446192297E+00	SAMP_NUM_COEFF_2: +1.004142099317687E+00
SAMP_NUM_COEFF_3: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	SAMP_NUM_COEFF_3: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
SAMP_NUM_COEFF_4: -4.105366001579239E-02	SAMP_NUM_COEFF_4: -2.665903755174855E-02
SAMP_NUM_COEFF_5: +1.402325917576382E-03	SAMP_NUM_COEFF_5: -5.822240378227795E-03
SAMP_NUM_COEFF_6: -5.812624425820720E-03	SAMP_NUM_COEFF_6: +5.712087306581231E-03
SAMP_NUM_COEFF_7: +3.066201689734285E-04	SAMP_NUM_COEFF_7: +4.430830679205634E-04
SAMP_NUM_COEFF_8: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	SAMP_NUM_COEFF_8: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
SAMP_NUM_COEFF_9: -6.248506898404740E-06	SAMP_NUM_COEFF_9: +9.556628708201158E-06
SAMP_NUM_COEFF_10: +2.455300721771185E-04	SAMP_NUM_COEFF_10: -1.105971256535960E-04
SAMP_NUM_COEFF_11: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	SAMP_NUM_COEFF_11: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
SAMP_NUM_COEFF_12: -2.965862376613027E-05	SAMP_NUM_COEFF_12: +5.114783477117166E-05
SAMP_NUM_COEFF_13: +5.053042378896868E-05	SAMP_NUM_COEFF_13: +2.192945837901475E-05
SAMP_NUM_COEFF_14: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	SAMP_NUM_COEFF_14: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
SAMP_NUM_COEFF_15: -8.493419039515457E-06	SAMP_NUM_COEFF_15: +6.700604855171762E-05
SAMP_NUM_COEFF_16: -1.218754497181285E-07	SAMP_NUM_COEFF_16: -3.626913807270455E-08
SAMP_NUM_COEFF_17: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	SAMP_NUM_COEFF_17: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
SAMP_NUM_COEFF_18: +1.527557190038714E-05	SAMP_NUM_COEFF_18: +3.019635279971442E-05
SAMP_NUM_COEFF_19: -1.125987220051302E-06	SAMP_NUM_COEFF_19: -5.019041893881710E-06
SAMP_NUM_COEFF_20: -3.090667403907915E-07	SAMP_NUM_COEFF_20: +8.226089504044678E-07
SAMP_DEN_COEFF_1: +1.000000000000000E+00	SAMP_DEN_COEFF_1: +1.000000000000000E+00
SAMP_DEN_COEFF_2: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	SAMP_DEN_COEFF_2: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
SAMP_DEN_COEFF_3: +2.149780418330181E-03	SAMP_DEN_COEFF_3: -5.078861953766840E-03
SAMP_DEN_COEFF_4: -7.567435706519009E-03	SAMP_DEN_COEFF_4: +3.541141832720650E-03
SAMP_DEN_COEFF_5: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	SAMP_DEN_COEFF_5: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
SAMP_DEN_COEFF_6: +2.476838052411721E-05	SAMP_DEN_COEFF_6: +6.587356326424252E-05
SAMP_DEN_COEFF_7: -2.638912265143100E-05	SAMP_DEN_COEFF_7: +1.224470695937807E-04
SAMP_DEN_COEFF_8: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	SAMP_DEN_COEFF_8: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
SAMP_DEN_COEFF_9: +5.235072918295039E-05	SAMP_DEN_COEFF_9: +1.844136279180545E-05
SAMP_DEN_COEFF_10: +1.666411773086458E-05	SAMP_DEN_COEFF_10: -3.164080971447059E-05
SAMP_DEN_COEFF_11: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	SAMP_DEN_COEFF_11: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
SAMP_DEN_COEFF_12: +6.216977121344636E-09	SAMP_DEN_COEFF_12: -1.302143457087275E-08
SAMP_DEN_COEFF_13: -6.887710196811208E-09	SAMP_DEN_COEFF_13: +1.949699941174648E-08
SAMP_DEN_COEFF_14: -2.460750023221328E-08	SAMP_DEN_COEFF_14: -5.857597697952754E-08
SAMP_DEN_COEFF_15: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	SAMP_DEN_COEFF_15: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
SAMP_DEN_COEFF_16: +1.806691397389746E-08	SAMP_DEN_COEFF_16: +1.353236003156377E-08
SAMP_DEN_COEFF_17: +3.925037331221747E-08	SAMP_DEN_COEFF_17: -2.148583674251431E-07
SAMP_DEN_COEFF_18: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	SAMP_DEN_COEFF_18: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
SAMP_DEN_COEFF_19: -1.235330047280024E-07	SAMP_DEN_COEFF_19: +2.955969561139788E-08
SAMP_DEN_COEFF_20: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	SAMP_DEN_COEFF_20: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
ERR_BIAS: 0001.09 meters	ERR_BIAS: 0001.09 meters
ERR_RAND: 0000.25 meters	ERR_RAND: 0000.25 meters

## PROVE ESEGUITE CON PCI

### Modello matematico di Toutin da GPS - GEOMATICA

MODELLO MATEMATICO	TOUTIN
TIPOLOGIA PUNTI	GCP
NUMERO PUNTI	20GCP - 26CP
RESIDUI	PROVE ESEGUITE CON 1m planimetria 1m altimetria, 1 pixel xy Residuo GCPs: 40 X RMS 0.32 Y RMS 0.29 Check points: 52 X RMS 0.84 Y RMS 0.92
	48GCP
	PROVE ESEGUITE CON 1m planimetria 1m altimetria, 1 pixel xy Residuo GCPs: 96 X RMS 1.17 Y RMS 11.86
	48GCP
	PROVE ESEGUITE CON 0,1m planimetria 0,1m altimetria 0,1pixel xy GCPs: 96 X RMS 0.45 Y RMS 1.07
	34GCP - 14CP
	GCPs: 68 X RMS 0.37 Y RMS 1.04 Check points: 28 X RMS 0.70 Y RMS 1.22
	35GCP - 13CP
	PROVE ESEGUITE CON 0,1m planimetria 0,1m altimetria 0,1pixel xy GCPs: 70 X RMS 0.44 Y RMS 1.15 Check points: 26 X RMS 0.52 Y RMS 0.96
RISULTATO DEM	Non buono fino 1 metro
RISULTATO CURVE DI LIVELLO	Non buone fino ai 2 metri

