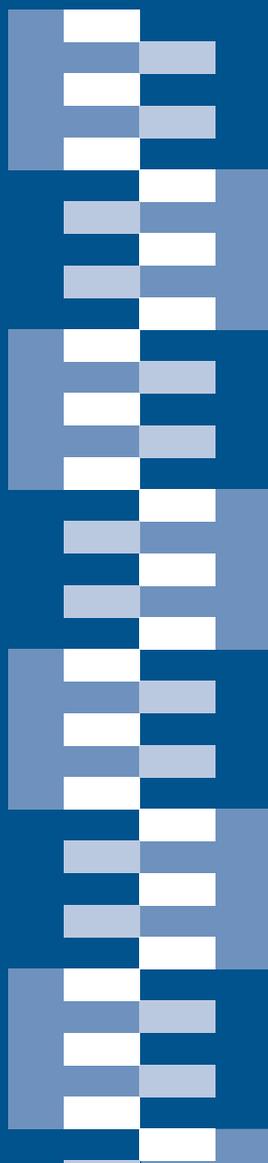


BOLLETTINO

SIFET

SOCIETÀ ITALIANA DI FOTOGRAMMETRIA E TOPOGRAFIA



Numero Speciale 2013
IL PROGETTO HELI-DEM





SIFET 2013

Bollettino della Società Italiana
di Fotogrammetria e Topografia
Numero Speciale 2013

Periodico trimestrale
Sped in abb. post 45%
Decreto legge 24/12/2003 n° 353
convertito in legge il 27/02/2004 n° 46
Cagliari - ISSN 1721-971X
Autorizzazione del Tribunale di Firenze
n. 1515 del 4 dicembre 1962
iscrizione RNS n. 01907 vol. 20 foglio 29
del 27 maggio 1986
Distribuzione gratuita ai soci SIFET
Associato alla
Unione Stampa Periodica Italiana



Direttore responsabile

Prof. Alessandro Capra

Comitato di Redazione

Prof. Fulvio Rinaudo
Ing. Paolo Aminti
Dott. Ludovico Biagi
Prof.ssa Maria Brovelli
Ing. Virgilio Cima
Prof. Stefano Gandolfi
Geom. Vittorio Grassi
Prof. Andrea Lingua
Prof.ssa Giannina Sanna
Prof. Aurelio Stoppini
Prof. Luca Vittuari

Segreteria di Redazione

Ing. Cristina Castagnetti
e-mail: redazione@sifet.org
t 059 2056298
f 059 2056126
SIFET
C.P. 286 Cagliari Centro
Piazza del Carmine
09124 CAGLIARI

Progetto grafico

S. Asili, G. Toneguzzi

Autorizzazione del Tribunale
di Firenze n. 1515 del 4.12.62
iscrizione R.N.S.
n. 01907 vol. 20 foglio. 29
del 27.5.86

ABBONAMENTO ANNUALE AL BOLLETTINO

Soci: distribuzione gratuita
Non Soci:
Italia e Comunità Europea € 95.00
Altri Stati € 120.00

In questo numero:



Nella foto sopra

Aspetto del DTM HELI-DEM. (Capitolo 9)
Immagine predisposta da Laura Carcano

A fianco

Punta Indren: 3260 m. Misure GNSS eseguite all'interno della rete NRTK HELI-DEM (Capitolo 5). Immagine fornita da Paolo Dabove

- 11 Introduzione al progetto HELI-DEM**
P. Belotti, L. Biagi, M. A. Brovelli, A. Campi, S. Campus, M. Cannata, M. Credali, A. M. Manzano, F. Sansò, G. B. Siletto
- 23 I DTM nella pubblica amministrazione**
P. Belotti, S. Campus, M. Cetti, H. Damaschi, V. Guasco, G. B. Siletto, M. Cannata, M. Molinari
- 35 Descrizione dei dati disponibili**
P. Belotti, L. Biagi, M. A. Brovelli, S. Campus, M. Cannata, L. Carcano, M. Cetti, M. Credali, P. Dabove, H. Damaschi, M. De Agostino, V. Guasco, A. M. Manzano, F. Sansò, G. B. Siletto, C. Taglioretti
- 45 Trasformazione di sistemi di riferimento dei dati**
L. Biagi, L. Carcano, P. Dabove, M. De Agostino, A. M. Manzano
- 59 Implementazione della rete GNSS di riferimento**
L. Biagi, P. Dabove, M. De Agostino, A. M. Manzano, C. Taglioretti, M. G. Visconti
- 75 Cross-validazione e validazione esterna dei DTM**
L. Biagi, M. A. Brovelli, L. Carcano, P. Dabove, M. De Agostino, A. Lucchese, A. M. Manzano, M. Negretti, C. Taglioretti, M. G. Visconti
- 107 Campagne di misura nell'ambito del progetto HELI-DEM: livellazioni geometriche di precisione e rilievi GNSS**
P. Belotti, P. Dabove, A. M. Manzano, G. B. Siletto, C. Taglioretti
- 121 Scelte e standard adottati per creare il DTM e il Geoservizio HELI-DEM**
L. Biagi, L. Carcano, M. Negretti, F. Sansò, D. Triglione
- 127 Interpolazione del DTM HD-1**
L. Biagi, L. Carcano, P. Dabove, A. Lucchese, A. M. Manzano, F. Sansò, D. Triglione
- 139 Correzione del DTM HD-1 con il DTM PST-A e validazione**
L. Biagi, S. Caldera, L. Carcano
- 153 Il geoide: fusione dei dati disponibili**
M. Gilardoni, M. Reguzzoni, D. Sampietro
- 167 Il geoportale HELI-DEM**
M. Cannata, M. Antonovic, M. Molinari
- 185 Strumenti di condivisione dei risultati del progetto**
A. Campi

La SIFET
per il quadriennio
2011-2014

Presidente

Prof. Alessandro Capra
c/o DIEF - Università di Modena e
Reggio Emilia
Via Vignolese 905/B
41125 Modena
t 059 2056188
f 059 2056126
e presidente@sifet.org
e alessandro.capra@unimore.it

Vice Presidente

Prof.ssa Anna Spalla
c/o DIET - Università di Pavia
Via Ferrara, 1 - 27100 Pavia
t 0382 985406
f 0382 985419
e anna.spalla@unipv.it

Tesoriere

Dott. Geom. Luciano Di Marco
Via Libertà n. 171
90143 Palermo
t 091 7829121
f 091 7829121
e tesoriere@sifet.org
e lucianodm@tiscali.it

Segretario

Ing. Giuseppina Vacca
c/o DISIG - Facoltà di Ingegneria
Piazza d'Armi - 09123 Cagliari
t 070 6755442
f 070 6755405
e segretario@sifet.org
e vaccag@unica.it

Assessori

Prof. Livio Pinto
c/o DIAR - Politecnico di Milano
Piazza Leonardo da Vinci, 32
20133 Milano
t 02 23996525
f 02 23996530
e livio.pinto@polimi.it

Dott. Renzo Maseroli
c/o Istituto Geografico Militare
Via di Novoli, 93 50127 Firenze
t 055 2732442
f 055 417909
e maseroli@tin.it

Sede legale

Via Barberini n. 68
00187 Roma
Partita Iva 04295830154
Codice fiscale 00754730588

Coordinate SIFET

C.C.P. Banco Posta n. 39667761
IBAN IT45Q076010480000039667761
intestato a Sifet C. P. n. 286
Cagliari Centro
Piazza del Carmine
09124 Cagliari

Il Consiglio Direttivo della Società è così costituito

Giunta esecutiva

Presidente

Prof. Alessandro Capra

Vice Presidente

Prof. ssa Anna Spalla

Segretario

Ing. Giuseppina Vacca

Tesoriere

Dott. Geom. Luciano Di Marco

Assessori

Dott. Renzo Maseroli

Prof. Livio Pinto

Membri onorari

Gen. Mario Carlà

Membri di diritto

Direttore dell'Istituto Geografico Militare

Direttore dell'Istituto Idrografico della Marina

Direttore del Centro Informazioni Geotopografiche dell'Aeronautica
Direttore Istituto Superiore per la Protezione e la ricerca Ambientale
Direttore del Dipartimento del Territorio

Presidente del Consiglio Nazionale degli Ingegneri

Presidente del Consiglio Nazionale degli Architetti

Presidente del Consiglio Nazionale dei Geometri e Geometri Laureati

Presidente Sezione Sifet Palermo

Presidente Sezione Sifet Catania

Presidente CS SIFET

Membri ordinari

(oltre ai componenti la giunta esecutiva)

Prof. Maurizio Barbarella

Prof. Mauro Caprioli

Ing. Virgilio Cima

Prof. Alberto Cina

Geom. Mauro Fino

Geom. Vittorio Grassi

Geom. Roberto Lietti

Prof. Ambrogio Manzino

Dott. Geom. Stefano Nicolodi

Dott. Geom. Paolo Nicolosi

Probiviri

Egidio Cima

Walter Mentasti

Massimiliano Currado

Revisori dei conti

Sergio Padovani

Carlo Vadilonga

Le quote sociali (con rinnovo entro il 31 Marzo) per l'anno 2011 sono le seguenti:

Soci annuali individuali

Euro 60.00 (Europa)

Euro 85.00

Soci annuali collettivi

Euro 300.00 (Europa)

Euro 365.00

Soci annuali giovani (*)

Euro 30.00 (Europa)

Euro 55.00

Soci vitalizi individuali

Euro 780.00 (Europa)

Euro 1170.00

Soci vitalizi collettivi

Euro 2710.00 (Europa)

Euro 3900.00

(*) età inferiore a 26 anni

Per informazioni:

Segreteria Amministrativa

t 070 6755406

f 070 6755405

e amministrazione@sifet.org

Numero Speciale 2013

Il Progetto HELI-DEM

Questo numero speciale del Bollettino reca i risultati di una ricerca internazionale durata tre anni di un progetto denominato HELI-DEM. HELI-DEM è stato un intervento cofinanziato con risorse PO Italia-Svizzera 2007-2013 Fondo Europeo di Sviluppo Regionale, di natura scientifica, tecnologica ed applicativa di interesse nazionale ed internazionale. I suoi obiettivi principali erano di produrre un modello digitale del terreno (DTM) e un modello di geoide per le zone alpine comprese fra Lombardia, Piemonte e Svizzera; si voleva inoltre sperimentare l'unificazione dei servizi di posizionamento satellitari per i professionisti ed il controllo dei trasporti.

Il Direttivo SIFET ha ritenuto interessante per i suoi soci questi temi e volentieri pubblica in questo numero speciale l'esito di tali ricerche.

Il presidente
Alessandro Capra



Unione Europea

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



Le opportunità non hanno confini.



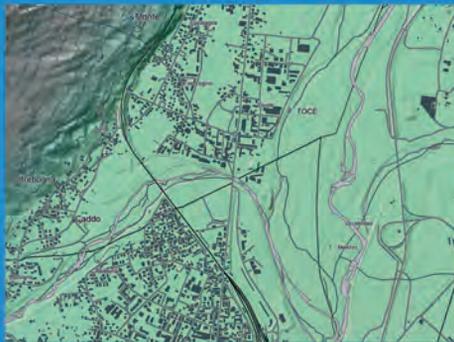
helidem

Helvetia Italy Digital Elevation Model



Partner di progetto:





HELI-DEM: INTEGRAZIONE DEI DATI DI ALTEZZA TRANSALPINI FRA ITALIA E SVIZZERA

Ludovico Biagi,
Ambrogio Maria Manzino,
Fernando Sansò
Editori

Milan Antonovic, Piera Belotti,
Maria Antonia Brovelli, Stefano Caldera,
Alessio Campi, Stefano Campus,
Massimiliano Cannata, Laura Carcano,
Monica Cetti, Marina Credali,
Paolo Dabove, Henry Damaschi,
Mattia De Agostino,
Maddalena Gilardoni, Veronica Guasco,
Alba Lucchese, Monia Molinari,
Marco Negretti, Mirko Reguzzoni,
Daniele Sampietro,
Gian Bartolomeo Siletto,
Cinzia Taglioretti, Damiano Triglione,
Maria Grazia Visconti

HELI-DEM: integrazione dei dati di altezza transalpini fra Italia e Svizzera

HELI-DEM è stato un intervento cofinanziato con risorse PO Italia-Svizzera 2007-2013 Fondo Europeo di Sviluppo Regionale, di natura scientifica, tecnologica ed applicativa di interesse nazionale ed internazionale. I suoi obiettivi principali erano di produrre un modello digitale del terreno (DTM) e un modello di geoide per le zone alpine comprese fra Lombardia, Piemonte e Svizzera; si voleva inoltre sperimentare l'unificazione dei servizi di posizionamento satellitari per i professionisti ed il controllo dei trasporti. Il progetto si è svolto con una entusiasta partecipazione dei partner, sia enti pubblici sia gruppi di ricerca ed ha raggiunto gli obiettivi previsti. In particolare:

1. è stata identificata e applicata una metodologia ottimale di costruzione del DTM;
2. è stato studiato e calcolato un geoide alpino,
3. i dati prodotti nell'ambito del progetto sono stati pubblicati.

Il presente volume discute analiticamente obiettivi, metodologie e risultati del progetto. Ulteriore materiale è disponibile sul sito del progetto: www.helidem.eu

20 luglio 2013, Ludovico Biagi, Ambrogio Maria Manzino e Fernando Sansò

Contributi di

Milan Antonovic, Piera Belotti, Maria Antonia Brovelli, Stefano Caldera, Alessio Campi, Stefano Campus, Massimiliano Cannata, Laura Carcano, Monica Cetti, Marina Credali, Paolo Dabove, Henry Damaschi, Mattia De Agostino, Maddalena Gilardoni, Veronica Guasco, Alba Lucchese, Monia Molinari, Marco Negretti, Mirko Reguzzoni, Daniele Sampietro, Gian Bartolomeo Siletto, Cinzia Taglioretti, Damiano Triglione, Maria Grazia Visconti

Enti partecipanti

Regione Lombardia, DG. Territorio Urbanistica e Difesa del Suolo, UO. Strumenti per il Governo del Territorio, P.zza Città di Lombardia 1, 20124, Milano

Regione Piemonte, Direzione programmazione strategica, politiche territoriali ed edilizia, Settore Infrastruttura geografica, strumenti e tecnologie per il governo del territorio, Corso Bolzano, 44, 10121, Torino

Politecnico di Milano, DICA, Laboratorio di Geomatica presso Polo Territoriale di Como, Via Valleggio 11, 22100 Como

Politecnico di Torino, DIATI, Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture, Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino

Fondazione Politecnico di Milano, Piazza Leonardo da Vinci 32, 20132, Milano

Istituto scienze della Terra, Dipartimento ambiente costruzione e design, Scuola universitaria professionale della Svizzera italiana, Campus Trevano CH-6952 Canobbio, Svizzera

CAPITOLO 1

INTRODUZIONE AL PROGETTO HELI-DEM (HELVETIA-ITALY DIGITAL ELEVATION MODEL)

Piera Belotti (1), Ludovico Biagi (2), Maria Antonia Brovelli (2), Alessio Campi (4),
Stefano Campus (3), Massimiliano Cannata (5), Marina Credali (1),
Ambrogio Maria Manzino (6), Fernando Sansò (2), Gian Bartolomeo Siletto (3)

(1) Regione Lombardia, DG. Territorio Urbanistica e Difesa del Suolo, UO. Strumenti per il Governo del Territorio, P.zza Città di Lombardia 1, 20124, Milano

(2) Politecnico di Milano, DICA, Laboratorio di Geomatica presso Polo Territoriale di Como, Via Valleggio 11, 22100 Como

(3) Regione Piemonte, Direzione programmazione strategica, politiche territoriali ed edilizia, Settore Infrastruttura geografica, strumenti e tecnologie per il governo del territorio, Corso Bolzano, 44, 10121, Torino

(4) Fondazione Politecnico di Milano, Piazza Leonardo da Vinci 32, 20132, Milano

(5) Istituto scienze della Terra, Dipartimento ambiente costruzione e design, Scuola universitaria professionale della Svizzera italiana, Campus Trevano CH-6952 Canobbio, Svizzera

(6) Politecnico di Torino, DIATI, Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture, Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino

SOMMARIO

I dati di elevazione, ovvero le quote del terreno, vengono memorizzati nei Modelli Digitali di Elevazione (DEM), i quali costituiscono uno strumento di base per moltissime applicazioni di carattere ambientale e territoriale. Nella gestione congiunta dell'informazione geografica contigua o parzialmente sovrapposta, come quella di enti diversi e confinanti, ad esempio nella gestione transfrontaliera tra due stati, si pone il problema di armonizzare l'informazione per mezzo di algoritmi generali di trasformazione sia per le informazioni quantitative che qualitative. Per quanto riguarda i DEM ciò richiede che le coordinate planimetriche e altimetriche dei punti siano tra loro congruenti e correttamente georeferenziate in un unico sistema di riferimento, e che la definizione del terreno digitale, per quanto attiene alle sue caratteristiche di risoluzione ed accuratezza, sia consistente tra le due parti.

Negli ultimi anni sono stati acquisiti in Italia e in Svizzera dati di elevazione del terreno con sistemi di riferimento, tecnologie, risoluzioni, accuratezze e modelli dati differenti. Analogamente la stima del geoide non è uniforme tra Italia e Svizzera per quanto riguarda le metodologie di calcolo impiegate e i dati di base utilizzati per tali calcoli. Il progetto HELI-DEM (Helvetia Italia Digital Elevation Model) ha mirato alla creazione di un modello digitale delle altezze unificato, per la fascia alpina e subalpina, tra Italia e Svizzera, correttamente georeferenziato, prodotto validando e, ove possibile, integrando in un unico modello tutte le sorgenti di informazioni che erano disponibili. Il progetto ha avuto una durata complessiva di 36 mesi. Questa introduzione al libro discute analiticamente gli scopi di HELI-DEM e presenta le diverse parti che lo hanno composto.

ABSTRACT

Elevation data are stored in the Digital Elevation Models (DEM) that are the basic tools for many environmental and territorial applications. In the joint management of geographic information by different institutions, for example in the cross-border management between two states, the problem exists of managing information in a federated and widespread way. The DEM merging requires that the 3D coordinates of the points are mutually consistent and correctly geo-referenced in a unique reference system. In recent years, elevation data in different reference frames, with different resolutions and accuracies have been acquired in Italy and Switzerland. Moreover, the merging of different national geoids poses methodological and practical problems.

The HELI-DEM (Helvetia Italia Digital Elevation Model) project aimed at creating a unified digital model of the heights for the alpine and subalpine zones along the border between Italy and Switzerland. This model should be properly geo-referenced and produced combining in a single model all the available information. The project has lasted 36 months. This introductory Chapter discusses the purposes of HELI-DEM and presents its different parts.

1 DESCRIZIONE DI IMPIANTO DEL PROGETTO HELI-DEM

I modelli che descrivono la quota della superficie topografica del pianeta sono parte integrante nei Sistemi Informativi Geografici (GIS) e uno dei dati territoriali fondamentali previsti dalla Direttiva Europea INSPIRE (INfrastructure for SPatial InfoRmation in Europe, *inspire.jrc.ec.europa.eu*); essi vengono memorizzati nei Digital Elevation Models (modelli digitali di elevazione, DEM, Li et al., 2005), i quali costituiscono uno strumento di base per moltissime applicazioni di carattere ambientale e territoriale: nel seguito si riportano quelle principali. Si noti che il termine DEM è riferito alla generica famiglia dei modelli di elevazione: in tale ambito si distingue fra Digital Surface Models (DSM) che rappresentano la superficie effettiva, ovvero inclusiva di edifici, vegetazione, etc.; viceversa i Digital Terrain Models (DTM) rappresentano l'elevazione del terreno nudo (Figura 1). Maggiori dettagli e le applicazioni dei DTM sono discusse nel Capitolo 2.

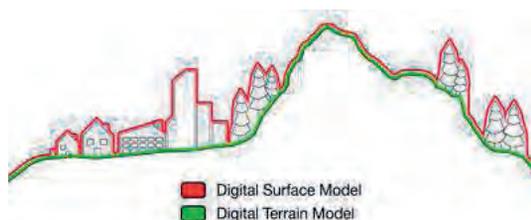


Figura 1. Distinzione fra Modelli Digitali di Superficie (Digital Surface Models, DSM) e del Terreno (Digital Terrain Models, DTM).

Immagine dal sito <http://www.computamaps.com/newsletter/3-3/newsletter3-3.html>

Negli ultimi anni sono stati acquisiti in Italia e in Svizzera diversi DEM con diverse caratteristiche. In estrema sintesi, il progetto HELI-DEM (Biagi et al., 2011) ha permesso la creazione di un DEM unificato, per la fascia alpina e subalpina, tra Italia (Piemonte e Lombardia)

e Svizzera (Canton Ticino, fascia alpina di Canton Grigioni e Vallese), integrando in un unico modello tutte le sorgenti di informazioni disponibili. Maggiori dettagli analitici sul progetto vengono dati nella Sezione 3, alla quale però è necessario porre alcune premesse tecniche.

2 QUALCHE DEFINIZIONE E DETTAGLIO TECNICO

Un modo standard per descrivere un DEM è quello di fornire un campo di altezze dei punti del terreno rispetto ad una superficie di riferimento, campionato su una griglia regolare di punti; all'insieme numerico di dati è poi associato un interpolatore per la stima dell'altezza in un punto qualunque e quindi per la rappresentazione grafica di linee di livello, linee di massima pendenza, etc.

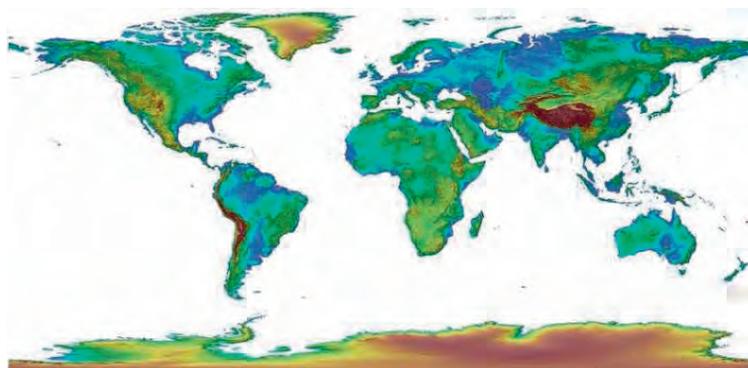


Figura 2. Un esempio di modello digitale di elevazione: il modello Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010 (GMTED2010, topotools.cr.usgs.gov/gmted_viewer). GMTED2010 copre effettivamente l'intera superficie del pianeta, è grigliato in coordinate geografiche con risoluzione di 7.5" (che alle nostre latitudini corrisponde a circa 225 m): la sua accuratezza nominale è di 25m. Immagine dal sito ufficiale di GMTED2010

Il modello altimetrico a maglia regolare può essere costruito utilizzando un grigliato metrico, generalmente fornito in coordinate cartografiche, nel quale le coordinate (N , E) dei punti (o nodi) variano di quantità costanti (ΔN , ΔE) o un grigliato in coordinate geografiche (φ , λ) nel quale sono costanti le differenze di latitudine e di longitudine ($\Delta\varphi$, $\Delta\lambda$). Il grigliato metrico è usato per descrivere porzioni di territorio limitate, indicativamente comprese entro un fuso della rappresentazione UTM. Il grigliato geografico è invece usato di solito per modelli altimetrici a scala nazionale, continentale o globale, ed è continuo, cioè non presenta soluzioni di continuità dovute al cambiamento del fuso; esso non ha una densità metrica omogenea: non possono infatti essere garantite contemporaneamente l'omogeneità nel campionamento metrico e nel campionamento geografico. Si noti che per il passaggio dal grigliato metrico a quello geografico devono essere utilizzati metodi di interpolazione per il ricalcolo delle quote in punti equidistanti geograficamente o metricamente nei due rispettivi casi. Spesso le griglie sono "quadrate" ovvero $\Delta N = \Delta E$ o $\Delta\varphi = \Delta\lambda$ a seconda dei casi: in tal caso il passo della griglia (ad esempio 100 m oppure 1") viene assunto come indice di risoluzione spaziale del DEM.

In alternativa al modello a griglia, il terreno può essere anche descritto dal modello TIN (Triangulated Irregular Network), cioè un insieme di punti disposti nello spazio e corrispondenti ai punti in cui sia stata misurata la quota, collegati mediante una serie continua di triangoli piani. La costruzione del TIN, cioè la scelta dei triangoli, viene generalmente eseguita in modo univoco mediante l'algoritmo di Delaunay, secondo il quale la circonferenza circoscritta ad ogni triangolo non deve contenere nessun altro vertice. All'interno del singolo triangolo si suppone che il terreno sia descrivibile con un piano passante per i vertici del triangolo stesso e quindi la quota in un punto qualsiasi è derivabile da tale modello. Le poligonali che descrivono linee caratteristiche o linee di rottura sono sempre impiegate come lati dei triangoli e i loro vertici come punti nella generazione del modello altimetrico.

Infine le informazioni di elevazione possono essere disponibili dai DB topografici o dalle cartografie numeriche tridimensionali in termini di punti altimetrici, di curve di rottura, di profili quotati e di curve di livello, con le quote associate quale loro attributo. In generale nella produzione del DB topografico tutte le informazioni altimetriche di tipo sia puntuale sia lineare vengono utilizzate per creare un TIN. Dai dati sotto forma di TIN vengono in seguito ricavate le curve di livello.

L'accuratezza del DEM è di solito data per mezzo della deviazione standard delle altezze stimate ai nodi della griglia. Va sottolineato che tale indice non rappresenta l'accuratezza della predizione di un'altezza in un punto qualunque, per il calcolo della quale occorrerebbe conoscere la covarianza completa del DEM sulla griglia oltre che avere un variogramma del terreno nell'area di interesse.

2.1 Tipi di altezze in uso e loro acquisizione

Indipendentemente dal modello usato per le informazioni altimetriche, le altezze più utilizzate sono l'altezza ortometrica, ovvero la lunghezza della linea della verticale compresa tra il punto dato ed una superficie di riferimento detta geoide (vedi sotto), oppure l'altezza ellissoidica, ovvero il tratto di normale all'ellissoide compreso tra il punto dato e l'ellissoide stesso. Il rilevamento del campo di altezza del terreno è sempre in termini di altezze ellissoidiche almeno per le principali tecniche:

- GNSS (Global Navigation Satellite Systems): si tratta di un rilevamento puntuale e fornisce punti isolati per la validazione e la georeferenziazione (Biagi, 2009).
- Aerofotogrammetria: permette di ottenere la ricostruzione della superficie da osservazioni ottiche di carattere puramente geometrico. La superficie viene resa in altezze ellissoidiche se i punti d'appoggio sono dati a loro volta in coordinate ellissoidiche, ovvero se il rilevamento avviene per fotogrammetria diretta (Kraus, 1998).
- LiDAR (Light Detection And Ranging): è analogo alla fotogrammetria ma utilizza per il rilevamento un telemetro laser georeferenziato mediante strumentazione INS-GNSS. La determinazione delle altezze avviene per punti, ancorché ad alta densità (fino a decine di punti per m², Baltsavias, 1999, Wehr et Lohr, 1999).
- SAR (Synthetic Aperture Radar): da aereo o da satellite. Il radar, nella funzione di rilevamento di un DEM, fornisce valori di altezze medie su un'area; ad esempio il DSM SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) disponibile gratuitamente a livello mondiale fornisce altezze medie su $100 \times 100 \text{ m}^2$ con accuratezza dell'ordine di 10 m (Curlander et McDonough, 1991).

- Fotogrammetria da satellite: ha lo stesso principio della fotogrammetria da aereo ma usa stereocoppie di immagini ad alta risoluzione prese da piattaforma satellitare. Un prodotto reso da poco liberamente disponibile dalla NASA e dal Ministero Giapponese dell'Economia, del Commercio e dell'Industria e Trasporti a livello mondiale è il DSM ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) con risoluzione di 30 m ed accuratezza verticale di circa 20 m (www.asterweb.jpl.nasa.gov).

Esistono poi modelli ibridi, ovvero ottenuti mediante fusione e armonizzazione di diversi DTM: il più noto di essi è GMTED2010, un modello globale prodotto dallo U.S. Geological Survey (USGS) e dallo National Geospatial-Intelligence Agency (NGA), di cui si fornisce una descrizione sintetica in Figura 2. Si noti che tutte le tecniche di ricostruzione in effetti forniscono un DSM (Digital Surface Model) e non un DTM, anche se, in realtà, il LiDAR, con la sua osservazione di ritorni multipli, permette talvolta di “bucare” la vegetazione e raggiungere il terreno. In ogni caso il passaggio dal DSM al DTM è un passaggio analitico (detto filtraggio del dato) che comporta la stima dell'altezza del terreno sotto manufatti e vegetazione (Baltsavias, 1999, Brovelli et al., 2004).

2.2 Riferimenti delle altezze e loro trasformazione

Il sistema di riferimento e il relativo ellissoide internazionali globali sono quelli definiti dalle convenzioni e dai parametri ITRS (International Terrestrial Reference System, www.iers.org) ed aggiornato circa ogni quattro anni dallo IERS (International Earth Rotation and Reference System Service) tramite i diversi ITRF_y (attualmente ITRF2008, Altamimi et al., 2010). A livello europeo, i dati cartografici dovrebbero essere prodotti nel sistema di riferimento ETRS89 (Adam et al., 1999), la cui attuale realizzazione è ETRF2000 (www.euref.eu): le formule di trasformazione fra ITRF e ETRF sono pubblicate e hanno accuratze migliori del centimetro. Si deve però ricordare che molti dati cartografici nazionali o regionali sono ancora espressi in sistemi di riferimento storici locali: come vedremo, questo è il caso del DTM di Regione Lombardia, che è nel sistema Italiano Roma 40. Anche in questo caso, le trasformazioni da o verso i sistemi di riferimento ITRF e ETRF sono pubblicate, ma le loro accuratze sono decisamente inferiori, arrivando ad alcuni centimetri: al riguardo della trasformazione fra sistemi di riferimento si trovano maggiori dettagli nel Cap. 4.

Il geoide è una superficie equipotenziale del campo di gravità terrestre anch'esso definito convenzionalmente mediante il valore W_0 del potenziale. La sua realizzazione tuttavia varia da nazione a nazione e si possono avere sistematismi nella trasformazione del datum d'altezza tra una nazione e l'altra. Il passaggio da un DEM in altezze ellissoidiche $\{h\}$ ad uno in altezze ortometriche $\{H\}$ deve avvenire attraverso la conoscenza dell'altezza del geoide sull'ellissoide ovvero del cosiddetto campo di ondulazione del geoide N : la relazione elementare che lega le tre grandezze con una precisione migliore del centimetro anche per aree di alta montagna, è data dall'equazione $h = H + N$.

A sua volta il geoide è noto con diversi livelli di risoluzione ed accuratezza. Ad esempio è disponibile oggi un modello globale (EGM08, Pavlis et al., 2008) con una risoluzione di circa 10 km ed una accuratezza globale di 30 cm. Il modello locale di maggior dettaglio e precisione in Italia è ITALGE008 (Albertella et al., 2008), prodotto dal Politecnico di Milano e distribuito dall'Istituto Geografico Militare (IGM): la risoluzione è di 1' e l'accuratezza complessiva è dell'ordine dei 10 cm. Il modello locale svizzero è CHGeo2004 (Marti, 2007), de-

terminato attraverso una combinazione di tutti i metodi di stima e presenta su tutto il territorio nazionale un grado di precisione che varia tra 1 e 3 cm: il modello di geoide della Svizzera è reso disponibile da Swisstopo nella forma di una griglia con passo di 1 km. Si noti che le accuratèzze appena citate non sono realistiche nell'area alpina di interesse a causa di due fenomeni: la fascia alpina risulta ai margini del data set gravimetrico disponibile per il calcolo del geoide, la distribuzione dei dati è rada e maldisposta, avendosi per lo più dati gravimetrici lungo le valli principali. Tuttavia la disponibilità di un migliore data set gravimetrico e un miglior DEM, ottenuti integrando dati italiani e svizzeri, e il contemporaneo utilizzo di dati di gradiometria della missione GOCE (Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer, Drinkwater et al., 2007) possono permettere di raggiungere l'obiettivo posto anche per un'area a forte variabilità geofisica come quella alpina.

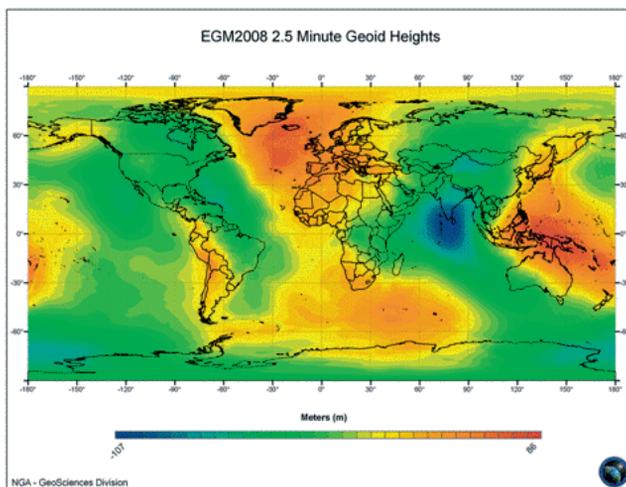


Figura 3. Il modello globale di geoide EGM2008
(earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/egm08_wgs84.html)

2.3 Accuratezza e tolleranza dei modelli altimetrici

I dati di un modello altimetrico possiedono una precisione inferiore rispetto a quelli ottenuti dalle reti geodetiche: i valori di riferimento per operazioni di controllo di qualità sono in genere quelli di misure di quota caratterizzate da un'accuratezza superiore. Per i modelli digitali più accurati tali valori corrispondono alle quote dei capisaldi delle reti altimetriche di inquadramento geodetico, la cui precisione è normalmente di alcuni millimetri. Misure di alta precisione con strumentazione geodetica e rilievi GNSS in modalità RTK possono pertanto essere considerate come valori di riferimento e di controllo per i dati dei modelli altimetrici.

Gli scostamenti dei dati dei modelli altimetrici dai valori di riferimento sono considerati errori: tali errori possono essere accidentali o sistematici. Per la determinazione degli errori sistematici, che hanno effetti equivalenti a quelli nel sistema di riferimento del modello, è necessario individuare dei punti in campo aperto e in corrispondenza di variazioni significative di pendenza, il più possibile distribuiti omogeneamente su tutta la zona coperta dal modello e calibrare su di essi il modello stesso. La calibrazione deve essere effettuata almeno stimando

e rimuovendo la differenza altimetrica media (errore sistematico altimetrico) tra quote del modello e quote dei punti di riferimento, con procedura di traslazione in quota (detta anche 2.5D); possibilmente, la calibrazione deve essere effettuata stimando e rimuovendo anche le differenze planimetriche medie (errore sistematico planimetrico) con una rototraslazione spaziale, ovvero una trasformazione 3D, per ora possibile solo con software scientifico. Il Politecnico di Milano ha elaborato tale procedura e dispone quindi del software adeguato per questo tipo di calibrazione rigorosa (Brovelli et al., 2009).

Dopo aver effettuato la calibrazione e aver rimosso gli errori sistematici, l'accuratezza del modello dipende unicamente dai suoi errori accidentali e può essere valutata per mezzo della deviazione standard, che in questo caso coincide con l'errore quadratico medio (RMSE) o di indici dedotti dall'errore quadratico medio. Gli indici adottati sono, conformemente allo standard ISO/TC 211: *TS 19138 - Geographic information - Data quality measures - N 2029* del 5 giugno 2006 (211n2029), la tolleranza in quota (lineare) $LE95_{H(a)}$ corrispondente alla probabilità pari al 95 % e la tolleranza planimetrica $CE95_{NE}$ sempre corrispondente alla medesima probabilità.

Livello	Tipo	Res	$LE95_{H(a)}$	$LE95_{H(b)}$	$LE95_{H(c)}$	$CE95_{NE}$
0	DTM, DSM	40-100	30	30	30	20
1	DTM, DSM	20	10	20	10	10
2	DTM, DSM	20	4	½ al.m.al.	5	4
3	DTM, DSM	10	2	½ al.m.al.	3	2
4	DTM, DSM	5	0.60	1.20	0.80	0.60
5	DTM, DSM	2	0.40	0.80	0.54	0.40
6	DDTM, DDSM	1	0.60	1.20	0.80	0.60
7	DDTM, DDSM	0.50	0.30	0.60	0.40	0.30
8	DDTM, DDSM	0.10-0.20	0.20	0.30	0.26	0.20

Tabella 1. Indici di accuratezza per i diversi livelli DTM in accordo alla classificazione ISO/TC 211: TS 19138, dove sono indicati: Livello: il livello del DTM/DSM; Res: risoluzione del DTM/DSM; $LE95_{H(a)}$: la tolleranza in quota in campo aperto, detta anche tolleranza fondamentale, per DTM/DSM; $LE95_{H(b)}$: la tolleranza in quota in presenza di alberatura folta (copertura arborea maggiore del 70 %) per DTM; $LE95_{H(c)}$: tolleranza in quota dei punti del modello di descrizione degli edifici per DSM; $CE95_{NE}$: tolleranza planimetrica. Risoluzione e tolleranze in metri. Si noti che gli acronimi DDTM/DDSM ivi citati significano rispettivamente Dense DTM/DSM e vengono usualmente adottati per modelli con risoluzione spaziale migliore del metro. Da Brovelli et al. (2012).

Gli indici teorici di riferimento per valutare la qualità di un DTM sono calcolati a priori a partire dalla scala nominale della cartografia numerica a cui corrisponde lo specifico DTM.

Dal punto di vista applicativo, deve essere verificato che sul 95 % dei punti di riferimento (punti in cui è stata misurata la quota con precisione superiore a quella che ci si aspetta per il

modello digitale del terreno), la differenza media tra le quote del DTM e le quote “vere” moltiplicata per 1.960 (per ottenere l’indice LE95) è inferiore all’indice teorico di riferimento. Analogamente nel caso della tolleranza planimetrica, deve essere calcolato lo scostamento medio nelle componenti planimetriche del modello rispetto alle coordinate planimetriche con precisione superiore, tale valore deve essere moltiplicato per 1.7308 (per ottenere l’indice CE95) e il risultato deve essere inferiore all’indice teorico di riferimento. Una possibile classificazione dei modelli digitali del terreno è quella ISO/TC 211, TS 19138, riportata in Tabella 1.

3 DESCRIZIONE ANALITICA DEL PROGETTO HELI-DEM

Negli ultimi anni sono stati acquisiti in Italia e in Svizzera dati di elevazione del terreno con sistemi di riferimento, tecnologie, risoluzioni, accuratèzze e modelli dati differenti. Analogamente le stime di geoidè per Italia e Svizzera non sono uniformi per quanto riguarda le metodologie di calcolo impiegate e i dati di base utilizzati per tali calcoli. Obiettivo del progetto HELI-DEM (Biagi et al., 2011) era la creazione di un modello digitale delle altezze unificato, per la fascia alpina e subalpina, tra Italia e Svizzera, correttamente georeferenziato, prodotto validando e integrando in un unico modello tutte le sorgenti di informazioni rese disponibili dai vari partner. Si è posto dunque il problema di un sistema di inquadramento che permettesse di gestire in forma federata e diffusa. Per quanto riguardava i modelli di elevazione ciò ha richiesto:

- a) che le coordinate planimetriche dei punti in una fascia transfrontaliera fossero tra loro congruenti e correttamente georeferenziate in un unico sistema di riferimento,
- b) che l’informazione altimetrica ovviamente non presentasse discontinuità e che fosse consistente al livello nominale di accuratezza dei DEM,
- c) che la definizione del terreno digitale, per quanto atteneva alle sue caratteristiche di risoluzione ed accuratezza, fosse consistente tra le due parti.

Per adempiere a tale compito con una risoluzione almeno di 20 m (o migliore laddove erano disponibili modelli digitali o informazioni di elevazione a maggior dettaglio) ed un’accuratezza che fosse la migliore ottenibile in funzione sempre dei prodotti disponibili, per la fascia alpina oggetto del progetto è stato necessario un ricalcolo del geoidè, o datum d’altezza, nell’area d’interesse, con un’accuratezza migliore di 10 cm. Inoltre, è stato necessario realizzare e determinare una rete GNSS, per la validazione e la georeferenziazione dei dati lungo la linea di frontiera. L’integrazione di dati tridimensionali transnazionali multirisoluzione ha richiesto la disponibilità di appropriati metodi e parametri di trasformazione di sistemi di riferimento e di rigrigliatura, almeno conformi alle accuratèzze dei modelli digitali del terreno originari.

E’ necessario ricordare che originariamente il progetto prevedeva di assimilare e integrare sia modelli del terreno (DTM), sia modelli di superficie (DSM): perciò il nome iniziale conteneva l’acronimo generale DEM. Nello sviluppo del progetto stesso è poi emerso che i DSM effettivamente disponibili ed acquisibili non avrebbero aggiunto alcuna informazione significativa ai DTM effettivamente acquisiti. Per tale motivo si sono utilizzati esclusivamente DTM (Cap. 3) e, nella dizione, in seguito si utilizzerà sempre tale acronimo.

Nel progetto sono stati coinvolti i seguenti Enti: Fondazione Politecnico di Milano, Politecnico di Milano - Polo Territoriale di Como, Politecnico di Torino, Regione Lombardia, Regione Piemonte, Scuola Universitaria della Svizzera Italiana. Si è inoltre collaborato con SwissTopo e l'Istituto Geografico Militare.

Il progetto si è articolato in nove Work Packages (WP), per una durata complessiva inizialmente prevista di 30 mesi, che è stata poi prorogata a 36. Si fornisce nel seguito una sintetica presentazione dei WP e un elenco dei risultati ottenuti, richiamando e rinviando la loro discussione approfondita ai Capitoli successivi.

Il WP1 ha riguardato la gestione generale del progetto, ed è durato per tutta l'estensione dello stesso: il suo responsabile è stato Fondazione Politecnico Milano, in supporto a Regione Lombardia, capofila.

WP2. Raccolta e analisi delle varie tipologie di dati disponibili (DTM e geoide). Nell'ambito di tale WP si è creato e omogeneizzato il database di HELI-DEM: inoltre si è predisposta una panoramica dettagliata dei vari prodotti disponibili con le relative caratteristiche (metainformazioni). I metodi e risultati ottenuti nel WP2 sono discussi nei Capitoli 3 e 4 per i DTM, 11 per i modelli di geoide.

