

# GEOMATICA

## LE RADICI DEL FUTURO



### TRIBUTO

A

## SERGIO DEQUAL

&

## RICCARDO GALETTO

a cura di Ambrogio MANZINO e Anna SPALLA

<i>V. Achilli, M. Fabris, D. Bragagnolo, M.T. Grassi, A. Menin, G. Targa</i> <i>Università degli Studi di Padova</i>	Rilievi 3D ad alta risoluzione nell'antica città di Palmyra (Siria) mediante metodologie geomatiche.	117
<i>F. Pirotti, A. Vettore, A. Guarnieri, M. Camarda</i> <i>Università degli Studi di Padova</i>	Airborne Lidar for Earth Surface Monitoring: Latest Developments and Considerations on Data Processing	123
<i>L. Barazzetti, R. Roncella, G. Forlani, F. Remondino, M. Scaioni</i> <i>Università degli Studi di Parma</i>	Orientamento automatico di blocchi fotogrammetrici in ambito close-range: stato dell'arte e prospettive della ricerca	131
<i>V. Casella, M. Franzini</i> <i>Università degli Studi di Pavia</i>	Esperienze sulla triangolazione di fotogrammi aerei	141
<i>G. Fastellini, F. Radicioni, A. Stoppini</i> <i>Università degli Studi di Perugia</i>	Tracciamento in tempo reale di flotte di veicoli con sensori integrati di basso costo	149
<i>G. Caroti, A. Piemonte</i> <i>Università degli Studi di Pisa</i>	Analisi dei dati altimetrici disponibili per il territorio comunale di Pisa	157
<i>P. Capaldo, M. Crespi, F. Fratarcangeli, A. Nascetti, F. Pieralice</i> <i>Università degli Studi di Roma "La Sapienza"</i>	High Resolution Sar Radargrammetry. Application with Cosmo-Skymed Spotlight Imagery	163
<i>G. Colosimo, M. Crespi, A. Mazzoni</i> <i>Università degli Studi di Roma "La Sapienza"</i>	GPS Real-Time Seismology with <i>Vadase</i> : a Preliminary Demonstration	171
<i>A. Cina, A. M. Manzano, M. Piras</i> <i>Politecnico di Torino</i>	Il posizionamento satellitare: prospettive nel campo della Geomatica con ricevitori GNSS basso costo	179
<i>A. Lingua, F. Nex, D. Piatti, F. Rinaudo</i> <i>Politecnico di Torino</i>	Dalle nuvole di punti alle informazioni: automatismo e integrazione	189
<i>T. Bellone, C. Porporato, F. Fiermonte</i> <i>Politecnico di Torino</i>	Spazio, Tavola, Globo	199
<i>R. Chiabrando, E. Borgogno Mondino, F. Chiabrando</i> <i>Università degli Studi di Torino</i>	Hives Geometric Characterization by Means of Unconventional Geomatic Techniques	205
<i>G. Manzoni</i> <i>Università degli Studi di Trieste</i>	Tele-Geomatics for the Design and the Construction and Maintenance of the New Great Silk Road	215
<i>F. Crosilla, A. Gubana, D. Visintini</i> <i>Università degli Studi di Udine</i>	Misura delle deformazioni di elementi strutturali lignei con laser scanner terrestri distanziometrici	219

---

# ANALISI DEI DATI ALTIMETRICI DISPONIBILI PER IL TERRITORIO COMUNALE DI PISA

G. Caroti <sup>a</sup>, A. Piemonte <sup>a</sup>

<sup>a</sup>Dipartimento di Ingegneria Civile – Sede Topografia e Fotogrammetria – Università di Pisa – g.caroti@ing.unipi.it