### Modello matematico di Toutin da CTR - GEOMATICA

MODELLO MATEMATICO	TOUTIN
TIPOLOGIA PUNTI	MGCP
NUMERO PUNTI	53GCP - 22CP
RESIDUI	PROVE ESEGUITE CON 1m planimetria 1,5m altimetria, 1 pixel xy - Residuo GCPs: 106 X RMS 0.34 Y RMS 0.36 Check points: 44 X RMS 0.87 Y RMS 1.50
NUMERO PUNTI	53GCP - 20CP
	PROVE ESEGUITE CON 1m planimetria 1 m altimetria, 1 pixel xy - Residuo GCPs: 106 X RMS 0.34 Y RMS 0.33 Check points: 40 X RMS 0.46 Y RMS 0.59
NUMERO PUNTI	56GCP - 19CP
	PROVE ESEGUITE CON 1m planimetria 1,5m altimetria, 1 pixel xy - Residuo GCPs: 112 X RMS 0,40 Y RMS 0,55 Check points: 38 X RMS 0,81 Y RMS 1,42
NUMERO PUNTI	75GCP
	PROVE ESEGUITE CON 1m planimetria 1,5m altimetria, 1 pixel xy - Residuo GCPs: 150 X RMS 0.50 Y RMS 0.81
RISULTATO DEM	Non buono fino ai 2 metri
RISULTATO CURVE DI LIVELLO	Non buone fino ai 2 metri

# PARAMETRI UTILIZZATI NEL MODELLO DEFINITIVO

## Modello matematico Toutin

GEOMATICA		
MODELLO MATEMATICO	Toutin	
TIPOLOGIA PUNTI	GGCP	
NUMERO PUNTI	15 GCP +14 CP +11 TP	
PARAMETRI PER IL DEM	Dem detail	ExtraHigh to low
	Terrain type	Mountainous
	Channel type	32bit
	Fill holes	NO
	Smoothing filter	Low
	Wallis filter	Yes
	Score channel	Yes
	resolution	Da 0,5m fino a 2 m

## Modello matematico RPF

GEOMATICA		
MODELLO MATEMATICO	RPF	
TIPOLOGIA PUNTI	MGCP	
NUMERO PUNTI	53GCP	
PARAMETRI PER IL DEM	Dem detail	High
	Terrain type	Mountainous
	Channel type	32bit
	Fill holes	NO
	Smoothing filter	Low
	Wallis filter	Yes
	Score channel	Yes
	Resolution	Da 1m fino a 2 m

## Modello matematico Rigorous Simultaneous

SOCET SET		
MODELLO MATEMATICO	Rigorous Simultaneous	
TIPOLOGIA PUNTI	GCP+TIEPOINTS	
NUMERO PUNTI	15 GCP +14 CP +11 TP	
PARAMETRI PER IL DEM	Formato	Grid
	Filtro di ricerca	Adaptative ATE
	smoothing	high
	Precision/speed	High/low
	TIN masspoint	no thinnig
	resolution	Da 0,5m a 2 m
	Seed DEM	automatico
	RISULTATO DEM	ottimo a 1metro dopo filtraggio ottimo a 2 metri
RISULTATO CURVE DI LIVELLO	ottimo a 1metro dopo filtraggio ottimo a 2 metri	

# RESIDUI DI GEOREFERENZIAZIONE MODELLO FINALE

PCI Geomatica Modello matematico di Toutin per GPS

TOUTIN

(VERSIONE FINALE)

PUNTI USATI:

15 GCP

14 CP

11 TP

INDETERMINAZIONI:

0,1 PLANIMETRIA 0,1 ALTIMETRIA 1 PIXEL

GCPs: 30 X RMS 0.31 Y RMS 0.52

Check points: 28 X RMS 0.43 Y RMS 0.50

Tie points: 11 X RMS 0.11 Y RMS 0.02

Point ID	Diff	Diff X	Diff Y	Diff Z	Type	No of images	Input X	Input Y	Input Z
P11	0,974	0,578	0,71	0,332	Check	2	529059,185	4445627,319	600,454
P21	0,942	0,081	-0,918	-0,195	GCP	2	526129,844	4441467,547	292,387
P4	0,933	0,636	0,44	-0,522	Check	2	525309,780	4446275,110	685,819
P9R	0,923	-0,415	-0,814	0,131	GCP	2	524031,807	4445589,274	742,891
P14	0,906	0,203	0,782	0,41	GCP	2	520850,832	4443316,736	510,013
P22	0,901	-0,255	-0,119	0,856	GCP	2	519213,114	4440160,796	201,057
P2B	0,893	0,141	0,851	-0,233	Check	2	518569,483	4447747,845	276,682
P20	0,888	0,341	0,684	0,451	GCP	2	523491,567	4441652,521	524,403
P17B	0,873	0,516	0,531	0,463	Check	2	516904,001	4442671,026	100,013
P17	0,868	0,484	0,684	-0,227	Check	2	516324,826	4441939,669	155,911
P10A	0,838	-0,421	-0,535	-0,489	GCP	2	526153,715	4445778,065	602,599
P18A	0,81	0,585	0,558	0,049	Check	2	519588,222	4442243,652	420,006
P23A	0,809	0,093	0,231	-0,77	Check	2	520860,559	4440294,103	381,813
P26B	0,798	0,624	0,426	-0,256	Check	2	523428,842	4438091,066	408,515
P12A	0,761	0,23	-0,579	-0,437	GCP	2	515716,089	4443435,352	210,132
P13	0,693	-0,057	0,144	-0,675	GCP	2	518560,564	4442881,073	347,132
P24B	0,671	0,154	0,215	-0,617	Check	2	524492,756	4440912,769	360,329
P6	0,663	-0,157	0,644	0,01	GCP	2	529597,948	4446341,206	599,505
P25A	0,561	-0,186	0,163	-0,504	GCP	2	521190,848	4438644,418	368,186
P7A	0,548	0,137	0,458	0,267	Check	2	516109,341	4445545,261	34,824
P15A	0,502	0,211	0,315	0,329	Check	2	524787,609	4443651,654	502,061
P21A	0,497	0,263	0,28	0,315	Check	2	525789,931	4442051,177	325,414
P16A	0,437	0,261	0,347	-0,044	GCP	2	527657,683	4444371,541	449,465
P28A	0,433	-0,077	0,029	0,425	GCP	2	518643,252	4446071,332	124,76
P3	0,372	0,363	-0,017	-0,08	GCP	2	521364,003	4446408,509	396,22
P8B	0,347	0,097	0,329	-0,049	Check	2	519880,338	4444621,454	564,824
P1A	0,344	-0,124	0,321	0,006	GCP	2	516609,551	4447235,984	216,868
P5B	0,318	0,305	0,044	-0,079	Check	2	527818,404	4445782,635	651,526
P5	0,286	0,214	-0,133	0,135	GCP	2	528405,682	4446769,831	1020,199