WP	Titolo e responsabile	MI	MF
WP1	Management-FPM	1	30
WP2	Raccolta e analisi delle varie tipologie di dati disponibili (DTM e geoide)-PoliTO	1	6
WP3	Verifica incrociata dei DTM e dei geoidi esistenti-PoliMiC	5	16
WP4	Reti GNSS transfrontaliere-PoliTo	7	18
WP5	Unificazione del datum d'altezza (geoide) tra Svizzera e Italia-PoliMiC	12	23
WP6	Validazione esterna e georeferenziazione del DEM-SUPSI	21	26
WP7	Integrazione di tutti i dati di altezza disponibili e validati-PoliMiC	16	27
WP8	Sperimentazione di uso dei risultati del progetto e valutazione finale dei dati-PoliMiC	22	27
WP9	Diffusione e valorizzazione dei risultati della ricerca-FPM	19	30

Tabella 2. I WP di HELI-DEM. MI. Mese di inizio. MF. Mese di fine. La tabella riporta la scansione inizialmente prevista, rispetto alla quale è stata concessa una proroga a 36 mesi. Fondazione Politecnico di Milano: FPM, Politecnico di Milano - Polo Territoriale di Como: PoliMiC, Politecnico di Torino: PoliTo, Regione Lombardia: RLo, Regione Piemonte: RPi, Scuola Universitaria della Svizzera Italiana: SUPSI.

WP3. Verifica incrociata dei DTM e dei geoidi esistenti. La cross-validazione dei dati altimetrici è stata un'operazione centrale del progetto perché mirava a definire i dati a risoluzione ed accuratezza migliori che sarebbero stati utilizzati nel prodotto finale. Si sono definite le metodologie di verifica incrociata, si sono scelti gli algoritmi e si è sviluppato il software per la cross-validazione, l'elaborazione dei dati e la valutazione statistica dei risultati. La descrizione analitica del lavoro svolto e dei risultati ottenuti nel WP3 è nei Capitoli 6 per quanto riguarda i DEM e 11 per quanto riguarda i modelli di geoide.

WP4. Reti GNSS transfrontaliere. Il WP4 ha riguardato l'implementazione di una rete permanente transalpina GNSS a supporto di rilievi statici e in modalità RTK. A tal fine si sono unificate le reti permanenti GNSS nelle regioni di interesse e si è implementato un centro di controllo congiunto. Tale rete è stata sperimentata per la georeferenziazione del DEM e del dato di altezza. Le azioni svolte e i risultati ottenuti nel WP5 sono descritti nel Capitolo 5 (installazione e validazione della rete GNSS): i Capitoli 6 e 7 riportano i prodotti derivati da tale WP, rispettivamente la validazione dei DEM mediante rilievi RTK e l'utilizzo di rilievi statici.

WP5. Unificazione del datum d'altezza (geoide) tra Svizzera e Italia. In un approccio moderno l'altezza ortometrica deve sempre essere accompagnata dai valori di ondulazione del geoide per la trasformazione tra altezze ortometriche ed ellissoidiche. Per il calcolo di un geoide di alta precisione nella fascia transalpina ci si è avvalsi del modello globale EGM 08, dei due geoidi nazionali italiano e svizzero, dei valori di potenziale anomalo T e delle sue derivate radiali seconde a circa 200 km di altezza fornite dalla missione GOCE. La raccolta dei dati, la metodologia di unificazione e i risultati del WP sono descritti nel Capitolo 11.

WP6. Validazione esterna e georeferenziazione del DEM. La validazione esterna e la georeferenziazione dei DTM sono state effettuate per mezzo di rilievi GNSS. E' fondamentale ricordare che qui si confrontano tra loro insiemi di dati (DTM e GNSS) totalmente indipendenti; inoltre le accuratze dei DTM sono inferiori a quelle dei rilievi GNSS in modalità cosiddetta RTK. La validazione esterna dei DTM mediante GNSS è quindi metodologicamente differente dalla loro cross-validazione, ovvero gli obiettivi del WP3. Ciò nonostante lo scopo pratico dei due WP è identico perché riguarda la validazione e l'armonizzazione dei dati disponibili: quindi i risultati del WP6 sono descritti insieme a quelli del WP3, nel Capitolo 6.

WP7. Integrazione di tutti i dati di altezza disponibili e validati. Il WP ha previsto la definizione della metodologia per l'integrazione delle informazioni altimetriche disponibili e validate. In particolare si sono studiati algoritmi e implementato software per:

1. integrare tutti i DTM regionali a simile (bassa) risoluzione e confinanti, in modo da interpolarli su una nuova griglia comune e produrre un DTM unificato a copertura dell'intera area di HELI-DEM,
2. correggere il DTM HELI-DEM prodotto al passo precedente mediante dati ad alta risoluzione e accuratezza ove questi erano disponibili,
3. pubblicare mediante un geoservizio standard OGC i dati così ottenuti.

L'impostazione del lavoro e la descrizione di come è strutturato il geoservizio sono nel Capitolo 8. L'interpolazione del DTM unificato viene descritta nel Capitolo 9, la sua correzione mediante i dati ad alta risoluzione è nel Capitolo 10.

WP8. Sperimentazione di uso dei risultati del progetto e valutazione finale dei dati. Per un test di sperimentazione si è realizzato un Geoportale che legge i dati del progetto dal geoservizio, li pubblica mediante un'interfaccia intuitiva e permette di effettuare operazioni di analisi su di essi. Il Geoportale è sviluppato in ambiente Free and Open Source; l'accesso ai dati e i servizi di interrogazione sono stati implementati in accordo agli standard Web Map Service, Web Coverage Service, Web Feature Service e Web Processing Service. Oltre ai dati primari, il Geoportale pubblica carte derivate; inoltre permette all'utente di effettuare operazioni di analisi e estrazione statistica. I metodi e i risultati sono descritti nel Capitolo 12.

WP9. Diffusione e valorizzazione dei risultati della ricerca. Per la divulgazione si è implementata e si sta ora concludendo una strategia integrata che ha utilizzato il più ampio ventaglio di opzioni possibili, ovvero forme consolidate di diffusione quali articoli e pubblicazioni sia scientifiche sia a taglio divulgativo ma anche forme legate alle nuove tecnologie. Sono inoltre stati integrati nella strategia di divulgazione anche appuntamenti collettivi destinati agli operatori del settore e agli interessati: un elenco delle attività di promozione e valorizzazione dei risultati di HELI-DEM è riportata nel Capitolo 13.

4 CONCLUSIONI

Il progetto ha visto l'entusiasta partecipazione dei partner, sia enti pubblici sia gruppi di ricerca, raggiungendo significativi obiettivi, sia metodologici sia di produzione cartografica, anche in accordo alla direttiva Inspire.

1. E' stata identificata una metodologia ottimale di costruzione del DTM e si è verificato che una interpolazione bicubica ha in generale maggior precisione in particolare nella predizione delle pendenze, ma è prona a deviazione in aree di cattiva distribuzione dei punti di input; al contrario una interpolazione bilineare risulta meno precisa ma più robusta.
2. Corrispondentemente sono stati creati due DTM a bassa risoluzione (a passo di circa 20 m), calcolati con le due metodologie: i dati di input di questo processo sono circa 380×10^6 , i nodi del DTM finale sono 116×10^6 .
3. E' stata identificata una metodologia multirisoluzione per l'utilizzo di DTM a maggior risoluzione e precisione. In particolare è stato creato un nuovo DTM a bassa risoluzione compatibile con i dati ad alta risoluzione (LiDAR), ove disponibili.
4. E' stato studiato un geoide alpino nell'area che combina i geoidi locali, quello globale EGM08 e il geoide a bassa risoluzione e con bias ridotto derivato da GOCE.
5. Il materiale divulgativo e le relazioni tecniche relative al progetto sono pubblicati sul sito www.helidem.eu. I dati prodotti nell'ambito del progetto sono pubblicati mediante un Geoservizio e su un Geoportale.

BIBLIOGRAFIA

Albertella A., Barzaghi R., Carrion D., Maggi A., *The joint use of gravity data and GPS/levelling undulations in geoid estimation procedures*. Bollettino di Geodesia e Scienze Affini, n°1, 2008

Adam J., et al, *The European Reference System coming of age*, in Geodesy Beyond 2000, IAG General Assembly, Birmingham July 1999, K. P Schwarz eds., IAG Symposia , Vol. 121, Springer-Verlag, Berlin, 1999

Altamimi Z., Collilieux X., Métivier L., *ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame*, Journal of Geodesy, Vol. 85 Issue 8, open access on-line, <http://dx.doi.org/10.1007/s00190-011-0444-4>, 2011

Baltsavias E., *Airborne laser scanning: basic relations and formulas*, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 54, no. 2, p. 199, 1999

Biagi L., *I fondamentali del GPS*, Geomatics Workbooks VIII, 2009

Biagi L., Brovelli M. A., Campi A., Cannata M., Carcano L., Credali M., De Agostino M., Manzano A., Sansò F., Siletto G., *Il progetto HELI-DEM (Helvetia-Italy Digital Elevation Model): scopi e stato di attuazione*, Bollettino SIFET 1/2011, pagg. 35-51, 2011

Brovelli M. A., Caldera S., and Liu X., *3D comparison of DTMs without the use of homologous points*, in Proceedings of 6th International Symposium on Digital Earth, (Beijing, China), 2009

Brovelli M. A., Cannata M. and Longoni U., *LIDAR data filtering and DTM interpolation within GRASS*, Transactions in GIS, vol. 8, no. 2, pp. 155–174, 2004

Brovelli A., Cina A., Crespi M., Lingua A., Manzano A., *Ortoimmagini e modelli altimetrici a grande scala – Linee guida*, CISIS - Centro Interregionale di Coordinamento e documentazione per le informazioni territoriali, 2012, www.centrointerregionale-gis.it/ortoimmagini/cisis_ortofoto_dtm_grande%20scala_finale_2.pdf

Curlander J.C., McDonough R.N., *Synthetic Aperture Radar: System and Signal Processing*, 1991

Drinkwater M.R., Haagmans R., Muzi D., Popescu A., Floberghagen R., Kern M., Fehring M., Proceedings of 3rd International GOCE User Workshop, 6-8 November, 2006, Frascati, Italy, ESA SP-627, 2007

Kraus K., *Fotogrammetria, Vol. I Teoria e applicazioni, traduzione e ampliamenti di S. Dequal*, Libreria universitaria Levrotto e Bella, Torino, 1998

Li Z., Zhu Q. and Gold C., *Digital terrain modeling: principles and methodology*. CRC, 2005

Marti U., *Comparison of High Precision Geoid Models in Switzerland*, Dynamic Planet, International Association of Geodesy Symposia, 2007, Volume 130, Part III, pp. 377–382, 2007

Pavlis, N.K., Holmes S.A., Kenyon S.C. and Factor J.K., *An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008*, presented at the 2008 General Assembly of the European Geosciences Union, Vienna, Austria, April 13-18, 2008

Wehr A. and Lohr U., *Airborne laser scanning—an introduction and overview*, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 54, no. 2-3, pp. 68–82, 1999

CAPITOLO 2

I DTM NELLA PUBBLICA AMMINISTRAZIONE

Piera Belotti (1), Stefano Campus (2), Monica Cetti (1), Henry Damaschi (1), Veronica Guasco (2), Gian Bartolomeo Siletto (2), Massimiliano Cannata (3), Monia Molinari (3)

(1) Regione Lombardia, D.G. Territorio, Urbanistica e Difesa del suolo, U.O. strumenti per il governo del territorio, Piazza città di Lombardia, 20124 Milano

(2) Regione Piemonte, Direzione programmazione strategica, politiche territoriali ed edilizia, Settore Infrastruttura geografica, strumenti e tecnologie per il governo del territorio, Corso Bolzano, 44, 10121, Torino

(3) Istituto scienze della Terra, Dipartimento ambiente costruzione e design, Scuola universitaria professionale della Svizzera italiana, Campus Trevano CH-6952 Canobbio, Svizzera

SOMMARIO

L'esigenza di rappresentare le caratteristiche morfologiche e topografiche del terreno è antichissima, ed è divenuta sempre più pressante con la necessità di progettare grandi opere sul territorio. La Pubblica Amministrazione, nelle sue attività di programmazione e controllo, non può prescindere dall'utilizzo di modelli digitali di elevazione, che da alcune decine di anni sono disponibili con vari gradi di accuratezza e precisione. Viene brevemente riassunta l'evoluzione dei modelli di elevazione, con particolare riferimento a quelli dei partner, e i più comuni utilizzi che ne vengono fatti.

ABSTRACT

The need to represent the morphological and topological features of the terrain comes from ancient times, and it becomes more and more critical as complex construction are to be planned. Nowadays land planning and management activities use digital terrain models, which are available with different degrees of accuracy and precision. In this context, the different DTMs of the partners of the project are described, together with their main uses.

1 INTRODUZIONE

L'esigenza di rappresentare le caratteristiche morfologiche e topografiche del terreno è antichissima. Nelle rappresentazioni cartografiche storiche il dato di elevazione è rappresentato unicamente con qualche artificio grafico, che suggerisce la presenza di catene montuose, o comunque di dislivelli: è sostanzialmente rappresentata la difficoltà di raggiungere alcuni luoghi (Fig. 1a).

Nel tempo le rappresentazioni cartografiche hanno subito un'evoluzione, diventando sempre più accurate e precise, e anche il dato di elevazione ha guadagnato importanza. Infatti

la conoscenza quantitativa dell'elevazione del territorio è utile, ad esempio, per classificare il terreno in fasce altimetriche, valutare pendenza ed esposizione, progettare opere, calcolare distanze reali tra due punti e molte altre applicazioni.

Nella cartografia tradizionale il dato di elevazione viene espresso convenzionalmente attraverso il disegno di curve di livello e il tratteggio artistico, insieme a un certo numero di punti quotati (Fig. 1b,c).

Questa modalità di rappresentazione, se da una parte ha il vantaggio di fornire a un occhio esperto e allenato l'andamento del terreno, dall'altra richiede, per sfruttarne appieno le potenzialità, elaborazioni manuali molto dispendiose (si pensi ad esempio a quando si disegnavano le carte delle pendenze con righello e planimetro...). Infatti la cartografia tradizionale non fornisce informazioni in un formato adatto a un trattamento numerico con il calcolatore, che ha invece bisogno di un dato strutturato che rappresenti la superficie terrestre.

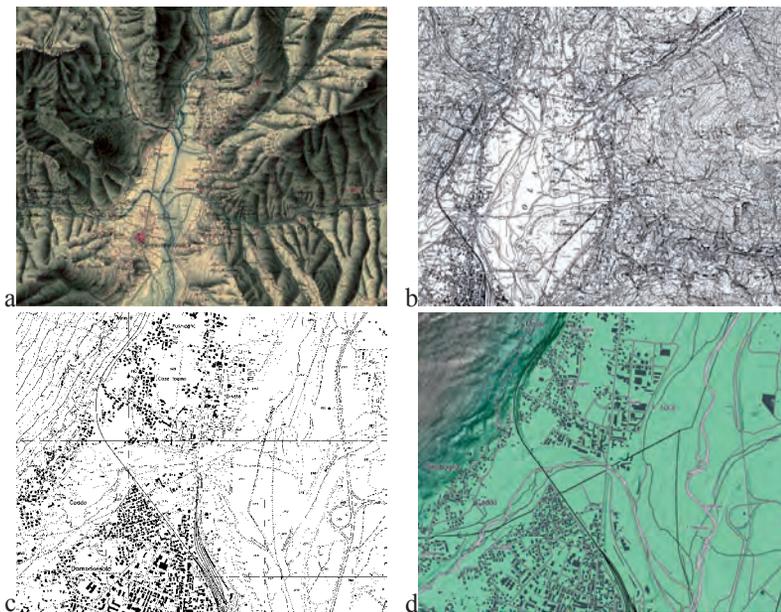


Figura 1. Esempi di cartografia classica: a. Carta degli Stati sardi (1850 ca, dai tipi dell'Istituto Geografico Militare), b. tavoletta IGM 1:25.000, 1° impianto (fine 1800), c. Carta Tecnica Regionale in scala 1:10.000 (C.T.R. Regione Piemonte, ed. 1991), d. DTM 5m Regione Piemonte, ed. 2010.

L'avvento delle tecnologie digitali e la sempre maggiore disponibilità e diffusione di strumenti GIS hanno agevolato la nascita di modelli di superficie (più o meno densi e precisi) in formato numerico, da cui estrarre l'informazione altimetrica rappresentabile poi in forma tradizionale (curve di livello). Dal modello di superficie si possono anche ricavare, sempre in modalità automatica, altre informazioni, quali ad esempio pendenze, esposizioni, reticolo e bacini idrografici ..., in una parola le caratteristiche morfometriche del terreno.

Il dato di elevazione è uno degli ingredienti di base di un sistema informativo territoriale e, insieme ai dati puramente planimetrici, concorre alla descrizione del territorio.

Nell'attività quotidiana di una pubblica amministrazione (ma non solo), gli utilizzi dei modelli digitali del terreno sono molteplici ad esempio:

- nelle attività legate alla difesa del suolo:
 - modelli idrologici e idrogeologici,
 - modelli di gestione delle risorse idriche,
 - valutazioni di rischi naturali (esondazioni, frane, valanghe),
 - progettazione ed esecuzione di opere di mitigazione/protezione;
- per la pianificazione territoriale ed ambientale, ad esempio per valutare l'impatto paesaggistico derivante dall'inserimento di una nuova infrastruttura;
- nelle attività di progettazione:
 - messa in opera di infrastrutture di trasporto (strade, ferrovie, gallerie, ponti...),
 - costruzione di opere idrauliche, messa in opera di nuove linee elettriche (modelli digitali ad alta risoluzione);
- in operazioni estimative per la classificazione di fondi, è necessario associare il DTM a informazioni di Catasto Fondiario, ottenendo da esso elementi come la giacitura, l'esposizione del versante, la pendenza e l'altimetria;
- nelle applicazioni ambientali, il DTM è uno strumento fondamentale per:
 - modelli anemologici per analisi ambientali e per la progettazione di impianti di energia eolica,
 - modelli della radiazione solare incidente per studi climatologici e per la progettazione di impianti di energia solare/fotovoltaici,
 - analisi di impatti ambientali (VIA) di infrastrutture e grandi opere,
 - monitoraggio e quantificazione dell'attività estrattiva delle cave, monitoraggio della deforestazione, calcolo volumetrico delle discariche (nel caso di DTM ad alta risoluzione);
- nell'architettura e progettazione del paesaggio il DTM permette la rappresentazione e le viste tridimensionali del territorio;
- in ambito turistico, il DTM consente di valutare pendenze ed esposizioni dei percorsi lungo strade e sentieri.

Inoltre, nelle telecomunicazioni, il DTM permette di pianificare la localizzazione ottimizzata di antenne e ripetitori per la copertura dei territori da parte di segnali di rete (esempio: telefonia mobile).

Nell'agricoltura di precisione (strategia gestionale dell'agricoltura che utilizza moderne tecnologie ed è mirata all'esecuzione di interventi agronomici basati sulle effettive esigenze colturali e sulle caratteristiche biochimiche e fisiche del suolo) sono necessarie informazioni di pendenza del terreno ed esposizione dei versanti, informazioni deducibile dal DTM.

In Cartografia il DTM trova impiego nella generazione di ortofoto aeree e satellitari, strumenti divenuti ormai fondamentali per la conoscenza aggiornata del territorio e della sua evoluzione. Inoltre viste tridimensionali dell'edificato e dell'orografia risultano estremamente utili per la scelta di strategie di pianificazione di sessioni di misura a terra. L'orografia è più facilmente interpretabile grazie alla rappresentazione dell'ombreggiatura (*hillshade*) ottenuta a partire da un modello di elevazione.

Il DTM può essere anche una base su cui appoggiare il Database Topografico in 3D in modo da ottenere una reale visualizzazione del territorio: questo è un ausilio notevole in tantissime applicazioni di carattere ingegneristico (realizzazione opere), urbanistico (pianificazione di interventi), ambientale (valutazione degli impatti sul territorio) in quanto si può visualizzare concretamente il territorio su cui si va ad intervenire (Fig. 2).

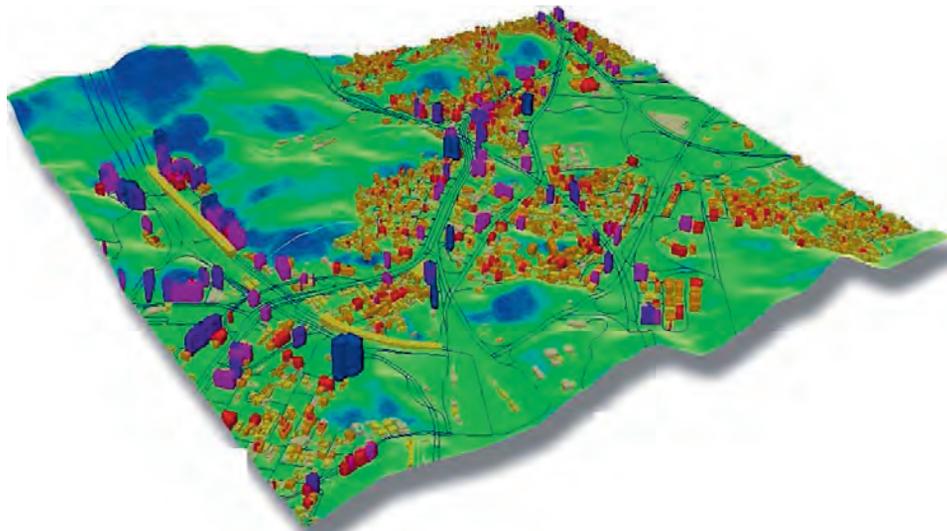


Figura 2. Esempio di cartografia 3D su un modello digitale del terreno (<http://www.galantis.com/maps/makkah-3d-geodata-for-rf-planning.html>)

Ovviamente, le diverse attività richiedono DTM (e talvolta DSM) con livelli di risoluzione, accuratezza e precisione diversi: non esiste il “Modello Universale” valido per tutte le linteressano solo alcune parti di territorio e con le più disparate caratteristiche.

Negli ultimi anni, fortunatamente, molte Amministrazioni hanno promosso la realizzazione di modelli del terreno più estesi, ad esempio a copertura regionale, le cui caratteristiche mediano tra le esigenze di accuratezza più spinte, le tecnologie e le risorse disponibili.

In ambito italiano, l’interesse sempre maggiore della Pubblica Amministrazione per i DTM e DSM è anche testimoniato dall’impegno economico profuso da Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (MATTM), Presidenza del Consiglio dei Ministri - Dipartimento della Protezione Civile (DPC) e Ministero della Difesa (MD) nel Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale (PST-A), ai sensi della legge 179 del 31 luglio 2002 art. 27. Il PST-A prevede l’acquisizione di dati di elevazione prodotti con tecnica LiDAR (da piattaforma aerea) e con tecnica interferometrica (da piattaforma satellitare).

A livello svizzero l’importanza del dato altimetrico è evidenziata dallo sforzo economico sostenuto per ricoprire l’intero territorio nazionale con un DTM LiDAR ad alta risoluzione, oltre che dallo sviluppo di strategie per l’introduzione della terza dimensione nella Misurazione Ufficiale (catasto).

2 EVOLUZIONE DEL DATO ALTIMETRICO NELLE BASI DATI DELLA PUBBLICA AMMINISTRAZIONE ITALIANA

Fino a quando le Regioni non si sono dotate di cartografia propria, le uniche basi cartografiche disponibili in modo diffuso erano quelle prodotte dall'Istituto Geografico Militare (IGM), generalmente a scala medio piccola, da cui si derivavano anche le uniche informazioni di elevazione disponibili.

Un'altra fonte di informazioni altimetriche, più precise ma puntuali, erano le monografie dei vertici trigonometrici e in seguito della rete geodetica nazionale.

Con l'avvento delle tecnologie digitali, le Regioni hanno provveduto a derivare dalle informazioni altimetriche delle proprie Carte Tecniche i primi DTM, con modalità di produzione differenti.

Generalmente, anche in considerazione della scala della cartografia di origine, questi DTM si caratterizzano per la risoluzione bassa (20-50 m); pertanto se da un lato si dimostrano idonei per elaborazioni ed analisi di scala vasta, dall'altra non sono ottimali per applicazioni più precise e di dettaglio, che richiedono risoluzioni maggiori (almeno intorno al metro).

Anche l'IGM, all'inizio degli anni '90, ha iniziato la produzione di un DTM nazionale, mediante interpolazione dei dati orografici vettoriali acquisiti in precedenza attraverso la digitalizzazione della cartografia ufficiale a varie scale (Italia Nord Ovest 1:100.000, Sicilia 1:50.000, il resto 1:25.000). Il DTM ha quindi caratteristiche di precisione assai diverse a seconda della fonte cartografica di origine (± 10 -50 m).

Un'altra realizzazione a scala nazionale è il DTM della Compagnia Generale Riprese aeree di Parma (CGR), prodotto utilizzando i dati derivati dalle C.T.R. alla scala 1:10.000 e 1:5.000 opportunamente integrati con le misure effettuate in occasione delle riprese del volo ITALIA 94 e successivamente migliorato per il programma "IT 2000". L'"accuratezza media" dichiarata per questo DTM è pari a metà dell'equidistanza delle CTR10, ovvero ± 5 m (*Programma "it 2000" L'ortofoto digitale a colori del territorio italiano* – *Caratteristiche Tecniche*).

Oltre ai modelli di elevazione regionali e nazionali, sono disponibili almeno due modelli globali: ASTER GDEM2 (ottenuto dalle immagini stereoscopiche del satellite ASTER - Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) e SRTM (ottenuto dai dati del sistema radar a bordo dello Shuttle Endeavour durante la "Shuttle Radar Topography Mission" nel 2000, con risoluzione, fuori dagli Stati Uniti, pari a 3 gradi secondi, cioè circa 90 metri).

A partire dalla fine degli anni '90, molte iniziative cartografiche sono confluite nell'"Intesa GIS", un protocollo d'intesa tra Stato, Regioni e Enti Locali sottoscritto con l'obiettivo di sviluppare interventi coordinati per realizzare basi informative territoriali a copertura nazionale, gestite su elaboratore, necessarie per l'esercizio delle funzioni di interesse locale, regionale e nazionale. Tra i diversi documenti prodotti dai gruppi di lavoro legati all'Intesa GIS si annoverano anche le "*Prescrizioni tecniche per la produzione di Modelli Digitali del Terreno*" (AAVV, 2001), in cui sono definiti i requisiti di un modello digitale del terreno, nonché le diverse tecniche di produzione: in particolare l'impiego di dati altimetrici esistenti, alla luce delle prescrizioni tecniche con cui sono stati generati. Il documento comprende anche la classificazione dei DTM secondo 6 livelli di precisione, poi

ripresa nelle “*Linee guida per la produzione di ortoimmagini e modelli altimetrici a grande scala*” (Brovelli et al., 2012, Tab. 1 del Cap. 1).

Con l’Intesa è iniziato il processo che ha portato, alla fine del 2011, alla pubblicazione delle “Regole tecniche per la definizione delle specifiche di contenuto dei database geotopografici” (DM 10/11/2011): una specifica condivisa a livello nazionale per le realizzazioni cartografiche 3D. All’interno della specifica, all’orografia è dedicato uno strato, in cui sono descritti le informazioni relative all’altimetria, alla batimetria, alle forme del terreno e ai modelli digitali del terreno.

La direttiva 2007/2/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 14 marzo 2007, che istituisce un’infrastruttura per l’informazione territoriale nella comunità europea (INSPIRE), recepita dal D. Lgs. 32/2010, considera il tema Elevazione tra i temi di base dell’Annex II, e stabilisce che le altezze siano espresse nel sistema di riferimento EVRS (European Vertical Reference System). Importante notare come il tema Elevazione comprenda anche la batimetria.

2.1 Il Modello Altimetrico Digitale della Regione Piemonte

Acquisito come elaborato numerico preliminare nel ciclo di produzione dell’Ortofotocarta Regionale 1:10.000 nel periodo 1985-94, il Modello Altimetrico Digitale (DTM), unificato nel formato su tutto il territorio regionale, è stato diffuso al pubblico nel 1995 su cd-rom.

La precisione del modello era adeguata agli standard di precisione richiesti per l’ortofoto-proiezione con accuratezza 1:10.000, in funzione della quale è stata ritenuta sufficiente una campionatura dei punti quota del terreno disposti secondo una maglia quadrata di 50 m di lato. Il DTM è stato acquisito, per via fotogrammetrica, con due diverse modalità:

- **Piemonte centro-nord.** Sono stati acquisiti per fotorestituzione numerica diretta alcuni elementi dell’altimetria, necessari in fase di formazione della C.T.R., quali le isoipse con equidistanza 10 m, i punti quotati e le linee di discontinuità altimetrica (*breaklines*); si è quindi proceduto all’interpolazione dei punti quota del DTM in corrispondenza dei nodi della griglia di 50 m;
- **Piemonte sud.** qui la suddetta interpolazione è stata effettuata a partire da profili di scansione intervallati di 60 m, ricavati dai modelli stereoscopici dei fotogrammi, con campionamento dei punti anch’esso di 60 m.

Nel 2000, è stata diffusa al pubblico una versione del cd-rom col DTM, completa di programmi dimostrativi e di utilità, nota come DTM Piem 2.0, nel Sistema di Riferimento Roma40/Gauss-Boaga.

Nel 2005 si è proceduto alla trasformazione del Sistema di Riferimento del DTM, ora UTM/WGS84, mediante:

- trasformazione dei punti caratteristici della griglia regolare nel sistema Gauss-Boaga in punti considerabili come punti quotati nel sistema UTM-WGS84;
- interpolazione su maglia regolare di tali punti, in modo da ottenere la griglia nel nuovo sistema.

Nel 2008 è stato appaltato un nuovo volo aerofotogrammetrico sul territorio regionale,

abbinato a un rilievo Lidar. I risultati del volo sono disponibili dal 2012. In particolare, dal rilievo Lidar è stato interpolato un DTM (e un DSM) con passo di griglia 5 m, precisione planimetrica ± 0.3 m (± 0.6 m in aree boscate) e altimetrica ± 0.3 m, utilizzato nell'ambito del progetto HELI-DEM (vedi capitoli successivi).

2.2 Il Modello Altimetrico Digitale della Regione Lombardia

Sulla base della necessità di sviluppare modelli di rischio all'arco alpino regionale, tra il 2000 e il 2003 Regione Lombardia ha scelto di progettare un modello digitale del terreno a maglia di 20 m \times 20 m, partendo dalla C.T.R. e in considerazione della ridondanza dell'informazione dell'equidistanza (10 m) in area montuosa e dei tempi ragionevoli per la sua realizzazione.

Realizzazione della base dati vettoriale

La procedura più comune per l'acquisizione dei dati da documenti cartografici richiede la digitalizzazione e la vettorizzazione delle isoipse, la loro codifica con operazioni interattive o semi-automatiche. Per la preparazione della base dati vettoriale erano già disponibili: a) i file raster delle sezioni della C.T.R. 1:10.000, b) i file vettoriali di parte delle curve di livello (CL_CTR), c) i punti quotati (PQ_CTR).

1. La Carta Tecnica Regionale (C.T.R.), come ogni prodotto cartografico tradizionale, è finalizzata alla visualizzazione delle forme del territorio e talvolta presenta distorsioni nel disegno che possono creare difficoltà nel processo di vettorizzazione, come nel caso di scarpate, creste smussate, errori mascherati con soluzioni grafiche, errori di disegno al margine di sezioni contigue, ecc. Nonostante gli errori insiti nel documento cartografico di partenza, la Carta Tecnica Regionale ha costituito e costituisce il modello analogico del territorio da considerare come il riferimento reale da riprodurre in forma digitale in quanto base tecnica per tutte le informazioni tematiche ad esso correlate.

2. Lo strato CL_CTR della Carta Tecnica Regionale contiene i vettoriali delle curve di livello ogni 50 m e 100 m (direttrici), interrotte ad ogni attraversamento con altri elementi cartografici, assenti solo nelle aree a tratteggio artistico; i vettoriali delle curve di livello ordinarie (modulo 30 m e 80 m) e ausiliarie (modulo 10 m, 20 m, 40 m, 60 m, 70 m, 90 m) compaiono sporadicamente e segmentati.

Tenendo conto che qualsiasi algoritmo di interpolazione incontra difficoltà inversamente proporzionali alla omogeneità nella distribuzione spaziale delle informazioni e alla loro continuità laterale, nella progettazione del primo DTM regionale basato sull'informazione grafica delle C.T.R. si è ritenuto indispensabile completare le direttrici congiungendone i tratti interrotti e interpretandole nelle aree a tratteggio artistico, in conformità con i punti quotati esistenti. Altre due curve ordinarie (modulo 30 m e 80 m) sono state tracciate quasi del tutto *ex novo* e in modo continuo, garantendo sull'intera area l'equidistanza delle isoipse ogni 20 o 30 m; tutte le altre curve ausiliarie (moduli 10 m, 20 m, 40 m, 60 m, 70 m, 90 m) sono state tracciate nelle aree pianeggianti, di fondovalle e comunque a basso gradiente altimetrico, oppure dove hanno rivelato una morfologia non descrivibile con le sole curve ordinarie; ovviamente, a differenza delle precedenti, queste hanno carattere di discontinuità.

3. Accanto al lavoro di infittimento delle curve di livello, particolare attenzione ha richiesto l'analisi dei punti quotati esistenti, contenuti nello strato PQ_CTR: sono stati

selezionati ed eliminati dal set di generazione del DTM, quelli riferiti a manufatti (ponti, rilevati stradali, edifici, ecc.) che appartengono all'infrastruttura abitativa e genererebbero errori di quota al suolo superiori ai margini di progetto. Tra i punti eliminati, (complessivamente circa il 5% del totale), una piccola percentuale corrisponde a punti palesemente errati appartenenti realmente alla morfologia del terreno, dei quali non è stato possibile ricostruire univocamente la quota o la posizione esatta.

Interpolazione del DTM

Per la scelta dell'algoritmo di interpolazione dei vettori in una superficie continua di tipo raster è stata effettuata un'analisi comparata di tre metodi differenti sia in ambiente Arc/Info che MGE.

La scelta è ricaduta sull'interpolatore implementato nel GIS MGE (Intergraph): l'algoritmo produce inizialmente un TIN a partire dalle curve di livello secondo la triangolazione di Delaunay, successivamente il modulo inserisce nel modello i punti quotati appartenenti a linee di impluvio e displuvio, generate automaticamente, e ricalcola l'intero TIN in base anche a tali informazioni aggiuntive.

In seguito il modello a triangoli viene convertito in griglia di punti con passo di campionamento di 20 m attraverso algoritmi comportanti operazioni di semplice interpolazione bilineare; i valori sono di tipo floating, con due cifre decimali.

Validazione del DTM

Per la validazione del DTM è stato effettuato, in modo reiterativo, un controllo qualitativo della realistica della morfologia riprodotta dal DEM e dell'assenza di artefatti (Carrara et al., 1997), nonché un controllo quantitativo dell'indice di qualità (Carrara, 2001) secondo i seguenti criteri:

1. in corrispondenza delle curve di livello originali i valori del DTM devono coincidere (o discostarsi di un valore inferiore al 5% dell'equidistanza) con la quota delle medesime;
2. nello spazio compreso tra ogni coppia di isoipse i valori del DTM devono quantomeno ricadere nell'intervallo altimetrico definito dalla coppia;
3. sempre nello spazio di cui sopra, i valori del DTM devono variare linearmente tra le quote della coppia;
4. in aree a bassa informazione altimetrica, quali ampie spianate vallive o dossi estesi, i valori del DTM devono riflettere in modo verosimile la probabile conformazione morfologica delle medesime;
5. distribuzioni di quote del DTM che definiscono conformazioni morfologiche irrealistiche (artefatti) devono essere limitate a meno dello 0.1 – 0.2% dei dati.

3 IL DATO ALTIMETRICO NELLE BASI DATI DELLA PUBBLICA AMMINISTRAZIONE ELVETICA

L'importanza rivestita dall'altimetria nella pubblica amministrazione elvetica è sicuramente testimoniata dalla sua inclusione tra i livelli d'informazione della Misurazione Ufficiale (MU) "utilizzati da autorità della Confederazione, dei Cantoni e dei Comuni nonché

dall'economia, dalla scienza e da terzi per ottenere geoinformazioni” (Ordinanza del 18 Novembre 1992 concernente la Misurazione Ufficiale, OMU 211.432.2)

Negli ultimi anni la richiesta crescente di dati 3D, sempre più fondamentali per svariate applicazioni, ha portato alla necessità di definire delle strategie per l'integrazione del dato tridimensionale all'interno della MU: i primi passi hanno portato all'introduzione delle coordinate di punti 3D, al perfezionamento del livello d'informazione “altitudini”, alla definizione di un nuovo livello d'informazione “oggetti3D” e all'estensione alla terza dimensione del livello di informazione “singoli oggetti” secondo quanto previsto dalla Raccomandazione del 2008 “Grado di dettaglio nella misurazione ufficiale. Livello d'informazione «Oggetti singoli» in 3 dimensioni (OS_3D)”. I prossimi passi verso una MU-3D, necessitano ancora di discussioni su questioni legali e finanziarie, nonché ulteriori approfondimenti di carattere tecnico che sono in fase di discussione in appositi gruppi di lavoro composti da rappresentanti di Cantoni e Confederazione.

Così come in Italia, la Confederazione elvetica ha recepito, già dal 2008, la direttiva 2007/2/CE INSPIRE in materia di geoinformazione tramite la Legge Federale sulla geoinformazione (LGI 510.62) che inserisce l'Altimetria nel catalogo dei geodati di base (OGI 510.620). A sua volta la LGI è stata recepita poi dai diversi Cantoni con apposte leggi Cantionali.

Oltre al catasto, altre fonti di dati altimetrici sono:

- i piani corografici, che riportano informazioni altimetriche sottoforma di curve di livello e quote,
- i punti della rete di livellamento federale LF02 e i loro raffittimenti a livello cantonale e comunale (PFA1, PFA2, PFA3),
- il più recente sistema altimetrico RAN95, basato su livellazioni di precisione e misure di gravimetria,
- i modelli altitudinali a varie risoluzioni.

I tre modelli altitudinali disponibili in Svizzera sono denominati: swissALTI3D, DOM e DHM25.

swissALTI3D è il modello digitale del terreno ad alta risoluzione realizzato tramite laser scanning aereo nelle zone al di sotto del 2000 m e stereocorrelazione di immagini aeree nelle zone al di sopra del 2000 m. E' rilasciato come griglia a maglia regolare con risoluzione pari a 2 m e viene aggiornato ogni 6 anni.

Mentre swissALTI3D rappresenta l'andamento del terreno senza elementi naturali o artificiali, DOM è il modello digitale di superficie e tiene conto di tutti gli elementi del paesaggio (vegetazione, edifici, etc.); è disponibile sia come nuvola di punti vettoriale sia in formato griglia con passo di risoluzione 2 m.

DHM25 è il modello digitale del terreno a bassa risoluzione derivato dalla carta nazionale 1:25'000; essendo il modello utilizzato nell'ambito di questo progetto, ad esso è dedicata la seguente ampia descrizione.

3.1 Il Modello Altimetrico Digitale della Svizzera a bassa risoluzione

Il modello digitale delle altezze DHM25 riproduce l'andamento del terreno senza copertura vegetale ed elementi artificiali secondo un grigliato a maglia regolare di 25 m × 25 m. E' fornito da Swisstopo (Ufficio federale di topografia) nel datum geodetico CH1903 e nei seguenti formati: MMBLT, MMBL, ARC/INFO ASCII Grid, XZY, DXF, VRML.

Realizzazione: DHM25-livello 1 e DHM25-livello2

Il DHM25 - Livello 1, realizzato tra il 1984 e il 1996 nell'ambito del progetto DIKART (Digitale KARTe), è stato derivato dalle carte nazionali 1:25'000 (NM25) e 1:50'000 tramite digitalizzazione di elementi lineari e puntuali (quali curve di livello, perimetri dei laghi e i punti quotati) successivamente interpolati utilizzando un programma, sviluppato dall'Ufficio Federale di Topografia e dall'Istituto di Geodesia e Fotogrammetria dell'ETH di Zurigo. Tale software implementa un algoritmo di interpolazione cubica in 8 differenti direzioni.

Il DHM25 - Livello 2 è disponibile dal 2001. Il precedente modello di base è stato perfezionato attraverso la correzione di alcuni errori, l'aggiornamento delle curve di livello in corrispondenza dei ghiacciai, miglioramenti alla topologia e l'integrazione delle principali linee di rottura (*breaklines*) dell'area alpina, ottenute tramite restituzione fotogrammetrica. Rispetto al livello 1, per la realizzazione del modello matriciale è stato applicato un diverso procedimento di interpolazione basato su un programma sviluppato da swisstopo che implementa un algoritmo di triangolazione migliorato (Arnet, 2001).

Precisione

Il DHM25 è derivato dalla Carta nazionale 1:25'000 e si basa sostanzialmente sul grado di precisione di quest'ultima. Confronti tra i modelli digitali delle altezze e dei punti di controllo determinati mediante fotogrammetria indicano che nell'Altopiano e nel Giura la deviazione media è di 1.5 m, nelle Prealpi ed in Ticino di 2 m e nelle Alpi di 3-8 m. In Figura 3 è presentata la distribuzione delle accuratezze del DHM25-livello 2 del sull'intero territorio svizzero.

4 BENEFICI PER LA PUBBLICA AMMINISTRAZIONE CONSEGUENTI AL PROGETTO HELI-DEM

Nella gestione congiunta dell'informazione geografica da parte di enti diversi, ad esempio nella gestione transfrontaliera tra due stati, si pone il problema di un sistema di inquadramento che permetta di gestire in forma federata e diffusa l'informazione senza rimuoverla dal suo GIS di residenza naturale, per mezzo di un algoritmo generale di trasformazione sia per le informazioni quantitative sia qualitative.

Per quanto riguarda la componente altimetrica dell'informazione geografica, ciò richiede che:

- le coordinate planimetriche dei punti in una fascia transfrontaliera siano tra loro congruenti e correttamente georeferenziate in un unico sistema,
- la definizione del terreno digitale, per quanto attiene alle sue caratteristiche di risoluzione ed accuratezza, sia consistente tra le due parti, oltre ovviamente a non

presentare discontinuità.

Il progetto HELI-DEM mirando alla creazione di un DTM unificato, correttamente georeferenziato, prodotto validando e integrando in un unico modello tutte le sorgenti di informazioni disponibili per la fascia alpina e subalpina tra Italia (Piemonte, Lombardia) e Svizzera (Canton Ticino), facilita senza dubbio la condivisione delle informazioni territoriali di comune interesse.