**KEY WORDS:** DEM, LiDAR, GPS, Validation

## **RIASSUNTO:**

Il lavoro presenta i primi risultati di una ricerca congiunta fra il Laboratorio ASTRO del Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Pisa ed i tecnici della Direzione Ambiente del Comune di Pisa. Tale ricerca riguarda l'analisi e l'utilizzo dei dati altimetrici disponibili per il territorio comunale di Pisa. In particolare, tale analisi è condotta sui modelli digitali del terreno derivanti sia dal bando per l'Aggiornamento della Base Dati del Portale Cartografico Nazionale (PCN), emanato dal Ministero dell'Ambiente per la caratterizzazione altimetrica delle principali aste fluviali, di tutte le linee di costa e delle aree ad elevata criticità idrogeologica, sia dall'integrazione di questo bando da parte della Regione Toscana per la copertura integrale del territorio regionale. L'obiettivo iniziale della ricerca riguarda la validazione di tali modelli digitali del terreno (DTM), provenienti da rilievi laser scanner. Vengono quindi descritti e presentati i risultati delle validazioni eseguite.

## **ABSTRACT:**

The present paper discusses the preliminary findings of a joint research work carried out by the ASTRO Laboratory of the Civil Engineering Department of the Pisa University and the engineers of the Environment Management of the Pisa Municipality. This research is about analysis and usage of altimetry data available for the municipal territory. In detail, the analysis is carried on digital terrain models (DTMs) deriving both from the database update for Italy's National Cartographic Portal, promoted by the Ministry for the Environment for the altimetric characterization of the main river courses, all coastlines and areas with high hydro-geologic risk, and from the integration of this by the Toscana Region for a full coverage of the regional territory. The initial goal of the research includes validating such DTMs, deriving from laser scanning surveys. Results of the performed validations are hence described and discussed.

## **1. INTRODUZIONE**

L'oggetto di questo studio si inquadra nella convenzione di ricerca tra il Comune di Pisa e il Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Pisa sull'analisi avanzata e l'utilizzo dei dati altimetrici disponibili per il territorio comunale. Questi dati derivano dalle operazioni di rilevamento previste sia dal bando per l'Aggiornamento della Base Dati del Portale Cartografico Nazionale (PCN), emanato dal Ministero dell'Ambiente, sia dall'integrazione a questo bando da parte della Regione Toscana per la copertura integrale del territorio regionale.

I modelli altimetrici del terreno ad elevata risoluzione sono ad oggi un prodotto cartografico di grande utilità come base progettuale per la realizzazione di opere di ingegneria, la prevenzione dei rischi ed il monitoraggio, la pianificazione delle infrastrutture di comunicazione, la valutazione d'impatto ambientale. Inoltre, essi costituiscono anche i dati di input per la modellazione numerica di simulazione di fenomeni fisici legati al territorio. Tutti questi possibili utilizzi hanno qualità ed attendibilità strettamente legata all'affidabilità ed alla precisione intrinseca dei modelli altimetrici sui quali si basano.

Il punto di partenza per lo studio di ricerca è stata l'analisi e la verifica della qualità dei dati altimetrici in termini di accuratezza e ricerca degli errori sistematici seguendo quanto prescritto dalle recenti linee guida del CISIS.

## **2. METODOLOGIA**

### **2.1 Requisiti di qualità dei modelli altimetrici e metodologie di verifica**

Gli standard di riferimento per i requisiti di qualità e le metodologie di verifica dei modelli altimetrici sono ad oggi quelli previsti nelle linee guida "Ortoimmagini 10k e modelli altimetrici" pubblicate dal Centro Interregionale di Coordinamento e Documentazione per le Informazioni Territoriali (CISIS) nel 2009: esse contengono prescrizioni tecniche operative per la produzione ed il collaudo di ortoregistrazioni 10k e modelli altimetrici ed assumono un valore normativo per la produzione dei dati territoriali nel settore specifico.

Tali linee guida tengono conto sia delle potenzialità offerte dalle nuove tecniche di acquisizione dati (in particolare il LiDAR - Light Detection And Ranging, la fotogrammetria digitale, satelliti ad alta risoluzione SRTM - Shuttle Radar Topography Mission, AsterDTM - Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Digital Terrain Model) sia delle precisioni richieste per l'utilizzo dei modelli altimetrici per lo studio idrologico (ad esempio zone a rischio di inondazione) e per la progettazione di opere di ingegneria.