Point ID	Res	Res X	Res Y	Type	Image ID	Ground X	Ground Y	Ground Z	Comp X	Comp Y
T0023	0.269	-0.263	0.056	TP	pan_0000	525501.417	4444425.150	528.132	525501.15	4444425.21
T0023	0.268	0.263	-0.056	TP	pan_0001	525501.417	4444425.150	528.132	525501.68	4444425.09
T0028	0.133	-0.130	0.027	TP	pan_0000	521327.754	4444332.170	538.274	521327.62	4444332.20
T0028	0.132	0.130	-0.027	TP	pan_0001	521327.754	4444332.170	538.274	521327.88	4444332.14
T0024	0.119	-0.116	0.024	TP	pan_0001	516747.987	4442022.808	124.490	516747.87	4442022.83
T0024	0.119	0.116	-0.024	TP	pan_0000	516747.987	4442022.808	124.490	516748.10	4442022.78
T0029	0.089	-0.087	0.018	TP	pan_0000	515421.295	4446016.489	111.332	515421.21	4446016.51
T0029	0.089	0.087	-0.018	TP	pan_0001	515421.295	4446016.489	111.332	515421.38	4446016.47
T0025	0.084	-0.083	0.017	TP	pan_0000	516652.289	4443572.675	310.445	516652.21	4443572.69
T0025	0.084	0.083	-0.017	TP	pan_0001	516652.289	4443572.675	310.445	516652.37	4443572.66
T0032	0.070	-0.069	0.015	TP	pan_0000	525116.094	4447569.474	840.304	525116.02	4447569.49
T0032	0.070	0.069	-0.015	TP	pan_0001	525116.094	4447569.474	840.304	525116.16	4447569.46
T0031	0.058	-0.056	0.012	TP	pan_0000	519762.762	4446534.007	162.617	519762.71	4446534.02
T0031	0.058	0.056	-0.012	TP	pan_0001	519762.762	4446534.007	162.617	519762.82	4446534.00
T0026	0.056	-0.055	0.012	TP	pan_0001	523396.706	4439409.315	570.946	523396.65	4439409.33
T0026	0.056	0.055	-0.012	TP	pan_0000	523396.706	4439409.315	570.946	523396.76	4439409.30
T0027	0.049	-0.048	0.010	TP	pan_0001	526178.162	4447000.485	879.189	526178.11	4447000.50
T0027	0.049	0.048	-0.010	TP	pan_0000	526178.162	4447000.485	879.189	526178.21	4447000.47
T0030	0.037	-0.037	0.008	TP	pan_0001	521671.320	4437856.688	125.041	521671.28	4437856.70
T0030	0.037	0.037	-0.008	TP	pan_0000	521671.320	4437856.688	125.041	521671.36	4437856.68
T0022	0.007	-0.006	0.001	TP	pan_0000	518934.129	4440886.379	236.807	518934.12	4440886.38
T0022	0.007	0.006	-0.001	TP	pan_0001	518934.129	4440886.379	236.807	518934.14	4440886.38

PCI Geomatica Modello matematico RPF per CTR

RPF FROM GCP

PUNTI USATI: GGCP

46 GCP

0 CP

0 TP

INDETERMINAZIONI:

0,1 PLANIMETRIA 0,1 ALTIMETRIA

1 PIXEL

GCPs: 92 X RMS 0.47 Y RMS 0.56										
Check points: 0 X RMS Y RMS										
Point ID	Res	Res X	Res Y	Type	Image ID	Image X	Image Y	Comp X	Comp Y	
P18	2.50	1.71	1.83	GCP	po_3803955_pan_0000000		9448.0	12204.9	9449.7	12206.7
P11	1.84	1.19	1.40	GCP	po_3803955_pan_0000000		27450.8	5516.5	27452.0	5517.9
P18A	1.63	-1.25	-1.04	GCP	po_3803955_pan_0000000		8628.9	12237.0	8627.6	12236.0
P7	1.44	0.70	-1.25	GCP	po_3803955_pan_0010000		2430.2	5513.9	2430.9	5512.6
P7A	1.19	-0.61	1.02	GCP	po_3803955_pan_0010000		1874.1	5845.0	1873.5	5846.0
P24	1.17	-1.10	0.37	GCP	po_3803955_pan_0000000		18600.4	14761.2	18599.3	14761.6
P1	1.15	1.11	-0.30	GCP	po_3803955_pan_0000000		2838.9	2165.9	2840.0	2165.6
P24A	1.09	0.72	0.82	GCP	po_3803955_pan_0010000		18524.5	14741.5	18525.2	14742.3
P22A	1.06	-0.43	0.97	GCP	po_3803955_pan_0000000		8064.0	16362.4	8063.6	16363.4
P18	1.05	0.13	1.04	GCP	po_3803955_pan_0010000		9478.9	12074.9	9479.0	12075.9
P1A	1.04	-0.93	0.46	GCP	po_3803955_pan_0000000		2812.0	2190.0	2811.1	2190.5
P11A	1.04	-0.88	-0.54	GCP	po_3803955_pan_0000000		27416.9	5542.9	27416.0	5542.4
P11	1.03	-0.45	0.93	GCP	po_3803955_pan_0010000		27522.0	5201.9	27521.6	5202.8
P22	0.99	0.25	-0.96	GCP	po_3803955_pan_0000000		8030.0	16334.3	8030.2	16333.3
P2B	0.99	-0.98	0.13	GCP	po_3803955_pan_0000000		6689.5	1184.1	6688.5	1184.2
P28A	0.98	-0.02	0.98	GCP	po_3803955_pan_0010000		6898.0	4715.7	6898.0	4716.7
P28	0.97	-0.14	-0.96	GCP	po_3803955_pan_0010000		6951.0	4965.3	6950.9	4964.3
P7	0.94	0.63	-0.70	GCP	po_3803955_pan_0000000		2493.1	5200.0	2493.7	5199.3
P8B	0.92	-0.21	-0.90	GCP	po_3803955_pan_0000000		9111.0	7524.1	9110.8	7523.2
P24B	0.91	-0.38	-0.83	GCP	po_3803955_pan_0010000		18489.3	14840.9	18488.9	14840.1
P5B	0.87	-0.20	-0.85	GCP	po_3803955_pan_0000000		24935.9	5223.0	24935.7	5222.1
P5B	0.85	-0.05	-0.85	GCP	po_3803955_pan_0010000		25016.9	4850.0	25016.9	4849.2
P8B	0.81	0.26	-0.77	GCP	po_3803955_pan_0010000		9171.1	7251.0	9171.4	7250.2
P3	0.81	0.46	0.67	GCP	po_3803955_pan_0010000		12214.0	3813.1	12214.5	3813.8
P14	0.77	-0.77	-0.10	GCP	po_3803955_pan_0000000		11090.2	10118.5	11089.4	10118.4
P2	0.77	0.72	0.28	GCP	po_3803955_pan_0000000		6756.9	1177.1	6757.6	1177.4
P7A	0.72	-0.58	0.42	GCP	po_3803955_pan_0000000		1941.0	5515.6	1940.4	5516.0
P22	0.71	-0.52	-0.48	GCP	po_3803955_pan_0010000		8003.0	16471.5	8002.5	16471.0
P23	0.71	-0.12	-0.70	GCP	po_3803955_pan_0010000		11996.5	16097.3	11996.4	16096.6
P8	0.70	0.29	0.64	GCP	po_3803955_pan_0000000		9110.1	7708.0	9110.4	7708.6
P2A	0.67	-0.07	-0.67	GCP	po_3803955_pan_0010000		6772.0	1241.9	6771.9	1241.2
P28A	0.67	0.31	0.59	GCP	po_3803955_pan_0000000		6943.1	4490.9	6943.4	4491.5
P22A	0.67	0.45	0.49	GCP	po_3803955_pan_0010000		8035.7	16499.0	8036.2	16499.5
P2	0.63	0.58	0.26	GCP	po_3803955_pan_0010000		6748.0	1231.0	6748.6	1231.3
P28	0.62	-0.49	-0.37	GCP	po_3803955_pan_0000000		6989.1	4772.2	6988.6	4771.8
P23	0.62	0.01	-0.62	GCP	po_3803955_pan_0000000		11965.0	16234.5	11965.0	16233.9
P24A	0.61	0.59	-0.16	GCP	po_3803955_pan_0000000		18514.0	14783.0	18514.6	14782.8
P6	0.61	0.20	-0.58	GCP	po_3803955_pan_0000000		28531.3	4089.0	28531.5	4088.4
P26	0.60	0.55	-0.25	GCP	po_3803955_pan_0000000		15851.8	20652.8	15852.3	20652.5
P13	0.59	0.34	-0.48	GCP	po_3803955_pan_0000000		6623.1	10938.6	6623.4	10938.1
P18A	0.58	0.06	-0.58	GCP	po_3803955_pan_0010000		8652.0	12127.0	8652.1	12126.4
P16A	0.58	-0.09	-0.57	GCP	po_3803955_pan_0010000		24781.0	7844.4	24780.9	7843.8
P2B	0.58	-0.56	0.13	GCP	po_3803955_pan_0010000		6679.9	1238.9	6679.3	1239.0
P26B	0.58	-0.53	0.22	GCP	po_3803955_pan_0000000		16319.2	20539.4	16318.7	20539.6
P2A	0.56	0.03	-0.56	GCP	po_3803955_pan_0000000		6780.9	1188.1	6780.9	1187.5
P11A	0.55	0.53	0.16	GCP	po_3803955_pan_0010000		27485.1	5226.8	27485.6	5227.0
P8	0.53	-0.19	0.49	GCP	po_3803955_pan_0010000		9176.3	7410.2	9176.1	7410.7
P6A	0.52	-0.33	0.40	GCP	po_3803955_pan_0000000		28428.0	4052.9	28427.7	4053.3
P1A	0.52	0.06	0.51	GCP	po_3803955_pan_0010000		2789.0	2314.9	2789.1	2315.4
P21A	0.49	0.14	0.47	GCP	po_3803955_pan_0010000		21099.0	12591.0	21099.1	12591.5
P24	0.49	-0.44	-0.22	GCP	po_3803955_pan_0010000		18610.5	14720.5	18610.1	14720.3
P3A	0.49	-0.44	-0.21	GCP	po_3803955_pan_0010000		11914.2	4353.9	11913.8	4353.7
P23A	0.48	0.05	0.47	GCP	po_3803955_pan_0010000		11215.0	16057.9	11215.0	16058.4
P6	0.46	0.14	-0.44	GCP	po_3803955_pan_0010000		28600.1	3775.1	28600.2	3774.7