Per ottenere questo risultato è stata messa a punto una metodologia di integrazione di DTM con caratteristiche differenti, che potrà essere riutilizzata anche per includere nel modello generale altri DTM che si rendessero disponibili.

Infatti, la sempre maggiore disponibilità di strumenti GIS desktop di facile utilizzo, che permettono di eseguire in modo semplice analisi sempre più sofisticate, insieme alla crescente disponibilità di misure Laser, hanno favorito la formazione di DTM molto dettagliati e precisi, ma con estensione limitata, nati per esigenze specifiche (modellazione di versanti in frana, studi idrologici,...). Questi dati costituiscono un patrimonio assai frammentato e facilmente disperdibile se non si ha a disposizione una metodologia robusta per la loro integrazione, e uno dei risultati del progetto HELI-DEM è consistito proprio nella individuazione di una metodologia ripetibile per l'integrazione di DTM differenti.

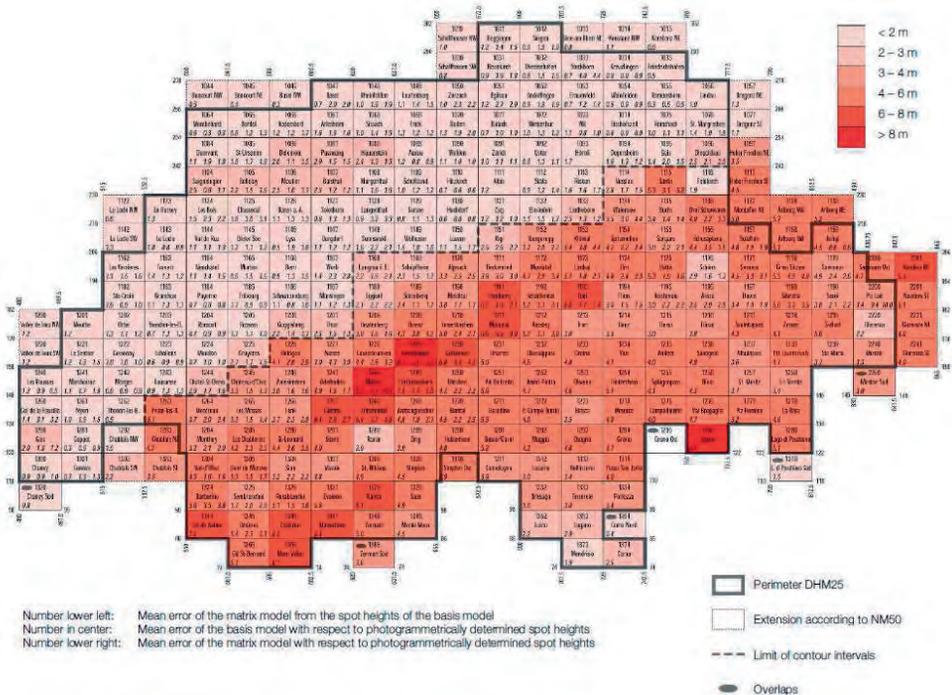


Figura 3. Stima delle accuratze ottenute con il DHM25 – livello 2. (Fonte: swisstopo, 2004)

ACRONIMI E SITI

Vengono qui riportati gli acronimi utilizzati nel contributo; per quelli relativi a enti o istituzioni si riporta anche il sito web di riferimento.

CISIS:	Centro Interregionale per i Sistemi informatici, geografici e statistici www.cisis.it
IGM	Istituto Geografico Militare www.igmi.org
MATTM:	Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare www.minambiente.it
PST-A:	Piano Straordinario di Telerilevamento – Ambientale http://www.pcn.minambiente.it/GN/progetto_pst.php?lan=it

BIBLIOGRAFIA

Arnet F., Interpolation von DHM25 Level 2. Bundesamt für Landestopographie, Wabern (CH), 2001.

AAVV, *Prescrizioni Tecniche per la produzione di Modelli Digitali del Terreno*, http://www.centrointerregionale-gis.it/public/DTM/DTM16I_Spec_Apr01_it.pdf, 2001

AA.VV., *Programma "it 2000" L'ortofoto digitale a colori del territorio italiano* – *Caratteristiche Tecniche*

Brovelli A., Cina A., Crespi M., Lingua A., Manzano A., *Ortoimmagini e modelli altimetrici a grande scala – Linee guida (CISIS - Centro Interregionale di Coordinamento e documentazione per le informazioni territoriali)*, 2012 (http://www.centrointerregionale-gis.it/ortoimmagini/cisis_ortofoto_dtm_grande%20scala_finale_2.pdf)

Carrara, A., Bitelli, G. e Carlà, R., *Comparison of techniques for generating digital terrain models from contour lines*, Int. J. Geographical Information Science, vol.11, no.5, 451- 473, 1997,

Swisstopo, DHM25, The digital height model of Switzerland, Federal Office of Topography, 2004.
<http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/en/home/products/height/dhm25.html>

Testa B., Alighieri B. *La realizzazione di un modello digitale del terreno (DTM) per il territorio alpino lombardo*, http://www.cartografia.regione.lombardia.it/metadata/DTM20/doc/artic_1.pdf

CAPITOLO 3

DESCRIZIONE DEI DATI DISPONIBILI

Piera Belotti (1), Ludovico Biagi (2), Maria Antonia Brovelli (2), Stefano Campus (3), Laura Carcano (2), Massimiliano Cannata (4), Monica Cetti (1), Marina Credali (1), Paolo Dabove (5), Henry Damaschi (1), Mattia De Agostino (6), Veronica Guasco (3), Ambrogio Maria Manzino (5), Fernando Sansò (2), Gian Bartolomeo Siletto (3), Cinzia Taglioretti (5)

(1) Regione Lombardia, DG. Territorio Urbanistica e Difesa del Suolo, UO. Strumenti per il Governo del Territorio, P.zza Città di Lombardia 1, 20124, Milano

(2) Politecnico di Milano, DICA, Laboratorio di Geomatica presso Polo Territoriale di Como, Via Valleggio 11, 22100 Como

(3) Regione Piemonte, Direzione programmazione strategica, politiche territoriali ed edilizia, Settore Infrastruttura geografica, strumenti e tecnologie per il governo del territorio, Corso Bolzano, 44, 10121, Torino

(4) Istituto scienze della Terra, Dipartimento ambiente costruzione e design, Scuola universitaria professionale della Svizzera italiana, Campus Trevano CH-6952 Canobbio, Svizzera

(5) Politecnico di Torino, DIATI, Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture, Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino

(6) all'epoca del lavoro, Politecnico di Torino; ora CSI Piemonte, Corso Tazzoli 215/12, 10137 Torino

SOMMARIO

Negli ultimi anni sono stati acquisiti, in Italia e in Svizzera, dati di elevazione del terreno con sistemi di riferimento, tecnologie, risoluzioni e accuratèzze differenti. Il presente capitolo vuole fornire una panoramica dettagliata dei vari modelli digitali del terreno (DTM/DEM) raccolti e disponibili nell'ambito del Progetto HELI-DEM, con le relative caratteristiche.

ABSTRACT

In the last years, several Digital Terrain Models have been made available for Italy and Switzerland: they have been produced with different technologies, resolutions and accuracies and are georeferenced in different reference frames. This Chapter provides a detailed discussion of the data that have been acquired for HELI-DEM.

1 INTRODUZIONE

La fase di raccolta ha interessato principalmente la ricerca e la selezione dei DTM locali, ovvero di quei modelli digitali del terreno con risoluzione da bassa a media (almeno 50 metri), sviluppati da Enti locali (Regioni, Autorità geodetiche nazionali), aventi un'estensione nazionale o regionale. In fase progettuale era stato previsto di raccogliere anche i cosiddetti DSM globali, tipicamente realizzati da Enti governativi o internazionali e disponibili gratuitamente a risoluzioni ed accuratèzze minori (mediamente a risoluzioni di 90-100 metri circa,

e con accuratezze verticali LE90 di 15-20 m). Effettivamente, nell'ambito del progetto, si è svolta un'analisi di accuratezza sui DSM SRTM (srtm.csi.cgiar.org), ASTER (gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp) e GMTED (topotools.cr.usgs.gov/gmted_viewer/) (Ramos Clavijo, 2012). Le analisi condotte sui DSM globali hanno evidenziato che l'informazione in essi contenuta non avrebbe in alcun modo migliorato la qualità dei prodotti HELI-DEM che si potevano ottenere dai DTM locali. Quindi i DSM globali sono stati acquisiti e analizzati, ma non sono stati utilizzati per il calcolo dei prodotti finali di HELI-DEM: per tale motivo, non si ritiene nel seguito necessario esporne le caratteristiche, per le quali si rimanda ai siti ufficiali degli Enti che distribuiscono tali dati.

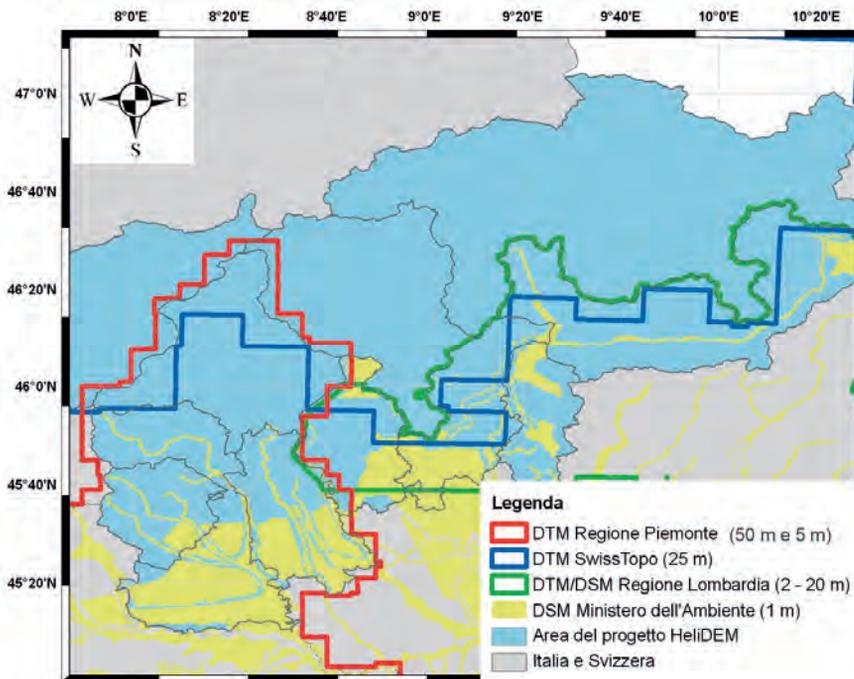


Figura 1. Quadro di insieme dei DTM locali per l'area oggetto di studio.

Sinteticamente, i dati raccolti e disponibili per il progetto HELI-DEM possono essere distinti in base a due principali metodologie di acquisizione: acquisizione da cartografia e acquisizione da tecniche LiDAR. Tali tecniche comportano precisioni e risoluzioni differenti. Nel caso di modelli derivati dalla digitalizzazione della cartografia esistente, infatti, si hanno in genere basse accuratezze (dell'ordine di alcuni metri o, in casi peggiori, di decine di metri) e risoluzioni spaziali inferiori (alcune decine di metri, come ad esempio nel DTM della Regione Piemonte), ma consentono di abbracciare porzioni molto più ampie di territorio (scale regionali o addirittura nazionali, come ad esempio il DTM svizzero realizzato da SwissTopo). Invece i modelli ottenuti attraverso tecniche LiDAR hanno accuratezze anche migliori del metro e risoluzioni spaziali dell'ordine del metro (come ad esempio nel DTM LiDAR del Ministero dell'Ambiente), sebbene in questo caso le porzioni di terreno modellato siano molto ridotte (generalmente alvei fluviali o aree lacustri, piccole fasce montuose o collinari).

Tutti i modelli digitali raccolti sono memorizzati come griglie in formato ASCII (tipicamente, ESRI ASCII) con passo (distanza fra i nodi) assegnato. Tale passo è in coordinate cartografiche (ΔE , ΔN) nel caso dei DTM di Regione Piemonte e di Regione Lombardia e in coordinate geografiche ($\Delta \phi$, $\Delta \lambda$) nel caso dei DTM della Svizzera e quello LiDAR del Ministero dell'Ambiente. La Figura 1 riporta il quadro di unione per i DTM locali effettivamente utilizzati nel progetto, relativamente all'area di interesse. A partire dal quadro di unione è possibile definire anche le zone di sovrapposizione tra i prodotti locali raccolti: circa il 30% dell'area HELI-DEM presenta una sovrapposizione di almeno due DTM.

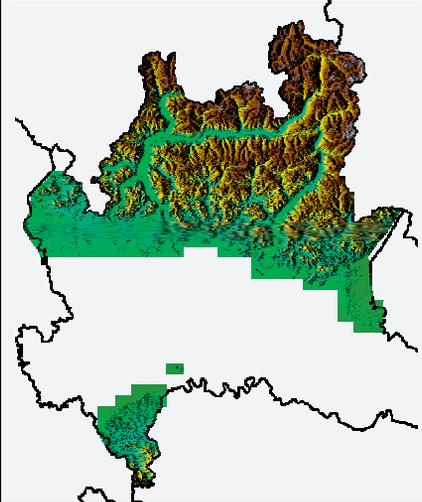
2 I MODELLI DI TERRENO

Di seguito vengono elencati e discussi i DTM raccolti e le loro caratteristiche. Si premette però un aspetto che risulterà più chiaro nei seguenti capitoli. Considerando che la creazione di un modello digitale delle altezze unificato per la fascia alpina e subalpina compresa tra l'Italia e la Svizzera costituisce l'obiettivo principale del progetto HELI-DEM, è possibile trarre alcune conclusioni sulla possibile risoluzione e sulla conseguente accuratezza del modello risultante, alla luce dei prodotti disponibili sull'area oggetto di studio. A tal proposito si richiama anche la Tabella 1 del Capitolo 1. Si ritiene di poter produrre un DTM a bassa risoluzione, ovvero di circa 20 metri, a copertura dell'intera area del progetto: ciò verrà effettuato mediante opportuna fusione dei dati a bassa e media risoluzione, che sono ovunque disponibili; nelle aree in cui sono disponibili DTM ad alta risoluzione, questi verranno utilizzati come strato sovrapposto, in modo da produrre un DTM multirisoluzione. I dati acquisiti per il progetto vengono quindi caratterizzati in due categorie principali, in accordo alla loro risoluzione e accuratezza:

1. DTM regionali a bassa risoluzione. Si tratta dei tre DTM ufficialmente rilasciati dagli Enti Regionali per la Lombardia, il Piemonte e la Svizzera. Inoltre in tale categoria viene inserito il DTM del Piemonte Est. Sono DTM di livello fra 1 e 3 (Tab. 1 del Cap. 1). Hanno risoluzione comprese fra i 10 e i 50 metri.
2. DTM locali a alta risoluzione. Sono due DTM realizzati con tecniche LiDAR: il primo è realizzato da Regione Piemonte, a copertura della regione mentre il secondo è realizzato dal Ministero dell'Ambiente e copre il fondovalle delle principali vallate del bacino del Po.

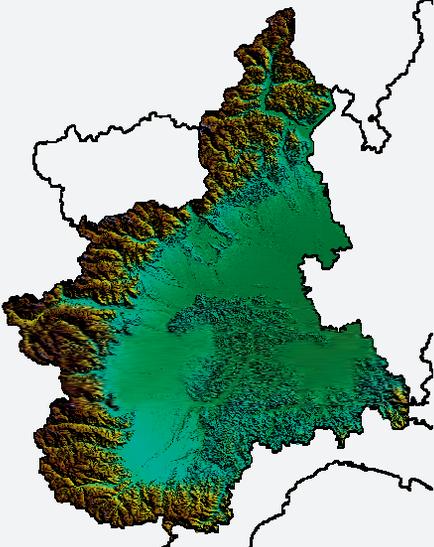
3 I DTM REGIONALI

3.1 Il DTM di Regione Lombardia (Livello 1)

	Risoluzione: 20 metri
	Estensione: Lombardia – zona alpina/prealpina e appenninica
	Anno di realizzazione: 2002
	Sistema di riferimento: Roma 40
	Sistema di coordinate: Gauss-Boaga fuso Ovest, quote ortometriche
	Accuratezza: 5-10 m (in quota), 2 m (in planimetria)
	Formato memorizzazione: ASCII GRID (ESRI)
Organizzazione files: Sezioni 1:10000 Regione Lombardia	

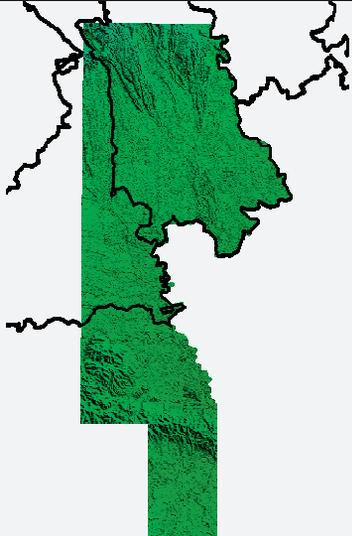
Note sulla generazione del modello. La preparazione della base vettoriale del modello altimetrico del territorio ha richiesto la vettorizzazione e l'assemblaggio dei file *raster* delle sezioni alla scala 1:10.000, l'infittimento delle curve di livello e l'analisi dei punti quotati. È stato quindi prodotto un modello di dati altimetrici TIN (a triangoli irregolari) che successivamente è stato convertito in un modello a griglia con passo di campionamento pari a 20 metri. Le curve di livello direttrici (50 m, 100 m) sono state completate nei punti dove erano interrotte e sono state interpretate nelle aree a tratteggio artistico con l'ausilio dei punti quotati. Le curve ausiliarie (10m, 20m, 40m, 60 m, 70 m, 90 m) sono state aggiunte in tratti nelle aree a basso gradiente altimetrico, mentre le curve di livello ordinarie (30 m, 80 m) sono state tracciate in maniera continua su tutto il territorio. Dall'insieme originario dei punti quotati sono stati esclusi quelli riferiti ai manufatti che appartengono alle infrastrutture abitative. Per effettuare l'interpolazione dei vettori delle curve di livello è stato usato l'algoritmo implementato nel GIS MGE (Intergraph) che ha prodotto la struttura TIN mediante la triangolazione di Delaunay. Il TIN è stato successivamente ricalcolato inserendo nel modello le informazioni aggiuntive dei punti quotati appartenenti alle linee di impluvio e displuvio generate automaticamente. La conversione alla struttura a griglia è stata effettuata attraverso algoritmi di interpolazione bilineare.

3.2 Il DTM di Regione Piemonte (Livello 1)

	Risoluzione: 50 metri
	Estensione: Regione Piemonte
	Anno di realizzazione: anni '90 (riorganizzato nel 2003)
	Sistema di riferimento: WGS84 – IGM95 (ETRF 89)
	Sistema di coordinate: UTM fuso 32, quote ortometriche
	Accuratezza: 2.5 m (in quota), 4 m (in planimetria)
	Formato memorizzazione: ASCII GRID (ESRI), XYZ
Organizzazione files: Sezioni, Fogli, intera Regione	

Note sulla generazione del modello. Il DTM è stato acquisito, per via fotogrammetrica, con due diverse modalità. Per il centro-nord Piemonte sono stati acquisiti per fotorestituzione numerica diretta alcuni elementi dell'altimetria, necessari in fase di formazione della CTR, quali le isoipse con equidistanza 10 metri, i punti quotati e le linee di discontinuità altimetrica (*breaklines*), si è proceduto all'interpolazione dei punti quota del DTM in corrispondenza con i nodi della griglia di 50 metri. Nel sud del Piemonte, invece, la suddetta interpolazione è stata effettuata a partire da profili di scansione intervallati di 60 metri, ricavati dai modelli stereoscopici dei fotogrammi, con campionamento dei punti anch'esso di 60 metri. Il seguente modello in WGS84/IGM95 è il frutto della riorganizzazione dei files del Modello precedente, realizzato in Roma 40, Gauss-Boaga.

3.3 Il DTM di Piemonte Est (Livello 3)

	Risoluzione: 10 / 50 metri
	Estensione: 70 Sezioni di CTR Borgomanero-Alessandria
	Anno di realizzazione: 2006
	Sistema di riferimento: WGS84 – IGM95 (ETRF 89)
	Sistema di coordinate: UTM fuso 32, quote ortometriche
	Accuratezza: 1 m (in quota)
	Formato memorizzazione: ASCII GRID (ESRI)
	Organizzazione files: Sezioni 1:10000 Regione Piemonte

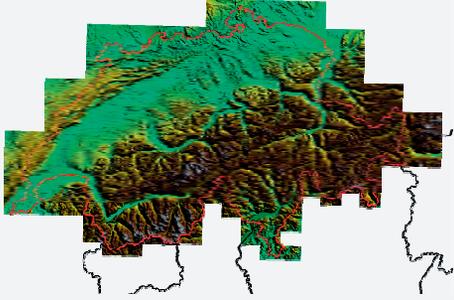
Note sulla generazione del modello. La realizzazione del prototipo Piemonte-Est è avvenuta nel quadro della partecipazione della Regione Piemonte all'Accordo sul Sistema Cartografico di Riferimento. In questo contesto, la Regione Piemonte ha attuato un programma relativo alla produzione pilota di un DB topografico su una consistente porzione di territorio appartenente al Piemonte Orientale - province di Vercelli, Alessandria e Novara - condotta adottando integralmente le specifiche approvate e disponibili sul sito dell'Intesa GIS. La Regione Piemonte ha in particolare promosso una serie di attività che riguardano le seguenti Azioni: realizzazione del DB topografico, realizzazione del modello altimetrico digitale DTM, realizzazione degli strati prioritari DBPrior10k, realizzazione delle reti di raffittimento ai 7 km. Per quanto concerne la generazione del modello digitale, che fa riferimento alle caratteristiche di precisione del livello 3 del documento Intesa sul DTM (cosiddetto documento Kölbl – www.intesagis.it), ci si è avvalsi delle innovative norme contenute nel capitolo 5 del documento 1n1011_2, che prevedono:

- la produzione del DTM a maglia regolare per via fotogrammetrica passa attraverso la generazione di un TIN (Triangular Irregular Network);
- per la produzione del TIN, il ricorso a tutte le informazioni disponibili riconducibili al suolo, quindi tutti gli elementi che costituiscono la planimetria delle rappresentazioni cartografiche, ristretta ai soli elementi la cui quota è riferita al terreno;
- l'integrazione delle informazioni altimetriche, in fase di generazione del modello digitale, mediante punti (*mass point*) e linee di discontinuità (*breaklines*) rilevati unicamente per la produzione del DTM, prive pertanto di valenza cartografica. Per la misura dei punti isolati sono state utilizzate le metodologie della fotogrammetria digitale che prevedono l'uso dell'autocorrelazione;
- la verifica della produzione del modello digitale avviene direttamente sul modello stereoscopico: l'operatore, che osserva nelle tre dimensioni il TIN generato sovrapposto

al terreno, può quindi verificare in quali zone le superfici si scostano al di sopra della soglia prefissata ed intervenire con l'introduzione di altri punti e/o *breaklines*. Il prototipo relativo alla sezione di Gattinara è scaricabile gratuitamente al sito:

<http://www.regione.piemonte.it/sit/argomenti/pianifica/daticarte/intesagis.htm>

3.4 Il DTM di Swisstopo, DHM25 (Livello 2)

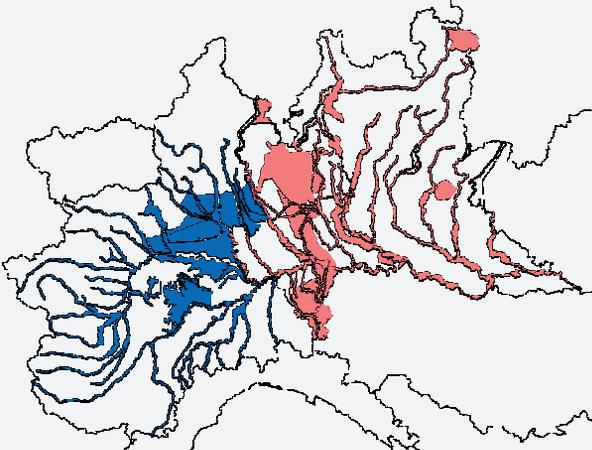
	Risoluzione: 25 metri (1" sessagesimale)
	Estensione: Svizzera
	Anno di realizzazione: 2001
	Sistema di riferimento: ETRS89
	Sistema di coordinate: geografiche, quote ortometriche LN02
	Accuratezza: 1.5 - 3 m (in quota)
	Formato memorizzazione: ASCII GRID
	Organizzazione files: Griglie di dimensione costante (3601x3601), denominate con le coordinate dello spigolo in basso a sinistra

Note sulla generazione del modello. Il modello digitale del terreno fornito da SwissTopo è derivato dal DHM25, ed è stato calcolato appositamente per HELI-DEM e riproiettato in ETRS89. Il modello originale DHM25 è stato ottenuto partendo dalle isoipse delle mappe in scala 1:250000, ed 1:50000 sul confine con le altre nazioni. A disposizione del progetto sono state fornite solo le griglie del DTM che coprono la zona di interesse del progetto HELI-DEM (cantoni Ticino e Grigioni). Ulteriori informazioni, oltre al modello con risoluzione a 1000 m e a 200 m scaricabile gratuitamente, possono essere trovate sul sito internet:

<http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/it/home/products/height/dhm25.html>

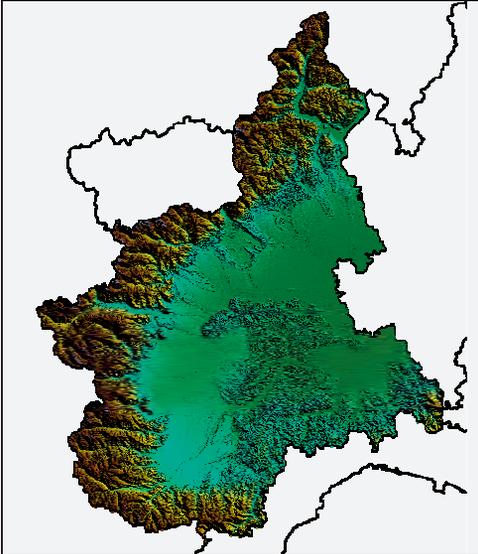
4 IDTM AD ALTA RISOLUZIONE

4.1 Il DTM del Ministero dell'Ambiente: PST-A (Livello 4)

	Risoluzione: 0.00001 gradi sessadecimali
	Estensione: Piemonte e Lombardia – bacini idrografici principali
	Anno di realizzazione: in corso di realizzazione e collaudo
	Sistema di riferimento: WGS84 – IGM95 (ETRF 89)
	Sistema di coordinate: geografiche, quote ortometriche
	Accuratezza: ~ 1 m (in quota)
	Formato memorizzazione: ASCII GRID (ESRI)
	Organizzazione files: Griglie di dimensioni costanti (1000 x 1000 punti), denominate: “D XXXX YYYY.DEM” dove XXXX ed YYYY sono la latitudine e la longitudine della cella in basso a sinistra della griglia - 2 interi e 2 decimali

Note sulla generazione del modello. Il Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale (PST-A) ha come obiettivo principale quello di generare e rendere disponibili e condivisibili, all'intero comparto della Pubblica Amministrazione, le informazioni territoriali indispensabili per la creazione di elaborati ad alto valore aggiunto. In particolare, il progetto prevede la acquisizione, da parte del Ministero, di dati prodotti da Telerilevamento con tecnica LiDAR (da piattaforma aerea) e con tecnica interferometrica (da piattaforma satellitare) e la conseguente catalogazione di tali dati nella Banca Dati del Portale Cartografico Nazionale (PCN). L'obiettivo primario del PST-A è quello di realizzare, il più rapidamente possibile, una base dati per il supporto ai processi decisionali in tutte le aree soggette al rischio del dissesto idrogeologico ed a favorire la condivisione di “data set” delle metodologie e dei risultati.

4.2 Il DTM di Regione Piemonte (Livello 4)

	Risoluzione: 5 metri
	Estensione: Regione Piemonte
	Anno di realizzazione: 2012
	Sistema di riferimento: WGS84 – IGM95 (ETRF 89)
	Sistema di coordinate: UTM fuso 32, quote ortometriche
	Accuratezza: 0.3 m (in planimetria e quota)
	Formato memorizzazione: ASCII GRID (ESRI)
Organizzazione files: Sezioni, Fogli, intera Regione	

Note sulla generazione del modello. Il DTM è stato acquisito, per via fotogrammetrica, tramite strumentazione LiDAR. I dati sono stati successivamente trattati andando ad effettuare una classificazione automatica ed in seguito una depurazione manuale dei dati stessi

5 I MODELLI DI GEOIDE

Come per i modelli digitali del terreno, anche per il geoida sono stati raccolti i principali modelli disponibili per la zona di analisi del progetto HELI-DEM. In particolare, la scelta è ricaduta sul più accurato modello globale di geoida attualmente disponibile (EGM2008), su una sua realizzazione ottenuta integrando i dati provenienti dalla missione GOCE (*Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer*), e due modelli a scala nazionale (ITAL-GEO2005 per l'Italia e CHGeo2004 per la Svizzera). Tali modelli, tutti di recente realizzazione (il più datato è del 2003), hanno risoluzioni spaziali e sistemi di riferimento differenti. Per quanto concerne la memorizzazione dei dati, tutti i prodotti disponibili sono in formato ESRI GRID ASCII e hanno il medesimo ricoprimento spaziale (da 45°N a 47°N in latitudine e da 7°E a 11°E in longitudine). I modelli di geoida sono stati utilizzati per la creazione di un geoida unico per tutta l'area del progetto: il metodo e i risultati sono completamente discussi nel Capitolo 11, che, per contro, è l'unica parte del libro in cui vengono trattati i problemi legati al geoida. Per tale motivo si rimanda a tale capitolo la descrizione più dettagliata delle caratteristiche dei modelli di geoida precedentemente citati.

SITI

EGM 2008, <http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/index.html>.

European Space Agency, *GOCE*: <http://www.esa.int/SPECIALS/GOCE/index.html>.

GMTED: http://topotools.cr.usgs.gov/gmted_viewer/

GRACE: <http://www.csr.utexas.edu/grace/>.

Intesa GIS sui Sistemi Informatici Geografici: http://www.centrointerregionale-gis.it/script/Documenti_intesa.asp.

Portale Cartografico Nazionale: <http://www.pcn.minambiente.it/PCN/>.

Regione Lombardia, *geoportale*: <http://www.cartografia.regione.lombardia.it/geoportale>.

Regione Piemonte, *geoportale* <http://www.geoportale.piemonte.it>

SwissTopo, prodotti:

<http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/it/home/products.html>.

BIBLIOGRAFIA

A.A.V.V., *Progetto HELI-DEM (Helvetia-Italy Digital Elevation Model)*, Allegato Tecnico, 2007.

Marion C., Marti U., *Remarks on the digital terrain model of Switzerland for the European Geoid determination*, nota tecnica a cura di SwissTopo (CH), 2005.

Ministero dell' Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, *Relazione Tecnica Rilievo PST-A – Regione Lombardia*, 2010.

Pavlis, N.K., S.A. Holmes, S.C. Kenyon, and J.K. Factor, *An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008*, General Assembly of the European Geosciences Union, Vienna April 13-18 2008.

Ramos Clavijo A. P., *Comparisons and problems identification on Local and Global Digital Elevation Models*, Master Graduation Thesis in Environmental and Geomatic Engineering, Politecnico di Milano, 2012

Rao S., Garnerò G., *Il Modello Altimetrico Digitale della Regione Piemonte*, nota tecnica, 2003.

Regione Lombardia, *Modello digitale del terreno del territorio lombardo (DTM20)*, nota tecnica a cura del Sistema Informativo Territoriale (S.I.T.) della Regione Lombardia, versione 1.0, Giugno 2003.

Regione Piemonte, *Prototipo Piemonte Est – note tecniche*, Maggio 2006.

Reuter H.I., A. Nelson, A. Jarvis, *An evaluation of void filling interpolation methods for SRTM data*, International Journal of Geographic Information Science, 21:9, 983-1008, 2007.

CAPITOLO 4

TRASFORMAZIONE DI SISTEMI DI RIFERIMENTO DEI DATI

Ludovico Biagi (1), Laura Carcano (1), Paolo Dabove (2),
Mattia De Agostino (3), Ambrogio Maria Manzino (2)

(1) Politecnico di Milano, DICA, Laboratorio di Geomatica presso Polo Territoriale di Como, Via Valleggio 11, 22100 Como

(2) Politecnico di Torino, DIATI, Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture, Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino

(3) all'epoca del lavoro, Politecnico di Torino; ora CSI Piemonte, Corso Tazzoli 215/12, 10137 Torino

SOMMARIO

I dati originari del progetto HELI-DEM sono disponibili in diversi sistemi di riferimento e espressi in diverse coordinate. La fusione di tali dati presuppone che essi vengano preliminarmente trasformati a un sistema di riferimento comune. Nel caso di HELI-DEM tale sistema di riferimento deve essere ETRF2000. Il presente capitolo descrive le procedure di trasformazione implementate allo scopo.

ABSTRACT

Input data of HELI-DEM project are available in different reference frames and are stored with different coordinates representations. The fusion of these data requires that they are preliminarily transformed to a common reference frame. In HELI-DEM project, ETRF2000 has been chosen. The Chapter describes the implemented software for this purpose.

1 INTRODUZIONE

In questo paragrafo vengono ricordati alcuni fondamentali relativi ai sistemi di riferimento, dalla scala globale a quelli per la produzione cartografica nazionale. Dal 1990, con una risoluzione della International Association of Geodesy (IAG, www.iag-aig.org) il sistema di riferimento globale è lo International Terrestrial Reference System (ITRS), definito con origine nel centro di massa della Terra, asse Z orientato secondo l'asse di rotazione convenzionale terrestre, asse X verso il meridiano convenzionale di Greenwich. Le realizzazioni di ITRS prendono nome di ITRF_{yy}, ove yy è l'anno convenzionale della stima. La realizzazione attuale è ITRF2008 (Altamimi et al., 2011), calcolata dall'International Earth Rotation Service di IAG. ITRF2008 è materializzato da una rete di 934 stazioni permanenti

delle tecniche VLBI, SLR, GPS e DORIS: la soluzione, per ognuna di esse, riporta le stime delle coordinate all'epoca 2005.0 e delle velocità geodinamiche (Fig. 1).

In Europa, in media, il moto geodinamico rispetto a ITRF è dell'ordine di 2-3 cm all'anno in direzione Nord Est: per le applicazioni cartografiche è stato quindi istituito un sistema di riferimento statico rispetto al continente, il cui nome è European Terrestrial Reference System 89 (ETRS89, Adam et al., 1999, etrs89.ensg.ign.fr). ETRS89 è definito dalla Commissione EUREF della IAG (www.euref-iag.net), coincidente con ITRS nel 1989.0 ma, da allora, in corotazione solidale alla geodinamica della placca media europea. Per definizione quindi, gli spostamenti geodinamici medi europei rispetto a ETRS89 sono nulli e quindi il sistema si presta a applicazioni cartografiche, che prediligono una rappresentazione geografica statica. Ormai quasi tutte le nazioni europee stanno migrando le cartografie storiche a ETRS89.

A livello internazionale la realizzazione corrente di ETRS89 è ETRF2000, pubblicata e monitorata dalla rete permanente European Permanent Network (EPN, Kenyeres, Brunyninx, 2004, www.epncb.oma.be): la realizzazione ufficiale Italiana è IGM95 (Surace, 1993, 1997), distribuita dall'Istituto Geografico Militare (IGM, www.igmi.org). IGM95 costituisce una rete statica, inizialmente composta di circa 1250 vertici, rilevata e stimata negli anni 90 ma in continua crescita per i raffittimenti regionali ancora in atto. Sino al 2009 la soluzione ufficiale per IGM95 era quella ottenuta dall'inquadramento in ETRF89 (realizzazione 1989 di ETRS89). Le differenze orizzontali fra le realizzazioni correnti di ITRS e ETRS89 sono di alcuni decimetri; inoltre ETRF89-IGM95 presentava ulteriori deformazioni correlate nello spazio e errori incorrelati (Benciolini et al., 2008, Biagi et al., 2009b).

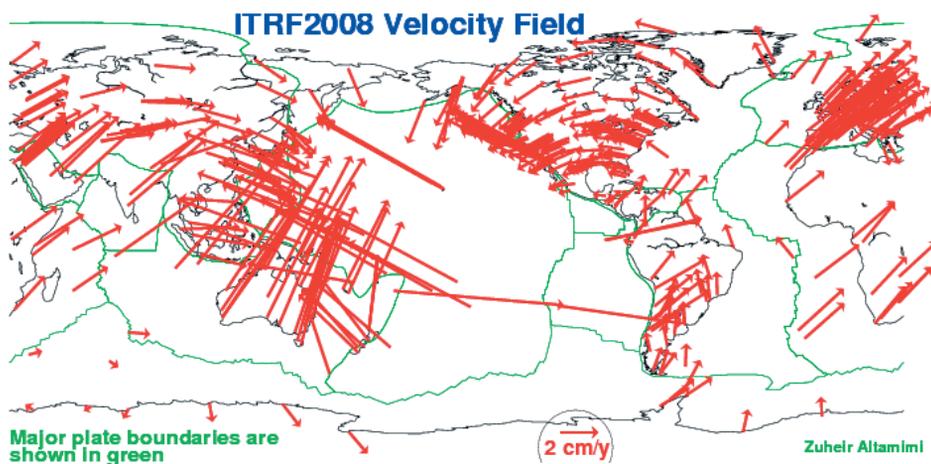


Figura 1. La rete che materializza ITRF2008 e le stime di velocità geodinamiche per le sue stazioni. Figura tratta dal sito ITRF (http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2008/)

Per ovviare alla obsolescenza di ETRF89-IGM95, nel 2007 IGM ha avviato un nuovo processo di aggiornamento e inquadramento della rete nazionale. Si è innanzitutto definita una nuova rete di ordine zero nazionale, denominata Rete Dinamica Nazionale (RDN): RDN si compone di 100 stazioni, che sono state selezionate fra stazioni permanenti già esistenti e

gestite da vari Enti, in base a criteri di omogenea distribuzione e buona qualità. Nel 2008, IGM ha effettuato una prima stima di RDN, basata sulla compensazione di quattro settimane di dati a cavallo del capodanno 2008 (epoca 2008.0, Baroni et al., 2009). A tale stima ha partecipato il Gruppo di Geodesia e Geomatica (G3, composto dal DITS de La Sapienza, Università di Roma, dal DITAG e dal DINSE del Politecnico di Torino e dal DIAR del Politecnico di Milano, Biagi et al., 2009a). La stima di RDN ha permesso un nuovo inquadramento di IGM95: a tal fine sono state rilevate le basi da un certo numero di stazioni RDN, circa 45, ai punti IGM95 loro contigui; quindi il “vecchio” grafo delle basi IGM95, con le nuove connessioni a RDN, è stato ricompensato utilizzando RDN e le relative coordinate ETRF2000 come vincoli. Si tratta quindi di un aggiornamento, perlomeno parziale, di IGM95 da ETRF89 a ETRF2000, e si deve ora parlare di ETRF2000-IGM95, oppure ETRF2000-RDN. RDN è stata ufficialmente riconosciuta e indicata come sistema di riferimento ufficiale nazionale con Decreto della Presidenza del Consiglio dei Ministri del 10 novembre 2011.

La cartografia ufficiale Italiana oggi dunque viene prodotta nel sistema di riferimento europeo ETRS89. Si ricorda che, prima degli anni '90, la cartografia veniva prodotta nel sistema nazionale Roma40, materializzato da una rete topografica di ordine zero e raffittito alla scala locale da reti di ordine superiore: le differenze fra Roma40 e qualunque ETRF_{yy} sono dell'ordine dei cento metri e molto variabili sul territorio nazionale. La trasformazione fra Roma40 e ETRS89 è stata dunque oggetto di approfondito lavoro di studio: si cita qui il lavoro di Donatelli et al., (2002). La trasformazione è stata implementata nel programma Verto, distribuito da IGM.

Come ampiamente descritto nel Capitolo 3, i prodotti cartografici raccolti nell'ambito del Progetto HELI-DEM sono in sistemi di riferimento o di coordinate differenti: si hanno infatti dati in Roma40, coordinate Gauss-Boaga oppure ETRF89, coordinate sia cartografiche UTM sia geografiche. La validazione reciproca, l'unione e l'armonizzazione dei dati in un unico archivio richiedono evidentemente, in fase preliminare, che tutti i dati siano trasformati a un unico sistema di riferimento. La scelta del sistema di riferimento per il database HELI-DEM è subito apparsa univoca, essendo questo un progetto a estensione transnazionale e finanziato dalla Comunità Europea. In accordo alle linee guida EUREF si è optato di trasformare tutti i dati a ETRF2000, la cui realizzazione Italiana è, come già detto, ETRF2000-RDN: a tal fine si è implementato un programma che applica a liste di punti oppure griglie regolari le trasformazioni codificate a livello internazionale fra i vari ITRF e ETRF (Altamimi et Boucher, 2002) e, a livello nazionale, fra Roma40, ETRF89 e RDN-ETRF2000. Il presente Capitolo descrive il programma. Si nota che la trasformazione di sistema di riferimento per un DTM su griglia regolare produce un seminato di punti distribuiti ancora regolarmente ma non più sui nodi di una griglia ben orientata e che rispetti i tagli cartografici standard. Tale problema viene meglio discusso nelle conclusioni.