**2.1.1 Requisiti di qualità:** Le linee guida definiscono i requisiti di qualità in funzione delle finalità per cui le varie tipologie di modelli altimetrici, (Digital Elevation Model: DEM, Digital Surface Model: DSM, Dense Digital Elevation Model: DDEM, Dense Digital Surface Model: DDSM) vengono prodotti.

Vengono individuate otto classi di precisione, “livelli”, che coprono l’intervallo di accuratezza in quota da  $\pm 15\text{m}$  a  $\pm 0.1\text{m}$  in campo aperto, a cui corrispondono campi di applicazione, tecniche e costi di produzione differenti.

A seconda del “livello” di precisione e quindi in relazione al campo di applicazione del modello altimetrico le linee guida stabiliscono:

- L’accuratezza e la tolleranza in quota differenziandola a seconda della tipologia di copertura del terreno (terreno aperto, aree con copertura arborea, tetti di edifici).
- L’accuratezza e la tolleranza in planimetria.
- La spaziatura più opportuna della griglia, al fine di descrivere in modo appropriato l’andamento del terreno comunque esso si presenti (pianeggiante, ondulato, accidentato).
- Le linee caratteristiche (*breakline*) che individuano particolari elementi del territorio che danno luogo, entro la maglia della griglia, ad una discontinuità del terreno superiore all’accuratezza planimetrica prevista per il “livello”.
- La tipologia delle aree non rappresentabili, “zone morte” nel modello altimetrico e le proprietà delle linee caratteristiche che le delimitano.
- Le principali applicazioni del modello altimetrico.
- Le più opportune tecniche di acquisizione dati.

In particolare, l’accuratezza dei modelli altimetrici viene espressa in funzione della scala nominale della corrispondente cartografia numerica e a tal riguardo vengono accolte le accuratezze consigliate dalla Commissione Geodetica Italiana. Le tolleranze sono fissate al 95% di probabilità e sono corrispondenti al valore LE95 (*Linear Error* al 95% di probabilità) per l’altimetria (caso monodimensionale) e al valore CE95 (*Circular Error* al 95%) per le componenti planimetriche (caso bidimensionale).

**2.1.2 Verifiche di qualità:** Le linee guida prevedono le specifiche procedure da adottare per le verifiche di qualità che devono essere realizzate sia in corso d’opera (verifiche di qualità interna), per controllare la qualità delle varie tecniche di produzione del dato topografico e per verificare preliminarmente il modello altimetrico, sia al termine del processo di produzione del modello (verifiche sul prodotto finale).

Le verifiche in corso d’opera sono finalizzate a controllare la densità dei punti presenti nel modello rispetto alla griglia del modello stesso al fine anche di mettere in evidenza le aree del modello a densità nulla nonché a valutare la presenza di errori grossolani di grande entità.

**2.1.3 Verifiche del modello altimetrico finale:** I dati del modello altimetrico finale devono essere controllati al riguardo della loro accuratezza al fine di stabilire se rientrano nella tolleranza stabilita dalle linee guida per lo specifico “livello”.

Le verifiche di accuratezza vengono applicate dopo aver eliminato gli errori sistematici presenti nei dati acquisiti.

L’individuazione degli errori sistematici si attua mediante il confronto dei dati del modello rilevato con i dati di un modello altimetrico di maggior precisione (ad esempio quello derivante dai capisaldi di inquadramento geodetico altimetrico, rilievi GPS in modalità RTK, misure di alta precisione con strumentazione geodetica).

Gli scostamenti dei dati del modello altimetrico rilevato dai valori di riferimento hanno una componente di errore

sistematico ed una di errore accidentale. La prima componente può venire individuata e rimossa calibrando i dati del modello rilevato su punti di controllo a terra (*Ground Control Point*) caratterizzati da accuratezza pari ad almeno un ordine di grandezza più piccolo rispetto alle tolleranze prefissate.