P21A	0.44	0.42	0.14	GCP	po_3803955_pan_0000000	21095.9	12592.9	21096.3	12593.0
P23A	0.43	-0.37	0.21	GCP	po_3803955_pan_0000000	11198.6	16122.9	11198.2	16123.1
P20	0.42	0.42	0.05	GCP	po_3803955_pan_0000000	16363.0	13452.0	16363.4	13452.0
P24B	0.41	0.33	-0.24	GCP	po_3803955_pan_0000000	18478.0	14880.9	18478.3	14880.7
P16A	0.40	-0.16	-0.37	GCP	po_3803955_pan_0000000	24749.0	7987.6	24748.8	7987.2
P13	0.39	-0.11	-0.37	GCP	po_3803955_pan_0010000	6631.9	10913.0	6631.8	10912.6
P15	0.37	0.30	-0.23	GCP	po_3803955_pan_0010000	19081.1	9208.1	19081.4	9207.9
P25	0.37	0.37	0.01	GCP	po_3803955_pan_0000000	11846.1	19344.8	11846.5	19344.8
P3A	0.33	-0.02	0.33	GCP	po_3803955_pan_0000000	11890.2	4454.9	11890.2	4455.2
P3	0.33	0.27	-0.19	GCP	po_3803955_pan_0000000	12195.3	3897.0	12195.6	3896.8
P25A	0.33	-0.22	0.24	GCP	po_3803955_pan_0010000	11882.5	19369.1	11882.3	19369.3
P15A	0.33	-0.24	0.22	GCP	po_3803955_pan_0010000	19017.5	9241.5	19017.3	9241.7
P25	0.32	0.26	-0.19	GCP	po_3803955_pan_0010000	11859.5	19297.5	11859.8	19297.3
P12A	0.32	-0.20	0.24	GCP	po_3803955_pan_0000000	1030.9	9786.9	1030.7	9787.1
P15	0.31	-0.11	-0.29	GCP	po_3803955_pan_0000000	19035.9	9413.0	19035.8	9412.7
P25A	0.30	-0.26	0.14	GCP	po_3803955_pan_0000000	11869.0	19417.9	11868.7	19418.0
P15A	0.29	-0.11	0.27	GCP	po_3803955_pan_0000000	18972.0	9445.0	18971.9	9445.3
P4	0.28	0.15	0.23	GCP	po_3803955_pan_0000000	19893.1	4248.0	19893.3	4248.2
P1	0.27	-0.04	-0.27	GCP	po_3803955_pan_0010000	2818.2	2290.0	2818.2	2289.7
P26B	0.26	-0.03	0.26	GCP	po_3803955_pan_0010000	16340.1	20446.0	16340.1	20446.3
P6A	0.24	-0.16	0.19	GCP	po_3803955_pan_0010000	28500.0	3727.1	28499.8	3727.3
P26	0.24	0.05	-0.23	GCP	po_3803955_pan_0010000	15864.4	20604.4	15864.4	20604.2
P10A	0.22	0.05	0.21	GCP	po_3803955_pan_0000000	21638.0	5217.2	21638.0	5217.4
P14	0.21	-0.10	0.19	GCP	po_3803955_pan_0010000	11136.8	9906.2	11136.7	9906.4
P17	0.21	0.20	-0.08	GCP	po_3803955_pan_0000000	2286.0	12761.0	2286.2	12760.9
P21	0.19	-0.19	-0.00	GCP	po_3803955_pan_0000000	21799.0	13749.3	21798.8	13749.3
P12A	0.16	-0.01	0.16	GCP	po_3803955_pan_0010000	1006.5	9918.5	1006.5	9918.7
P17B	0.12	0.10	-0.07	GCP	po_3803955_pan_0010000	3432.1	11536.0	3432.2	11535.9
P4	0.12	0.02	0.12	GCP	po_3803955_pan_0010000	19982.1	3835.9	19982.1	3836.0
P21	0.12	-0.04	-0.11	GCP	po_3803955_pan_0010000	21793.0	13786.0	21793.0	13785.9
P10A	0.11	-0.02	0.11	GCP	po_3803955_pan_0010000	21707.5	4899.6	21707.5	4899.7
P20	0.09	0.05	0.08	GCP	po_3803955_pan_0010000	16413.0	13224.1	16413.0	13224.2
P9R	0.08	-0.08	0.00	GCP	po_3803955_pan_0000000	17296.0	5638.1	17295.9	5638.1
P17B	0.06	0.05	0.02	GCP	po_3803955_pan_0000000	3483.1	11282.9	3483.2	11282.9
P5	0.02	0.00	0.02	GCP	po_3803955_pan_0010000	26032.1	2566.1	26032.1	2566.1
P9R	0.01	-0.01	-0.00	GCP	po_3803955_pan_0010000	17399.0	5161.2	17399.0	5161.2
P17	0.01	-0.00	-0.01	GCP	po_3803955_pan_0010000	2248.0	12951.8	2248.0	12951.8
P5	0.01	0.00	-0.00	GCP	po_3803955_pan_0000000	25863.8	3357.4	25863.8	3357.4