2 IMPLEMENTAZIONE DELLA TRASFORMAZIONE TRA SISTEMI DI RIFERIMENTO

Il programma GK2CNV (Fig. 2), sviluppato dal Politecnico di Torino in FORTRAN 90 all'interno del progetto HELI-DEM e distribuito con licenza GNU GPL (<http://www.gnu.org/licenses/old-licenses/gpl-2.0.html>), consente di effettuare il passaggio tra i precedentemente descritti sistemi di riferimento: vengono inoltre effettuate anche le trasformazioni fra sistemi di coordinate differenti. In particolare, il programma è in grado di

ricevere in input una lista di coordinate, un singolo DTM (nei formati ASCII più diffusi) oppure una lista di DTM.

```

#####
## GK2CNU - GK2 Converter                               ##
##                                                     ##
##                                     v. 2.0          ##
##                                     ##
##      <C> 2011 Politecnico di TORINO - DITAG        ##
##                                     ##
## Programma di conversione tra sistemi di riferimento ##
## e/o sistemi di coordinate secondo la procedura    ##
## UERTO di I.G.M.I.                               ##
##                                     ##
## Sviluppato nel progetto:                         ##
## Interreg IT-CH 2007-2013 <ID: 13881216>         ##
## HELIDEM - Helvetia-Italy Digital Elevation Model ##
##                                     ##
## Distribuito con licenza GNU General Public License ##
## v. 3.00 e successive. Digitare "10" per ulteriori ##
## dettagli sulla licenza.                         ##
##                                     ##
#####
Questo programma consente di effettuare trasformazioni
tra diversi sistemi di riferimento e di coordinate.

-----
CONVERSIONE TRA SISTEMI DI RIFERIMENTO
(1) Conversione di un singolo DEM
(2) Conversione di una lista di DEM
(3) Conversione di una lista di coordinate

-----
CONVERSIONE TRA SISTEMI DI COORDINATE
(4) Conversione di un singolo DEM
(5) Conversione di una lista di DEM
(6) Conversione di una lista di coordinate
    
```

Figura 2. Schermata iniziale del programma GK2CNU

E' inoltre prevista la gestione e alla generazione di grigliati NTV2 (<http://en.wikipedia.org/wiki/NTV2>) per la conversione all'interno di un ambiente GIS. Il programma fornisce in output una lista di coordinate, relative ai listati di punti oppure al centro di ciascuna cella della griglia in input. La Figura 3 mostra il diagramma di flusso del programma. Nel seguito saranno descritti i passaggi fondamentali della procedura di trasformazione tra sistemi di riferimento.

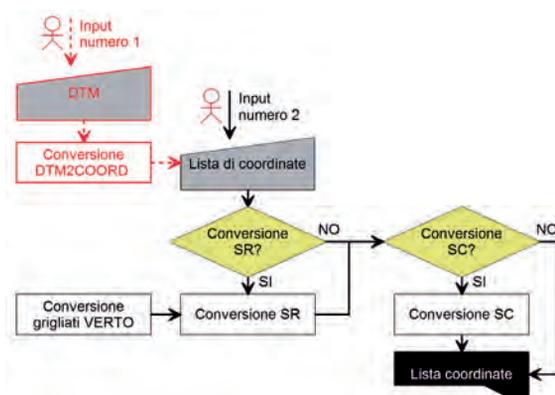


Figura 3. Diagramma di flusso del programma GK2CNU

2.1 CONVERSIONE MEDIANTE LA ROUTINE DTM2COORD

Come mostrato nel diagramma di flusso sopra riportato, il programma è in grado di accettare come input sia una lista di punti, sia una griglia. Quest'ultimo può essere inserito in uno dei seguenti formati ASCII:

- ESRI/ArcInfo grid ASCII,
- GRASS grid ASCII,
- SwissTopo ASCII.

Per quanto riguarda i primi due formati, si tratta di tipologie di esportazione standard, molto diffuse in ambiente GIS

(<http://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#//009t0000000w000000>, *GRASS ASCII grid format specification*, disponibile al sito http://www.prism.oregonstate.edu/pub/prism/docs/manual/Grass_Format.docx). Il formato dati SwissTopo è invece quello in cui è stato fornito il DTM con passo a 25 m del territorio svizzero. Di seguito si riportano in maniera sintetica le strutture dei tre tipi di file, iniziando dal formato ESRI/ ArcInfo grid ASCII. Il file SwissTopo prevede una sola riga di intestazione che contiene, nell'ordine, i campi riportati in Tabella 3. Qualsiasi sia il formato di DTM inserito, il programma restituisce una lista coordinate tridimensionali trasformate per ciascuna cella della griglia. Le coordinate sono sempre riferite al centro della cella.

Elemento	Descrizione
NCOLS	Numero di colonne della griglia
NROWS	Numero di righe della griglia
CELLSIZE	Passo della griglia (uguale per latitudine e per longitudine)
XLLCORNER (o XLLCENTER)	Coordinata X (Longitudine o cartografica Est) dello spigolo della cella in basso a sinistra; (alternativamente: XLLCENTER indica il centro della cella (nodo) in basso a sinistra)
YLLCORNER (o YLLCENTER)	Coordinata Y (Latitudine o cartografica Nord) dello spigolo della cella in basso a sinistra; (alternativamente: YLLCENTER indica il centro della cella (nodo) in basso a sinistra)
NODATA_VALUE	Valore convenzionalmente attribuito all'assenza di dato
z1	I valori della griglia vengono inseriti in righe per X decrescenti, con Y crescente
z2	
...	

Tabella 1. Struttura del formato ESRI/ArcInfo grid ASCII

Elemento	Descrizione
North:	Valore massimo di latitudine (spigolo superiore) (o cartografica Nord) della griglia
South:	Valore minimo di latitudine (spigolo inferiore) (o cartografica Nord) della griglia
East:	Valore massimo di longitudine (spigolo a destra) (o cartografica Est) della griglia
West:	Valore minimo di longitudine (spigolo a sinistra) (o cartografica Est) della griglia
Rows:	Numero di righe della griglia
Cols:	Numero di colonne della griglia
z1	Valori della griglia, inseriti dall'alto verso il basso e da sinistra a destra
z2	
...	

Tabella 2. Struttura del formato GRASS ASCII.

Elemento nr.	Descrizione
1	Valore minimo di latitudine della griglia
2	Valore massimo di latitudine della griglia
3	Valore minimo di longitudine della griglia
4	Valore massimo di longitudine della griglia
5	Passo della griglia lungo la latitudine
6	Passo della griglia lungo la longitudine

Tabella 3. Struttura del formato SwissTopo

2.2 CONVERSIONE TRA SISTEMI DI RIFERIMENTO MEDIANTE GRIGLIATI VERTO

Si sintetizzano in questo paragrafo i criteri adottati da IGM per l'attivazione della procedura di trasformazione tra i diversi sistemi di riferimento nella procedura Verto. Si noti che Verto implementa anche la trasformazione da e verso il sistema di riferimento ED50 ma tale procedura non viene discussa in questo lavoro in quanto non utilizzata nell'ambito del Progetto HELI-DEM.

- I sistemi di riferimento in oggetto sono quelli adottati ufficialmente nella cartografia già pubblicata e quindi le trasformazioni devono mantenere questa congruenza. Sono state eliminate solo le anomalie "locali" causate da errori grossolani commessi sul singolo vertice della rete; sono state lasciate le anomalie "regionali", comuni cioè a più punti presenti in una zona, nella convinzione che esse rappresentino una caratteristica del sistema di riferimento che ha caratterizzato tutti i prodotti cartografici già pubblicati.

- Le trasformazioni devono avvenire mediante l'applicazione di parametri univoci (traslazioni di latitudine e longitudine) e senza soluzione di continuità per tutto il territorio nazionale. I vertici utilizzati da IGM per il calcolo dei parametri di trasformazione fra i diversi sistemi di riferimento sono quelli geodetici del primo ordine.

Per la trasformazione tra Roma40 e ETRF89-IGM95, e tra ETRF89-IGM95 e ETRF2000-RDN sono stati selezionati 829 vertici geodetici le cui coordinate sono misurate nei due sistemi di riferimento (punti doppi, Fig. 4) appartenenti al territorio nazionale e zone limitrofe (Istria, Dalmazia, Tunisia e Corsica).



Figura 4. Grafico dei punti doppi utilizzati per il calcolo delle griglie Roma40-ETRF89

Per determinare le trasformazioni, sono stati calcolati i valori di $\Delta\phi$ e $\Delta\lambda$ di ciascun punto doppio come differenza di latitudine e di longitudine nei due sistemi di riferimento. Per il passaggio tra ETRF89 e ETRF2000 sono state calcolate anche le differenze di quote ellissoidiche. A partire dai $\Delta\phi$ e $\Delta\lambda$ sui punti doppi, che sono distribuiti in modo sparso, sono state poi interpolate delle superfici approssimanti mediante un algoritmo disponibile nel software SURFER della Golden Software (<http://www.goldensoftware.com/products/surfer>), che segue il principio della minima curvatura. Le superfici interpolate sono state poi campionate su un grigliato regolare di nodi, per ciascuno dei quali è stato calcolato il valore di $\Delta\phi$ e $\Delta\lambda$ (e di Δh per il passaggio tra i due sistemi ETRF). Sono state quindi generate complessivamente 7 griglie di differenze (tre per $\Delta\phi$, tre per $\Delta\lambda$ ed una per le differenze di altezza), inquadrata nel sistema di riferimento Roma40 (differenze rispetto a ETRF89) e nel sistema ETRF89 (differenze rispetto ad ETRF2000). I nodi delle griglie hanno passo di 5' in latitudine e 7'30" in longitudine e coincidono quindi con il taglio delle tavolette della vecchia cartografia in scala 1:25000, per un numero totale di 16677 nodi (Fig. 5). I nodi originali vengono quindi interpolati mediante interpolazione bilineare su griglie a maggior risoluzione, i cui $\Delta\phi$ e $\Delta\lambda$ finali sono memorizzati in file che mosaicano perfettamente il territorio nazionale: un particolare taglio di raffittimento della griglia prevede complessivamente 676

file, i quali possiedono un nome di tre o più caratteri alfanumerici corrispondenti al numero del foglio in scala 1:50000.

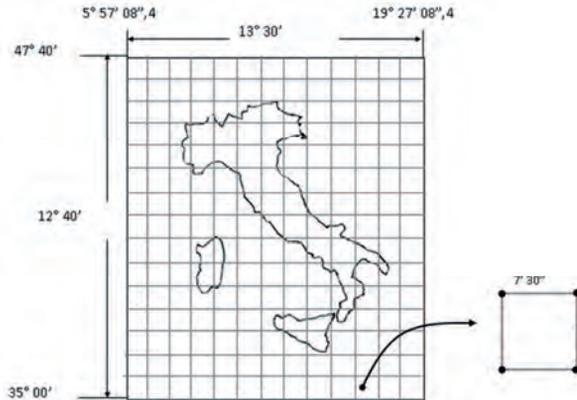


Figura 5. Struttura dei grigliati VERTO

Ciascun foglio (che corrisponde ad un file con estensione .gk1 o .gk2) è quindi composto da sette griglie del file tipo, contiene 36 valori di correzione (espressi in secondi sessadecimali per quanto riguarda le differenze di latitudine e di longitudine, e in metri per le differenze di altezza ellissoidica) caricati da sinistra verso destra e dal basso verso l'alto a partire da un valore di latitudine e di longitudine memorizzati alla fine dei valori delle correzioni con il passo (già ricordato) di 5' in latitudine e 7'30" in longitudine. La griglia dell'ondulazione del geoide, invece, contiene 140 valori di N (espressi in m) caricati da sinistra verso destra e dall'alto verso il basso a partire da un valore di latitudine e di longitudine memorizzati alla fine dei valori delle correzioni con il passo di 2' in latitudine e 2' in longitudine. Di seguito riportiamo la struttura del file xxx.GK2, utilizzati dal programma GK2CNV.

Nel caso in cui il punto da trasformare non coincida direttamente con un nodo della griglia, è prevista l'applicazione di un valore interpolato (interpolazione bilineare) considerando i quattro nodi più vicini al punto. Dato un punto X qualsiasi all'interno della griglia, è possibile definire le distanze a e b secondo le direzioni di longitudine e latitudine, così come indicato in Figura 6. La correzione in latitudine e longitudine da applicare al punto X (C_x) si calcolerà nel modo seguente:

$$C_x = (1-a)(1-b)C_1 + a \times (1-b)C_2 + (1-a) \times b \times C_3 + a \times b \times C_4 \quad (1)$$

C_1 , C_2 , C_3 e C_4 sono le correzioni relative ai 4 nodi della griglia che contengono il punto.

Per il loro utilizzo nel programma GK2CNV, le griglie contenute all'interno dei file GK2 sono state mosaicate in otto macro grigliati, con un'estensione pari a tutto il territorio nazionale, e scritti secondo il formato grigliato binario del software SURFER v.6 (file con estensione .GRD). Tale struttura consente una più semplice lettura dei valori di correzione tra i diversi sistemi di riferimento, in maniera da poter ottimizzare i tempi di esecuzione del programma, ed è composta come indicato in Tabella 5.

I grigliati sono nominati con la convenzione “Gr1.GRD”, dove “Gr” identifica il tipo di correzione contenuto all’interno dei grigliati (correzione di latitudine “DF”, correzione di longitudine “DL” e correzione di altezza “DH”). Oltre a questi sette grigliati, è stato generato anche il grigliato relativo alle ondulations di geoidi “DN.GRD”. Le convenzioni e i segni da applicarsi per ciascuna trasformazioni sono riassunti nella Figura 7.

Valore nel file	Descrizione
"FOGLIO"	Campo predefinito
"K"	Campo predefinito
S.R.1 – S.R.2	Trasformazione tra i sistemi di riferimento S.R.1 e S.R.2
anno	Anno di calcolo della griglia di trasformazione
5.74478	Listato delle correzioni $\Delta\phi$
...	
2.62094	
...	Correzioni $\Delta\lambda$
2.62094	
S.R.3 – S.R.2	Trasformazione tra i sistemi di riferimento S.R.3 e S.R.2
anno	Anno di calcolo della griglia di trasformazione
2.44252	Correzioni $\Delta\phi$
...	
-1.12021	
...	Correzioni $\Delta\lambda$
-1.12021	
...	Coordinate geografiche del primo punto in basso a sinistra delle quattro griglie, nel sistema di riferimento S.R. 2
44.91666667	
7.202333333	

Tabella 4. Struttura generica dei file GK2

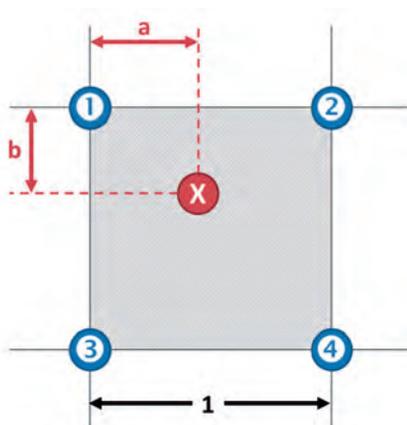


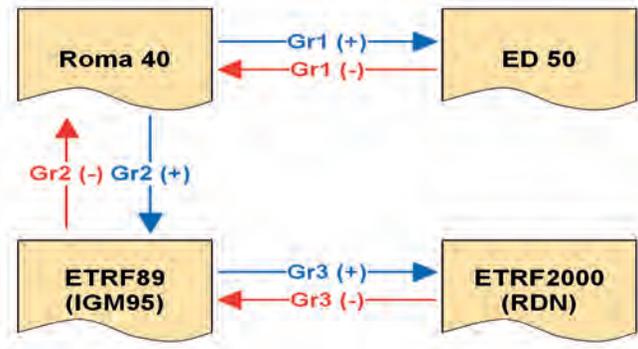
Figura 6. Interpolazione bilineare

Elemento	Posizione (byte)	Tipo di valore	Descrizione
id	1,2,3,4	char	Stringa ' DSBB ', che identifica i file del tipo "Surfer 6 binary grid"
nx	5	int	Numero di colonne della griglia
ny	7	int	Numero di righe della griglia
xlo	9	real	Valore minimo lungo X della griglia
xhi	17	real	Valore massimo lungo X della griglia
ylo	25	real	Valore minimo lungo Y della griglia
yhi	33	real	Valore massimo lungo Y della griglia
zlo	41	real	Valore minimo lungo Z della griglia
zhi	49	real	Valore massimo lungo Z della griglia
z1	57	real	Valori della griglia, inseriti dal basso verso l'alto e da sinistra a destra.
z2	61		
...	...		

Tabella 5. Struttura del grigliato SURFER v.6

Il programma GK2CNV è in grado di generare, partendo dai grigliati SURFER sopra descritti, anche grigliati in formato NTV2 (*National Transformation version 2*). L'NTV2 è un formato sviluppato dalla *Geodetic Survey Division* dell'ente canadese *Geomatics Canada*, per consentire le trasformazioni di coordinate fra alcuni sistemi di riferimento nordamericani (NAD27, NAD83). Negli ultimi anni il formato NTV2 si è diffuso a livello internazionale, fino a costituire oggi un diffuso standard per i modelli a maglia regolare utilizzati per il passaggio fra sistemi geodetici. Tale standard è ampiamente adottato in tutti i software GIS di uso comune (ESRI ArcGIS, QGIS, gvSIG, GRASS, ...), e consente quindi una maggiore fruibilità dei dati. In tempi recenti (ottobre 2011), anche IGM ha deciso di fornire i grigliati di trasformazione in questo formato.

Un file in formato NTV2 include in sostanza una serie di matrici regolari di punti che contengono le differenze puntuali fra le coordinate planimetriche di due sistemi di riferimento. Ciascun file, dopo l'intestazione che riporta le informazioni di carattere generale, contiene le descrizioni di una o più sotto griglie, ciascuna delle quali è seguita da un elenco di differenze di coordinate relative ai nodi di una maglia geografica con passo regolare. Le griglie NTV2 possono essere scritte sia in un formato binario che in un formato ASCII, ed hanno la struttura indicata in Tabella 6.



- Grigliati:
 DF1.GRD
 DL1.GRD
 DF2.GRD
 DL2.GRD
 DF3.GRD
 DL3.GRD
 DH3.GRD
 DN.GRD

Figura 7. Grigliati di trasformazione tra i diversi sistemi di riferimento

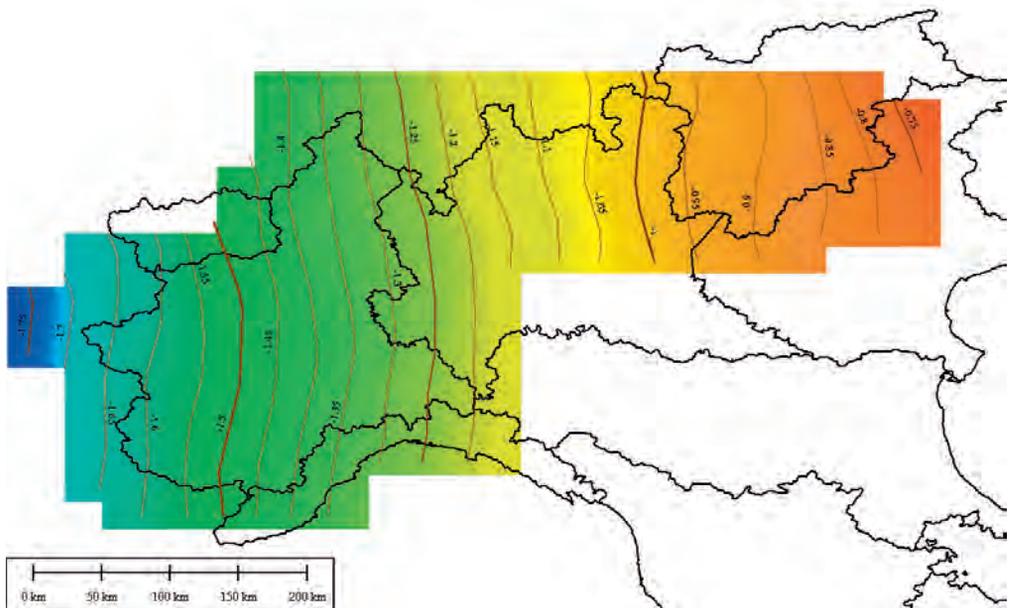


Figura 8. Correzioni di longitudine tra Roma40 e ETRF89 (in secondi sessagesimali) per l'area di interesse del progetto HELI-DEM

Elemento	Posizione (byte)	Tipo di valore	Descrizione
NUM_OREC	1	int	Numero di record (byte) nell'intestazione generale
NUM_SREC	2	int	Numero di record (byte) nell'intestazione delle sotto griglie
NUM_FILE	3	int	Numero delle sotto griglie
GS_TYPE	4	char	Unità di misura delle traslazioni (obbligatorio: "SECONDS")
VERSION	5	char	Versione della griglia
SYSTEM_F	6	char	Nome del sistema di riferimento di origine
SYSTEM_T	7	char	Nome del sistema di riferimento di destinazione
MAJOR_F	8	real	Semiasse maggiore dell'ellissoide del sistema di riferimento di origine
MINOR_F	9	real	Semiasse minore dell'ellissoide del sistema di riferimento di origine
MAJOR_T	10	real	Semiasse maggiore dell'ellissoide del sistema di riferimento di destinazione
MINOR_T	11	real	Semiasse minore dell'ellissoide del sistema di riferimento di destinazione
SUB_NAME	12	char	Nome della sotto griglia
PARENT	13	char	Sotto griglia superiore
			(se esiste, altrimenti "NONE")
CREATED	14	char	Data della creazione della griglia
UPDATED	15	char	Data della modifica della griglia
S_LAT	16	real	Valore minimo della latitudine (sud)
N_LAT	17	real	Valore massimo della latitudine (nord)
E_LONG	18	real	Valore massimo della longitudine (est)
W_LONG	19	real	Valore minimo della longitudine (ovest)
LAT_INC	20	real	Passo della griglia in latitudine
LONG_INC	21	real	Passo della griglia in longitudine
GS_COUNT	22	int	Numero totale di noti della griglia
φ1	22.5	real	Valore di traslazione per la latitudine del primo nodo della griglia

λ_1	23	real	Valore di traslazione per la longitudine del primo nodo della griglia
$\sigma\varphi_1$	23.5	real	Precisione della traslazione per la latitudine del primo nodo della griglia
$\sigma\lambda_1$	24	real	Precisione della traslazione per la longitudine del primo nodo della griglia
$\varphi\&$	...	real	Valore di traslazione per la latitudine del nodo della griglia
$\lambda\&$	...	real	Valore di traslazione per la longitudine del nodo della griglia
$\sigma\varphi\&$	...	real	Precisione della traslazione per la latitudine del nodo della griglia
$\sigma\lambda\&$	...	real	Precisione della traslazione per la longitudine del nodo della griglia

Tabella 6. Struttura del file NTv2

Nel caso del formato NTv2, occorre considerare due aspetti fondamentali:

- le longitudini vanno inserite con la convenzione americana, ovvero da est verso ovest: occorre quindi cambiare il segno delle longitudini (e delle correzioni delle longitudini);
- per la stessa ragione, i valori della griglia all'interno del formato NTv2 devono essere introdotti dal basso verso l'alto, da destra verso sinistra.

3 CONCLUSIONI

Le trasformazioni implementate nel programma sopra descritto sono state applicate a tutti i dati acquisiti nel progetto HELI-DEM. Si è in più punti ribadito che il prodotto finale della trasformazione di sistema di riferimento per una griglia è un listato di punti sparsi, scritti in termini di coppia di coordinate planimetriche (Est e Nord oppure longitudine e latitudine) e quota. In linea di massima, si può infatti confermare il seguente aspetto.

Per le trasformazioni e l'area di interesse del progetto HELI-DEM, a valle della trasformazione di sistema di riferimento, i dati inizialmente disposti sui nodi di una griglia regolare rimangono disposti su un seminato quasi regolare: tale seminato mantiene quasi la struttura di una griglia, le cui direzioni principali non sono però esattamente orientate secondo gli assi cartografici (Est, Nord) o geografici (λ , φ) convenzionali. Inoltre l'origine e il taglio delle griglie trasformate non rispettano i tagli standard delle diverse cartografie ufficiali. Ad esempio, il DTM lombardo con risoluzione di 25 m, originariamente in Roma 40, Gauss-Boaga viene trasformato a ETRF2000, UTM. Se ne ottiene un seminato i cui assi, almeno per estensioni alla scala della regione, sono ancora sostanzialmente orientati cartograficamente; inoltre i punti del seminato, con approssimazione del decimetro, distano reciprocamente ancora 20 m; però le loro coordinate (Est, Nord, UTM) risultano numeri reali molto diversi dai multipli interi di 20 m che viceversa costituiscono la griglia su cui è naturale memorizzare il DTM trasformato. Si consideri ora di voler trasformare un DTM LiDAR da ITRF2008,

coordinate geografiche, con risoluzione di 10^{-5} gradi sessadecimali (circa 1 m), a ETRF2000. In questo caso si applica una traslazione planimetrica di circa 60 cm (in Italia sostanzialmente con componenti uguali in Nord e Est). In unità angolari i nodi risultano spostati di circa $0.6 \times 10^{-5}''$, ovvero si trovano a diversi decimetri dai sottomultipli di grado (nuovamente 10^{-5}) su cui è ragionevole memorizzarli.

Dunque, può essere necessario interpolare nuovamente i punti trasformati su nodi posti a distanza significativa rispetto alla risoluzione spaziale del DTM. Per tale motivo, si devono studiare metodi di interpolazione ottimali per il calcolo della griglia trasformata: tali studi sono stati condotti esternamente e indipendentemente dal programma di trasformazione di sistema di riferimento e saranno descritti nel Capitolo 9.

BIBLIOGRAFIA

Adam J., et al, *The European Reference System coming of age*, Geodesy Beyond 2000, IAG General Assembly, Birmingham July 1999, K. P Schwarz eds., IAG Symposia , Vol. 121, Springer-Verlag, Berlin, 1999.

Altamimi, Z. and C. Boucher, *The ITRS and ETRS89 Relationship: New Results from ITRF2000*, Report on the Symposium of the IAG Subcommission for Europe (EUREF), Dubrovnik, 2001.

Altamimi Z., Collilieux X., Métivier L., ITRF2008, *An improved solution of the international terrestrial reference frame*, Journal of Geodesy, Vol. 85 Issue 8, 2011.

Baroni L., Cauli F., Donatelli D., Farolfi G., Maseroli R. 2008. *La rete Dinamica Nazionale (RDN) ed il nuovo sistema di riferimento ETRF2000*, Servizio Geodetico - Istituto geografico Militare - Firenze, on line sul sito IGM, sotto il link al Servizio Geodetico.

Biagi L., Caldera S., Mazzoni A. *La transizione Italiana da un sistema di riferimento statico a uno dinamico: analisi effettuate da G3 su IGM95 e RDN*. Bollettino SIFET 1/2009, 2009a.

Biagi L., Caldera S., Visconti M. G., *A first estimate of the transformation from the global IGS and the Italian ETRF89-IGM95 RF for the Italian Peninsula*. Geodetic Reference Frames, IAG Symposium Munich, Germany, IAG Symposia Volumes 134, 2009b.

Donatelli D., Maseroli R., Pierozzi M., *La trasformazione tra sistemi di riferimento utilizzati in Italia*, Bollettino di Geodesia e Scienze Affini, Anno LXI, N° 4, 2002.

Kenyeres A., Brunyninx C., *Coordinate time series monitoring for reference frame maintenance*, GPS Solutions 8:200-209, 2004.

Surace L., *Il progetto IGM95*, Bollettino di Geodesia e Scienze affini, Anno LII, N° 3, 1993.

Surace L., *La nuova rete geodetica nazionale IGM95: risultati e prospettive di utilizzazione*, Bollettino di Geodesia e Scienze affini, Anno LVI, N° 2, 1997.

CAPITOLO 5

IMPLEMENTAZIONE DELLA RETE GNSS DI RIFERIMENTO

Ludovico Biagi (1), Paolo Dabove (2), Mattia De Agostino (3) Ambrogio Maria Manzino (2),
Cinzia Taglioretti (2), Maria Grazia Visconti (1)

(1) Politecnico di Milano, DICA, Laboratorio di Geomatica presso Polo Territoriale di Como, Via Valleggio 11, 22100 Como

(2) Politecnico di Torino, DIATI, Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture, Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino

(3) all'epoca del lavoro, Politecnico di Torino; ora CSI Piemonte, Corso Tazzoli 215/12, 10137 Torino

SOMMARIO

E' stata istituita una rete di stazioni permanenti GNSS a copertura delle aree alpine del Piemonte, della Lombardia e di parte della Svizzera. Tale rete costituisce un prototipo di un servizio di posizionamento transnazionale ottenuto mediante l'unificazione di reti regionali già installate: inoltre, nell'ambito del presente progetto, ha lo scopo di materializzare il sistema di riferimento per i rilievi in tempo reale e post-processati finalizzati all'unione dei DTM e del modello di altezze. Il presente capitolo descrive il prototipo di rete e le modalità con cui è stata inquadrata nel sistema di riferimento ETRF2000. Vengono inoltre descritti i primi test di posizionamento cinematico, sia in tempo reale sia post-elaborato, appoggiato alla rete.

ABSTRACT

A GNSS permanent network has been established covering the alpine areas of Piedmont, Lombardy and part of Switzerland. The network is a prototype of a transnational positioning service obtained by the unification of already existing regional networks: moreover, the network aims at materializing the reference frame for the real time and post-processed survey, finalized to the merging of the DTMs and to the estimation of the model of heights. This chapter describes the prototype network and its adjustment in ETRF2000. It also describes the first test of kinematic positioning, both real-time and post-processed.

1 LA CREAZIONE DI UNA RETE GNSS TRANSFRONTALIERA

Al fine di sperimentare un servizio di posizionamento GNSS in tempo reale transalpino e di poter validare il modello di geoide e i DTM, sia di input sia prodotti nel progetto, si è deciso di istituire una rete di stazioni permanenti GNSS transfrontaliera. Si è reso indispensabile perciò analizzare lo stato delle stazioni permanenti presenti nella zona oggetto di studio (Tab. 1). E' stato analizzato lo stato di servizio delle stazioni esistenti all'avvio del Progetto (Biagi

et Sansò, 2006, Cina et al., 2004, De Agostino et Manzano, 2011) in grado di fornire dati per il tempo reale e si sono selezionate quasi tutte le stazioni permanenti ricadenti all'interno dell'area del progetto (Biagi et al. 2011) includendone anche alcune presenti in zone limitrofe (per motivi di configurazione geometrica). In seguito sono stati presi accordi con gli Enti gestori (Tab. 1) in modo tale da poter ottenere i flussi di dati in tempo reale. Una volta individuate le stazioni, prima di effettuare i test in tempo reale, le tre reti sono state inquadrare e compensate con il software BERNESE versione 5.0 (BSW5.0) nel sistema di riferimento IGS08 (2011.2), come verrà descritto nella Sezione 3.

Per quanto riguarda invece il calcolo di rete in tempo reale presso il Politecnico di Torino è stato predisposto un server che ospita il servizio sperimentale di posizionamento GNSS. Su tale macchina è stato installato il software di rete GNSS Spider v.4.2: tale software (Fig. 2 e 3) effettua un'elaborazione contemporanea di tutte le stazioni della rete per poter fornire una migliore stima dei parametri globali e per aumentare l'affidabilità dei risultati (Dabove et al. 2011).

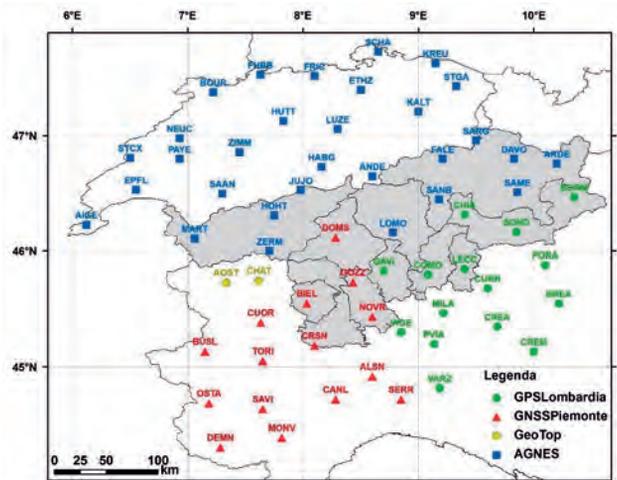


Figura 1. Stazioni permanenti GNSS nella zona oggetto di studio: stato attuale

Tutti i membri del progetto possono utilizzare i prodotti di rete per il posizionamento in tempo reale (Tab. 2) nonché scaricare i file RINEX per la post-elaborazione. La rete di stazioni permanenti così creata presenta una forte variabilità delle quote ortometriche: come visibile dalla Tabella 6, la distribuzione delle quote è disomogenea in quanto si passa da stazioni la cui quota è di circa 300 m s.l.m. (Novara) a stazioni la cui quota è di oltre 4000 m (Jungfrau Joch). Una variabilità di questo tipo può avere ripercussioni significative sulla modellazione degli errori atmosferici (soprattutto sui ritardi troposferici del segnale) da parte della rete (e del software che la gestisce), anche se va sottolineato che la stazione a quota maggiore non viene utilizzata per i prodotti di posizionamento per il tempo reale (viene utilizzata solo per la correzione Nearest), ma solo per la post-elaborazione (Dabove et al. 2012, Kisligh 2011). Nonostante questa variabilità, il software di rete riesce ad arrivare al fissaggio comune delle ambiguità di tutte le stazioni in meno di 3 minuti.

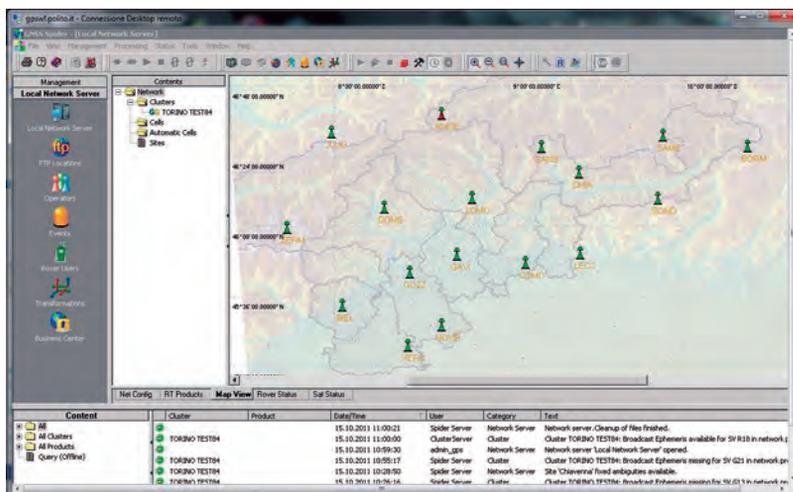


Figura 2. La schermata principale del software di rete GNSS Spider

Stazione		Rete di appartenenza	Ente gestore
Bormio	BORM	GPS Lombardia	GPS Lombardia
Chiavenna	CHIA	GPS Lombardia	GPS Lombardia
Como	COMO	GPS Lombardia	GPS Lombardia
Gavirate	GAVI	GPS Lombardia	GPS Lombardia
Lecco	LECC	GPS Lombardia	GPS Lombardia
Sondrio	SOND	GPS Lombardia	GPS Lombardia
Vercelli	VERC	-	Politecnico di Torino
Biella	BIEL	GNSS Piemonte	Regione Piemonte
Domodossola	DOMS	GNSS Piemonte	Regione Piemonte
Gozzano	GOZZ	GNSS Piemonte	Regione Piemonte
Novara	NOVA	GNSS Piemonte	Regione Piemonte
Andermatt	ANDE	AGNES	SWISS-Topo
Jungfrau	JUJO	AGNES	SWISS-Topo
Locarno Monte	LOMO	AGNES	SWISS-Topo
Samedan	SAME	AGNES	SWISS-Topo
San Bernardino	SANB	AGNES	SWISS-Topo
Zermatt	ZERM	AGNES	SWISS-Topo

Tabella 1. Stazioni permanenti considerate coi relativi Enti gestori

Per questo motivo, una volta attivato il servizio di posizionamento, sono state previste:

1. campagne di misura per la validazione dei DTM esistenti e da realizzare,
2. campagne (italiane e svizzere) per verificare la qualità del posizionamento RTK a quote diverse,
3. campagne di misura a supporto delle livellazioni.

Nome Prodotto	Mountpoint
FKP (RTCM 2)	FKP_R2
Inverse MAC (RTCM 3)	I-MAX_R3
Master Auxiliary (RTCM 3)	MAC_R3
VRS (RTCM 2)	VRS_R2
VRS (RTCM 3)	VRS_R3
Nearest (RTCM 2)	NRT_R2
Nearest (RTCM 3)	NRT_R3

Tabella 2. Prodotti NTRIP disponibili

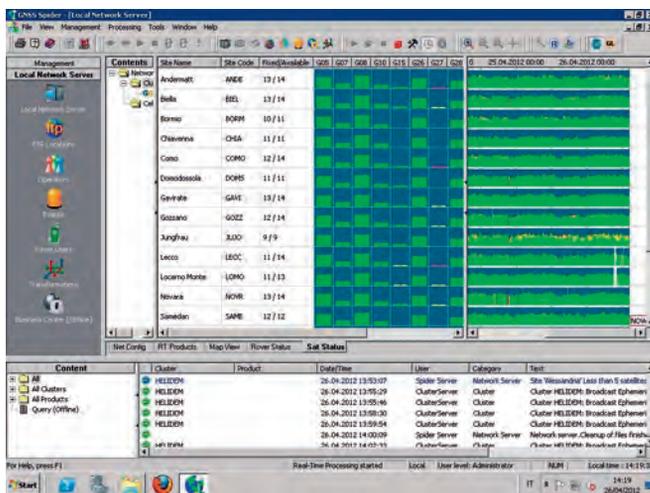


Figura 3. Stato della rete HELI-DEM

2 LA COMPENSAZIONE DELLA RETE

La compensazione è stata condotta contemporaneamente dal Politecnico di Torino e dal Politecnico di Milano, confrontando alla fine i risultati ottenuti in modo indipendente.

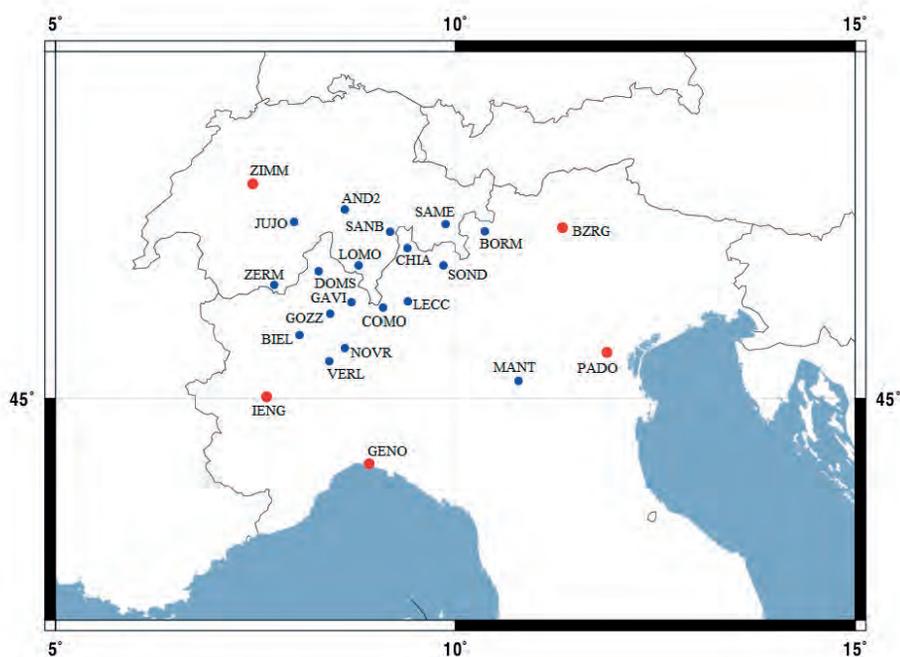


Figura 4. Rete HELI-DEM: in rosso le stazioni IGS di vincolo, in blu le stazioni HELI-DEM

L'elaborazione della rete è stata effettuata con il programma Bernese GPS Software 5.0 in accordo alle linee guida *EPN Processing Instruction for Local Analysis Centres* e alla documentazione del programma stesso (Dach et al., 2007). Sono state elaborate 14 sessioni da 24 h corrispondenti alle giornate GPS dalla 269 alla 282 (dal 26 settembre al 9 ottobre 2011). Le stazioni permanenti della rete HELI-DEM sono state inquadrare rispetto a cinque stazioni permanenti appartenenti alla rete IGS: BZRG, GENO, IENG, PADO, ZIMM. Il sistema di riferimento è stato allineato a ITRF08 (Altamini et al., 2011), epoca 2011.8 (momento centrale del periodo elaborato):

1. per ogni stazione IGS inclusa nella rete si sono ottenute le coordinate a priori interpolando al momento centrale delle settimane elaborate le 52 soluzioni settimanali SINEX IGS precedenti la settimana presa in considerazione,
2. la rete è quindi stata inquadrata imponendo una condizione di non traslazione rispetto al baricentro delle coordinate a priori delle stazioni IGS,
3. si sono adottati, senza ulteriore stima, i prodotti finali IGS: EOP, EPH e PCV.

Le elaborazioni sono state eseguite utilizzando la procedura automatica BPE (Bernese Processing Engine) del programma Bernese. Entrambe le unità che hanno eseguito il calcolo in modo indipendente hanno sviluppato una propria procedura per la gestione in automatico del calcolo di rete: nel caso del Politecnico di Torino la compensazione è stata gestita con il programma NetDownload mentre per il Politecnico di Milano è stato utilizzato il programma RegNet (Biagi et Caldera, 2011).

L'elaborazione dei dati grezzi è stata effettuata per sessioni quotidiane, utilizzando il seguente schema:

4. acquisizione di EOP, EPH, PCV finali da IGS,
5. interpolazione delle orbite,
6. elaborazione di codice in singola stazione per la stima degli orologi,
7. definizione del grafo di rete utilizzando il criterio della minima lunghezza delle basi,
8. identificazione e stima dei cycle slip,
9. prima stima delle basi mediante una soluzione a doppie differenze float e ionospheric free,
10. fissaggio delle ambiguità mediante il metodo QIF,
11. stima finale multibase della rete, mediante una soluzione alle doppie differenze fixed ionospheric free, con stima di:
 - a. coordinate delle stazioni,
 - b. disturbo troposferico zenitale orario e gradiente orizzontale di sessione per ogni stazione.

La stima finale viene ottenuta imponendo la condizione di non traslazione sul baricentro delle stazioni IGS. Tutti gli indicatori di qualità che il BSW5.0 fornisce ai vari passi dell'elaborazione denotano una buona qualità generale dei dati. In particolare per validare la bontà delle compensazioni sono stati valutati principalmente i seguenti indicatori:

1. statistiche relative alla formazione delle basi,
2. RMS relativo alla stima dei cycle slip,
3. numero e percentuale di fissaggio della ambiguità.

La lunghezza media delle basi formate dal grafo di rete delle singole differenze è di circa 50 km; la base di lunghezza massima è pari a 128 km e corrisponde alla base tra le stazioni BZRG e PADO mentre la base di lunghezza minima è pari a 20 km e corrisponde alla base tra le stazioni NOVR e VERL. Il RMS relativo alla stima dei cycle slip presenta valore medio di circa 1 cm per tutte le sessioni (Tab. 3); il numero di ambiguità iniziali e le loro percentuali di fissaggio (grafici in Fig. 5 e 6) rispecchiano i tipici valori per basi fra stazioni permanenti alla scala regionale con sessioni di 24 ore; in particolare la percentuale di fissaggio è in media circa il 90% per tutte le giornate, con i valori minimi che si attestano intorno al 70%.