La calibrazione standard prevede di stimare e rimuovere la differenza altimetrica media tra quote modello e quote dei *Ground Control Point* (GCP) con una traslazione in quota (procedura 2.5D). Una calibrazione più raffinata prevede di rimuovere non solo le discrepanze medie in quota ma anche quelle planimetriche medie con una rototraslazione 3D (procedura 3D).

Dopo aver effettuato la calibrazione e aver rimosso gli errori sistematici (almeno quello altimetrico), l’accuratezza del modello dipende unicamente dai suoi errori accidentali e può essere valutata per mezzo della deviazione standard ( $\sigma$ ), che in questo caso coincide con l’errore quadratico medio (RMSE) determinando il valore dell’errore lineare complessivo in quota al 95% di probabilità, LE95<sub>H</sub>, che deve risultare minore della tolleranza fissata in quota T<sub>H</sub>, seguendo le relazioni:

$$LE95_H = \sqrt{LE95_{MA}^2 + LE95_{CP}^2} \leq T_H \quad (1)$$

$$LE95_{CP} = 1.96 \cdot \sigma_{CP,H} \quad (2)$$

$$LE95_{MA} = 1.96 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_{MA,i} - H_{CP,i})^2}{n}} \quad (3)$$

dove:  $\sigma_{CP,H}$  = s.q.m. teorico delle quote dei GCP

$H_{MA,i}$  = quote del modello altimetrico

$H_{CP,i}$  = quote dei GCP

### 3. ANALISI DEI DATI

Nel 2007, il Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio Italiano ha indetto un bando di gara per l’aggiornamento della base dati del Portale Cartografico Nazionale (PCN) tramite la produzione di un *Data Set* del Modello Digitale del Terreno (DTM). Questo *Data Set* doveva comprendere porzioni di territorio nazionale relative a determinate aste fluviali, a tutte le linee di costa italiane e ad altre aree di elevata criticità idrogeologica e doveva essere ottenuto mediante l’esecuzione di una campagna di telerilevamento con tecnologia LiDAR da piattaforma su aeromobile.

La Regione Toscana, sfruttando l’iniziativa del Ministero, ha indetto a sua volta un bando per integrare il Modello Digitale del Terreno in alcune aree di interesse non comprese nel bando nazionale e per la realizzazione delle ortoimmagini del territorio rilevato. In figura 1 è riportata la copertura del territorio regionale a dicembre 2009.

La ditta che si è aggiudicata entrambi gli appalti è la Compagnia Generale Ripresearee S.p.A. di Parma.

Il *Data Set* completo per la Provincia di Pisa, gestito dall’Ufficio Assetto del Territorio del Comune di Pisa, è stato reso disponibile per la ricerca nel marzo 2010.

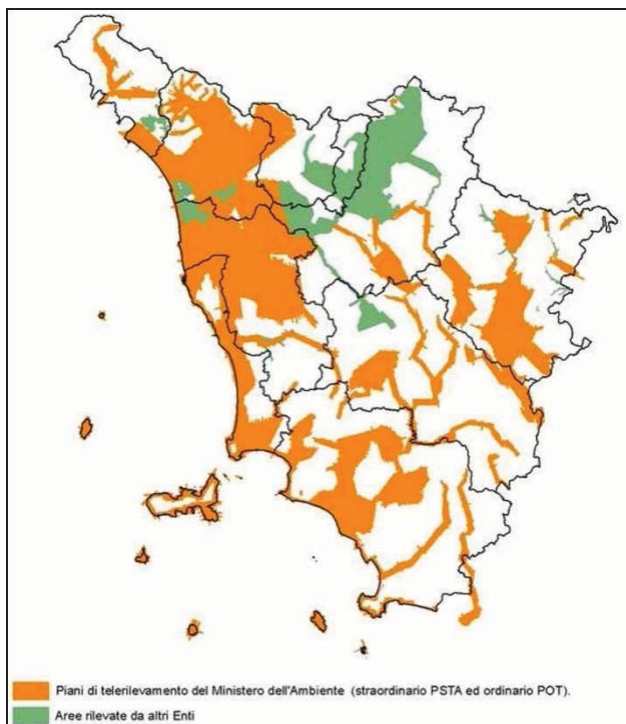


Figura 1. Rilievi LiDAR in Toscana a dicembre 2009

### 3.1 Specifiche tecniche previste dai bandi

Per quanto riguarda le prescrizioni di precisione e le specifiche di collaudo, il bando regionale ricalca sostanzialmente quello nazionale. Questi bandi prevedono che il *Data Set* consegnato contenga i dati grezzi ed alcuni prodotti derivati, fra cui il DSM ottenuto dal primo impulso laser, quello ottenuto dall'ultimo impulso laser ed il DTM, ottenuto per filtraggio del DSM.