RMS (x, y) for worst 5% of points in list: 1.46, 1.63

Residual Summary for po\_3803955\_pan\_0000000  
GCPs: 46 X RMS 0.59 Y RMS 0.57

Residual Summary for po\_3803955\_pan\_0010000  
GCPs: 46 X RMS 0.31 Y RMS 0.55

SOCET SET Modello matematico di Rigorous Simultaneous GCP

SENSOR PARAMETERS							
Image ID, Ground Pt	Parameter Name	Original Value	Original Sigma	Residual Value	Adjusted Value	Adjusted Sigma	
-----							
po_3803955_pan_0000000							
VALID PARAMETERS							
	CL0	0.0	6.0000000	0.5545947	0.5545947	0.5588472	
	CLS	0.0	1.0000e-005	1.0731e-006	1.0731e-006	9.6547e-006	
	CLL	0.0	1.0000e-005	3.8653e-006	3.8653e-006	9.8654e-006	
	CS0	0.0	6.0000000	2.1343412	2.1343412	0.5783658	
	CSS	0.0	1.0000e-005	1.2179e-005	1.2179e-005	9.2299e-006	
	CSL	0.0	1.0000e-005	-1.7975e-006	-1.7975e-006	9.6651e-006	
po_3803955_pan_0010000							
VALID PARAMETERS							
	CL0	0.0	6.0000000	-1.8196384	-1.8196384	0.3649668	
	CLS	0.0	1.0000e-005	4.8625e-007	4.8625e-007	9.6710e-006	
	CLL	0.0	1.0000e-005	-3.8964e-006	-3.8964e-006	9.8716e-006	
	CS0	0.0	6.0000000	5.1468230	5.1468230	0.2434045	
	CSS	0.0	1.0000e-005	-1.4444e-005	-1.4444e-005	9.0806e-006	
	CSL	0.0	1.0000e-005	4.3277e-006	4.3277e-006	9.6236e-006	
CHECK POINT SUMMARY							
RMS x ==> 7.174e-001							
RMS y ==> 8.696e-001							
RMS z ==> 1.519e+000							
Total RMS ==> 1.892e+000							
GROUND POINT SUMMARY							
RMS x ==> 0.8485							
RMS y ==> 1.2701							
RMS z ==> 0.89847							
Total RMS ==> 1.7721							
Check Point	res x	res y	res z	Ground Point	res x	res y	res z
CP-P21A	0,46276	-0,0287	0,97757	GCP-P22	1,09983	-0,11667	1,15313
CP-P8B	-1,52731	1,39747	-0,76013	GCP-P6	0,229696	1,29181	1,21137
CP-P2B	0,2584	0,78547	-1,24275	GCP-P25A	0,465488	-0,315	0,426324
CP-P17	0,81628	0,71635	1,28682	GCP-P20	0,268613	0,286263	0,449435
CP-P26B	0,75706	0,24868	-1,18821	GCP-P28A	-0,24295	0,13541	-0,78955
CP-P5B	0,08724	0,69581	-0,96193	GCP-P14	0,720753	-0,84208	1,69445
CP-P7A	0,42419	1,46894	-1,6867	GCP-P21	0,729983	-0,26418	0,221492
CP-P23A	0,62669	0,6752	0,65579	GCP-P13	0,467647	0,310746	0,063258
CP-P24B	0,39209	0,45292	0,06441	GCP-P3	-0,46729	1,15959	-0,55512
CP-P4	0,31018	0,66672	-1,41668	GCP-P9R	-0,93483	0,813818	-0,94135
CP-P18A	0,90895	0,61227	-0,37166	GCP-P1A	0,218716	0,332393	-0,65767
CP-P17B	-0,72617	-0,48541	-2,87184	GCP-P10A	-1,57679	1,09495	-1,25086
CP-P11	0,18565	1,75377	0,20382	GCP-P16A	0,273319	0,029581	-0,50964
CP-P15A	1,06456	-0,0811	0,97528	GCP-P12A	0,962348	0,384662	0,615048
				GCP-P5	-1,81404	0,292386	-1,24527

## BIBLIOGRAFIA

- M.A. Aguilar, F.J. Aguilar, M.M. Saldaña, I. Fernández, 2012. Dsm extraction and evaluation from geoeye-1 stereo imagery isprs Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume I-4, 2012 XXII ISPRS Congress, 25 August – 01 September 2012, Melbourne, Australia
- M.A. Aguilar, F.J. Aguilar, M.M. Saldaña, 2014. Generation and quality assessment of stereo-extracted DSM from GeoEye-1 and WorldView-2 imagery. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on (Volume: 52, Issue: 2) 1259 - 1271 DOI:10.1109/TGRS.2013.2249521
- M. Barbarella and M. Fiani, 2013. Monitoring of large landslides by Terrestrial Laser Scanning techniques: field data collection and processing. European journal of remote sensing, published online 23/02/2013 doi: 10.5721/EuJRS20134608
- M. Barbarella, M. Fiani, A. Lugli, 2013. Landslide monitoring using multitemporal terrestrial laser scanning for ground displacement analysis. Geomatica, Natural Hazards and Risk, TGNH-2013-0038.R3, 03-Nov-2013
- M. Barbarella, M. Fiani, C. Zollo, 2015. Large scale Digital Topography from Stereo GEOEYE-1 Satellite imagery for multiscale geo-morphological mapping. IN PRESS
- M. Barbarella, A. Cuomo, M. Fiani, S. Grasso, D. Guida, V. Siervo, G. Volpe, C. Zollo, 2012. Methodology for Multi-temporal Landslide Analisis by Terrestrial Laser Scanner: the Pisciotta Landslide case study. In: IAG/AIG International Workshop on "Objective Geomorphological Representation Models: Breaking through a New Geomorphological Mapping Frontier, Abstract book Salerno 15-19 Ottobre 2012 Pag.17-17 ID:52223 Abstract in Atti di convegno (274)
- M. Barbarella, M. Fiani, L. Gallo, D. Guida, C. Zollo, 2012. Large-scale mapping from stereo satellite imagery. In: IAG/AIG International Workshop on "Objective Geomorphological Representation Models: Breaking through a New Geomorphological Mapping Frontier, Abstract book Salerno 15-19 Ottobre 2012 Pag.17-17 Abstract in Atti di convegno (274)
- L. Bornaz, S. Dequal, A. Lingua, 2006. L'ortofoto solida di precisione: un prodotto innovativo per la rappresentazione e la gestione dei dati tridimensionali. In: Atti Conferenza nazionale SIFET, Taranto
- G. Botti, A. Furini, M. Gabaldo, A. Pellegrinelli, 2010. Valutazione dell'accuratezza di DEM estratti da una stereocoppia GeoEye. Atti 14a Conferenza Nazionale ASITA - Brescia 9-12 novembre 2010
- J. B. Campbell, 2007. Introduction to Remote Sensing. New York London: The Guilford Press (eds. 1-4) (1987, 1996, 2002, 2007).