Le coordinate finali ottenute dai due centri di ricerca sono state confrontate in termini di scostamenti medi relativi alle 14 sessioni elaborate. La Tabella 4 mostra i parametri statistici relativi ai confronti tra le due compensazioni: lo scostamento massimo si verifica in corrispondenza della componente X per la già citata stazione JOJO, posta a 3500 m di quota. Per le altre stazioni gli scostamenti sono inferiori al centimetro.

Le coordinate ottenute dalla compensazione sono state infine convertite nello stesso sistema di riferimento dei DTM e del modello del geoide prodotti dal progetto, ossia l'ETRF2000 (European Terrestrial Reference Frame 2000, Adam et al., 1999), tramite una rototraslazione a 7 parametri (Helmert) utilizzando i parametri forniti da EUREF (http://www.epncb.oma.be/_productsservices/coord_trans/).

Giorno GPS	RMS medio [cm]	RMS max [cm]	RMS min [cm]
269	1.02	1.20	0.80
270	1.03	1.20	0.80
271	1.00	1.20	0.80
272	1.00	1.20	0.80
273	1.01	1.20	0.80
274	1.01	1.20	0.80
275	1.01	1.20	0.80
276	1.03	1.20	0.80
277	1.01	1.20	0.80
278	1.02	1.20	0.80
279	1.03	1.20	0.80
280	1.06	1.30	0.90
281	1.01	1.20	0.80
282	1.00	1.20	0.80

Tabella 3. RMS relativi alla stima dei cycle slip, valore medio, massimo e minimo relativi a ogni giornata compensata

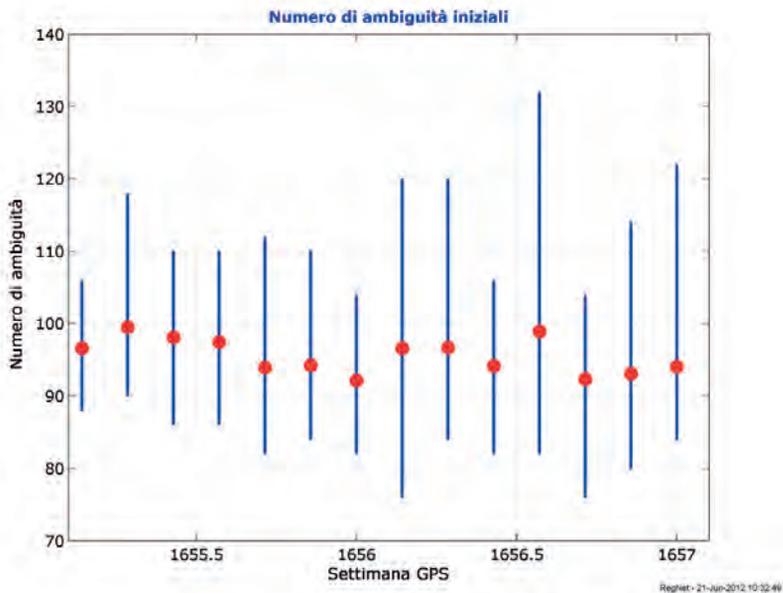


Figura 5. Numero di ambiguità iniziale. In rosso il valore medio giornaliero; in blu l'intervallo di variabilità

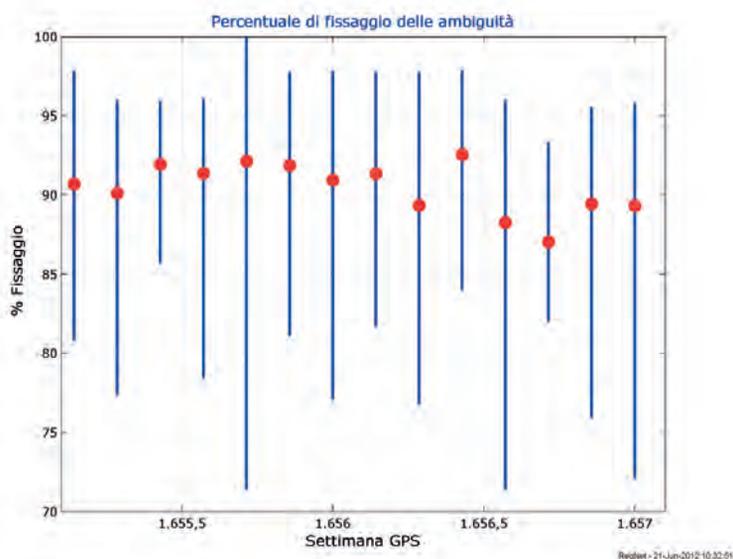


Figura 6. Percentuale di fissaggio. In rosso il valore medio giornaliero; in blu l'intervallo di variabilità

	dX (mm)	dY (mm)	dZ (mm)
MEDIA	-0.2	0.8	0.5
SQM	6.2	1.9	3.6
MAX	21.1	5.9	8.9
MIN	-9.1	-2.5	-6.1

Tabella 4. Parametri statistici relativi ai confronti tra le coordinate finali nel sistema di riferimenti ITRF08 ottenute dalle due compensazioni

3 CAMPAGNE (ITALIANE E SVIZZERE) PER VERIFICARE LA QUALITÀ DEL POSIZIONAMENTO RTK A QUOTE DIVERSE

Per verificare la qualità del posizionamento NRTK in appoggio alla rete HELI-DEM, sia il Politecnico di Torino che il Politecnico di Milano hanno condotto misure GNSS rispettivamente in Regione Piemonte e Regione Lombardia, andando a scegliere due porzioni significative in termini di variabilità morfologica del territorio. A titolo di esempio, si riportano nel seguito i risultati ottenuti dal Politecnico di Torino nella campagna di misura della Valsesia.

	ϕ			λ			h
	°	'	"	°	'	"	m
BZRG	46	29	56.475686	11	20	12.454304	329.1396
GENO	44	25	9.784978	8	55	16.102027	155.5280
IENG	45	0	54.466195	7	38	21.844743	316.6228
PADO	45	24	40.142976	11	53	45.809380	64.7027
ZIMM	46	52	37.540791	7	27	54.983337	956.3254
AND2	46	39	12.215481	8	36	51.070781	2384.2965
BIEL	45	33	38.678337	8	2	52.983884	480.4774
BORM	46	28	5.444324	10	21	50.297395	1263.3729
CHIA	46	19	11.442312	9	24	4.577142	391.5895
COMO	45	48	7.777478	9	5	44.227133	292.2867
DOMS	46	7	8.552198	8	17	10.772477	365.6224
GAVI	45	50	57.506650	8	42	9.454376	343.7081
GOZZ	45	44	48.270695	8	26	0.231117	416.6067
JUJO	46	32	50.945178	7	59	5.645212	3634.6351
LECC	45	51	26.329409	9	24	24.885076	311.0852
LOMO	46	10	21.225715	8	47	14.731748	438.0045
NOVR	45	26	49.944667	8	36	50.269492	218.6204
SAME	46	31	45.296785	9	52	41.603104	1759.2467
SANB	46	27	49.782750	9	11	4.363350	1702.2233
SOND	46	10	12.111015	9	51	0.897618	529.1815
TIRA	46	12	59.324114	10	10	20.487420	503.1744
VERL	45	19	52.479544	8	25	14.676235	183.9301
ZERM	46	0	5.191463	7	43	55.176891	1931.1882

Tabella 5. Coordinate geografiche nel sistema di riferimento ETRF2000

3.1.1 Rilievo in Valsesia

Per quanto riguarda la Regione Piemonte, è stata scelta la Valsesia come zona di studio, in quanto presenta forte variabilità morfologica con la possibilità di effettuare il posizionamento GNSS anche a quote elevate, grazie alla presenza di impianti sciistici di risalita. Lo scopo di tale campagna di misura è stato quello di verificare il corretto funzionamento della rete di stazioni permanenti GNSS per quanto riguarda il posizionamento in tempo reale.

Si è quindi deciso di effettuare quattro rilievi della medesima durata a quote via via crescenti, con l'obiettivo di analizzare, in termini di accuratezza, i risultati di posizionamento ottenuti da ciascuno di essi.

Le località di misura scelte sono state: Varallo Sesia, Alagna Valsesia, Pianalunga e Punta Indren, come mostrato in Figura 7.

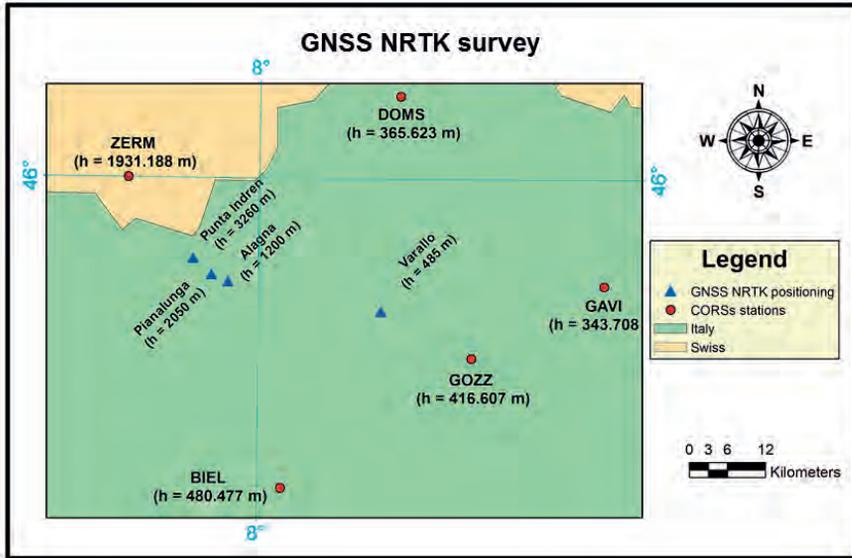


Figura 7. Identificazione dei luoghi del rilievo

Località	Prodotto di rete richiesto	Quota [m]
Varallo	i-MAX	485
Alagna Valsesia	VRS	1200
Pianalunga	i-MAX	2050
Punta Indren	i-MAX	3260

Tabella 6. Prodotti di rete richiesti per le località di stazioneamento

Queste località sono state scelte anche con l'intenzione di verificare il funzionamento della rete di stazioni permanenti in prossimità del proprio limite di copertura: le strutture di risalita presenti in zona hanno permesso di recarsi fino a Punta Indren, località posta a poco più di un chilometro di distanza dal limite di copertura della rete.

I prodotti di rete richiesti nelle località di stazioneamento sono riportati in Tabella 6.

I risultati di posizionamento riportati nei paragrafi seguenti permettono innanzitutto di affermare che un momentaneo malfunzionamento della rete ha fatto sì che per i siti di Pianalunga e Punta Indren le correzioni differenziali trasmesse fossero quelle della stazione permanente più vicina (correzione Nearest – NRT, nel caso in esame corrispondente con Zermatt) e

non quelle richieste. Questa ipotesi è supportata dal fatto che le due località prima citate (Pianalunga e Punta Indren), site a quota maggiore rispetto a Varallo ed ad Alagna Valsesia, permettono di ottenere precisioni di posizionamento migliori rispetto a quelle a quota minore, cosa piuttosto anomala. Inoltre la stazione permanente di Zermatt è sita a quota molto elevata (circa 1600 m), il che fa pensare ad una diretta influenza sui risultati di posizionamento planimetrico e soprattutto altimetrico di Punta Indren e di Pianalunga (precisioni quasi sempre migliori dei 2 cm). Il *LOG file* della rete conferma ciò che è avvenuto: ovvero se il dislivello tra il rover e le stazioni master limitrofe ad esso è elevato, il software di rete passa dalla modalità di correzione richiesta alla modalità di correzione Nearest.

3.1.1.1 Il trattamento dei dati acquisiti

Le coordinate di riferimento dei punti indicati col triangolo blu in Figura 7, denominate per semplicità *coordinate verità*, si sono ottenute utilizzando il software commerciale Leica Geo Office v.8.0 ed effettuando un posizionamento statico multibase, ovvero considerando come stazioni master Zermatt, Biella e Domodossola. In seguito è stato possibile valutare la differenza tra le coordinate *verità* e quelle ottenute dai rilievi NRTK effettuati.

Considerando per ogni rilievo lo stesso numero di epoche ad ambiguità di fase fissata, si sono realizzati i grafici di dispersione planimetrica ΔE - ΔN e di dispersione altimetrica Δh riportati nei paragrafi seguenti.

Nei grafici di dispersione planimetrica il triangolo rosso indica la posizione ottenuta tramite la post-elaborazione dei dati, punto (0,0); la croce indica la *media planimetrica* e l'ellisse nero rappresenta *l'ellisse d'errore*. Sempre nello stesso grafico sono riportati alcuni valori di soglia ritenuti idonei per il posizionamento NRTK: all'interno del cerchio verde sono comprese le epoche con dispersione planimetrica minore di 2 cm, all'interno del cerchio giallo le epoche con dispersione inferiore a 5 cm ed in rosso quelle minori di 10 cm.

La stessa legenda cromatica viene riportata anche nei grafici di dispersione altimetrica, nei quali la linea nera tratteggiata rappresenta il valore medio dei dati a disposizione e le soglie di accettazione dei valori non sono più rappresentate da cerchi, ma trattandosi di un caso monodimensionale, da linee.

Tutti i risultati che eccedono dalla soglia planimetrica di 10 cm sono facilmente riconoscibili come falsi fissaggi e non sono accettabili poiché al di fuori delle tolleranze stabilite.

3.1.1.2 I risultati dell'esperimento

Varallo. Il sito di misura collocato a quota minore è stato scelto all'interno del comune di Varallo, ad una quota ortometrica di circa 485 m. Il rilievo è stato condotto su un piazzale asfaltato al di fuori dal centro abitato, in modo da non venir disturbati né dalla presenza di ostruzioni né da superfici riflettenti. Nella Figura 8 si riportano i grafici della dispersione planimetrica ed altimetrica delle posizioni ad ambiguità fissata relativi a tale sito.

Osservando i grafici si può notare in altimetria una traslazione dei risultati rispetto alla posizione ottenuta in *post-processing* (identificabile in entrambi i grafici con lo *zero*), sia plani-

metricamente che altimetricamente. Va tuttavia detto che la media planimetrica si mantiene all'interno della soglia definita dal colore verde. Per quanto riguarda la componente altimetrica, si può notare la presenza di uno sistematismo medio di circa -8 cm oltre alla presenza di numerosi punti esterni alla soglia rossa che non è dovuto ad errori grossolani inerenti la posizione dell'antenna del ricevitore rover.

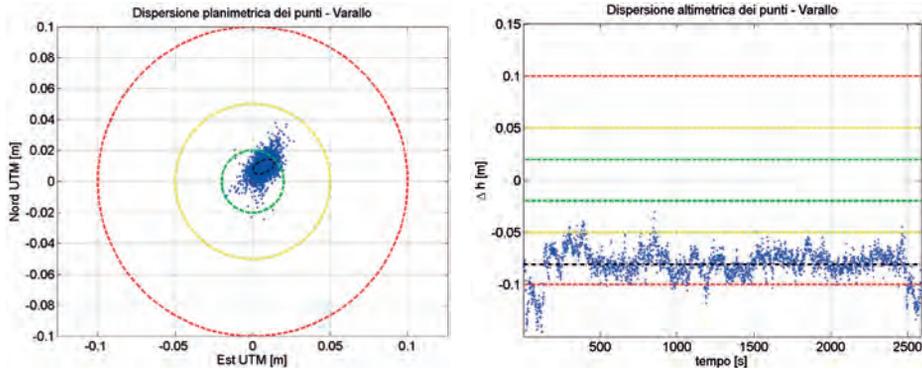


Figura 8. Dispersione planimetrica e altimetrica dei punti, Varallo

Alagna Valsesia. Anche per il secondo sito di misura, valutato nel comune di Alagna Valsesia, si è scelto un luogo piuttosto isolato al di fuori del centro abitato (un parcheggio ai piedi degli impianti di risalita, ad una quota di circa 1200 m) in modo da non incorrere in problemi di multipath e ostruzioni dovute ad ostacoli permanenti. Il prodotto di rete richiesto in questo caso è la Virtual Reference Station (VRS – RTCM 3.0).

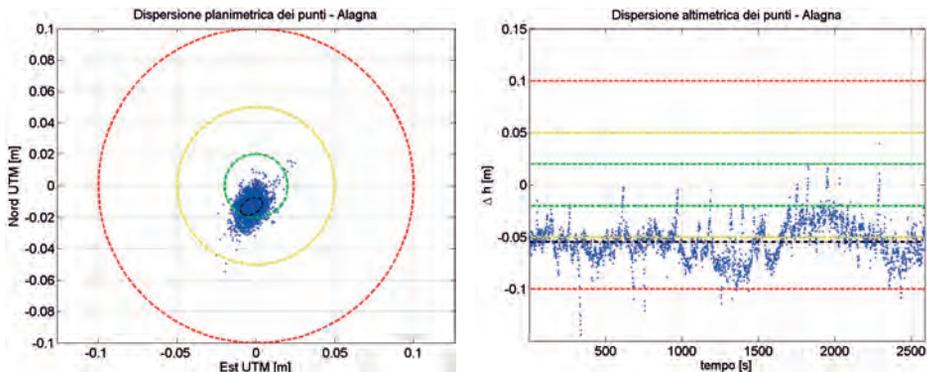


Figura 9. Dispersione planimetrica e altimetrica dei punti, Alagna Valsesia

Anche in questo caso è possibile osservare una traslazione sia nella dispersione planimetrica che in quella altimetrica dei punti (visibile in Figura 9), anche se di entità minore rispetto al caso precedente. La media planimetrica si colloca nuovamente all'interno della

soglia verde, mentre quella altimetrica si attesta intorno al valore -5 cm. Si assiste quindi ad un lieve miglioramento nel risultato di posizionamento.

Pianalunga. Il terzo sito di misura, come mostra la Figura 10, è stato scelto nei pressi dell'arrivo degli impianti di risalita che da Alagna Valsesia salgono a Pianalunga, in modo da poter trasportare agevolmente l'attrezzatura necessaria al rilievo. Anche in questo caso lo strumento è stato posto a debita distanza dagli impianti di risalita, da superfici riflettenti e da fonti elettromagnetiche, in un luogo indisturbato, con ottima visibilità satellitare; il treppiedi poggia su una superficie piana e priva di neve.

La Figura 11 mostra chiaramente la presenza di un falso fissaggio identificabile nella nuvola di punti che, sia nel grafico planimetrico che in quello altimetrico, si discosta dal valore medio. Non considerando questo falso fissaggio si assiste ad un deciso miglioramento del valore medio degli scarti rispetto ai casi trattati in precedenza, in particolare nella componente altimetrica dove la nuvola di punti ha media prossima a zero, eccezion fatta solo per qualche picco in corrispondenza della soglia gialla (-5 cm).



Figura 10. Collocazione del ricevitore, Pianalunga

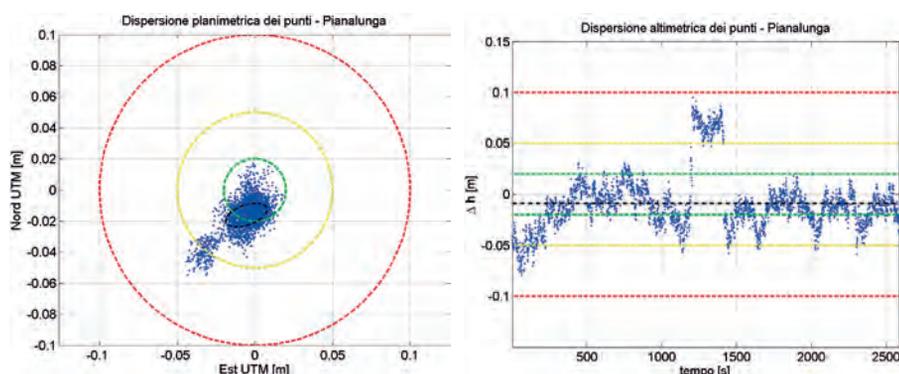


Figura 11. Dispersione planimetrica e altimetrica dei punti, Pianalunga

Pur avendo richiesto come prodotto di rete l'i-MAX, ci si è resi conto analizzando il *LOG file* ricavato dal software di rete GNSS Spider v.4.2 che la correzione differenziale realmente

fornita al rover è stata quella proveniente dalla stazione più vicina NRT (Zermatt, a circa 20 km di distanza), forse a causa dell'elevata quota del sito di misura.

Prima di passare alla descrizione dell'ultimo sito in cui si è effettuato il rilievo, è doveroso riportare che ad una quota intermedia tra Pianalunga e Punta Indren, cioè in corrispondenza del Passo dei Salati (circa 2980 m), non è stato possibile effettuare alcun rilievo NRTK data la mancanza di copertura da parte della rete GPRS (che comporta l'impossibilità di ricezione delle correzioni differenziali), nonostante la possibilità di utilizzare SIM dati di differenti gestori telefonici.

Punta Indren (stazione di arrivo della funivia di Punta Indren). La scelta di questo luogo è stata dettata dalla volontà di verificare il funzionamento della rete HELI-DEM anche a quote elevate. La presenza degli impianti di risalita ha infatti permesso di trasportare agevolmente la strumentazione fino alla quota di 3260 m.

Lo strumento è stato collocato nei pressi dell'arrivo degli impianti di risalita, su una superficie piana e priva di neve (nonostante quello che può sembrare dalla Figura 12), per evitare che lo scioglimento della stessa potesse provocare cedimenti del treppiede con conseguente variazione dell'altezza del punto rilevato.



Figura 12. Collocazione dello strumento, Punta Indren

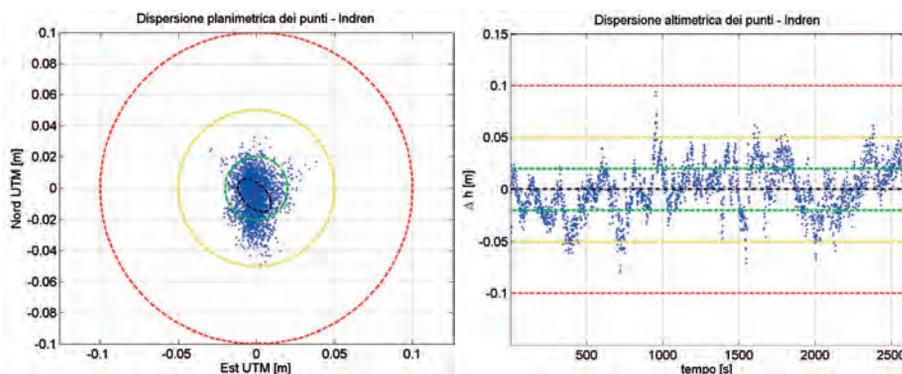


Figura 13. Dispersione planimetrica e altimetrica dei punti, Punta Indren

Nelle seguenti figure vengono mostrati i grafici ottenuti dal trattamento dei dati relativi al rilievo effettuato a Punta Indren, richiedendo come prodotto di rete la correzione i-MAX. I risultati di posizionamento ottenuti nel presente rilievo sono in assoluto i migliori: sia la media planimetrica che quella altimetrica (Fig. 13) si attestano nell'intorno dello zero. Come nel caso precedente si constata che le correzioni differenziali utilizzate per il posizionamento in tempo reale sono state fornite dalla stazione permanente più vicina (Zermatt anche in questo caso, distante circa 20 km dal punto in esame) come riscontrabile nel *LOG File* del software GNSS Spider e non invece da una vera e propria interpolazione dei fenomeni di disturbo spazialmente correlati del segnale.

CONCLUSIONI

I risultati degli esperimenti fin qui condotti permettono di affermare il buon funzionamento, anche a quote elevate, della rete HELI-DEM. Va però sottolineato che, proprio quando il rover si è trovato ad altezze geoidiche nettamente superiori a quella media della rete (Pianalunga e Punta Indren), si è assistito ad un momentaneo mal funzionamento della rete, che ha portato alla trasmissione delle correzioni differenziali della stazione permanente Nearest e non di quelle relative al prodotto di rete richiesto. Questo ha fatto sì che, contrariamente a quanto atteso, si ottenessero risultati di posizionamento di minor qualità nei punti di misura a bassa quota (Varallo ed Alagna, valori medi: 2 cm planimetrici e 8 cm altimetrici) e decisamente migliori a quota elevata (Pianalunga e Punta Indren, valori medi: 2 cm planimetrici ed altimetrici). Sempre a bassa quota si è notata la presenza di un bias nei risultati di posizionamento, di cui si è verificato la causa: dopo alcuni test si è potuto escludere l'ipotesi di un'erronea configurazione del ricevitore utilizzato o di un erroneo funzionamento da parte della rete GNSS. Si può affermare che, in presenza di reti di questo tipo è indispensabile andare ad infittire la rete, in modo tale che non vi siano forti variazioni di quota tra le diverse stazioni permanenti, al fine di evitare erronee stime dei disturbi atmosferici del segnale GNSS.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia la Regione Piemonte ed il CSI Piemonte, la Regione Lombardia e ERSAF ~ CEDeC per aver fornito i dati delle stazioni permanenti delle rispettive reti regionali GNSS. Ringraziamo l'Ufficio federale di topografia Swisstopo per aver fornito i dati in tempo reale delle stazioni permanenti AGNES utilizzate.

SITI

AAVV, Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (NTRIP), version 1.0:
http://igs.ifag.de/index_ntrip.htm, 2004

Bernese ftp data management: <http://antartica60.wordpress.com/2007/01/29/netdownload-help/>.

EUREF, European Terrestrial Reference Frame:

http://www.epncb.oma.be/_productsservices/coord_trans/.

EPN: Guidelines for EPN analysis centres. Document and related mails on-line:

http://www.epncb.oma.be/_documentation/guidelines/guidelines_analysis_centres.pdf, 2012.

Kouba J., *A guide to using international gps service (IGS) products*:

<ftp://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/resource/pubs/GuidetoUsingIGSPProducts.pdf>, 2003.

An introduction to the philosophy and technology behind Leica Geosystems' SpiderNET revolutionary Network RTK software and algorithms, White paper, Giugno 2005.

BIBLIOGRAFIA

Adam J., et al, *The European Reference System coming of age*, Geodesy Beyond 2000, IAG General Assembly, Birmingham July 1999, K. P Schwarz eds., IAG Symposia , Vol. 121, Springer-Verlag, Berlin, 1999.

Altamimi Z., Collilieux X., Métivier L., ITRF2008, *An improved solution of the international terrestrial reference frame*, Journal of Geodesy, Vol. 85 Issue 8, 2011.

Biagi L., Brovelli M.A., Campi A., Cannata M., Carcano L., Credali M., De Agostino M., Manzano A., Sansò F., Siletto G., *Il progetto HELI-DEM (Helvetia-Italy Digital Elevation Model): scopi e stato di attuazione*, in Bollettino SIFET n°1, 2011.

Biagi L., Caldera S., *The automation of permanent networks monitoring: remarks and case studies*, Applied Geomatics, Vol. 3, No. 3, 2011.

Biagi L. et Sansò F. eds., AAVV, *Il Servizio di Posizionamento in Regione Lombardia e la prima sperimentazione sui servizi di rete in tempo reale*, Bollettino SIFET n° 3, 2006.

Cina A., Manzano A., Piras M., Roggero M, *Rete test in Piemonte, impianto e risultati*, Bollettino SIFET n° 2, 2004.

Dabove P., De Agostino M., Manzano A.M., *Achievable positioning accuracies in a network of GNSS reference stations. Global Navigation Satellite Systems: Signal, Theory and Applications*, Shuanggen Jin Editor, 2012.

Dabove P., De Agostino M., *What effect does network size have on NRTK positioning?*, Inside GNSS, November-December 2011.

De Agostino M., Manzano A., 2011, *Validazione dei servizi della rete GNSS della Regione Piemonte.*, ISSN 1721-971X., BOLLETTINO DELLA SIFET, n° 1 pagg. 11-33

Dach R., Hugentobler U., Fridez P., Meindl M., *Bernese GPS Software Version 5.0.*, Astronomical Institute, University of Bern, 2007.

Kislig L., Petovello M., *What is a Virtual Reference Station and how does it work?*, Inside GNSS, July-August 2011.

CAPITOLO 6

CROSS-VALIDAZIONE E VALIDAZIONE ESTERNA DEI DTM

Ludovico Biagi (1), Maria Antonia Brovelli (1), Laura Carcano (1), Paolo Dabove (2), Mattia De Agostino (3), Alba Lucchese (1), Ambrogio Maria Manzino (2), Marco Negretti (1), Cinzia Taglioretti (2), Maria Grazia Visconti (1)

(1) Politecnico di Milano, DICA, Laboratorio di Geomatica presso Polo Territoriale di Como, Via Valleggio 11, 22100 Como

(2) Politecnico di Torino, DIATI, Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture, Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino

(3) all'epoca del lavoro, Politecnico di Torino; ora CSI Piemonte, Corso Tazzoli 215/12, 10137 Torino

SOMMARIO

Il presente capitolo illustra i risultati di cross-validazione e validazione esterna dei diversi DTM disponibili, come sono stati ottenuti dalle Unità di Ricerca del Politecnico di Milano e del Politecnico di Torino. Le Unità hanno prima concordato come ripartirsi le varie parti del lavoro: le analisi fondamentali sono comuni alle due attività, poiché tutte le scelte metodologiche sono state preliminarmente discusse e condivise. Però gli approfondimenti hanno differito, anche in funzione dei risultati ottenuti dalle prime analisi. Perciò si è deciso di mantenere separati i contributi.

Il lavoro del Politecnico di Milano ha riguardato la cross-validazione del DTM Lombardo e di quello Svizzero nella fascia di confine. Quindi si è effettuato il confronto fra DTM Lombardo e DTM LiDAR (Ministero dell'Ambiente, PST-A): poiché le differenze sembravano mostrare alcuni sistematismi, si è provato a stimare le eventuali traslazioni tridimensionali fra i due DTM. Infine, per alcune aree campione ove i risultati erano decisamente anomali, si è effettuata una validazione esterna mediante tecnica GNSS RTK.

Il lavoro del Politecnico di Torino ha riguardato la cross-validazione del DTM regionale Piemontese con quelli Lombardo e Svizzero nelle rispettive fasce di confine. Anche in questo caso è stato effettuato il confronto tra il DTM a bassa risoluzione e alcuni DTM ad alta risoluzione disponibili, tra cui il DTM PST-A. Inoltre sono state eseguite misure sul terreno in Valsesia, ove si disponeva di due DTM di diversa precisione e fra loro discordi, per comprendere se vi fossero dei sistematismi altimetrici o planimetrici fra questi e quale fosse il riferimento di maggiore precisione.

ABSTRACT

The acquired DTMs should be cross and externally validated. This chapter presents the results obtained from the Research Units of Politecnico di Milano and Politecnico di Torino. The basic analyses are common to both groups because all the methodological choices had been previously discussed and shared. However, according to the first results, the insights are different. Therefore it was decided to maintain separate contributions.

The work of the Politecnico di Milano focuses on the cross-validation of the Lombardy and Switzerland DTM on the border. After that, Lombardy low resolution and LiDAR high resolution DTMs are compared: because the differences seem to show some anomalies, the 3D translations between the two DTMs are estimated. Finally, for some sample areas, where the results are decidedly abnormal, an external validation is performed using GNSS RTK-technique.

The work of the Politecnico di Torino focuses on the cross-validation of Piedmont DTM with Lombardy and Switzerland DTM on the respective border. Also in this case the comparison between the regional low resolution DTM and some higher resolution DTMs, as for example the LiDAR DTM, is computed. Measures on the terrain in the Valsesia area are done, where two DTMs with different precisions and discordant are available, to find out if some altimetric or planimetric sistematisms between the two DTMs exist.

INTRODUZIONE

Si ricorda quanto dettagliatamente descritto nel Cap. 3. I DTM regionali, ovvero quelli ufficiali di Lombardia, Piemonte e Svizzera, hanno risoluzioni e accuratèzze simili, ovvero basse o medie, e presentano zone di sovrapposizione ai confini; inoltre per il Piemonte sono disponibili piú DTM oltre a quello ufficiale regionale. Infine, per le principali aste del bacino idrografico del Po è disponibile il DTM LiDAR (Ministero dell'Ambiente, PTS-A) ad alta risoluzione e accuratèzza. Quindi i DTM regionali possono innanzitutto essere confrontati nelle loro zone di sovrapposizione, ovvero ai confini o, nel caso del Piemonte, per ampie aree della regione: poiché tali DTM hanno risoluzioni planimetriche e accuratèzze altimetriche confrontabili tale operazione è effettivamente una semplice cross-validazione. Inoltre i DTM a bassa/media risoluzione possono essere confrontati con quello PST-A, che ha un'accuratèzza significativamente migliore: in questo caso si può ancora parlare di cross validazione fra DTM, ma le statistiche delle differenze forniscono già una valutazione di qualità dei DTM a bassa/media risoluzione. Infine, quando siano necessarie ulteriori verifiche, è possibile agire mediante rilievi GNSS: questo è ad esempio il caso in cui le differenze fra DTM a bassa/media risoluzione e PST-A eccedano significativamente le accuratèzze nominali. Per tali controlli si ricorre alla modalità cosiddetta RTK poiché permette la determinazione di molti punti, ovvero di un campione significativo di superficie, in tempi rapidi con accuratèzza che, in normali condizioni di rilievo, è migliore del decimetro anche in quota. Si noti che questa è in senso proprio una validazione esterna, poiché i DTM vengono confrontati con un'informazione completamente indipendente. Si ricorda che nell'ambito del progetto è stata connessa una rete di stazioni permanenti GNSS e che quindi è stato istituito e reso operativo un centro di calcolo con programmi per la distribuzione di correzioni RTK (Cap. 5): le validazioni esterne mediante GNSS RTK sono quindi state fatte utilizzando dati e correzioni di tale rete.

CAPITOLO 6.1

ANALISI E VALIDAZIONI CONDOTTE DAL POLITECNICO DI MILANO

Ludovico Biagi, Maria Antonia Brovelli, Laura Carcano,
Alba Lucchese, Marco Negretti, Maria Grazia Visconti

Politecnico di Milano, DICA, Laboratorio di Geomatica presso Polo Territoriale di Como, Via Valleggio 11, 22100 Como

1 CONFRONTO TRA DTM REGIONALI LOMBARDO E SVIZZERO

Il primo confronto riguarda i DTM lombardo e svizzero: le loro caratteristiche sono elencate nel Capitolo 3. Si è innanzitutto individuata la zona di sovrapposizione (Fig. 1), quindi il confronto è stato effettuato implementando opportune procedure in ambiente MATLAB. Si ricorda che i due DTM hanno risoluzione e accuratezza simile però, a causa delle differenze di passo, di sistema di riferimento e di coordinate, le posizioni dei loro nodi non coincidono: per questo motivo si è deciso di confrontarli su punti estratti casualmente all'interno della loro zona di sovrapposizione. Per ogni confronto, è stato quindi estratto un campione di posizioni (Est, Nord) da una variabile uniforme bidimensionale: in totale sono state estratte 257000 posizioni circa, con distribuzione omogenea e interdistanza planimetrica di circa 100 metri. Per ciascuna posizione si ricavano due valori di quota, mediante interpolazione bicubica esatta, il primo a partire dai nodi del DTM lombardo, il secondo da quelli del DTM svizzero: per maggiori dettagli sull'interpolazione bicubica si vedano Dermanis et Biagi (2002) e il Capitolo 9. Si calcolano quindi le differenze (punto a punto) tra le due quote interpolate. Si noti che prima di confrontare le altimetrie si sono eliminati i dati relativi agli specchi d'acqua: infatti tali zone vengono memorizzate con valori di riferimento differenti nei diversi DTM, che però non riguardano l'orografia del terreno. Ovviamente anche gli eventuali *no data* vengono esclusi. Fatto ciò si calcolano le differenze di quota

$$\Delta H = H_{DTM1} - H_{DTM2}.$$

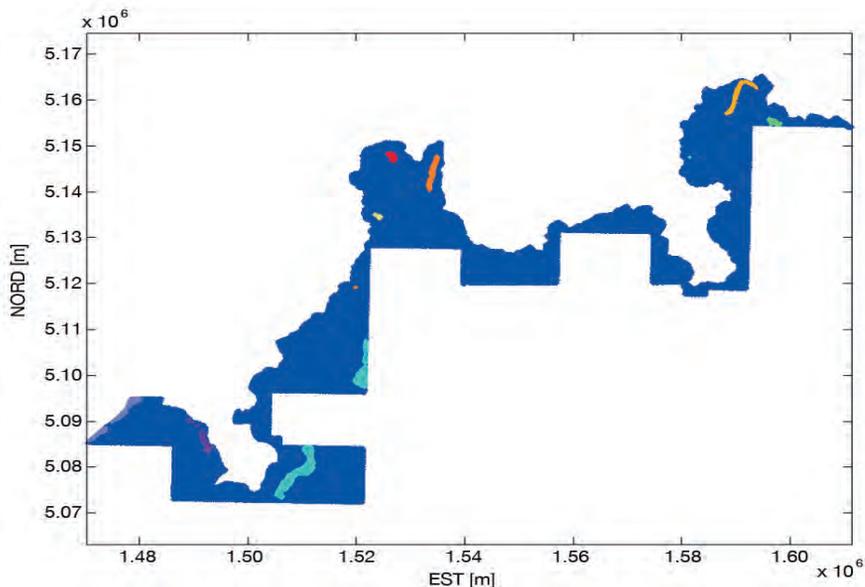


Figura 1. Zona di sovrapposizione e densità dei punti estratti casualmente per il calcolo delle differenze di quota fra DTM lombardo e svizzero. Sono evidenziate in diversi colori le zone corrispondenti ai laghi

Si sono eseguite diverse analisi statistiche sulle differenze di quota, secondo lo schema che segue:

1. divisione in classi e calcolo delle percentuali di appartenenza a tali classi,
2. curva di frequenza relativa ed assoluta,
3. verifica di adattamento ad una gaussiana e curva di frequenza empirica,
4. mappa delle differenze,
5. analisi di correlazione delle differenze con parametri orografici.

Numero di punti utili	256'737
Media	-0.1 m
Dev.Std.	± 18.9 m
Valore massimo	352 m
Valore minimo	-256 m

Tabella 1. Statistiche relative alle differenze di quota fra DTM lombardo e svizzero

Si riportano in Tabella 1 le statistiche delle differenze, che presentano media quasi nulla. Considerando che la deviazione standard nominale del DTM svizzero è di circa 5 metri e quella del DTM lombardo è valutata in 10-15 metri, per la combinazione dei due DTM dovrebbe valere la relazione $\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \approx 13.5m$. La deviazione standard ottenuta è più

grande ma perlomeno confrontabile: a tale riguardo si deve anche tenere conto che i confronti sono tutti relativi a aree con orografia prealpina o alpina, quindi complessa. Per contro, appare evidente la presenza di significative anomalie, ovvero differenze che raggiungono i 300 m: si sono quindi eseguite ulteriori analisi statistiche, sotto riportate.

Classi delle differenze, istogramma e verifica di adattamento a una gaussiana.

Dall'istogramma e dalla Tabella delle differenze (Fig. 2, Tab. 2) si può notare che la maggior parte dei valori (circa l'85%) è inferiore a 20 metri, ovvero accettabile rispetto alle accuratèzze nominali dei due DTM; solo il 4 % è superiore a 40 metri e solo lo 0.3 supera i 100 m. Si è effettuato un test di buon adattamento delle differenze a una gaussiana con media e deviazione standard uguali alle loro. Il test non risulta verificato: la distribuzione empirica delle differenze si discosta dalla gaussiana, in quanto è più concentrata intorno alla media.

Mappa delle differenze. Allo scopo di ottenere informazioni relative alla loro distribuzione spaziale, seguendo la stessa classificazione appena illustrata, si è creata una mappa delle differenze assegnando a ciascuna di esse un colore in funzione della classe di appartenenza (Fig. 3).

Da una semplice indagine visiva sembra che le differenze più grandi presentino una distribuzione spaziale anomala. Ciò appare evidente se si rappresentano le differenze in modulo (Fig. 4) e si sovrappongono loro le griglie del DTM lombardo: si può notare che parte della griglia B2 e le griglie B3, B4, C2 presentano le peggiori differenze di quota (maggiori di 40 metri, punti rossi e neri) mentre le altre griglie hanno statistiche migliori.