I dati grezzi devono comprendere tutta la nuvola di punti acquisita senza alcun adattamento o elaborazione mentre i modelli derivati devono essere forniti con maglia quadrata di un metro. I punti devono avere una precisione altimetrica di  $\pm 0.20\text{m}$  ( $1\sigma$ ) e planimetrica di  $\pm 1.00\text{m}$  ( $1\sigma$ ).

I punti dei DSM e del DTM devono essere riferiti per la planimetria al datum ETRS89 e devono riportare la quota ortometrica, derivata da quella ellissoidica, secondo il modello geoidico ITALGEO95.

Le specifiche di collaudo prevedono la verifica delle prescrizioni tramite confronto dei prodotti con un rilievo GPS a campione su 300 punti realizzato con tecnica RTK. Questi punti devono essere omogeneamente distribuiti sul territorio rispetto a cinque tipologie di copertura del terreno: terreni aperti, terreni coltivati, vegetazione rada, vegetazione fitta, aree urbane.

### 3.2 Dati a disposizione per il Comune di Pisa

I dati messi a disposizione dal Comune di Pisa comprendono i dati grezzi in formato ASCII (\*.xyz), che riportano tutti i punti rilevati in coordinate planimetriche geografiche rispetto all'ETRF89 e quote ellissoidiche, i DSM di primo ed ultimo impulso ed il DTM. Questi ultimi sono prodotti derivati e risultano forniti in formato di griglia a passo regolare ASCII (\*.asc) con coordinate planimetriche geografiche rispetto all'ETRF89 e quote ortometriche.

Bisogna sottolineare che i rilievi e le prescrizioni dei capitolati sono precedenti all'aggiornamento fatto dall'IGM del datum di riferimento nazionale per la rete GPS, che ora è inquadrata nell'ETRF2000.

### 3.3 Rilievo dei Ground Control Point

Per la validazione dei modelli è stato realizzato il rilievo delle coordinate piano altimetriche di numerosi punti distribuiti sul territorio comunale di Pisa (figura 2). I rilievi sono stati eseguiti con metodologia GPS in modalità RTK Stop & Go sfruttando la correzione differenziale fornita via GPRS dalla rete SmartNet ItalPos della Leica. Questa metodologia è in grado di fornire un rilievo caratterizzato da una precisione centimetrica pari ad un ordine di grandezza superiore rispetto a quella dei modelli da validare.

Nella scelta dei GCP si è tenuto conto sia delle prescrizioni dei capitolati di appalto nazionale e regionale, sia delle prescrizioni delle recenti linee guida del CISIS sui modelli altimetrici.



Figura 2. Distribuzione dei rilievi di validazione sul territorio.

Sono state, quindi, scelte venti zone omogeneamente distribuite nelle diverse tipologie richieste (zone aperte, aree urbane e aree con vegetazione) e per ognuna di queste sono stati rilevati venti GCP (figura 3).



Figura 3. Tipologia aree di validazione e distribuzione GCP.