- P. Capaldo, M. Crespi, L. Vendictis, F. Fratarcangeli, G. Murchio, A. Nascetti, F. Pieralice, 2010. Geometric Potentiality of GeoEye-1 In-Track Stereo Pairs and Accuracy Assessment of Generated Digital Surface models. Remote Sensing for Science, Education and Natural and Cultural Heritage, Rainer Reuter (Editor) EARSeL, 2010
- CNR, G. Galati, A. Gilardini, 2000. Monografie scientifiche tecniche e strumenti per il telerilevamento ambientale.
- M. Crespi, F. Fratarcangeli, F. Giannone, F. Pieralice, 2008. Modello RPC per l'orientamento di stereocoppie satellitari nel software SISAR. Atti 12° Conferenza Nazionale ASITA - L'Aquila 21-24 ottobre 2008
- S. De Corso and D. Magrì, 2008. Estrazione di DSM da immagini del satellite Eros B acquisite in stereoscopia: studio preliminare nell'area di Benevento. Rivista italiana di Telerilevamento - 2008, 40 (2): 147-151 147)
- S. Dequal and A. Lingua, 2003. True orthophoto of the whole town of Turin. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Antalya (Turchia), Vol. XXXIV, Part 5/C15 , pp.: 263-268
- C.S. Fraser and M. Ravanbakhsh, 2009. Georeferencing Accuracy of Geoeye-1 Imagery. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 75(6): 634-638.
- D. Grigillo 2011. Classification based building detection from GeoEye-1 images. Urban Remote Sensing Event (JURSE), 2011 Joint; 11-13 April 2011 pag 381 - 384 Munich 978-1-4244-8658-8
- J. Grodecki and G. Dial, 2003. Block adjustment of high-resolution satellite images described by rational polynomials. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 69, no. 1 (2003): 59-68.
- C.H. Grohmann, M.J. Smith, C. Riccomini 2011. Multiscale Analysis of Topographic Surface Roughness in the Midland Valley, Scotland, 1200-1213. - In IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 49 (4) pp. 1200-1213. ISSN (print) 0196-2892
- G. Guida, D. Clacaterra, P. Budetta, P. De Vita, D. Martire, A. Aloia, 2014. Moving geosites: how landslides can become focal points in Geoparks. Latest Trends in Engineering Mechanics, Structures, Engineering Geology, ISBN: 978-960-474-376-6, Salerno, Italy June 3-5, 2014 pp 162.170
- G. Guida, D. Palmieri, A. Cuomo, 2011. Digital orographic map of peninsular and insular Italy. Journal of Maps Volume 7, Issue 1, 2011 DOI:10.4113/jom.2011.1209 pages 447-463
- R.D. Hobson, 1972. Surface roughness in topography: quantitative approach. Pages 221–245 in R. J. Chorley, editor. Spatial analysis in geomorphology. Harper and Row, New York, New York, USA.

- J.K. Berry. 2005. Beyond Mapping III: Procedures and Applications in GIS Modeling, online book covering Beyond Mapping columns in GeoWorld from 1995-present.
- Jacobsen, Karsten, 2013. DEM Generation from High Resolution Satellite Imagery Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation, Volume 2013, Number 5, October 2013, pp. 483-493(11) DOI: <http://dx.doi.org/10.1127/1432-8364/2013/0194>
- J.S. Jenness, 2004. Calculating landscape surface area from digital elevation models. *Wildlife Society Bulletin*. 32(3):829-839
- K. Deilami, M. Hashim, 2011. Very high-resolution optical satellites for DEM generation: a review Generation and quality assessment of stereo-extracted DSM from GeoEye-1 and WorldView-2 imagery. *European Journal of Scientific Research*, 2011
- J. Kurt, J. de Venecia, A. Fidel Paderes Jr, A. Stewart Walker, 2006. Rigorous sensor modeling and triangulation for orbview-3 abstract Asrps 2006 Reno Nevada May 1-5 2006
- R. Lasaponara, N. Masini, 1995–2002. Satellite Remote Sensing in Archaeology: past, present and future. *Journal of Archaeological Science*. Vol. 38(9), 1995–2002
- F. Lovholt, H. Bungum, C.B. Harbitz, S. Glimsal, C.D. Lindholm, G. Pedersen, 2006. Earthquake related tsunami hazard along the western coast of Thailand. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. Vol. 6, No. 6, 979-997. 30 novembre 2006.
- S.a. Makki, 1991. Photogrammetric Reduction and Analysis of Real and Simulated SPOT Imagen'es, Ph.D. Dissertation, School of Civil Engineering, Purdue University, West Lafayette, Indiana.
- M.L. Hobi and C. Ginzler, 2012. Accuracy Assessment of Digital Surface Models Based on worldView-2 and ADS80 Stereo Remote Sensing Data *Sensors* 2012, 12(5), 6347-6368; doi: 10.3390/s120506347
- Meguro, Fraser 2010 - *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, Volume XXXVIII, Part 8, Kyoto Japan 2010- georeferencing accuracy of geoeye-1 stereo imagery: experiences in a Japanese test field
- M.A. Melton, 1965. The geomorphic and paleoclimatic significance of alluvial deposits in southern Arizona. *Journal of Geology* 73 (1965): 1-38.
- M. Van Den Eeckhauta, N. Kerleb, J. Poesenc, J. Hervása, 2012. Object-oriented identification of forested landslides with derivatives of single pulse LiDAR data. *Geomorphology Volumes 173–174*, 1 November 2012, Pages 30–42
- G. Mitchell and M. Ehling, 2010. A Geophysical Stereo Satellite Elevation Mapping System. *ASPRS 2010 Annual Conference San Diego*, 26-30 April, 12p. (On CDROM)