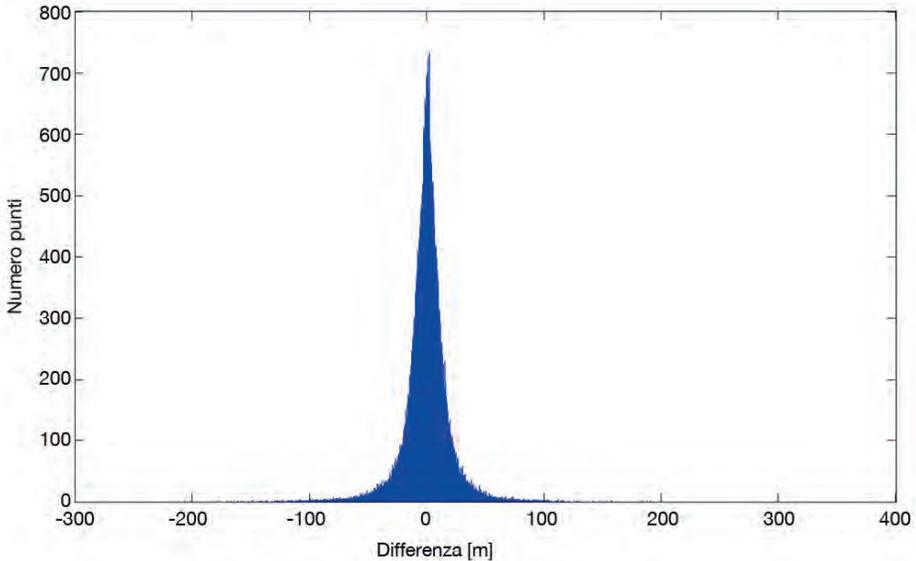


Figura 2. Istogramma delle differenze di quota fra DTM lombardo e svizzero

Differenze (m)	Percentuale rispetto al totale di punti utili
$\Delta H < -100$	0.2 %
$-100 \leq \Delta H < -40$	2.0 %
$-40 \leq \Delta H < -20$	5.6 %
$-20 \leq \Delta H < -10$	11 %
$-10 \leq \Delta H < 0$	29 %
$\Delta H = 0$	0.0 %
$0 < \Delta H \leq 10$	32 %
$10 < \Delta H \leq 20$	12 %
$20 < \Delta H \leq 40$	5.7 %
$40 < \Delta H \leq 100$	1.8 %
$\Delta H > 100$	0.1 %

Tabella 2. Classi e percentuali delle differenze di quota fra DTM lombardo e svizzero

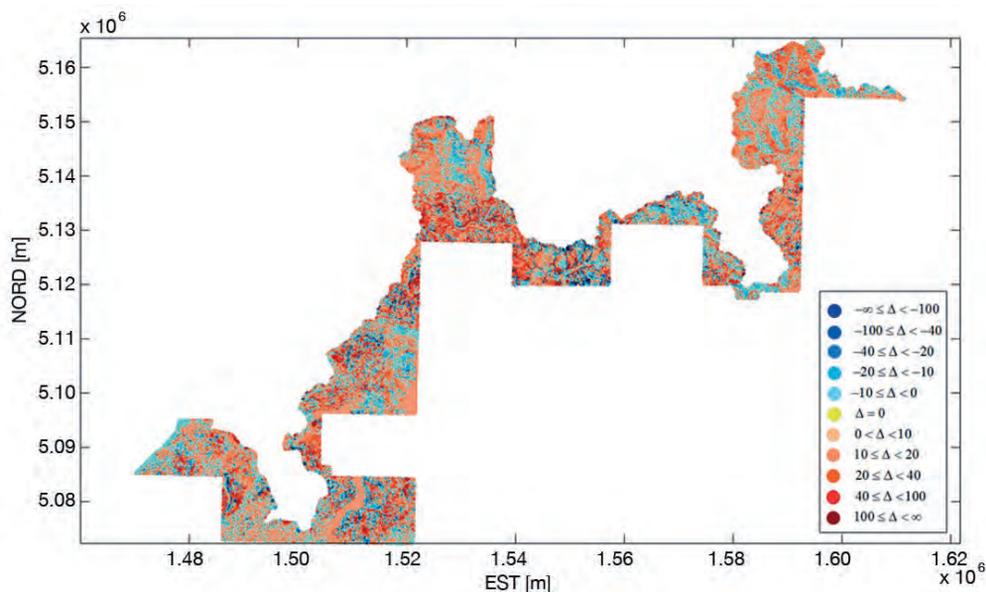


Figura 3. Differenze di quota (in m) fra DTM lombardo e svizzero classificate

Le griglie B2 e C2 coprono zone di montagna e ciò potrebbe essere la causa dei valori elevati; risulta però anomalo il fatto che tali zone presentino scarti peggiori di quelli della griglia B1, più vicina alla spartiacque alpino ma con statistiche decisamente soddisfacenti. Per verificare la correlazione fra differenze e orografia è stato innanzitutto calcolato il coefficiente di correlazione lineare tra i moduli delle differenze e l'elevazione del terreno: tale coeffi-

ciente risulta non significativo. La pendenza del terreno è una grandezza più rappresentativa della complessità orografica rispetto all'elevazione: si è quindi calcolata la pendenza con gli usuali algoritmi (Li et al., 2005) e quindi nuovamente la correlazione fra moduli delle differenze e pendenza. Anche questa risulta non significativa. In generale, si può quindi affermare che le differenze peggiori seguono tagli regolari che nulla hanno in comune con l'orografia ma che invece possono ricordare le forme di eventuali tavole di digitalizzazione: tali situazioni sono particolarmente emblematiche nelle griglie B3 e nella già citata B2.

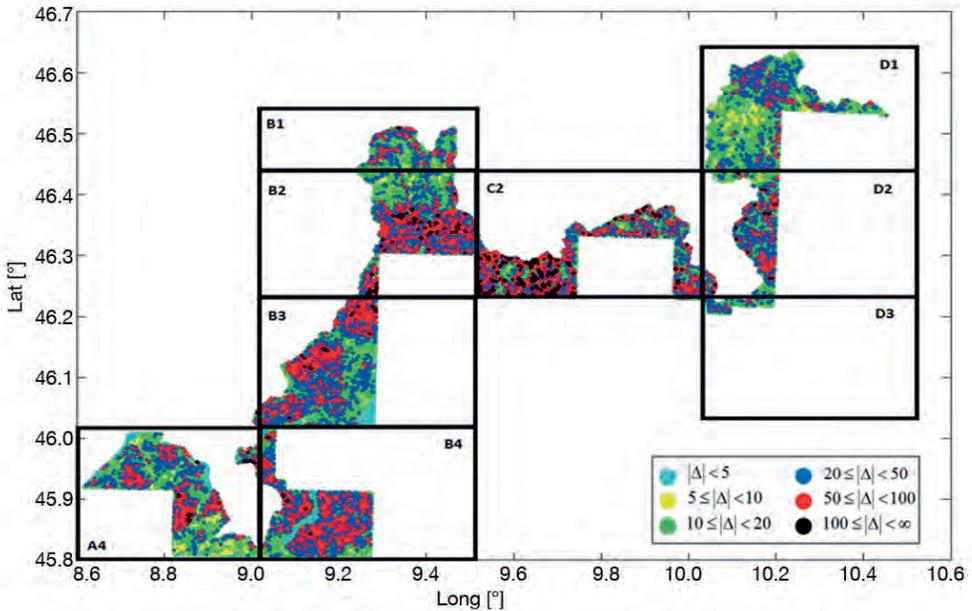


Figura 4. Valori assoluti delle differenze di quota (in m) fra DTM lombardo e svizzero classificate. Sono evidenziati i confini delle griglie del DTM lombardo

2 CONFRONTO FRA DTM A BASSA E ALTA RISOLUZIONE (PST-A) PER LA LOMBARDIA

Il DTM lombardo a bassa risoluzione è stato quindi confrontato con il DTM ad alta risoluzione PST-A: ciò è stato effettuato implementando un nuovo comando in GRASS 7.0. Di seguito viene brevemente descritta la cross-validazione effettuata per il territorio lombardo. Il DTM lombardo è stato trasformato in ETRF89, coordinate geografiche (sistema di riferimento del DTM PST-A), tramite le procedure descritte nel Capitolo 4: il risultato è un listato di coordinate 3D di punti, che chiaramente sono quasi regolarmente spaziate ma non più su una griglia regolare. Per ogni punto di questo insieme viene considerata una finestra di $20 \times 20 \text{ m}^2$: viene calcolata la media di tutti i nodi del DTM PST-A che vi ricadono e quindi viene calcolata la differenza fra punto derivato dal DTM lombardo e media del DTM PST-A. Si noti che il DTM PST-A copre solamente i principali bacini idrografici, per una copertura totale di circa 3810 km^2 (16% di tutta la regione Lombardia). In Tabella 3 si riportano i valori

statistici delle differenze. Per verificare l'esistenza di un sistematismo globale, esse sono state suddivise in sei classi (Tab. 4): non è presente alcun bias e le statistiche generali sono consistenti con le accuratezze nominali. I valori anomali, superiori a 100 m sono relativi a zone della Valtellina interessate dagli eventi franosi dell'estate del 1987 e il DTM lombardo è estratto da cartografia precedente. La Figura 5 rappresenta la distribuzione spaziale delle differenze.

Numero di punti	4048660
Media	0.5 m
Dev.Std.	6.6 m
Valore massimo	204 m
Valore minimo	- 138 m

Tabella 3. Statistiche delle differenze di quota tra DTM lombardo e PST-A

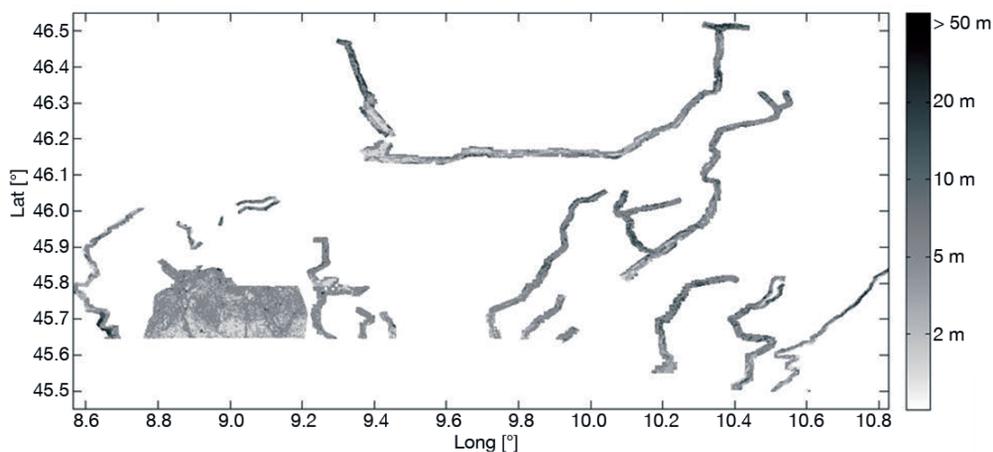


Figura 5. Distribuzione planimetrica dei valori assoluti delle differenze di quota tra DTM lombardo e PST-A

Classe	Differenze	Percentuale
1	$0 \text{ m} \leq |\Delta H| < 5 \text{ m}$	79 %
2	$5 \text{ m} \leq |\Delta H| < 10 \text{ m}$	14 %
3	$10 \text{ m} \leq |\Delta H| < 20 \text{ m}$	6.0 %
4	$20 \text{ m} \leq |\Delta H| < 50 \text{ m}$	1.2 %
5	$50 \text{ m} \leq |\Delta H| < 100 \text{ m}$	0.2 %
6	$|\Delta H| \geq 100 \text{ m}$	0.01 %

Tabella 4. Classi e relative percentuali delle differenze di quota fra DTM lombardo e PST-A

Per analizzare nel dettaglio i sistematismi che sembrano esistere in alcune zone, sono state effettuate numerose analisi di dettaglio: si riporta qui l'esempio della zona della valle di San Giacomo. La media delle differenze (Fig. 6) è di 0.5 m, che risulta non significativa rispetto all'accuratezza del DTM lombardo. Tuttavia, sul fianco occidentale della valle (la parte bassa in figura) i valori sono sempre negativi, mentre nell'altro versante è presente un sistematismo opposto. Ciò potrebbe essere giustificato da una traslazione tra i due DTM rispetto all'asse della valle: è quindi stato implementato un programma per la stima di eventuali sistematismi. Si ipotizza l'esistenza di una traslazione tridimensionale fra i due DTM: i parametri della traslazione vengono stimati utilizzando i Minimi Quadrati (Koch et al., 1987). L'altezza di un punto P è descritta dalle seguenti equazioni:

$$H(P) = f_1(\mathbf{x}(P)) + v_1$$

$$H(P) = f_2(\mathbf{x}(P)) + v_2$$

dove f_1, f_2 sono rispettivamente le funzioni altezza del DTM PST-A e di quello lombardo, v_1, v_2 sono i loro errori di osservazione, $\mathbf{x} = [N_P \ N_P]^T$ sono le coordinate planimetriche di P. In assenza di sistematismi, chiaramente otteniamo:

$$f_1(\mathbf{x}(P)) = f_2(\mathbf{x}(P))$$

Supponiamo che fra i due DTM esistano una traslazione $\mathbf{t} = [t_N \ t_E]^T$ ed un bias H in quota. Il modello funzionale diventa il seguente:

$$f_1(\mathbf{x}(P)) = f_2(\mathbf{x}(P) + \mathbf{t}) + H$$

Esso può essere linearizzato come segue:

$$\Delta f(\mathbf{x}(P)) = f_1(\mathbf{x}(P)) - f_2(\mathbf{x}(P)) = \nabla f_2(\mathbf{x}(P)) \cdot \mathbf{t} + H$$

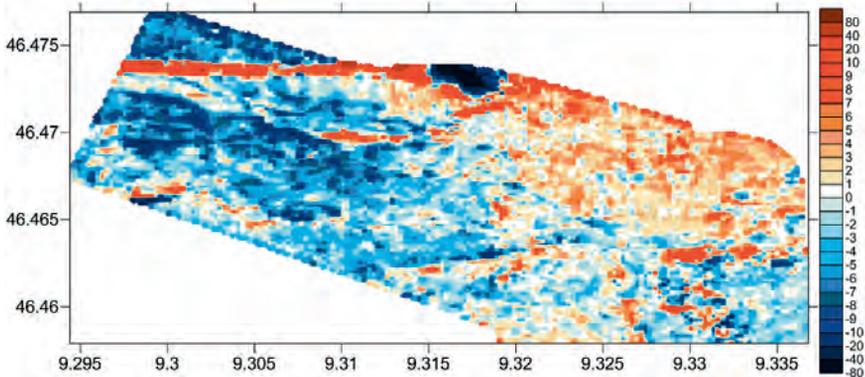


Figura 6. Differenze di quota tra DTM lombardo e PST-A (in m) nella valle di San Giacomo

La traslazione ed il bias possono essere stimati mediante i Minimi Quadrati a partire dalle differenze osservate $\Delta f(P_i), i = 1, 2, \dots, M$. Per riempire la matrice disegno del sistema, si deve calcolare il gradiente del DTM lombardo: ciò viene effettuato tramite le tipiche

approssimazioni numeriche (Li et al., 2005).

La traslazione ed il bias delle altezze sono stati calcolati in più modi: prima considerando la suddivisione cartografica ufficiale in griglie della Lombardia, quindi si è considerata la naturale suddivisione orografica in valli. Nel primo caso le stime per ogni foglio sono sempre inferiori a 1.5 m, e la loro media è 0.3 m: sia a scala regionale sia nei singoli fogli non appaiono traslazioni significative. Anche nel caso dell'analisi individuale delle valli, nessuna di esse presenta traslazioni o bias significativi, con stime sempre inferiori rispettivamente a 4 e 2 m.

Classe	Differenze	Percentuale
1	$\Delta H < -100$ m	0.0 %
2	$-100 \text{ m} \leq \Delta H < -50$ m	0.3 %
3	$-50 \text{ m} \leq \Delta H < -20$ m	0.5 %
4	$-20 \text{ m} \leq \Delta H < -10$ m	3.1 %
5	$-10 \text{ m} \leq \Delta H < -5$ m	15.7 %
6	$-5 \text{ m} \leq \Delta H < 0$ m	39.9 %
7	$0 \text{ m} \leq \Delta H < 5$ m	31.2 %
8	$5 \text{ m} \leq \Delta H < 10$ m	5.9 %
9	$10 \text{ m} \leq \Delta H < 20$ m	2.2 %
10	$20 \text{ m} \leq \Delta H < 50$ m	0.9 %
11	$50 \text{ m} \leq \Delta H < 100$ m	0.1 %
12	$\Delta H \geq 100$ m	0.0 %

Tabella 5. Differenze di quota tra DTM lombardo e PST-A nella valle di San Giacomo

3 VALIDAZIONE ESTERNA DEI DTM MEDIANTE DATI E TECNICHE GEODETICHE

Come già evidenziato per il caso della valle di San Giacomo, a livello locale sembrano essere presenti sistematismi significativi e spazialmente correlati. Per questo motivo è stata effettuata un'ulteriore analisi in base a due differenti approcci:

1. confronto tra DTM e monografie di ordine zero della rete geodetica IGM95 italiana,
2. rilievi GNSS RTK in zone dove sono presenti estese differenze di altezza, superiori a 10 m, tra il DTM PST-A e quello lombardo.

In particolare, i test sono stati effettuati in Valtellina (Fig. 7). La scelta di questa area come caso di studio è dovuta a specifiche caratteristiche: la Valtellina è la valle alpina più importante e popolata della Lombardia; inoltre, è localizzata nella zona settentrionale della regione in prossimità del confine con la Svizzera.

3.1 Confronto fra DTM e monografie IGM95

IGM95 è la rete nazionale geodetica di ordine zero, progettata e rilevata a partire dagli anni '90 dall'Istituto Geografico Militare (IGM, Surace, 1993, 1997). Allo stato attuale, la

rete consiste di circa 2000 capisaldi tipicamente monumentati sul terreno o su manufatti. Diversi punti IGM95 ricadono nella nostra area di studio. Abbiamo effettuato due tipologie di confronto, la prima tra i punti IGM95 ed il DTM lombardo, la seconda tra IGM95 ed il DTM PST-A. Considerato che il secondo confronto dovrebbe essere condotto meglio del decimetro, sono stati utilizzati solamente i punti IGM95 aggiornati recentemente: sono stati raccolti complessivamente 64 punti, sei dei quali ricadono in Valtellina. Il primo confronto restituisce valori sostanzialmente soddisfacenti, con uno scarto medio di 1 metro e deviazione standard di 3 m. Il confronto con il DTM PST-A richiede analisi più dettagliate. La media delle differenze di quota è di 6 cm con una deviazione standard di 13 cm. Solo 13 punti presentano differenze maggiori di 30 cm; controllando le monografie, risulta che tali punti sono monumentati su manufatti, quali muretti o terrapieni che non sono presenti nel DTM: non possono quindi essere considerati utili nel confronto. Nonostante il limitato numero di punti rimanenti, i risultati ottenuti sono completamente soddisfacenti. Tuttavia, nessun punto IGM95 è presente nelle aree dove esistono le differenze di quote maggiori: pertanto è stata realizzata una campagna GNSS RTK appositamente per il progetto che viene descritta nella sezione successiva.

3.2 Confronto fra DTM e rilievi RTK

Si vuole confermare l'accuratezza del DTM PST-A: per questo motivo i rilievi GNSS RTK possono essere utilizzati come validazione esterna in aree selezionate. Si noti che il metodo RTK (Real Time Kinematic) sembra adeguato poiché restituisce accuratèzze tipicamente migliori di un decimetro anche in quota (Biagi et Sansò, 2006).

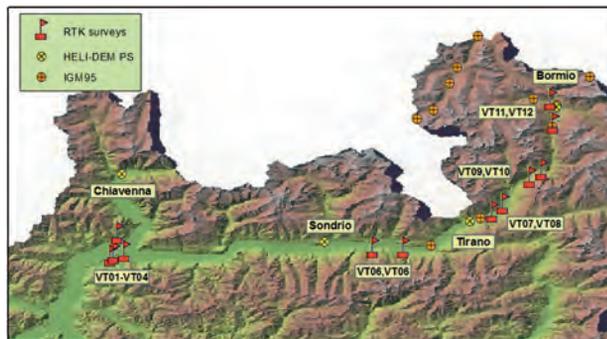


Figura 7. Area di studio della Valtellina (rilievi RTK), capisaldi IGM95 e stazioni permanenti HELI-DEM

Nell'ambito del progetto è stata realizzata una rete di Stazioni Permanenti GNSS selezionando stazioni già esistenti in Italia e Svizzera. A tal fine sono state selezionate tutte le SP ricadenti nell'area del progetto ed alcune presenti in aree limitrofe (per ragioni di configurazioni geometriche); sono stati presi accordi con gli enti gestori delle reti (GPS Lombardia, GNSS Piemonte, GeoTop and AGNES) per ottenere i dati in tempo reale: maggiori dettagli sulla rete HELI-DEM possono essere trovati nel Capitolo 5.

Dopo aver confrontato i DTM, sono state scelte 12 aree di studio in cui le differenze di quota tra DTM PST-A e lombardo sono superiori a 10 m e significamente correlate nello

spazio (Fig. 7, Tab. 6). Inoltre, le aree di studio sono state scelte sulla base della loro accessibilità e in modo da limitare il più possibile eventuali ostruzioni (buona visibilità satellitare). Le aree VT01, VT02, VT03, VT04 sono nella porzione occidentale della valle, tra Colico e Sorico, mentre le altre aree si trovano nella porzione orientale tra Sondrio e Bormio. Le aree da VT01 a VT06 si trovano a quote inferiori a 500 m, da VT07 a VT10 hanno quote da 500 m a 1000 m., ed infine VT11 e VT12 hanno quote superiori ai 1000 m. Le misure RTK sono state effettuate con ricevitori Leica RX 1200; la connessione dati fra ricevitori e centro di controllo della rete HELI-DEM avviene tramite UMTS.

Le misure sono state effettuate lungo strade o sentieri facilmente accessibili. Abbiamo scelto di non monumentare capisaldi poiché eravamo interessati a rilevare profili di altezze per traiettorie e non per punti. In zone pianeggianti abbiamo effettuato misure statiche di cinque secondi ogni 20 m circa. In tratti significativamente pendenti (10/15 %) le misure statiche sono state più frequenti, circa ogni 10 m. Ogni percorso è stato rilevato sia in andata sia in ritorno, in modo da averne un doppio controllo. Inoltre le campagne sono state ripetute due volte, la prima in giugno/luglio e la seconda in ottobre 2012 (circa 1300 punti). Le condizioni di rilievo non sono state sempre ottimali. Tutte le aree presentano vegetazione; inoltre la Valtellina, per il suo proprio orientamento da Ovest a Est, ha importanti ostruzioni orografiche verso Sud. Ciò nonostante, dal punto di vista delle acquisizioni e tempi di fissaggio delle ambiguità, i risultati appaiono in generale soddisfacenti. Le aree nei pressi di Colico costituiscono le uniche eccezioni (aree V01, V02 and V03): in particolare, nella campagna di ottobre, sono stati raccolti pochi punti a causa di un significativo problema nell'acquisizione di dati GNSS nell'intera area: ciò era probabilmente causato da interferenze elettromagnetiche generate da ripetitori presenti a meno di 1 km.

Id	L (m)	H (m)	φ	λ
VT01	420	213	46°08'27''	9°22'40''
VT02	508	243	46°08'45''	9°23'04''
VT03	1029	201	46°09'02''	9°24'29''
VT04	697	204	46°09'02''	9°24'30''
VT05	379	328	46°09'34''	9°57'31''
VT06	1083	357	46°09'32''	10°01'33''
VT07	908	520	46°14'18''	10°13'25''
VT08	2488	542	46°15'24''	10°14'49''
VT09	1161	795	46°18'51''	10°18'21''
VT10	1175	910	46°19'53''	10°19'57''
VT11	1609	1155	46°26'02''	10°21'27''
VT12	472	1277	46°29'11''	10°21'10''

Tabella 6. Posizioni RTK nell'area di studio. L: lunghezza del percorso. H, φ , λ : coordinate approssimate del baricentro dell'area, quota ortometrica, planimetria in ETRF2000

I dati raccolti in RTK sono in ITRF2008 (Altamimi et al, 2011), mentre il DTM PST-A è in ETRF89; quindi è stata necessaria un'omogeneizzazione dei sistemi di riferimento, in accordo alle trasformazioni standard (Cap. 4). Dopo avere effettuato la trasformazione, il confronto tra il DTM PST-A e i punti RTK è stato effettuato nel seguente modo. Le quote

geodetiche dei punti RTK sono state trasformate in ortometriche applicando l'ondulazione del geoide ufficiale Italgeo2005 (Barzaghi et al., 2007). Per ciascun punto rilevato in modalità RTK, si cercano i sedici nodi più vicini del DTM, che vengono interpolati mediante un'interpolazione bicubica esatta sul punto stesso. Quindi viene calcolata la differenza di quota tra il DTM e i punti RTK: le relative statistiche sono nelle Tabelle 7 e 8. Chiaramente, in questo modo, gli errori orizzontali dei punti RTK sono trascurati: tuttavia, al fine di questo confronto, l'approssimazione è accettabile.

Quarantatré punti presentano differenze di quote maggiori dei 50 cm e vengono considerati outliers; 10 differenze sono maggiori di un metro. Una prima osservazione degli outliers mostra che la maggior parte di essi è dovuta a problemi riscontrati durante il rilievo e non rappresenta errori del DTM: essi sono presenti in zone con fitta vegetazione o in siti con bassa visibilità dove non è stato possibile fissare le ambiguità o si sono verificati dei falsi fissaggi. La maggior parte degli outliers sono punti sparsi e pochi si presentano in entrambe le campagne di misure. Esistono due eccezioni. VT07 (localizzata nei pressi di Lovero, SO, Fig. 9): si tratta di un percorso lungo circa 900 m e con un dislivello in quota di 45 m. Durante la prima campagna sono presenti 7 outliers (in marrone e rosso), mentre gli altri valori di differenza di quota sono compresi tra 0 e 30 cm. Questo problema non si ripete nella seconda campagna di misure. Ciò è plausibilmente dovuto ad un prolungato errore nel fissaggio delle ambiguità durante la prima campagna. VT10 è localizzata nei pressi di Sondalo (SO): si tratta di una strada asfaltata lunga circa 600 m che sale ortogonalmente al versante della valle (differenza di quota totale di 44 m). Le quote dei punti RTK sono sistematicamente più alte del DTM nel lato della strada verso la valle, e contengono la maggior parte degli outliers con differenze di quota maggiori di un metro: tale anomalia è plausibilmente dovuta ad un errore nella georeferenziazione del DTM o nel filtraggio per produrre il DTM dalle nuvole di punti acquisiti dal LiDAR. I risultati delle altre zone sono soddisfacenti: a titolo di esempio si riporta in Figura 10 il tracciato di Tiolo (VT09).

4 CONCLUSIONI

I DTM a bassa risoluzione lombardo e svizzero sono stati confrontati nelle loro zone di sovrapposizione: le differenze non presentano sistematismi globali e hanno statistiche sostanzialmente accettabili; va però notato che sono lievemente peggiori delle accuratèzze nominali e la loro distribuzione spaziale sembra correlata più con eventuali fogli di produzione cartografica che non con l'orografia del terreno. Il DTM lombardo è quindi stato confrontato con quello ad alta risoluzione PST-A, ove questo è disponibile, ovvero per le zone di fondovalle delle valli alpine. I confronti forniscono risultati in generale soddisfacenti. Alcune aree in cui sono presenti risultati anomali sono state utilizzate come aree test per effettuare validazione esterna mediante rilievi GNSS RTK. I risultati forniti sono di buona qualità e confermano la correttezza del DTM PST-A.

BIBLIOGRAFIA

In comune con la seconda sezione del Capitolo: si veda al termine

Id	Ps	O	%O	M	σ	Max	RMSE
VT01	48	1	2,	14	9	31	17
VT02	60	1	2	12	13	32	18
VT03	40	0	0	18	8	38	19
VT04	22	1	4	19	6	40	20
VT05	50	0	0	4	4	17	6
VT06	72	0	0	-5	3	14	6
VT07	60	7	12	5	13	45	14
VT08	64	0	0	11	8	28	13
VT09	55	0	0	4	6	25	7
VT10	48	5	10	-3	10	36	10
VT11	70	4	6	7	8	35	10
VT12	39	0	0	13	6	27	15

Tabella 7. Differenze di quota fra DTM PST-A e GNSS-RTK: statistiche della prima campagna di misura. Id, numero di punti RTK, numero di outliers (differenze maggiori di 50 cm), percentuale di outliers, media, deviazione standard, valore massimo assoluto, sqm.

Tutti le statistiche metriche sono calcolate escludendo gli outliers e sono in cm

Id	Ps	O	%O	M	σ	Max	RMSE
VT01	35	1	3	2	12	23	12
VT02	7	0	0	7	17	31	17
VT03	18	1	5	2	15	19	15
VT04	36	3	8	2	12	19	12
VT05	68	0	0	3	8	37	9
VT06	50	2	4	-1	5	7	5
VT07	93	0	0	5	12	37	13
VT08	90	3	3	13	6	27	14
VT09	70	1	1,	6	10	42	12
VT10	77	10	13	5	17	39	16
VT11	101	2	2	2	9	30	10
VT12	61	1	2	7	7	19	4

Tabella 8. Differenze di quota fra DTM PST-A e GNSS-RTK: statistiche della seconda campagna di misura. Id, numero di punti RTK, numero di outliers (differenze maggiori di 50 cm), percentuale di outliers, media, deviazione standard, valore massimo assoluto, sqm.

Tutti le statistiche metriche sono calcolate escludendo gli outliers e sono in cm



Figura 9. Aree VT07 (in alto) e VT10 (in basso). Punti GNSS RTK e valori assoluti delle differenze di quota con il DTM PST-A: le due aree sono le uniche in cui è presente un numero significativo di differenze anomale

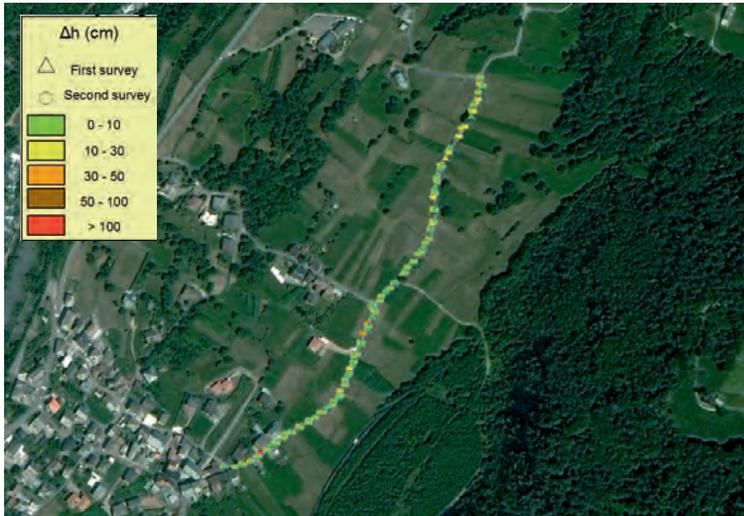


Figura 10. Area VT09. Punti GNSS RTK e valori assoluti delle differenze di quota con il DTM PST-A: l'area VT09 costituisce un esempio di area in cui il rilievo ha fornito risultati soddisfacenti (si noti l'unico outlier a Sud Ovest)

CAPITOLO 6.2

ANALISI E VALIDAZIONI CONDOTTE DAL POLITECNICO DI TORINO

Paolo Dabove (1), Mattia De Agostino (2),
Ambrogio Maria Manzino (1), Cinzia Taglioretti (1)

(1) Politecnico di Torino, DIATI, Dipartimento di Ingegneria dell’Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture, Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino

(2) all’epoca del lavoro, Politecnico di Torino; ora CSI Piemonte, Corso Tazzoli 215/12, 10137 Torino

1 INTRODUZIONE

Per validare i DTM disponibili (Brovelli et al., 2009) si è deciso di effettuare due tipi di confronti, il primo tra DTM regionali con risoluzioni planimetriche simili ove questi si sovrappongono nelle zone al confine tra due stati o tra due regioni, il secondo tra DTM ad alta e bassa risoluzione laddove i DTM ad alta risoluzione sono disponibili.

In particolare si è ha effettuata la cross-validazione tra le seguenti coppie di DTM:

- DTM piemontese (risoluzione 50 m) e DTM svizzero (risoluzione 25 m).
- DTM piemontese (risoluzione 50 m) e DTM lombardo (risoluzione 20 m).
- DTM piemontese (risoluzione 50 m) e DTM LiDAR ad alta risoluzione (1 m) PST-A.
- DTM piemontese (risoluzione 50 m) e DTM piemontese EST (risoluzione 10 m).

Per praticità di calcolo si è scelto di unire le griglie della Svizzera (griglie e00745, e00746, e008n45 ed e008n46) e del Piemonte (fogli 019, 020, 035, 036, 051, 052, 053, 071, 072, 073 e 074) al fine di ottenere un unico DTM Svizzero (denominato SwissTopo_25_FLH.asc) ed uno per il Piemonte (Piemonte_50_ENU.asc), mantenendo inalterati i rispettivi sistemi di riferimento, i sistemi di coordinate ed i passi dei grigliati. Le procedure di calcolo delle differenze fra coppie di DTM sono le medesime descritte nella precedente Sezione.

2 SELEZIONE DELLA ZONA DI SOVRAPPOSIZIONE TRA I DUE DTM

Prima del confronto è stato costruito un programma che, dopo la lettura dei due DTM restituisce in output un terzo DTM contenente il grigliato “tagliato” della sola zona di sovrapposizione dei due DTM. Questa operazione permette, così come si può facilmente notare dalla Figura 1 di limitare il numero dei punti da generare e ridurre così l’onere computazionale, concentrandosi sulla sola zona di sovrapposizione dei due DTM. È importante sottolineare che il programma di taglio non esegue alcuna interpolazione (Kidner et al., 1999) ma si limita

a ridurre la dimensione del DTM memorizzando la porzione individuata dai limiti imposti, senza apportare alcuna modifica ai valori in esso contenuti.

Diversamente da quanto accade durante la sovrapposizione tra i DTM di Lombardia e Svizzera, dove la sovrapposizione è tutta in territorio italiano, in questo caso, tra Piemonte e Svizzera, entrambi i DTM contengono porzioni oltre i confini nazionali.

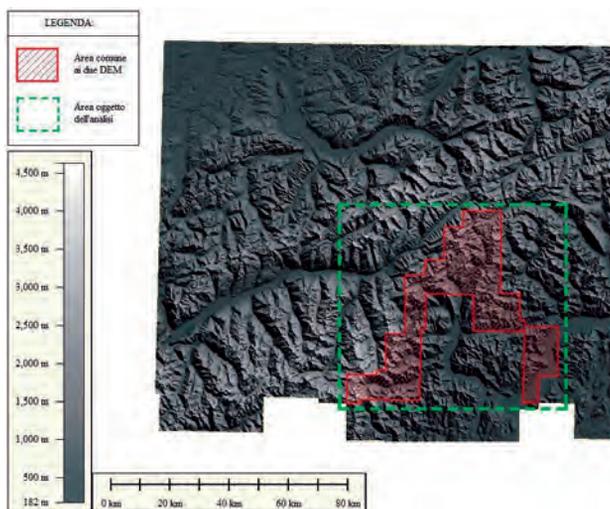


Figura 1. Visione d'insieme dell'area oggetto di studio

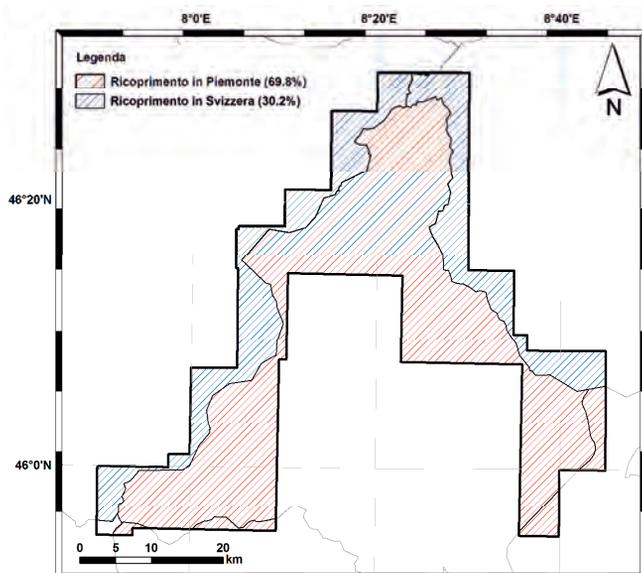


Figura 2. Sovrapposizione dei DTM nell'area oggetto di analisi

La Figura 2 mostra proprio le aree di sovrapposizione interessate dall'analisi, ed evidenzia le porzioni di area appartenenti al Piemonte (campitura rossa) e quelle appartenenti al territorio svizzero (campitura azzurra). Come si evince dalla Figura 2, la maggior parte dell'analisi è stata svolta comunque in territorio italiano (quasi il 70% dell'area di sovrapposizione è in Piemonte). La Tabella 1 riporta il dettaglio delle aree e delle percentuali di sovrapposizione lungo il confine.

Classe	Area	Percentuale
Aree piemontesi	1092 km ²	69.80%
Aree svizzere	471 km ²	30.20%
TOTALE	1563 km ²	-

Tabella 1. Aree piemontesi e svizzere nella zona di sovrapposizione oggetto dell'analisi

3 CONFRONTO DELLE ALTIMETRIE

La prima operazione svolta da quest'ultima sezione è stata il caricamento dei dati contenuti nei file di testo generati in precedenza. Si è proceduto dapprima all'eliminazione, per mezzo di una maschera, dei punti relativi al Lago Maggiore caratterizzati da un Δh costante pari ad 1 metro, evitando così che questi valori possano influenzare la statistica. Fatto ciò si è passato al calcolo delle differenze di quota $\Delta h = h_{\text{Svizzera}} - h_{\text{Piemonte}}$. Quando uno dei due valori era pari a NaN, il corrispondente Δh assumeva proprio il valore NaN ed è stato quindi facilmente eliminato prima di procedere al salvataggio su file di testo delle differenze. L'area di effettiva sovrapposizione sulla quale è stata svolta l'analisi statistica (Koch, 1987) è quindi visualizzata in Figura 3.

Sulle differenze di quota relative ai punti della zona di sovrapposizione, si sono eseguite diverse analisi statistiche secondo lo schema che segue:

- divisione in classi degli scarti e calcolo delle percentuali di appartenenza a tali classi,
- mappa degli scarti,
- tracciamento interattivo delle sezioni del terreno e del modello digitale degli scarti e loro analisi statistica,
- calcolo dei momenti campionari degli scarti di tutte le differenze,
- curva di frequenza relativa ed assoluta degli scarti,
- curva di frequenza assoluta del modulo degli scarti,
- verifica di adattamento ad una gaussiana e curva di frequenza empirica,
- carta probabilistica normale,
- test di adattamento di Pearson e test di Anderson-Darling.

Classi degli scarti. Per avere un'indicazione della distribuzione dell'entità degli scarti all'interno del nostro campione, si è deciso di dividerlo in classi e calcolare la numerosità di elementi all'interno di ciascuna di esse. Il risultato di questa operazione (Tab. 2) permette di notare come nel 95% dei casi, l'errore commesso sia inferiore a 50 m.

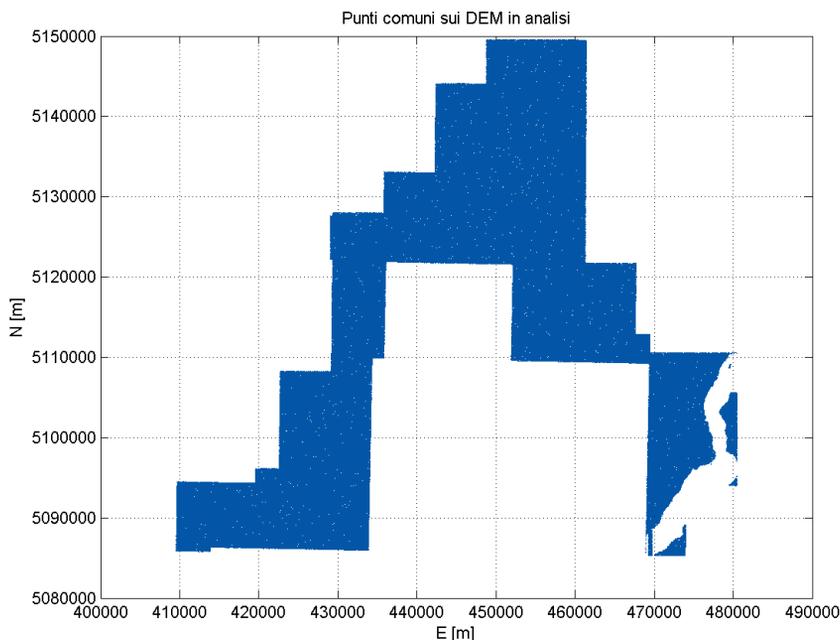


Figura 3. Area di effettiva sovrapposizione Piemonte –Svizzera

Classe	Limiti	Percentuale
1	$0 \leq |\Delta H| < 10 \text{ m}$	39.1 %
2	$10 \text{ m} \leq |\Delta h| < 50 \text{ m}$	55.2 %
3	$50 \text{ m} \leq |\Delta h| < 150 \text{ m}$	5.6 %
4	$|\Delta H| \geq 150 \text{ m}$	0.1 %

Tabella 2. Classi degli scarti e rispettive percentuali

Mapa degli scarti. Allo scopo di ottenere informazioni relative alla distribuzione spaziale degli scarti, seguendo la stessa classificazione appena illustrata, si è stampata una mappa dei punti assegnando a ciascuno di essi un colore in funzione della classe di appartenenza. Come si può notare dalla Figura 4, non esistono zone caratterizzate da anomalie particolarmente evidenti e soprattutto si può apprezzare come i Δh si modifichino in maniera graduale passando dal verde della classe 1 al nero della classe 4, senza però fare salti di classe. Queste considerazioni permettono di escludere la presenza di bias nella realizzazione dei DTM.

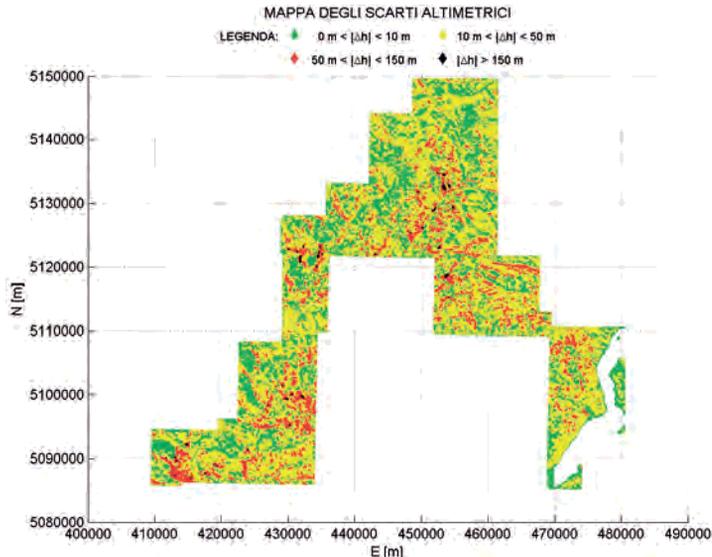


Figura 4. Mappa di distribuzione planimetrica degli scarti

Statistiche eseguite sulle sezioni. Al fine di permettere una visione d'insieme degli andamenti del terreno e degli scarti e poter interpretare più facilmente i risultati, si è realizzato un programma che consente di scegliere interattivamente uno o più punti in cui tracciare delle sezioni del terreno e del modello digitale degli scarti. I grafici contenenti le sezioni includono sia la sezione trasversale che quella longitudinale in un'unica finestra. Scegliendo sulla mappa degli scarti una zona ritenuta significativa, compare sulla mappa stessa un marker blu in corrispondenza del punto scelto e con esso vengono visualizzate le due linee di sezione (Figura 5) utilizzate per le statistiche.

In particolare si noti che le sezioni dei DTM (Figura 6 a sinistra), oltre a mostrare l'andamento del terreno derivante dall'interpolazione dei dati svizzeri e piemontesi, riportano anche il punto caratterizzato dal massimo Δh ed una linea in corrispondenza del punto di sezione per permettere una più rapida comprensione delle viste.

Le sezioni effettuate sul modello digitale degli scarti (Figura 6 a destra) mostrano invece l'andamento dei Δh lungo gli allineamenti prescelti, permettendo così di individuare in modo immediato eventuali errori sistematici o variazioni anomale delle differenze di quota.