### 3.4 Validazione 2.5D

Inizialmente è stato realizzato il confronto puntuale fra i rilievi GPS ed il DTM. Per procedere a tale confronto è stata calcolata la quota ortometrica dei GCP tramite il software VERTO ed i relativi grigliati. Quindi, è stato calcolato lo scarto  $v_{oQ}$  fra tale quota ortometrica ( $Q_{oGPS}$ ) e la quota calcolata per interpolazione bilineare dalla griglia del DTM a passo un metro ( $Q_{oDTM}$ ), secondo la relazione (4).

$$v_{oQ} = Q_{oDTM} - Q_{oGPS} \quad (4)$$

dove:  $v_{oQ}$  = scarto fra le quote ortometriche  
 $Q_{oDTM}$  = quota ortometrica interpolata dal DTM  
 $Q_{oGPS}$  = quota ortometrica calcolata tramite VERTO dalla quota ellissoidica dei GCP

Le statistiche di tale confronto sono riportate in tabella 1 per le diverse aree di validazione (le aree di tipo A sono zone aperte, quelle di tipo E sono in aree urbane e quelle di tipo V sono in presenza di vegetazione).

Zona	Media[m]	DevSt[m]
A01	0.43	0.05
A02	0.41	0.02
A03	0.27	0.02
A04	0.37	0.02
A05	0.34	0.03
A06	-4.11	3.15
A07	0.50	0.05
A08	0.45	0.02
A09	0.43	0.03
A10	0.20	0.02
E01	0.39	0.04
E02	0.42	0.06
E03	0.42	0.05
E04	0.23	0.38
E05	0.39	0.02
V01	0.41	0.04
V02	0.41	0.03
V03	0.37	0.03
V04	0.29	0.04
V05	0.37	0.06

Tabella 1. Statistiche del confronto fra DTM e GCP per le singole aree.

Dall'analisi delle statistiche per le singole aree si sono evidenziati alcuni errori grossolani, in particolare nella zona A06 e nella zona E04. Gli errori sono dovuti nel primo caso alla costruzione di un manufatto successivamente alla realizzazione dei rilievi LiDAR e nel secondo alla scelta di punti di controllo eccessivamente a ridosso degli edifici con possibili problemi sia di filtraggio del dato LiDAR grezzo sia di degradazione della qualità dei GCP stessi. Queste due zone sono state escluse dal set di validazione.

Le statistiche complessive per le aree considerate sono riportate in tabella 2.

Media[m]	0.38
DevSt[m]	0.04
Min[m]	0.20
Max[m]	0.50

Tabella 2. Statistiche complessive del confronto fra DTM e GCP.

Il valore della media degli scarti evidenzia la presenza di un errore sistematico nel DTM analizzato, che sovrastima la quota reale del terreno in media di 0.38m.

Questo sistematismo è stato analizzato andando a ricercare le possibili cause e l'entità dell'errore che queste introducevano.

Una prima componente di tale errore sistematico è individuabile nel cambio incasso nel datum di riferimento dalla realizzazione dei rilievi LiDAR a quella dei rilievi GPS di validazione.

I rilievi LiDAR risalgono al 2008 e sono riferiti a punti a terra inquadrati nel datum ETRF89. Le coordinate dei GCP, rilevati rispetto la rete SartNet ItalPos della Leica, sono invece riferite al datum attuale, cioè all'ETRF2000.

Il passaggio da ETRF89 ad ETRF2000, stabilito dall'IGM all'inizio del 2009, ha comportato una variazione media in quota dei punti della rete IGM95 e di tutte le reti ad essa collegate di -8cm. Tale variazione costituisce, quindi, una prima componente dell'errore sistematico.

Un'altra componente di questo errore è dovuta ai diversi modelli di geoidi utilizzati per la conversione della quota ellissoidica del rilievo nativo in quota ortometrica.

I capitolati d'appalto prevedevano l'utilizzo del vecchio modello di geoidi ITALGEO95 mentre le conversioni effettuate con il software VERTO ed i grigliati \*.grX delle quote dei GCP applicano il geoidi ITALGEO2005.

Per indagare l'entità di tale errore è stato realizzato un confronto fra i GCP ed i dati grezzi, dai quali sono stati ottenuti per filtraggio e conversione di coordinate i DSM ed il DTM. I dati grezzi, infatti, sono forniti con la quota nativa del rilievo, riferita all'ellissoide, che è direttamente confrontabile con quella dei GCP senza necessità di ricorrere ai diversi modelli di geoidi.