- M. Deidda, G. Sanna, G. Deiana, 2012. Estrazione di batimetria da immagini del sensore WorldView2: stima dell'accuratezza e della precisione. Atti 16a Conferenza Nazionale ASITA. Fiera di Vicenza 6-9 novembre 2012.
- C. Nelleman and G. Fry, 1995. Quantitative analysis of terrain ruggedness in reindeer winter grounds. *Arctic* 48:172–176.
- C. Nellemann and M.G. Thomsen, 1994. Terrain ruggedness and caribou forage availability during snowmelt on the Arctic Coastal Plain, Alaska. *Arctic* 47:361 – 367.
- C. Nellemanna, O. Støenb, G. Kindbergc, J. Swensonb, I. Vistnesb, G. Ericssonc, J. Katajistod, B. Kaltenborne, J. Martinf, A. Ordizb, 2007. Terrain use by an expanding brown bear population in relation to age, recreational resorts and human settlements. *Biological conservation* 138 (2007) 157 – 165
- O. Korup, 2005. Geomorphic hazard assessment of landslide dams in South Westland, New Zealand: fundamental problems and approaches – *Geomorphology* Volume 66, Issues 1–4, 1 March 2005, Pages 167–188
- P. De Vita , M. T. Carratu, G. La Barbera, S. Santoro - Kinematics and geological constraints of the slow-moving Pisciotta rock slide (southern Italy) – *Geomorphology* - 11/2013; 201:415-429. DOI: 10.1016/j.geomorph.2013.07.015
- D. Poli and T. Toutin, 2012. Review of developments in geometric modelling for high-resolution satellite pushbroom sensors. *The Photogrammetric Record Special Issue: ian dowman retirement symposium* Volume 27, Issue 137, pages 58–73, March 2012
- RADC-TDR-64-353, 1964. Research in mathematical targeting – The practical and rigorous adjustment of large photogrammetric nets. Technical documentary report no. October 1964
- J. Richards, J. Xiuping, 2006. *Remote Sensing Digital Image Analysis, an introduction*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 4th edition 2006 ISBN: 978-3-540-29711-6 DOI: 10.1007/3-540-29711-1
- S.J. Riley, D. DeGloria, R. Elliot. 1999. A terrain ruggedness index that quantifies topographic heterogeneity. *Intermountain Journal of Sciences* 5(1-4): 23-27.
- T. Toutin, 2004. Review article: Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods, *International Journal of Remote Sensing*, 25:10, 1893-1924
- P. Tarolli, G. Sofia, G. Dalla Fontana, 2012. Geomorphic features extraction from high-resolution topography: landslide crowns and bank erosion. *Natural Hazards* March 2012, Volume 61, Issue 1, pp 65-83

Y. Wang, X. Yang, A. Leason, S. Megenta, 2008. An operational system for sensor modeling and dem generation of satellite pushbroom sensor images - The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B1. Beijing 2008

Y.El-Manadili and K. Novak, 1996. Precision Rectification of SPOT Imagery Using the Direct Linear Transformation Model, photogrammetric engineering & remote sensing journal of the american society for photogrammetry and remote sensing volume 62, number 1 67-72 January 1996

GeoEye, 2010. GeoEye-1 web site: <http://launch.geoeye.com/>

ESA, [http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace\\_IT/SEMRCWZRA0G\\_0.html](http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_IT/SEMRCWZRA0G_0.html)



## RINGRAZIAMENTI

I ringraziamenti sono sempre la parte più difficile di una tesi, non perché non ci siano persone da ringraziare, anzi ce ne sono molte, ma perché ci sono di moltissime cose da scrivere, ma poi per tutti i pensieri che si hanno a volte mancano le parole.

Quindi parto con i ringraziamenti accademici. Un ringraziamento speciale alla Professoressa Amoruso, che mi ha supportato per due tesi e soprattutto sopportato per quasi 6 anni. Un ringraziamento speciale alla Professoressa Fiani che mi ha dato l'opportunità di affrontare diverse tematiche, mi ha supportato e sopportato per circa 4 anni. Entrambe mi avete insegnato a districarmi nelle situazioni più disparate, sia in ambito accademico che nella vita professionale e privata.

Voglio ringraziare i miei amici e "consulenti" di Università. Vi voglio ringraziare perché ogni volta che ho letto il mio nome nei vostri ringraziamenti, cari amici e amiche care, è stata sempre una emozione forte, ripensavo a tutte le emozioni vissute assieme, alle cavolate fatte, alle risate sonanti, insomma a tutti i momenti passati assieme. Di questi istanti me ne ricordo tanti fatti con Luciano, quante ne abbiamo fatte, come quella volta del muro rotto per recuperare il pennino del GPS o la foto fatta l'ultimo giorno il lab. prima di partire per la mia avventura ad Asti, una foto che portò al vetro rotto del mio smartphone. Ah, la foto sulle sedie vestiti come cavalieri per un torneo medioevale è a casa stampata!

Nel corso degli anni di dottorato mi ricordo le risate e le chiacchiere fatte con Ilaria e Veridiana, le pizze in laboratorio come topi da laboratorio e i momenti di relax a pensare al futuro, grazie ragazze siete state due amiche fidate.

Un ringraziamento a Salvatore, inizialmente ci siamo guardati un po' strani ma poi ne è nata una ottima amicizia, come spesso dici la pensiamo uguale su molte cose per questo ci facciamo delle chiacchierate che durano ore.

Grazie a mia madre e mio padre... Non so cosa scrivere, non posso scrivere, scriverei un'altra tesi solo per voi, ma so che se vi dicessi solo grazie, questo varrebbe più di mille parole, perché sapete cosa intendo dirvi in una sola parola, GRAZIE. Grazie alla mia sorellina che da piccolo picchiavo e tormentavo sempre, però in realtà la volevo bene e ancora gliene voglio, ma non smetto di tormentare e continuerò a farlo.

Ai miei amici di sempre, negli ultimi anni ci siamo visti poco, ma ogni volta sembra non essere passato il tempo e alle amiche di Penta che negli anni avete reso felice me e il mio amore.

Al mio amore e al mio Io, assieme perché noi siamo una sola cosa.

Grazie, un GRAZIE GIGANTESCO e un TI AMO IMMENSO, al te il mio amore, Alessandra, te che sei sempre al mio fianco anche quando rompo le scatole, cosa che accade praticamente sempre, grazie, grazie, grazie, perché mi hai dato la forza di andare avanti in tutti i momenti tristi e di sconforto che ho avuto, per tutte le volte che avrei dovuto essere vicino a te ma invece davo priorità al dovere e... Una "e" molto più lunga di soli tre puntini sospensivi!

Al mio Io. Leggerai questi ringraziamenti, non fare sempre il yesman, fai solo quello che ti piace fare e ogni tanto falla una pazzia, ricorda cos'hai sulla pelle e nelle ossa, vivi ama e ricorda [...] Hoc facto quamquam nulli erat dubium, quidnam contra Caesarem pararetur, tamen Caesar omnia patienda esse statuit, quoad sibi spes aliqua relinqueretur iure potius disceptandi quam belli gerendi. Contendit . . .

*Grazie.*