Risultati del confronto sulle sezioni. Le conclusioni che possono essere tratte dall'analisi di queste sezioni sono principalmente due:

1. il DTM della Svizzera sembra essere sistematicamente al di sopra di quello del Piemonte, il valore di tale scostamento non risulta tuttavia significativo,
2. sull'andamento degli scarti non si notano particolari anomalie o sistematismi che facciano pensare alla presenza di un bias nei DTM.

Per verificare quanto è stato evinto dall'analisi qualitativa dei DTM in possesso, si è passati all'analisi statistica dei dati.

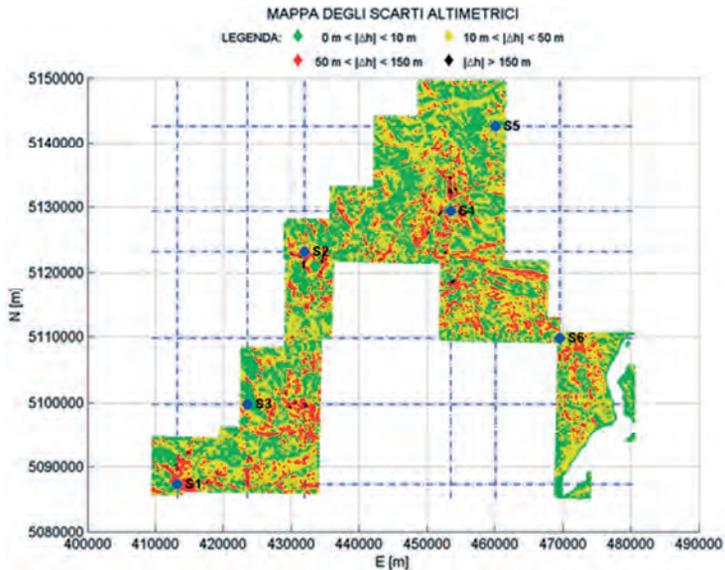


Figura 5. Individuazione del punto di sezione

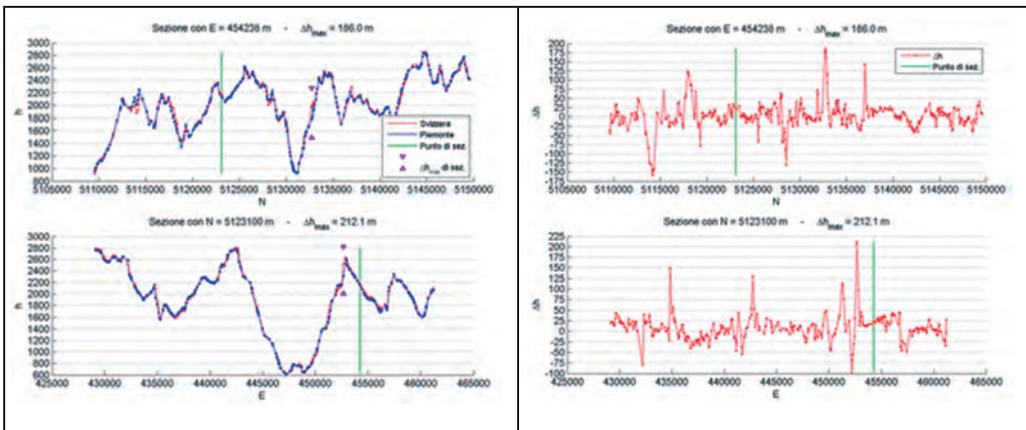


Figura 6. Esempio di sezione longitudinale e trasversale del terreno (sinistra) con relativi scarti (destra)

Analisi statistica su tutto il campione. Il campione costituito dalle differenze di quota viene trattato da un punto di vista prettamente statistico, in particolare vengono calcolati i momenti campionari per avere un'indicazione del valore medio dei Δh e della loro dispersione, dopodiché viene individuata, qualora possibile, la distribuzione di probabilità dalla quale il campione è stato estratto. Per avere un'idea immediata dell'andamento dei dislivelli si sono valutate alcune grandezze ritenute significative, ovvero i momenti campionari:

Media	Mediana: Me	sqm: σ	skewness: g	kurtosis: k
1.3 m	0.8 m	26 m	0.2	4.7

Tabella 3. Momenti campionari

Per quanto invece riguarda la possibile distribuzione generatrice del campione, poiché il coefficiente di asimmetria è circa nullo, si può pensare che le differenze di quota ottenute si distribuiscano su una Normale. Allo stesso tempo si nota che l'indice di appiattimento k è positivo, ciò significa che la curva di densità di probabilità del campione è leptocurtica.

Con il fine di verificare l'adattamento del campione ad una distribuzione Normale si sono anche valutate le curve di frequenza, la curva di frequenza empirica, la carta probabilistica normale ed i test di Pearson (χ^2) ed Anderson-Darling (A^2), che confermano quanto affermato relativamente al campione.

Frequenza relativa degli scarti. Dopo aver diviso il campione in classi, si sono determinate le frequenze relative e le frequenze cumulate di ciascuna classe. I risultati di questa operazione, visibili nella Figura 7, confermano le affermazioni fatte in precedenza relativamente alla simmetria ed al grado di appiattimento del campione. La curva di frequenza evidenzia inoltre come a distanza di $\pm\sigma$ dal valore medio, esistano ancora scarti caratterizzati da frequenze elevate e come le code della distribuzione siano poco pesanti ma al contempo molto lunghe.

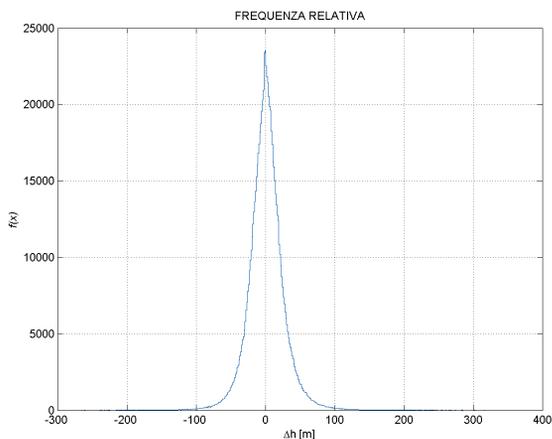


Figura 7. Funzione di frequenza relativa degli scarti

4 CONFRONTO TRA I DUE DTM PIEMONTESI (50 M E 10 M) E IL DTM LOMBARDO (20 M)

Con lo scopo di verificare se i sistematismi in quota ottenuti dal confronto tra il DTM di Regione Piemonte (50 m) e quello svizzero (25 m) fossero presenti anche rispetto al DTM della Regione Lombardia sono state condotte ulteriori analisi tra:

1. DTM Piemonte (50 m - DTMRP) e DTM Lombardia (20 m - DTMRL),
2. DTM Piemonte (50 m - DTMRP) e DTM Piemonte Est (10 m - DTMPE).

I seguenti confronti avevano lo scopo di indagare l'eventuale esistenza di altri sistematismi nei valori di quota del DTM piemontese, e pertanto sono stati condotti in modo più spedito utilizzando un programma commerciale piuttosto che i programmi sviluppati dal Politecnico di Milano o dal Politecnico di Torino. Attraverso tale programma è stato infatti possibile combinare insieme i diversi DTM, sottraendo al primo le quote del secondo.

Per quanto riguarda le aree considerate nel confronto, queste sono inferiori rispetto a quelle coinvolte nella verifica di coerenza tra DTM Regione Piemonte e DTM svizzero. Se in quest'ultimo caso infatti il confronto era stato condotto su un'area di oltre 1500 km², la sovrapposizione tra DTM piemontese e DTM lombardo è di soli 34 km², mentre quella tra i due DTM piemontesi è di circa 1000 km². Le immagini seguenti riportano la sovrapposizione tra i diversi DTM utilizzati. I risultati dei confronti sono stati rappresentati in Figura 9 in toni di verde/rosso in funzione dell'entità dello scarto tra le due quote. In particolare, con toni di verde sono stati individuati gli scarti positivi (DTM Regione Lombardia è situato sopra a DTM Regione Piemonte, oppure il DTM del Piemonte è situato sopra al DTM Piemonte est), mentre i toni di rosso identificano gli scarti negativi.

I risultati del confronto sono riportati nella Figura 9 e statisticamente in Tabella 4.

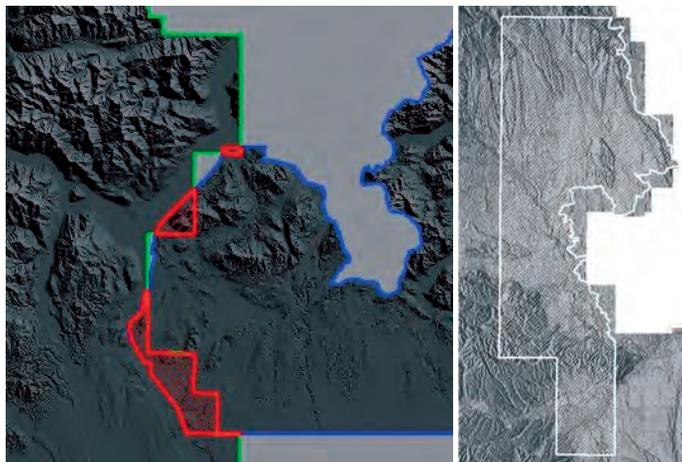


Figura 8. Aree confrontate tra DTMRL-DTMRP (a sinistra) e tra DTMRP-DTMPE (a destra)

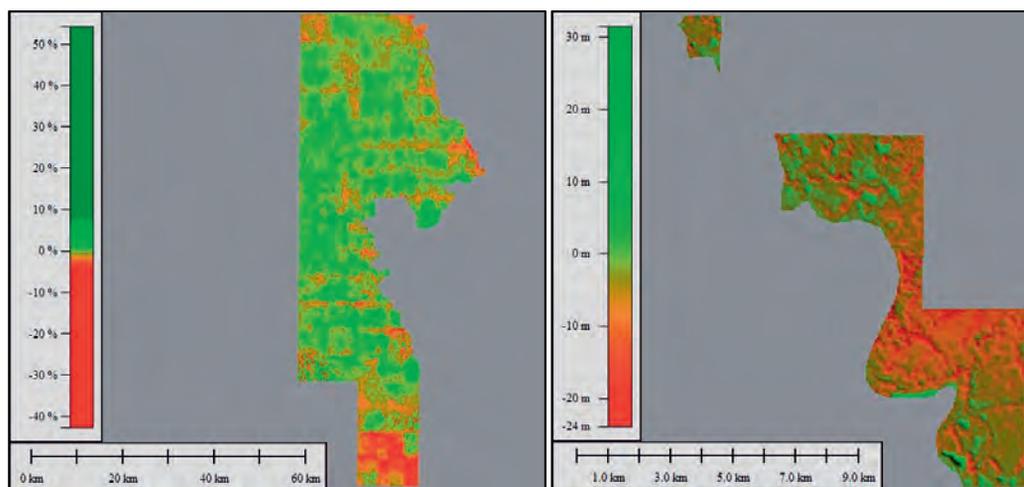


Figura 9. Risultati del confronto tra DTMRL-DTMRP (a sinistra) e DTMRP-DTMPE (a destra)

	DTMRL - DTMRP	DTMRP - DTMPE
Media	3.5 m	-0.3 m
Sqm	1.5 m	1 m
Δ Max	33 m	100 m
Δ Min	-26 m	-121 m

Tabella 4. Risultati del confronto tra i DTM

Dai risultati sopra riportati si evince ancora la presenza di un sistematismo legato al DTM di Regione Piemonte, che risulta sempre a quote inferiori rispetto agli altri DTM utilizzati.

Tale sistematismo è evidente nel caso del primo confronto (con il DTMRL) e meno nel secondo caso. Tuttavia, l'area di confronto elevata a disposizione della seconda analisi (l'intera superficie del DTMRP) consente di mettere in risalto un comportamento anomalo degli scarti, con un andamento "a griglie".

Gli ingrandimenti riportati in Figura 10, relativi alla parte sud del DTMRP (nei pressi della città di Alessandria) evidenziano ancora di più questo andamento, che risulta essere coerente non solo con la suddivisione in fogli della cartografia regionale 1:10000 della Regione Piemonte, ma anche con la primitiva assegnazione a lotti diversi della cartografia fotogrammetrica avvenuta durante la realizzazione della stessa dalla quale ha avuto origine il DTM a passo 50 m della Regione Piemonte.

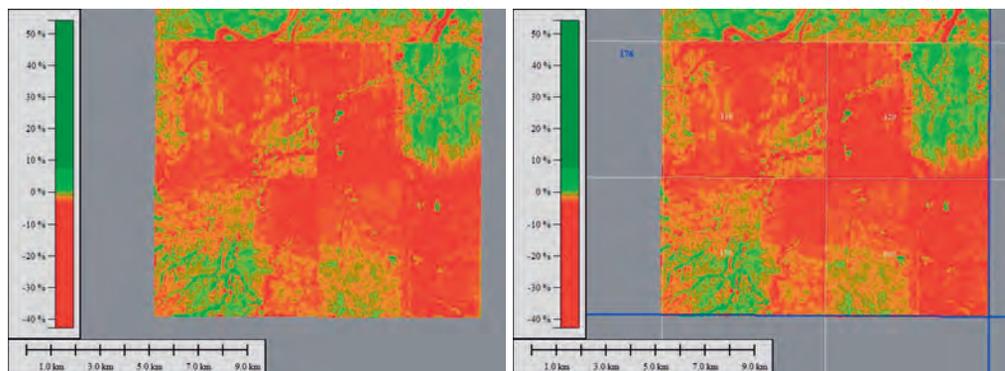


Figura 10. Andamento degli scarti nel confronto DTMRP-DTMPE: ingrandimento della parte sud e coerenza con la suddivisione in fogli della Carta Tecnica Regionale 1:10000

5 CONFRONTO TRA DTM REGIONE PIEMONTE E DTM LiDAR PST-A

Il confronto fra il DTM della Regione Piemonte con risoluzione 50 m e il DTM LiDAR PST-A è stato effettuato lungo la valle del fiume Sesia (Figura 11).

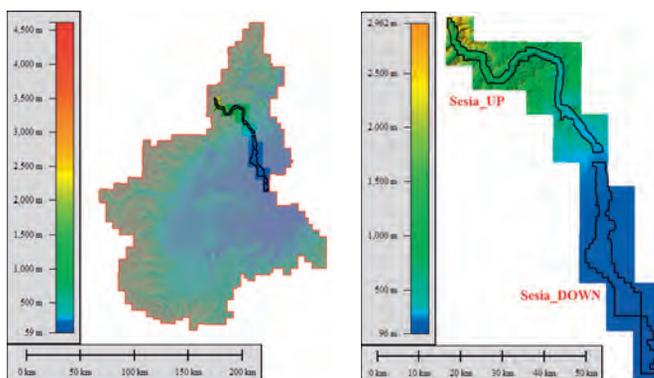


Figura 11. A sinistra: individuazione dell'area oggetto dell'analisi; a destra: suddivisione della valle del fiume Sesia nelle due porzioni Sesia_UP (zona montuosa) e Sesia_DOWN (zona pianeggiante)

	Quota max	Quota min	Superficie
Sesia UP	2962 m	238 m	110 km ²
Sesia DOWN	277 m	96 m	190 km ²

Tabella 5. Dati delle due zone oggetto di studio

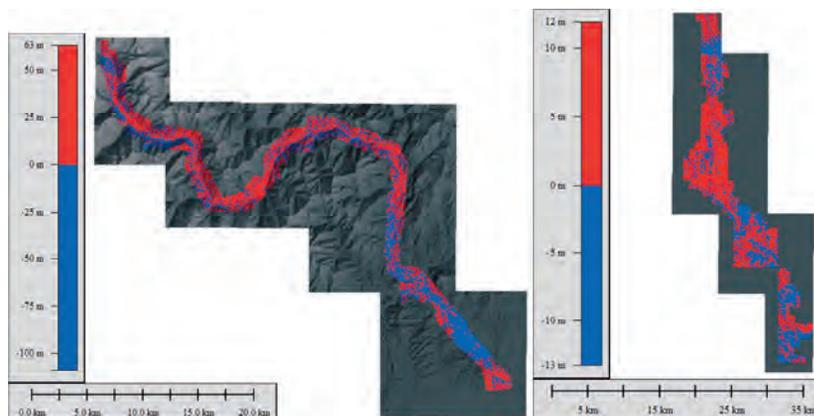


Figura 12. A sinistra viene riportata la porzione del DTM a 50 m utilizzato per l'analisi sulla parte montuosa della valle; mentre a destra quella utilizzata per l'analisi sulla parte pianeggiante della valle

La valle in esame è caratterizzata da una parte montuosa ed una prevalentemente pianeggiante, quindi per il confronto sono state prese in considerazione in modo separato le due aree suddette in modo da poter valutare se e come la conformazione territoriale potesse influenzare l'analisi. Nella Tabella 5 sono riportati alcuni dati significativi delle due aree in esame.

La Figura 12 mostra gli andamenti degli scarti nei due casi in esame e permette di evidenziare la presenza di correlazione tra l'andamento dei versanti e quello degli scarti nella zona montuosa (Figura 12 a sinistra) e l'assenza di correlazione spaziale nella zona pianeggiante della valle (Figura 12 a destra), in corrispondenza della quale i valori di scarto si riducono fortemente, come è possibile osservare nella Tabella 6.

DTM R. Piemonte <=> DTM PST-A	Scarto	
Zona montuosa	60 m	-100 m
Zona pianeggiante	12 m	-13 m

Tabella 6. Valori di scarto in corrispondenza delle due zone in esame

Proprio a causa della morfologia del territorio si è quindi deciso di stimare il valore delle traslazioni fra il DTM Regione Piemonte ed il DTM PST-A tramite il calcolo del coefficiente di correlazione lineare fra i due DTM. Si sono scelte otto aree estratte dal DTM PST-A a 1 m delle dimensioni di circa 2.5 km × 2.5 km (visibili nella Figura 13), all'interno di ciascuna delle quali è stata cercata la corrispondenza con due DTM a 50 m della dimensione di 1 km × 1 km.

Per ciascuna delle aree in esame è stato ricercato il massimo valore di correlazione con la corrispondente porzione di DMT ad 1 m, ottenendo così il valore di traslazione da applicare al *lowerleft corner* di ciascun DTM 50 m. Effettuati i calcoli è stato possibile ricavare un valore medio della traslazione in Est ed in Nord, visibile in Tabella 7.

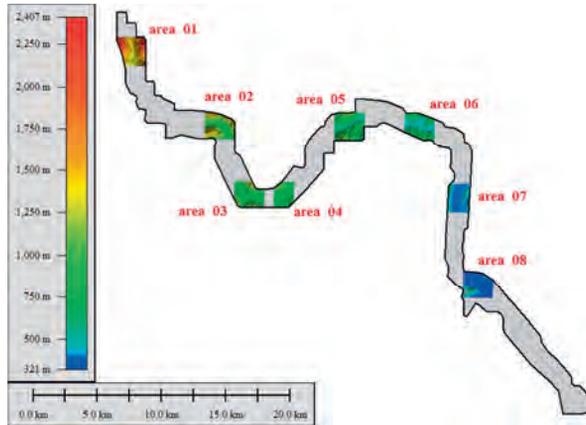


Figura 13. Aree di lavoro per il calcolo dei coefficienti di correlazione

Traslazione Est	0.3 m
Traslazione Nord	6.6 m
|Traslazione|	7.4 m

Tabella 7. Valori medi delle traslazioni dell'area oggetto di studio

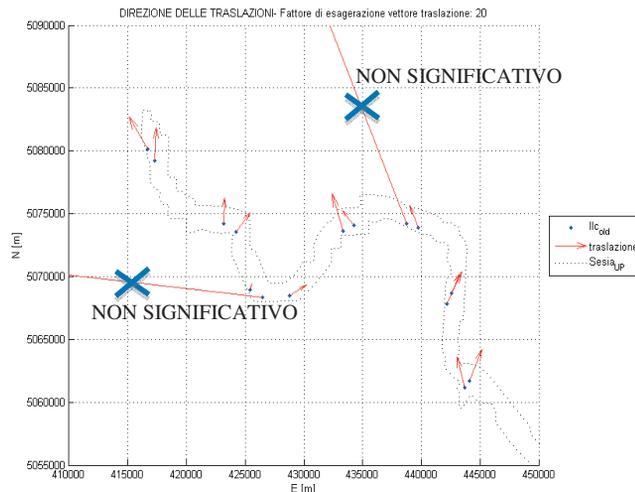


Figura 14. Traslazioni da applicare al DTM 50 metri (in blu si sono indicati i valori non significativi)

Analizzando i risultati ottenuti dai test condotti e la corrispondente rappresentazione grafica di Figura 14 si possono fare le seguenti osservazioni.

- I coefficienti di correlazione lineare sono tutti superiori al 97%, tranne che in due casi messi in evidenza in figura, nei quali anche le traslazioni non sono significative.

- Il valore di traslazione in Est assume sia valori positivi che negativi con media circa nulla portando quindi a pensare che non esistano sistematismi in questa direzione.
- La traslazione in Nord è sempre positiva e con una media pari a circa 7 m. In questo caso ci si può attendere che questo risultato implichi la necessità, al fine di riallineare correttamente il DTM 50 metri di Regione Piemonte, di una sua traslazione sistematica.

Al fine di validare quanto affermato e di stabilire quale fra i DTM in esame sia corretto e di conseguenza quale sia la direzione di applicazione della traslazione ottenuta dalle precedenti analisi, si sono effettuati una serie di rilievi topografici GNSS su pendii privi di ostacoli (alberi, edifici, etc.) e facilmente individuabili su ambedue i DTM. Questo ha permesso di ricavare delle piccole nuvole di punti (circa 650 suddivisi su sette aree indicate con i triangoli blu nella Figura 15), che sono state interpretate come la “verità” da confrontarsi con i due DTM in esame.

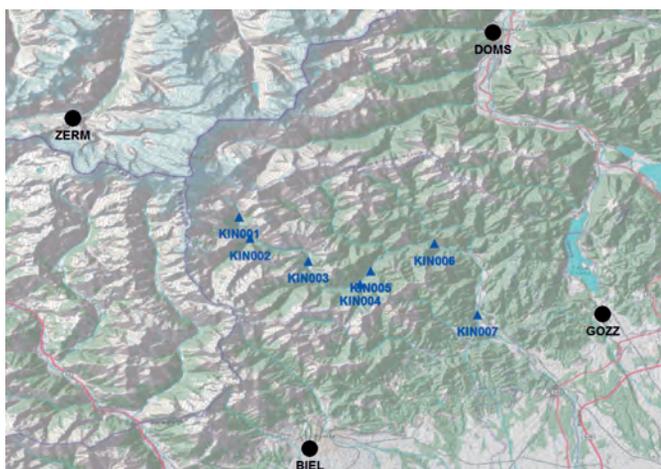


Figura 15. Area in cui sono stati effettuati i rilievi GNSS

Il rilievo GNSS è stato effettuato utilizzando la rete di stazioni permanenti HELI-DEM, lavorando su sette differenti aree poste lungo il corso del fiume Sesia. Tali zone, disposte su entrambe le sponde idrografiche del fiume sono state scelte a quote differenti per valutare anche il comportamento della rete di stazioni permanenti al variare della quota di lavoro.

Il rilievo effettuato consta di una serie di misure NRTK, del tipo “stop&go” (della durata di circa 5 secondi), effettuate utilizzando due diversi prodotti di rete, ovvero VRS e MAC. Sono inoltre stati acquisiti anche i dati grezzi per effettuare un’ulteriore verifica di coerenza fra le coordinate dei punti in tempo reale (RTK) e quelle ottenute dal post-processamento dei dati (PPK).

La validazione dei due DTM è stata effettuata secondo il seguente procedimento.

- Post-processamento dei dati GNSS: si ricavano così le coordinate dei punti relativi a ciascun rilievo.

- Conversione quote ortometriche: le altezze ellissoidiche risultato del processamento GNSS sono state convertite in quote ortometriche attraverso un programma implementato in linguaggio FORTRAN e sviluppato dal Politecnico di Torino, ottenendo così le nuvole di punti che rappresentano la verità per il confronto.
- Estrazione delle altezze dai DTM: per ciascun punto GNSS si sono calcolate, tramite interpolazione bicubica dei dati di altezza dei due DTM, le quote relative alla sua posizione planimetrica.
- Confronto con i punti GNSS: le altezze così ricavate sono state confrontate con quelle PPK e ciascun punto è stato classificato in funzione del Δh così ottenuto.

Per quanto riguarda il DTM PST-A, i risultati dell'analisi effettuata mostrano come la quasi totalità dei punti rilevati presenti uno scarto altimetrico inferiore a 0.5 m, assolutamente compatibile con l'accuratezza altimetrica dello stesso DTM (migliore del metro). Questo sembrerebbe indicare che la discrepanza fra il DTM Regione Piemonte ed il DTM PST-A, sia dovuta ad una traslazione del primo.

Per avere conferma di quanto appena detto, si sono confrontati anche il DTM Regione Piemonte con i punti PPK (Figura 16 a destra). Il confronto fra il DTM della Regione Piemonte ed i punti rilevati, mostra come fra questi due non vi sia quasi mai coerenza, fatta eccezione per un solo punto che però è caratterizzato da un terreno relativamente pianeggiante e di conseguenza risulta essere poco significativo.

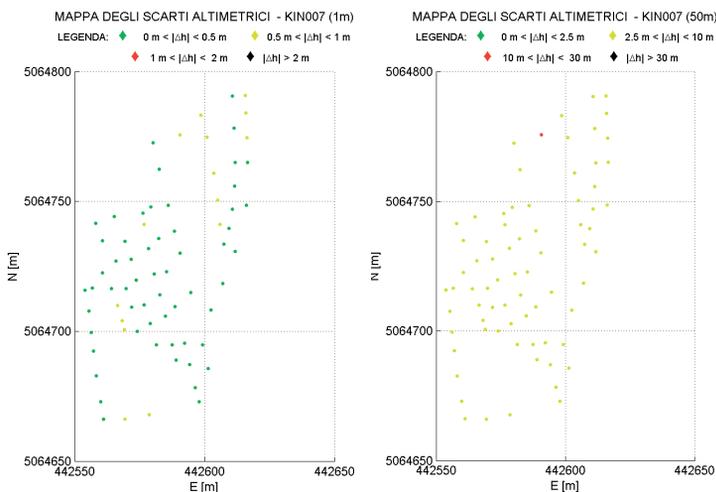


Figura 16. Mappa degli scarti altimetrici in uno dei punti in esame (KIN007). A sinistra confronto PPK-DTM PST-A, a destra PPK-DTM Regione Piemonte

Questa considerazione è confermata dalla Figura 17 in cui si nota come nel caso di terreno pianeggiante (a quota h_1 e h_2) la presenza di una traslazione fra terreno stesso (punti PPK) ed il DTM, possa non venir rilevata, a differenza invece dei punti scelti su pendii (punto a quota

h_3) per i quali una leggera traslazione planimetrica implica un evidente scostamento altimetrico.

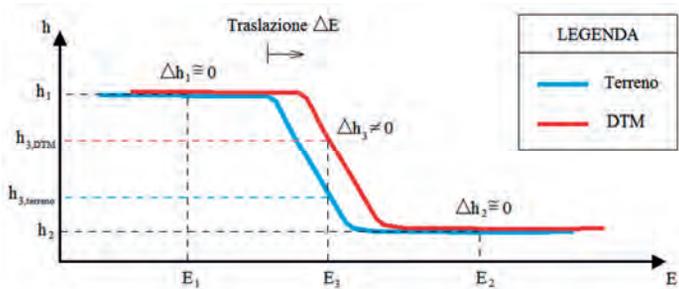


Figura 17. Possibili problematiche di errori in quota legate alla morfologia del terreno e ad una traslazione planimetrica dei DTM

In Figura 18 è riportato un esempio dell'andamento dei Δh in funzione dell'altezza del punto rilevato, in cui si è evidenziato con la doppia linea tratteggiata rossa, il limite di accettabilità dello scarto imposto dall'accuratezza di ciascun DTM. Ciò che si può immediatamente notare, è come nel caso del DTM PST-A esistano solo pochi punti al di fuori della sua accuratezza altimetrica (± 1 m) (Rees, 2000), mentre nel caso del DTM Regione Piemonte si hanno scarti ben superiori e quasi costantemente oltre il valore di ± 2.5 m.

Un altro aspetto che è stato evidenziato da questa rappresentazione è l'esistenza di una correlazione fra l'entità dello scarto e la quota del punto. Tale relazione è particolarmente evidente nei casi relativi al DTM a 50 m della Regione Piemonte (grafico riportato a destra nella Figura 18).

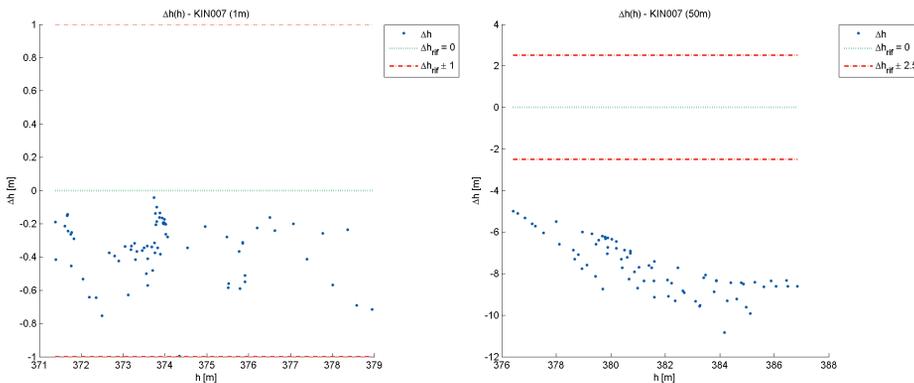


Figura 18. Δh in funzione h , per DTM LiDAR (a sinistra) e DTM Regione Piemonte (a destra) in una sezione analizzata

Il risultato di queste analisi porta a concludere che il DTM PST-A risulta assolutamente compatibile con il reale andamento del terreno, a differenza del DTM Regione Piemonte.

BIBLIOGRAFIA (COMUNE DELLE DUE SEZIONI DEL CAPITOLO)

Altamimi Z., Collilieux X., Métivier L., ITRF2008, *An improved solution of the international terrestrial reference frame*, Journal of Geodesy, Vol. 85 Issue 8, 2011.

Barzaghi R., Borghi A., Carrion D., Sona G., *Refining the estimate of the Italian quasi-geoid*. Bollettino di Geodesia e Scienze Affini, 3, 2007.

Biagi L. et Sansò F. eds., AAVV, *Il Servizio di Posizionamento in Regione Lombardia e la prima sperimentazione sui servizi di rete in tempo reale*, Bollettino SIFET n° 3, 2006.

Brovelli M. A., Caldera S., and Liu X., *3D comparison of DTMs without the use of homologous points*, in Proceedings of 6th International Symposium on Digital Earth, (Beijing, China), 2009.

Dermanis A., Biagi L., *Il telerilevamento, informazione territoriale mediante immagini da satellite*, 280 pp. e CD con esempi numerici, CEA Editrice, Milano, 2002.

Kidner D.B., Dorey M., Smith D., *What's the point? Interpolation and extrapolation with a regular grid DEM*.

Koch K.-R., 1987. *Parameter estimation and hypothesis testing in linear models*. Springer, Berlin, 378pp.

Li Z., Zhu Q., Gold C., *Digital terrain modeling: principles and methodology*, CRC, Boca Raton, 2005.

Rees W.G., *The accuracy of digital elevation model interpolated to higher resolutions*. International Journal of Remote Sensing, vol. 21, no.1, pp. 7-20, 2000.

Surace L., *Il progetto IGM95*, Bollettino di Geodesia e Scienze affini, Anno LII, N° 3, 1993

Surace L., *La nuova rete geodetica nazionale IGM95: risultati e prospettive di utilizzazione*, Bollettino di Geodesia e Scienze affini, Anno LVI, N° 2, 1997

CAPITOLO 7

CAMPAGNE DI MISURA NELL'AMBITO DEL PROGETTO HELI-DEM: LIVELLAZIONI GEOMETRICHE DI PRECISIONE E RILIEVI GNSS

Piera Belotti (1), Paolo Dabove (2), Ambrogio Maria Manzino (2), Gian Bartolomeo Siletto (3), Cinzia Taglioretti (2)

(1) Regione Lombardia, DG. Territorio Urbanistica e Difesa del Suolo, UO. Strumenti per il Governo del Territorio, P.zza Città di Lombardia 1, 20124, Milano

(2) Politecnico di Torino, DIATI, Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture, Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino

(3) Regione Piemonte, Direzione programmazione strategica, politiche territoriali ed edilizia, Settore Infrastruttura geografica, strumenti e tecnologie per il governo del territorio, Corso Bolzano, 44, 10121, Torino

SOMMARIO

Nell'ambito del Progetto HELI-DEM sono state commissionate ed eseguite linee di livellazioni sia in Regione Piemonte che in Regione Lombardia. Lo scopo di tali campagne era triplice: connettere il sistema altimetrico italiano a quello svizzero, chiudere anelli di livellazione italiani che IGM non aveva ancora completato, valutare l'ondulazione del geoide attraverso misure congiunte GNSS su alcuni capisaldi livellati e così confrontare le differenze di ondulazione con quelle disponibili nei tre modelli di geoide gravimetrico disponibili per il Progetto.

Le linee di livellazione sono state misurate e collaudate in entrambe le Regioni italiane. Il presente articolo propone un approfondimento dei controlli eseguiti sulla rete di livellazione del Piemonte.

ABSTRACT

In the HELI-DEM project some leveling lines have been commissioned and performed both in the Piedmont and Lombardy Region. The goal of these campaigns was threefold: to connect the Italian height system to the Swiss one, to close some Italian leveling rings that IGM had not yet completed and finally to evaluate the geoid undulation through joint GNSS measures on some well-known leveled points, in order to compare the differences between these results of geoid undulation with those available by the three gravimetric geoid models available for the Project.

The leveling lines have been measured and tested in both Italian regions. This article proposes a study carried out on the Piedmont leveling network.

1 INTRODUZIONE

Il presente capitolo vuole essere un approfondimento circa la progettazione e l'esecuzione di campagne di livellazione geometrica di alta precisione svolte nell'ambito del Progetto HELI-DEM, con l'obiettivo di valutare quanto il modello di geoide ottenuto a partire dalle livellazioni concordi con i modelli disponibili nell'ambito del Progetto e descritti nel Cap. 3. I dati provenienti dalle campagne di livellazione di alta precisione, commissionate da Regione Piemonte e Regione Lombardia, sono stati inoltre inseriti nel database dell'Istituto Geografico Militare (IGM), ente che ha collaudato sia le campagne di misura sia il trattamento dei dati.

Per poter effettuare i confronti descritti in precedenza, si è reso necessario andare a considerare le quote ortometriche provenienti dalle livellazioni con altezze ellissoidiche derivanti da rilievi GNSS svolti in prossimità delle linee di livellazione. Tale operazione ha perciò previsto un posizionamento su capisaldi IGM95 in modalità statica con strumentazione GNSS doppia frequenza e multi costellazione. Nonostante siano state svolte campagne di misura in entrambe le Regioni, parleremo qui in modo approfondito dei soli controlli eseguiti sulla rete di livellazione del Piemonte.

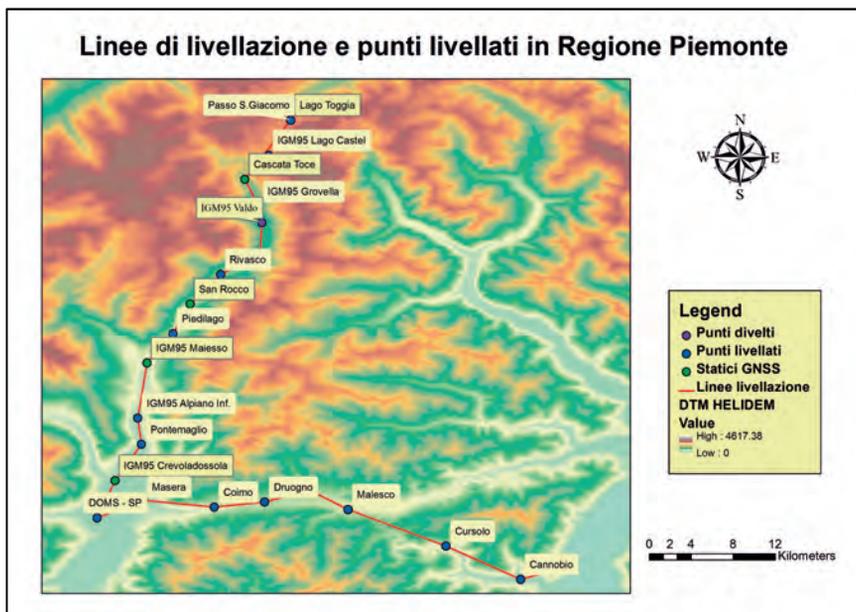


Figura 1. Traccianti delle livellazioni, capisaldi livellati e punti IGM95 rilevati in modalità statica GNSS

L'istituzione di capisaldi GNSS aventi coordinate affidabili si è reso necessario in quanto le stazioni permanenti (SP) della rete creata nell'ambito del Progetto (Cap. 5) non garantivano una copertura spaziale ottimale per la determinazione delle altezze ellissoidiche tramite misure GNSS. Si è perciò reso necessario effettuare rilievi statici su punti che potessero

costituire una sorta di nuove “stazioni permanenti”, dai quali l’IGM potesse agganciare, anche con singole baselines, i punti da livellare sia con livellazione geometrica di precisione sia con livellazione GNSS. La scelta di istituire tale capisaldi in connessione ad almeno tre stazioni della rete GNSS HELI-DEM è data dal fatto che si voleva creare una vera e propria rete di punti aventi coordinate note con notevole precisione, andando a connettere tali vertici ad almeno tre SP grazie a sessioni di misura di lunga durata; lungo la linea IS (percorso Nord – Sud) infatti non esistevano tre vere stazioni permanenti, aventi interdistanze inferiori a 50 km, che potessero permettere il raggiungimento delle precisioni desiderate.

2 CAMPAGNE DI MISURA GNSS

Le campagne di misura GNSS descritte in questo capitolo sono state articolate in diverse giornate a partire dai mesi estivi fino ai mesi autunnali del 2012. Alcuni capisaldi da livellare appartengono alla rete IGM95, altri alla rete svizzera, ed altri ancora a reti regionali e provinciali. Prima di procedere con le operazioni di misura, durante i sopralluoghi si è verificato in loco che tutti i capisaldi scelti “a tavolino” non fossero stati rimossi: quando invece si è riscontrata tale evenienza, si è provveduto ad effettuare nuove monumentazioni, secondo le specifiche dell’IGM, in luoghi opportunamente protetti. La scelta è avvenuta facendo in modo che il dislivello tra due punti successivi su cui stazionare fosse al massimo pari a 500 m, in modo da limitare quanto più possibile i bias troposferici del segnale GNSS, decisamente non trascurabili nel posizionamento differenziale se il dislivello tra i punti è notevole.

Le preventive operazioni di ricognizione in sito hanno quindi permesso, come già detto in precedenza, di individuare i capisaldi che successivamente sarebbero stati livellati e di monumentarne di nuovi ove è stato ritenuto necessario. Nel comune di San Rocco si è deciso infatti di collocare un nuovo caposaldo in posizione più rientrata rispetto alla strada, per non essere disturbati da salti di fase (*cycle slip*) dovuti ai passaggi frequenti di mezzi di trasporto pesanti e per proteggere il caposaldo stesso dall’azione delle pale spartineve. Un altro caposaldo, sito in corrispondenza della diga del lago Toggia, è stato monumentato per evitare di dover effettuare una deviazione di 700 m dal percorso della livellazione, come sarebbe accaduto se si fosse utilizzato il caposaldo IGM95 del lago Castel (come visibile nella Figura 2). Un ulteriore caposaldo è stato monumentato nei pressi di Crodo, in quanto un caposaldo della rete IGM95 dislocato nei pressi del paese è stato rimosso da ignoti.

A partire dal mese di giugno si sono condotte le campagne di misura GNSS, prima in corrispondenza dei siti di bassa quota (Crevoladossola e Maiesso - comune di Premia) ed in seguito per capisaldi in alta quota (cascata del fiume Toce, dove è dislocato il caposaldo Rete GPS 2005 della provincia di Verbania, e diga del lago Toggia), onde evitare di incorrere in condizioni climatiche avverse dovute all’avvicinarsi dei mesi autunnali. Nel mese di ottobre è stato poi eseguito l’ultimo rilievo nei pressi del comune di San Rocco di Premia, sito all’incirca a metà della linea di livellazione che si estende lungo la Val Formazza. Nella Tabella 1 sono riportate le coordinate dei punti oggetto dei rilievi GNSS statici.

3 TRATTAMENTO DEI DATI GNSS IN POST-ELABORAZIONE

Il trattamento dei dati GNSS ottenuti dai rilievi di lunga durata è stato effettuato utilizzando tre diversi software, uno di tipo commerciale, uno scientifico (Bernese GPS Software 5.0) ed un terzo di caratteristiche intermedie tra i due precedenti (NDA Professional), con l'intento di determinare le coordinate dei punti oltre che di confrontare le precisioni di posizionamento ricavabili da ciascun programma di elaborazione.

Siti di misura	E [m]	N [m]	h [m]
Crevoladossola	446072.105	5111053.504	361.687
Maiesso	448290.216	5122218.306	602.189
San Rocco	451167.761	5127779.427	807.540
Cascata del Toce	454872.038	5139615.957	1735.243
Diga Lago Toggia	456268.347	5142775.519	2246.489

Tabella 1. Coordinate dei capisaldi IGM95

Il software commerciale ha permesso la post-elaborazione dei dati in modalità *singola base*, ovvero l'elaborazione dei dati del *rover* con quelli di una sola stazione permanente di riferimento (detta anche *master*) volta per volta. I singoli vettori di base (*baseline*) sono poi stati compensati in rete con lo stesso software.

La compensazione delle *baselines*, ha consentito di mettere in luce quali stazioni permanenti potessero influenzare positivamente o negativamente la qualità del risultato di posizionamento. Considerando le elaborazioni effettuate col software commerciale, si è osservato infatti che la stazione permanente di Andermatt influisce negativamente sulla qualità del posizionamento dei punti di stazione a bassa quota, proprio perché la differenza di quota tra master e rover è notevole (Andermatt è sita a circa 1500 m di quota, mentre le due stazioni di misura dislocate a quote più basse sono a circa 400-500 m) ed inoltre la loro interdistanza è elevata (oltre 60 km).

Queste osservazioni hanno permesso di identificare le caratteristiche che sono state ritenute idonee per la scelta delle stazioni *master* per la compensazione dei capisaldi tramite l'utilizzo del software commerciale.