Dato che i dati grezzi si presentano come una nuvola di punti non organizzata, è stata innanzitutto ricavata dal file ASCII originale una griglia regolare delle quote ellissoidiche a passo un metro. Quindi, calcolando per interpolazione bilineare le quote ellissoidiche in corrispondenza dei GCP sono stati calcolati gli scarti fra tale quota ellissoidica interpolata ( $Q_{eXYZ}$ ) e la quota ellissoidica dei GCP ( $Q_{eGPS}$ ), secondo la relazione (5). In tabella 3 sono riportate le statistiche di questo confronto.

$$v_{eQ} = Q_{eXYZ} - Q_{eGPS} \quad (5)$$

dove:  $v_{eQ}$  = scarto fra le quote ellissoidiche  
 $Q_{eDTM}$  = quota ortometrica interpolata dal DTM  
 $Q_{eGPS}$  = quota ortometrica calcolata tramite VERTO dalla quota ellissoidica dei GCP

Zona	Media[m]	DevSt[m]
A01	0.28	0.14
A02	0.23	0.02
A03	0.09	0.02
A04	0.21	0.04
A05	0.16	0.03
A07	0.31	0.05
A08	0.24	0.03
A09	0.25	0.11
A10	0.02	0.08
E01	0.29	0.22
E02	0.24	0.09
E03	0.23	0.05
E05	0.17	0.03
V01	0.24	0.03
V02	0.24	0.13
V03	0.17	0.03
V04	0.08	0.03
V05	0.14	0.04

Tabella 3. Statistiche del confronto fra dati grezzi e GCP per le singole aree.

Le statistiche complessive di questo confronto, pur confermando una sovrastima delle quote da parte dei dati grezzi,

mettono in evidenza una diminuzione consistente della media degli scarti (tabella 4).

Media[m]	0.20
DevSt[m]	0.07
Min[m]	0.02
Max[m]	0.31

Tabella 4. Statistiche complessive del confronto fra dati grezzi e GCP.

Il maggior valore della media degli scarti nel primo confronto realizzato (tabella 2) rispetto a quella del confronto che utilizza i dati grezzi (tabella 4) è quindi da imputare alla trasformazione delle quote da ellissoidiche ad ortometriche ed è riconducibile al vecchio modello di geoidi utilizzato per il calcolo delle quote ortometriche del DTM. Il sistematismo imputabile a questo fattore è di circa 18cm.

Sommando a questa quantità il sistematismo, concorde in segno, di 8cm, dovuto all'aggiornamento al datum ETRF2000, si è potuto spiegare un sistematismo pari a circa 26cm dei 38cm dell'analisi iniziale sul DTM.

Resta da indagare una componente sistematica di 12cm di cui non siamo ancora in grado di dare una spiegazione. E' stato escluso che tale sistematismo dipenda dai GCP perché strumentazione e metodologia GPS sono stati validati in corso d'opera su dieci punti della rete IGM95.

E' stato, quindi, tolto al DTM il sistematismo di 38cm ed è stata realizzata la verifica di qualità sui dati finali, così come prescritto dalle linee guida del CISIS, tramite l'analisi della tolleranza altimetrica.

Come scarto quadratico medio delle quote dei GCP è stato assunto un valore teorico  $\sigma_{CP,H}=0.04m$  derivante dall'esperienza di validazione dei GCP sui punti della rete IGM95. Il valore dell'errore lineare al 95% di probabilità dei punti di controllo è, secondo la (2),  $LE95_{CP}=0.08m$ . Infine, si ricava, tramite la (3), l'errore lineare complessivo. Per le diverse tipologie di zona considerate tale errore è riportato in tabella 5.

	A	b	c
$LE95_H[m]$	0.20	0.19	0.34

Tabella 5. Errore lineare complessivo per le tre tipologie di zona definite dal CISIS.

Il valore del passo della griglia del DTM, pari ad un metro, ed il valore dell'errore lineare complessivo, ottenuto dalla verifica di qualità altimetrica, permettono di classificare il DTM a disposizione del Comune di Pisa come un modello di "livello 6". La tolleranza altimetrica per questo livello è stabilita, infatti, pari a 0.60m in campo aperto e a 1.20m con copertura arborea superiore al 70% o arbustiva superiore al 50%.

Secondo le linee guida del CISIS le principali applicazioni possibili con un tale DTM sono la modellazione idraulica delle zone esondabili, le applicazioni ingegneristiche, la produzione di ortofoto ordinarie fino alla scala 1:1000 ed ortofoto di precisione fino alla scala 1:5000.

#### 4. CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha descritto le operazioni preliminari di validazione del modello digitale del terreno disponibile per il Comune di Pisa e derivante dagli appalti del Ministero dell'Ambiente per l'aggiornamento del Portale Cartografico Nazionale e dalla integrazione di tali appalti da parte della Regione Toscana.

Per classificare il modello sono state seguite le prescrizioni per le verifiche di qualità del dato finale inserite nelle linee guida "Ortoimmagini 10k e modelli altimetrici" pubblicate dal CISIS. Tramite una validazione 2.5D, effettuata confrontando le quote ortometriche di un set di punti di controllo a terra GPS con quelle ottenute per interpolazione dal DTM, è stato evidenziato un errore sistematico di +0.38m.

Analizzando le cause di tale errore è stato appurato che dell'errore sistematico complessivo, circa 0.08m sono imputabili al fatto che i rilievi LiDAR sono stati realizzati prima del passaggio dal datum ETRF89 ad ETRF2000 e circa 0.18m sono dovuti alla trasformazione delle quote ellissoidiche del rilievo LiDAR alle quote ortometriche del DTM.

Non è stata individuata al momento la causa del residuo errore sistematico.

Il DTM è stato, comunque, corretto da tale errore ed è stato calcolato l'errore lineare complessivo da confrontare con le tolleranze definite dal CISIS.

Il valore dell' $LE95_H$  è risultato di 0.20m in campo aperto. Il valore inferiore alla tolleranza di 0.60m ed il passo della griglia di 1.00m, hanno permesso di classificare il modello come un "livello 6".

La ricerca continuerà con l'approfondimento delle cause del sistematismo trovato e con la verifica dell'eventuale presenza di un sistematismo non solo altimetrico ma anche planimetrico. A tale scopo verrà condotta una validazione 3D che evidenzii le componenti di rotazione e traslazione del DTM rispetto al modello di riferimento costituito dai GCP.

Inoltre, verranno approfondite le problematiche relative alle zone arginali, caratterizzate da precisioni disomogenee, la cui qualità di rappresentazione altimetrica è fondamentale ai fini della modellazione idraulica delle esondazioni.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

Brovelli, M.A., Caldera, S., Liu, X., Sansò, F., 2009, Valutazione dell'accuratezza tridimensionale di un modello digitale del terreno. *Proceedings Convegno Nazionale SIFET, Mantova*, pp. 31-36.

Brovelli, M.A., Cilloccu, F., Dequal, S., Crespi, M., Lingua, A., 2009a, Linee guida Ortoimmagini 1:10.000 e modelli altimetrici. *Collana di documenti CISIS*.

Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, Direzione Generale della Difesa del Suolo, 2007, Piano straordinario di telerilevamento ambientale ad alta precisione per le aree ad alto rischio idrogeologico: Disciplina Tecnica.

Regione Toscana, Servizio Geografico Regionale, 2007, Appalto per la prestazione del servizio di realizzazione prodotti ripresa LiDAR e fotogrammetria: capitolato speciale.

#### 6. RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano il Dott. Marco Redini del Comune di Pisa per la collaborazione ed i dati messi a disposizione.

Inoltre, si ringrazia Leica Geosystem per aver messo a disposizione della ricerca uno strumento GPS1200 e la connessione alla propria rete di stazioni permanenti per la correzione differenziale.



**Edizioni SIFET**  
**ISBN 88-901939-6-4**

Finito di stampare nel Febbraio 2011 presso Pixart srl. Mestre (Ve)





**Edizioni SIFET**  
**ISBN 88-901939-6-4**  
**Febbraio 2011**