- Distanze master - rover minori di 50 km.
- La variabilità di quota tra master e rover non deve essere eccessiva, tale cioè da inficiare la qualità del risultato di posizionamento (ad esempio trattando i dati con il metodo singola base si è osservato che anche il trattamento dei dati della stazione di Jungfrau Joch (3634 m) determinava in alcuni casi un peggioramento nel risultato di posizionamento).
- A seconda della dislocazione delle stazioni di misura si sono quindi utilizzate stazioni permanenti diverse: ad esempio per i siti di alta quota si sono utilizzate anche alcune stazioni permanenti di alta quota che sono state ovviamente quindi escluse dal trattamento dei dati di Crevoladossola (a quota molto più bassa); per il calcolo del

vertice della diga del lago Toggia (ad alta quota) non si è fatto invece ricorso a Gavirate, stazione di bassa quota collocata a più di 50 km di distanza.

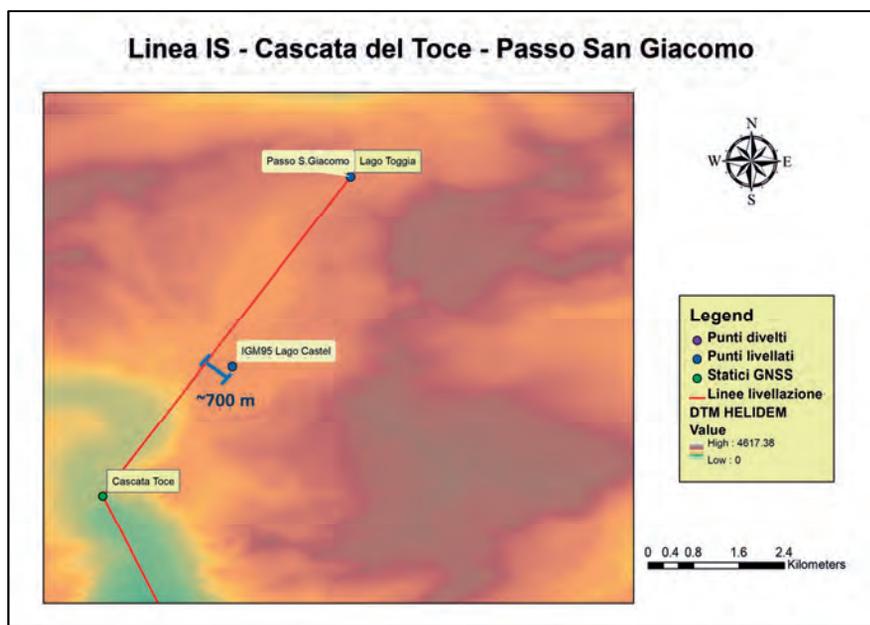


Figura 2. Stralcio carta IGM 1:25000. In rosso è mostrata la linea di livellazione IS da Passo San Giacomo a Riale; in giallo la deviazione di circa 700 m in direzione del caposaldo IGM95 del Lago Caste

Anche nel trattamento con Bernese 5.0 e NDA Professional è stata fatta una scelta delle stazioni idonee a ricoprire il ruolo di master nella compensazione.

Le stazioni scelte come riferimento sono state¹:

1. nel caso di *Crevoladossola*: Domodossola, Gavirate e Zermatt,
2. nel caso di *Maiesso*: Andermatt, Domodossola, Gavirate, Jungfrau, Zermatt,
3. nel caso di *San Rocco*: Andermatt, Domodossola, Gavirate, Locarno Monte e Zermatt,
4. nel caso della cascata del *fiume Toce* e della diga *lago Toggia*: Andermatt, Domodossola, Jungfrau, Locarno Monte e Zermatt (visibili in Figura 3).

¹ Il numero di stazioni permanenti utilizzate per il trattamento dei dati varia a seconda dei parametri identificati sopra, ma anche in base all'effettivo corretto funzionamento delle stesse stazioni. Nella giornata nella quale si è effettuato il rilievo si è riscontrato in alcuni casi un cattivo funzionamento di alcune stazioni permanenti limitrofe al rover, che quindi sono state escluse dall'analisi.

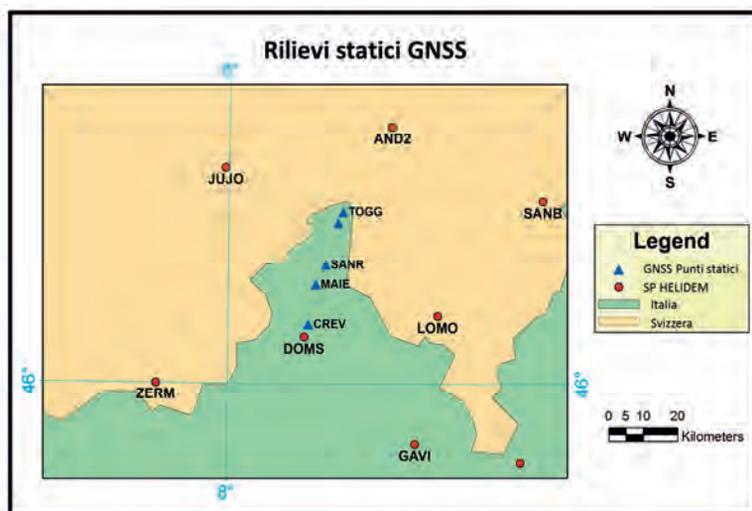


Figura 3. Configurazione delle SP della rete HELI-DEM utilizzate nel trattamento dei dati (in rosso) rispetto ai punti oggetto del rilievo (in blu)

Il software NDA Professional, pur trattando i soli dati GPS ha permesso infatti, nei casi in esame, il raggiungimento di risultati molto simili a quelli ottenuti con il Bernese 5.0. L'utilizzo dei tre diversi software ha consentito un confronto tra le coordinate ottenute da tali processamenti con quelle provenienti da una successiva compensazione di rete eseguita dall'IGM. Quest'ultimo confronto ha fornito ottimi riscontri sia con il software Bernese 5.0 che con NDA Professional. La maggior precisione e la capacità di trattare un gran numero di effetti sistematici (ad esempio la possibilità di introdurre la precisione delle coordinate a priori dei punti, le effemeridi precise, le orbite dei satelliti, le maree terrestri, ecc.), ha portato all'adozione dei risultati ottenuti col Bernese 5.0 come valori di riferimento. Il confronto dei risultati è mostrato nella Tabella 2.

Sito di misura	h [m]	Software commerciale – Bernese						
		ΔX [m]	ΔY [m]	ΔZ [m]	ΔE [m]	ΔN [m]	Δh [m]	
Crevoladossola	361.687	-0.014	0.014	0.009	0.015	0.015	-0.002	
Maiesso	602.189	-0.014	0.017	-0.006	0.019	0.003	-0.013	
San Rocco	807.540	-0.079	-0.049	-0.066	-0.037	0.016	-0.106	
Cascata Toce	1735.243	0.010	-0.004	0.000	-0.006	-0.006	0.006	
Diga Toggia	2246.489	-0.034	-0.002	-0.037	0.003	-0.002	-0.050	

Tabella 2. Differenza di coordinate (in ETRF2000) ottenute con *software commerciale - Bernese* dei siti di misura

Come è possibile notare dalla Tabella 2, vi è una buona corrispondenza tra i risultati ottenuti col software commerciale rispetto a quelli ottenuti col software scientifico ad

eccezione del sito di San Rocco. Analizzando in maniera più approfondita il perché di tale discrepanza, si è potuto notare che sono stati acquisite osservazioni fortemente disturbate (Figura 4) a causa della morfologia del sito, in quanto in quelle zone la valle è stretta e profonda e la visibilità satellitare è particolarmente ridotta. Tuttavia il software scientifico è in grado di effettuare una rimozione delle osservazioni disturbate più accurata e quindi di ottenere risultati decisamente migliori; ciò è confermato analizzando i risultati ottenuti, sempre per lo stesso sito, con il software NDA Professional, il cui output è pressoché identico a quello del software Bernese 5.0.

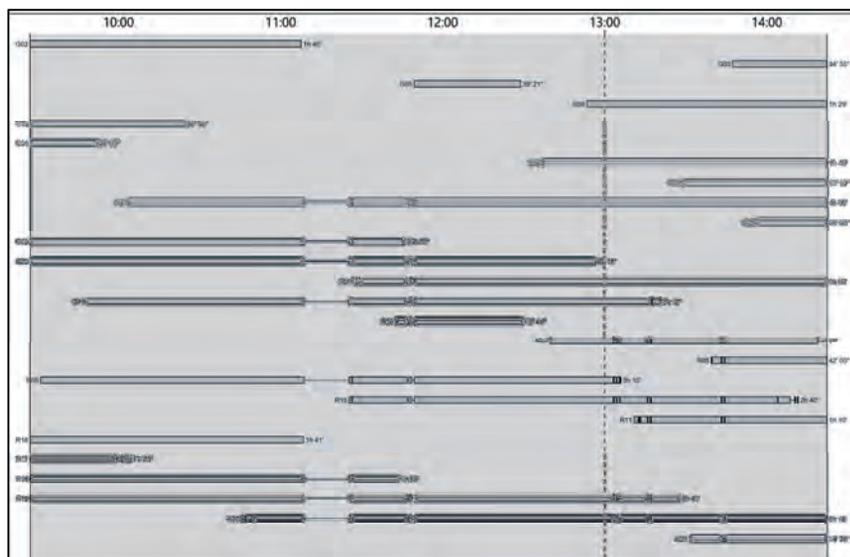


Figura 4. Visibilità satellitare per il sito di San Rocco

4 CAMPAGNE DI LIVELLAZIONE DI ALTA PRECISIONE

Le operazioni di livellazione appaltate nell'ambito del progetto da Regione Piemonte e Regione Lombardia sono state eseguite da una stessa Ditta vincitrice di entrambi gli appalti e sono state in parte seguite anche dai due Politecnici. Tali linee appartengono ora alla rete altimetrica fondamentale italiana.

Nel versante piemontese sono:

1. *Linea IS*: Crevoladossola – Cannobio (45 km),
2. *Linea 207*: Crevoladossola – Passo San Giacomo (55 km),
3. *Linea D4 della linea FS* Crevoladossola – Stazione GNSS DOMS a Domodossola (5 km).

Per ciascuna delle tre linee si è provveduto ad effettuare:

- Una ricognizione in loco ed a riattare i capisaldi di riferimento altimetrico eventualmente distrutti o danneggiati e non più utilizzabili, appartenenti a linee o tratti di linee già materializzate (per riattamento si intendono tutte le operazioni necessarie a rendere stabili e fruibili i contrassegni esistenti, compresa la posa in opera di nuovi contrassegni).
- La segnalizzazione dei nuovi capisaldi e dei capisaldi riattati, con la redazione del relativo schizzo monografico.
- La posa in opera ogni 5 km di un caposaldo stazionabile con strumentazione GNSS (verificando che il dislivello massimo tra due capisaldi sia di 500 m), il quale consenta il centramento planimetrico con treppiede e sia idoneo alla osservazione di satelliti.
- Le misure di livellazione geometrica di alta precisione, in andata e ritorno, lungo le linee sopra indicate.
- La realizzazione delle monografie di tutti i nuovi capisaldi e l'aggiornamento delle monografie relative ai capisaldi già esistenti e riattati, oltre all'implementazione con i dati monografici di tutti i capisaldi della *Banca dati di livellazione* IGM.

Le linee di maggior estensione sono state livellate per prime, a partire da Nord verso Sud e da Ovest ad Est. Il riaggancio è stato effettuato successivamente in corrispondenza della città di Domodossola (Linea FS, di circa 5 km). Il supporto del Politecnico di Torino ha inoltre permesso la determinazione della quota ortometrica della stazione permanente GNSS di Domodossola (DOMS) appartenente alla rete GNSS piemontese (Figura 4).

Il percorso di una livellazione di alta precisione si sviluppa sempre secondo poligoni chiusi, in modo da consentire il controllo delle misure tramite la “chiusura” dei poligoni stessi, ed ha sempre almeno un collegamento con le linee esistenti, in modo da poter assegnare ai nuovi capisaldi una quota riferita al sistema altimetrico nazionale. In maniera analoga si ottiene sia l'inserimento nel sistema nazionale che il controllo di una nuova linea se essa inizia e finisce su linee esistenti. Per poter effettuare la verifica di chiusura dei poligoni è stato fondamentale eseguire alcuni sbracci in modo da potersi ricongiungere con le tratte livellate negli anni precedenti dall'Istituto Geografico Militare. Per lo stesso motivo queste linee erano indispensabili per chiudere poligoni di vaste dimensioni (su questo aspetto non ci si soffermerà in quanto tale lavoro è stato condotto dall'Istituto Geografico Militare). Nel caso in esame, trattandosi di linee aperte, in andata e ritorno si è adottata la seguente formula per la tolleranza di livellazioni di alta precisione (dalle Specifiche IGM 4):

$$T = 2.5 \cdot \sqrt{L [km]} = [mm] \quad (1)$$

Tale controllo è stato ovviamente effettuato in fase di collaudo per tutte le linee livellate ed è stato verificato che i valori ottenuti si mantengono ampiamente sotto i limiti di tolleranza prefissati.

4.1 IL CALCOLO DELLA QUOTA ORTOMETRICA DELLA STAZIONE PERMANENTE DI DOMODOSSOLA

Per l'aggancio altimetrico alle livellazioni condotte, come pure per il calcolo della quota della stazione permanente di Domodossola si è utilizzato il caposaldo principale della linea FS, sito nei pressi dell'edificio del Comune della città. Il caposaldo è protetto da un chiusino in ghisa stabilizzato alla base della facciata dell'edificio comunale ed ha per accessorio il caposaldo verticale visibile in Figura 5.



Figura 5. Livellazione eseguita nei pressi del chiusino in ghisa. A destra viene mostrato una *mensola* infissa sulla facciata con il corrispondente strumento che serve da supporto per l'effettuazione della misura

A partire dal comune di Domodossola si è condotta la livellazione fino alla stazione permanente GNSS DOMS, operazione di notevole importanza per una stazione permanente, soprattutto in vista di un suo possibile inserimento nella rete europea EUREF.



Figura 6. Livellazione eseguita nei pressi della stazione permanente GNSS della città di Domodossola

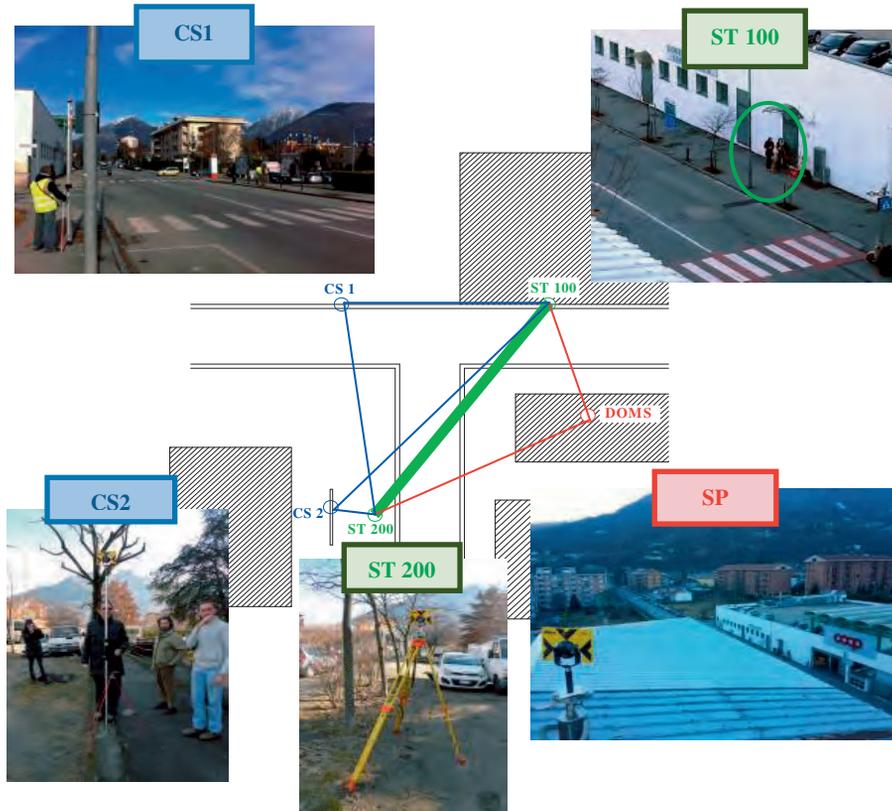


Figura 7. Schema della rete eseguita per livellare la stazione permanente di Domodossola

Nella Figura 7 è riportato lo schema della livellazione condotta dal Politecnico di Torino: la stazione permanente GNSS è colorata in rosso, in verde sono indicati i punti di stazione su cui è stata collocata la stazione totale (ST100 e ST200) ed in blu sono indicati i capisaldi (CS1, CS2 livellati anche dalla Ditta), su cui è stata collocata una palina a testa piatta, di altezza costante e nota con precisione, adattata appositamente per questi scopi di misura.

I dati della rete tridimensionale così realizzata sono stati trattati tramite il software *StarNet* v.7 ed hanno permesso di ricavare il valore di quota ortometrica della stazione permanente DOMS, che risulta essere pari a 313.942 m con scarto quadratico medio di ± 2 mm.

A questo punto è stato possibile effettuare il calcolo dell'ondulazione del geoide in corrispondenza della stazione permanente, confrontando quanto ottenuto con i tre modelli di geoide in uso per il Progetto HELI-DEM. Il più accurato modello globale di geoide attualmente disponibile è l'EGM2008, su una sua realizzazione ottenuta integrando i dati provenienti dalla missione GOCE (*Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer*), denominato nel seguito *updated*. Si hanno a disposizione inoltre due modelli a scala nazionale: ITALGEO2005 per l'Italia e CHGeo2004 per la Svizzera.

Le risoluzioni spaziali di tali modelli sono visibili nelle tabelle che seguono e che ne riassumono anche le caratteristiche principali.

Modello	Passo del dato di griglia	Accuratezza
ITALGEO2005	2' sessagesimali	3 cm
CHGeo2004	30" sessagesimali	3 cm (aree pianeggianti)
		5 cm (aree montuose)
EGM2008update	1' sessagesimali	3 cm

Tabella 3. Caratteristiche modelli di geoidi del Progetto HELI-DEM

	Livellazione	CHGeo2004	EGM2008	ITALGEO2005
N [m]	51.689	51.92	52.078	51.805
Δ (geoidi – liv)[m]	-	0.231	0.389	0.116

Tabella 4. Confronto valori di ondulazione geoidi e livellazione alla stazione permanente di Domodossola

I risultati della Tabella 4. mettono in luce come ci sia una certa discrepanza tra i valori di ondulazione ricavati dai tre modelli e quello ottenuto dalla livellazione: la loro differenza infatti è variabile tra i 12 ed i 40 cm ed è stato quindi fondamentale comprendere se vi fosse una fonte d'errore nelle misure condotte per livellare la stazione permanente. Anche per questo motivo sui capisaldi livellati a terra si sono condotte misure GNSS: tali misure hanno rilevato che il dislivello ellissoidico con la stazione permanente, distante pochi metri dai capisaldi, era identico al dislivello ortometrico calcolato con la rete trigonometrica con precisione millimetrica.

Chiarite queste possibili incertezze è stato interessante valutare l'ondulazione calcolata dalle campagne GNSS e di livellazione geometrica su tutte le linee di livellazione per comprendere quale fosse l'andamento del geoidi ricavato dalla livellazione rispetto alle stime del geoidi dei vari modelli ITALGEO2005, CHGeo2004 e EGM2008updated.

I grafici che seguono riportano le differenze tra l'ondulazione del geoidi calcolata per mezzo delle livellazioni geometriche congiunte alle misure GNSS con l'ondulazione del geoidi fornita dai vari modelli. I valori riportati nei grafici sono: $\Delta N = N_{LIV} - N_{Modello}$.

Per cercare di capire se vi fosse qualche relazione tra questi scostamenti e l'andamento della topografia o tra questi scostamenti ed i funzionali del campo anomalo, nella Figura 8 e nella Figura 9 è riportata in nero la quota dei punti, mentre nella Figura 10 e nella Figura 11 viene rappresentato il valore di anomalia di gravità ottenuto interpolando misure gravimetriche effettuate realmente nei siti di misura.

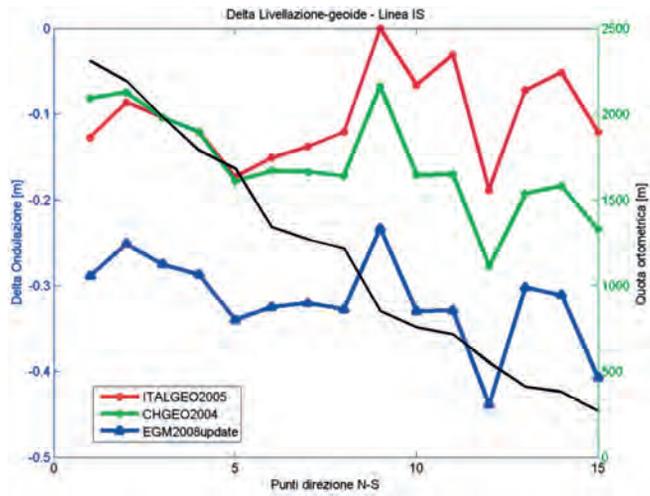


Figura 8. Linea IS: valori di delta-ondulazione IGM-geoidi & quota ortometrica

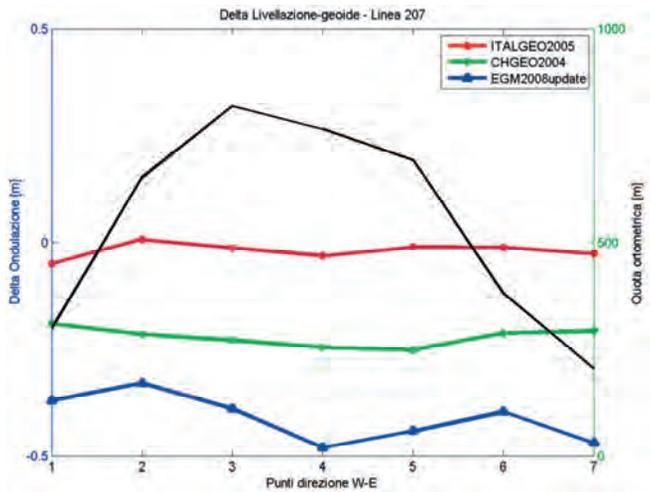


Figura 9. Linea 207: valori di delta-ondulazione IGM-geoidi & quota ortometrica

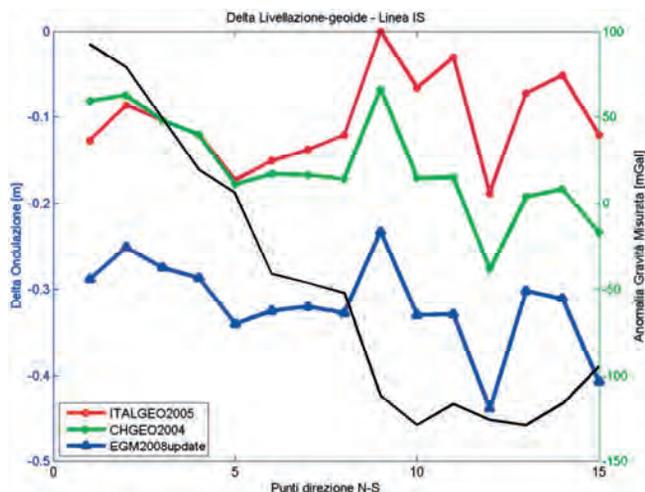


Figura 10. Linea IS: valori di delta-ondulazione IGM-geoidi & Anomalia di gravità misurata

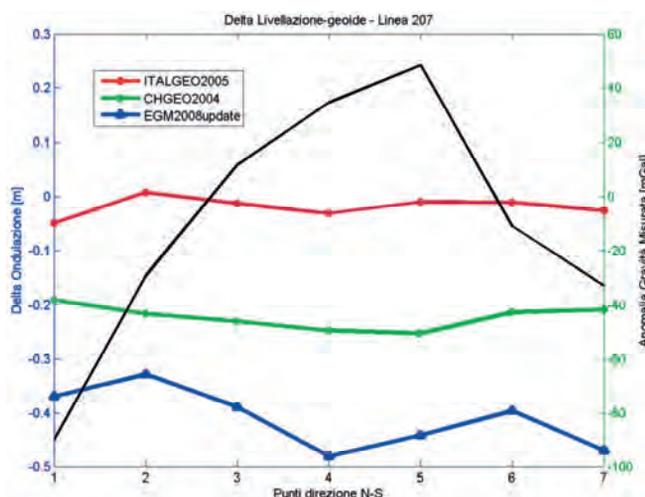


Figura 11. Linea 207: valori di delta-ondulazione IGM-geoidi & Anomalia di gravità misurata

5 ANALISI DEI RISULTATI OTTENUTI

I risultati ottenuti dai rilievi GNSS statici riportati in precedenza mostrano come, in presenza di osservazioni fortemente disturbate, sia necessaria un'analisi approfondita dei dati acquisiti al fine di evitare di commettere errori considerevoli. È quindi importante andare ad effettuare un controllo di qualità non solo del posizionamento ma anche dei dati grezzi che si registrano in campagna: il software scientifico, come anche NDA Professional, possiede

algoritmi che permettono di effettuare tale controllo andando a scartare alcune osservazioni che inficiano la stima finale delle coordinate. Analizzando invece l'ondulazione del geode ricavata da altezze ellissoidiche, misurate tramite livellazione, e quote ortometriche, ottenute dai rilievi GNSS precedentemente citati, si può affermare che i valori ottenuti, considerando ad esempio la stazione permanente di Domodossola, si discostano di almeno una decina di centimetri da quelli che forniscono i modelli. Estendendo l'analisi alle due linee, si è potuto notare come vi sia una buona coerenza tra il modello ITALGEO05 e l'ondulazione determinata tramite misure di livellazione e GNSS, cosa che non è sempre possibile affermare se si considerano gli altri due modelli disponibili per il Progetto.

Infine si è cercato di valutare se vi potesse essere una correlazione tra i valori di anomalia di gravità misurata e la variazione di ondulazione tra i valori ottenuti dalla livellazione e quelli dei modelli di geode disponibili per il Progetto, correlazione che non è riscontrabile dai grafici presenti in Figura 10 ed in Figura 11.

BIBLIOGRAFIA

Biagi L., *I fondamentali del GPS*, Geomatics Workbooks VIII, 2009.

Biagi L., Brovelli M.A., Campi A., Cannata M., Carcano L., Credali M., De Agostino M., Manzano A., Sansò F., Siletto G., *Il progetto HELI-DEM (Helvetia-Italy Digital Elevation Model): scopi e stato di attuazione*, in Bollettino SIFET n°1, 2011.

Biagi L., Dabove P., Manzano A.M., Taglioretti C., Visconti M.G., *Il posizionamento NRTK in alta quota: applicazioni e risultati nell'ambito del progetto HELI-DEM*, in Bollettino SIFET n°3, 2012.

Dabove P., De Agostino M., *What effect does network size have on NRTK positioning?*, Inside GNSS, November-December 2011.

Dabove P., De Agostino M., Manzano A.M., *Achievable positioning accuracies in a network of GNSS reference stations. Global Navigation Satellite Systems: Signal, Theory and Applications*, Shuanggen Jin Editor, 2012.

Kislig L., Petovello M., *What is a Virtual Reference Station and how does it work?*, Inside GNSS, July-August 2011.

Moritz H., Heiskanen W., *Physical Geodesy*, Institute of Physical Geodesy, 1979.

Pavlis, N.K., S.A. Holmes, S.C. Kenyon, and J.K. Factor, *An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008*, General Assembly of the European Geosciences Union, Vienna April 13-18 2008.

CAPITOLO 8

SCELTE E STANDARD ADOTTATI PER CREARE IL DTM E IL GEOSERVIZIO HELI-DEM

Ludovico Biagi, Laura Carcano, Marco Negretti, Fernando Sansò, Damiano Triglione

Politecnico di Milano, DICA, Laboratorio di Geomatica del Polo Territoriale di Como

SOMMARIO

Questo capitolo ha lo scopo di illustrare la struttura dati prevista per i diversi livelli di dato di altezza finali del progetto. Inoltre si definiscono le caratteristiche del geoservizio HELI-DEM. A tal fine si analizzano i requisiti del progetto e, in funzione dei dati disponibili in input, anche in base a considerazioni riguardanti la modalità opportuna di elaborarli efficacemente, si definiscono i diversi livelli informativi che costituiranno l'output.

ABSTRACT

The chapter presents the data structure that was planned as suitable according to the different levels of height data for the project. Moreover, the implemented HELI-DEM geoservice is presented. The requirements are studied and the available input data are discussed: according to the above characteristics, the output levels are defined.

1 INTRODUZIONE AI GEOSERVIZI

L'obiettivo finale del progetto è molteplice. Innanzitutto si vogliono calcolare un DTM e un modello di geoide transalpini. I modelli stimati devono anche essere resi fruibili alla comunità, tramite opportuni metodi di pubblicazione di dati geografici. Inoltre nell'ambito del progetto sono stati raccolti anche altri dati che non sono finora stati menzionati in questo volume perché non strettamente inerenti il problema del calcolo dei suddetti modelli: un esempio in tal senso sono le informazioni vettoriali di elevazione (quali punti quotati e isoipse) estratte dai DB topografici comunali, disponibili per alcune municipalità italiane. Anche tali dati sono potenzialmente di pubblico interesse ed è quindi opportuna la loro pubblicazione. La pubblicazione di dati geografici viene effettuata mediante l'implementazione di un geoservizio (*geoweb service*), ossia un servizio web (*web service*) orientato alla distribuzione di dati geografici (Peng et al, 2003). Realizzare un web service permette di realizzare un disaccoppiamento tra il fornitore dei dati e l'utilizzatore: il server espone pubblicamente le sue funzionalità, tramite l'utilizzo di interfacce standard, al client; queste interfacce restano le stesse indipendentemente (da qui il disaccoppiamento) da come il server implementi effettivamente i servizi offerti. Nella restante parte dell'introduzione viene sinteticamente tratteggiato il concetto di geoservizio e i suoi standard. Nelle restanti sezioni si

descrivono le scelte adottate per generare i dati HELI-DEM e la strutturazione del geoservizio.

Per realizzare un alto livello di accessibilità ai dati e facilitarne quindi la fruizione è opportuno orientarsi verso una distribuzione che avvenga seguendo procedure standard. Nel contesto della condivisione e distribuzione di dati di tipo geografico, l'Open Geospatial Consortium (OGC - <http://www.opengeospatial.org/>) è un importante attore per quanto riguarda la definizione di procedure standard.

OGC è un consorzio internazionale con più di 400 membri, appartenenti ad ambiti e con competenze diverse: ci sono società private (multinazionali, come ad esempio ESRI, Autodesk o Oracle, ma anche piccole società, come OpenGEO che si occupa dello sviluppo di GeoServer o Camptocamp coinvolta nello sviluppo di software opensource come OpenLayers), agenzie governative (NASA, USGS) e università (ad esempio in Italia il Politecnico di Milano e La Sapienza di Roma). Lo scopo di OGC è di partecipare allo sviluppo di interfacce standard chiamate OGC Web Service (OWS) che hanno l'obiettivo di supportare soluzioni interoperabili per lo scambio di dati geografici. In questo modo, utilizzando gli standard OGC, è possibile fornire dati e servizi indipendentemente dal sistema operativo, dal software GIS o da altre proprietà o configurazioni del client.

In Figura 1 è illustrato lo schema di funzionamento base di un servizio OWS: il client invia una richiesta standard al server, in funzione di questa richiesta il server accede ai dati e li elabora, quindi invia la risposta al client. Si possono chiaramente avere diversi tipi di richieste a seconda del servizio OWS implementato. Ci sarà comunque sempre un'operazione di *GetCapabilities*, alla quale il server risponde con l'elenco dei processi o dei dati disponibili, una richiesta *Describe*, alla quale il server risponde con la descrizione di un particolare dato o processo e una *GetData* o *GetService*, alla quale il server risponde eseguendo un determinato processo o fornendo i dati richiesti. Nel nostro caso specifico sono stati presi in considerazione gli standard WCS, WFS, WMS, poiché sono direttamente implementati nel geoservizio: lo standard dei Web Processing Services (WPS) viene descritto più avanti, poiché di maggior rilevanza per la realizzazione del Geoportale (Cap. 12).

Lo standard WCS (Web Coverage Service, <http://www.opengeospatial.org/standards/wcs>) definisce un'interfaccia per la fornitura di dati di tipo raster. Questo standard prevede i seguenti tre tipi di richieste.

- *GetCapabilities*: richiesta fatta dal client verso il server per avere la descrizione delle proprietà del server in termini di dati generali riguardanti il servizio (nome del servizio, responsabile, contatti, ecc) e l'elenco dei dati pubblicati
- *DescribeCoverage*: si specifica il nome di un determinato layer pubblicato dal server e si ottengono le sue proprietà (ad esempio, l'estensione geografica, il sistema di riferimento originale e i sistemi di riferimento in cui il dato è comunque disponibile, oppure i formati in uscita supportati).
- *GetCoverage*: questa operazione è quella di richiesta del dato; il client specifica come si vuole ottenere il dato, conformemente con le caratteristiche del servizio offerto dal server, indicando ad esempio la risoluzione, il formato di uscita, l'estensione della zona di interesse, il sistema di riferimento.

Lo standard WFS (Web Feature Service, <http://www.opengeospatial.org/standards/wfs>) definisce una interfaccia per la fornitura di dati di tipo vettoriale. Il WFS prevede le seguenti

richieste standard (le prime tre sono caratteristiche della versione base del WFS).

- **GetCapabilities:** per ottenere la descrizione delle proprietà del server in termini di dati generali riguardanti il servizio.
- **DescribeFeatureType:** restituisce la descrizione delle caratteristiche di un determinato layer vettoriale (feature) fornito dal servizio.
- **GetFeature:** si specifica il nome della feature che si vuole ottenere ed eventualmente dei parametri aggiuntivi (sistema di riferimento, estensione geografica, elenco degli attributi, ecc.).
- **LockFeature:** rende disponibile un meccanismo di blocco di una feature in modo da garantirne la coerenza durante le operazioni di modifica, impedendo richieste contemporanee di modifica da parte di più client.
- **Transaction:** questa richiesta permette di creare, modificare ed eliminare gli elementi di una feature pubblicata da un server WFS: un server WFS che supporta le transazioni è denominato WFS Transactional (WFS-T).

Con la nuova versione 2.0.0 dello standard sono state introdotte nuove funzionalità.

- **GetPropertyValue:** permette di interrogare il server WFS specificando il valore di una proprietà caratteristica della feature.
- **GetFeatureWithLock:** stessa operazione della **GetFeature**, solo che in questo caso le feature richieste vengono bloccate anche se non è ancora stata avviata una loro operazione di modifica (transaction).
- **CreateStoredQuery:** crea una query e la salva sul server rendendola disponibile per utilizzi successivi.
- **DropStoredQuery:** elimina una query salvata sul server.
- **ListStoredQueries:** restituisce un elenco delle query salvate su un server.
- **DescribeStoredQueries:** restituisce la descrizione delle query salvate sul server.

In uscita, un servizio WFS può rendere disponibili i dati secondo diversi formati, ad esempio GML2, GML3, shape file, GeoJSON.

Lo standard WMS (Web Map Service, <http://www.opengeospatial.org/standards/wms>) definisce una interfaccia per la fornitura di dati di tipo raster come nel caso del WCS. In questo caso però il dato restituito è un'immagine e non si ha la matrice numerica del dato. Le possibili richieste al WMS sono le seguenti.

- **GetCapabilities:** per ottenere la descrizione delle proprietà del server in termini di dati generali riguardanti il servizio.
- **GetMap:** con questa operazione il client fa una richiesta, specificando il layer raster che vuole ottenere, l'estensione geografica di interesse, il sistema di riferimento, la risoluzione e il formato per l'output.
- **GetFeatureInfo:** questa operazione permette di interrogare il raster specificato: specificando le coordinate del punto di interesse si ottiene il valore del raster in quel punto.
- **GetLegendGraphic:** questa operazione richiede al server la generazione di una immagine che illustri la legenda grafica del raster.

Per l'implementazione del geoservizio, si è utilizzato GeoServer (<http://geoserver.org/>): si tratta di un programma multi-piattaforma, scritto in linguaggio Java, che permette di

elaborare, visualizzare e condividere dati georeferenziati (Botts, 2013, Brovelli et al., 2011) in ambito locale o in un contesto distribuito utilizzando gli standard pubblicati dall'OGC.

GeoServer è un progetto Open Source che conta su una consistente comunità di sviluppatori distribuiti nel mondo; inoltre è possibile fare riferimento a diverse società che offrono supporto e personalizzazioni. Geoserver implementa gli standard WMS (versione 1.1.1 e 1.3) WFS (versione 1.0 e 1.1), WFS Transactional (WFS-T), ovvero permette di fare editing vettoriale sui dati pubblicati, WCS (versione 1.0 e 1.1) e WPS (1.0). Per quanto riguarda i dati di input, GeoServer fornisce il supporto per accedere ai dati spaziali da database (PostgreSQL/PostGIS, ArcSDE, DB2 e Oracle) e tramite le librerie GDAL (<http://www.gdal.org/>) permette di accedere ai principali formati raster (come TIFF, bigTIFF, geoTIFF, Arc/Info ASCII Grid, GRASS raster, PNG, GIF e molti altri: http://www.gdal.org/formats_list.html). In uscita può fornire i dati in diversi formati, come JPEG, GIF, PNG, PDF, SVG, KML, GeoRSS, shape file. Infine GeoServer permette di riproiettare al volo i dati pubblicati sui servizi WMS e WFS utilizzando il database EPSG interno (<http://www.epsg.org/>) che supporta centinaia di diversi sistemi di riferimento. Il software è quindi stato scelto e installato su un server del Laboratorio di Geomatica del Politecnico di Milano, Polo Territoriale di Como.

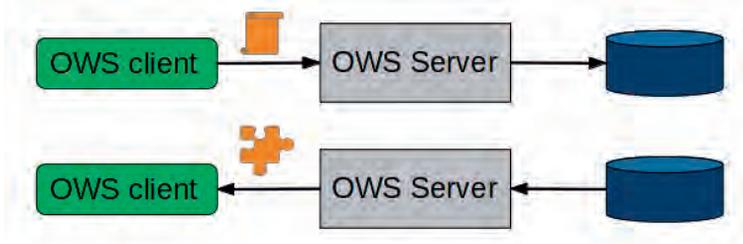


Figura 1. Lo schema di funzionamento base di un servizio OWS

2 LA COSTRUZIONE DEL DTM HELI-DEM

Come sintetizzato nell'introduzione, la base di dati finale del progetto conterrà sicuramente i DTM prodotti a diversa estensione e risoluzione e il modello unico di geoidi. Il calcolo e il modello del geoidi vengono discussi nel Capitolo 11: qui si introduce il problema della creazione dei DTM del progetto.

Per la parte svizzera è disponibile un unico DTM (DTMCH25), in origine grigliato in ETRS89, coordinate geografiche (λ , φ) con passo uguale in latitudine e longitudine di 1" (circa 25 metri). Per la parte lombarda è disponibile il DTM di Regione Lombardia (Italia), originariamente grigliato in Roma 40, coordinate Gauss Boaga (Est, Nord) con passo di 20 metri. Per l'area piemontese sono disponibili diversi DTM a estensione regionale: quello a maggior risoluzione ha passo di 5 m, originariamente è grigliato in ETRF89, coordinate UTM, ed è stato recentemente rilasciato; poiché esso è caratterizzato da accuratezza maggiore rispetto agli altri, per la parte piemontese si è ritenuto ragionevole utilizzare solo tale DTM. Molti bacini idrografici di Lombardia e Piemonte sono inoltre coperti dal DTM LiDAR PST-A, grigliato in ETRF89, coordinate geografiche e passo di 10^{-5} gradi sessadecimali.

In accordo a quanto descritto nel Capitolo 4, tutti i DTM sono stati trasformati a un sistema di riferimento comune, ovvero ETRF2000. Essi si presentano dunque come listati di punti tridimensionali che devono quindi essere opportunamente armonizzati e interpolati su una griglia regolare che contenga il DTM finale. Considerando la tipologia dei dati in input, i risultati delle nostre elaborazioni verranno pubblicati su diversi strati informativi.

1. **DTM HD-1, a copertura dell'intera regione HELI-DEM.** Questo viene ottenuto armonizzando, filtrando e interpolando sulla griglia finale i tre DTM lombardo, piemontese e svizzero.
2. **DTM HD-2, ottenuto da HD-1 corretto mediante dati locali a maggiore accuratezza.** Il DTM prodotto al punto precedente viene migliorato sfruttando le informazioni apportate, sia pur in zone molto limitate, dai dati di DTM locali ad alta risoluzione.
3. **Altri DTM locali ad alta risoluzione.**

Il Modello Digitale del Terreno HD-1 dovrà coprire tutta l'area di interesse del progetto, avere una risoluzione confrontabile con quella dei DTM di input, essere ottenuto con procedure ottimizzate anche in funzione della natura dei dati di input. L'area di interesse è contenuta nel rettangolo geografico compreso in longitudine fra $\lambda=7.80^\circ$ Est e $\lambda=10.70^\circ$ Est, in latitudine fra $\phi=45.10^\circ$ Nord e $\phi=46.70^\circ$ Nord. Il DTM HD-1 sarà calcolato su una griglia con passo uguale in latitudine e longitudine, pari a 2×10^{-4} gradi sessadecimali: ciò presenta lo svantaggio che metricamente le celle non sono quadrate, poiché alle nostre latitudini $\Delta\lambda = 2 \times 10^{-4}^\circ$ corrisponde a circa 15 m, mentre $\Delta\phi = 2 \times 10^{-4}^\circ$ corrisponde a circa 22 m. Per contro l'utilizzo di coordinate geografiche svincola dalla gestione di differenti fusi cartografici, che non riguarda l'estensione del presente progetto ma è chiaramente un limite metodologico e potrebbe costituire un problema nel caso di una futura estensione dell'area di interesse del DTM. La scelta di un passo uguale in latitudine e longitudine è una scelta piuttosto standard che permette l'utilizzo dei dati anche con quei programmi che non ammettono differenze di passo fra le due direzioni. La risoluzione è confrontabile con quelle dei DTM lombardo e svizzero; risulta un sottocampionamento per l'area piemontese, che è stato comunque ritenuto accettabile. In definitiva, si avrà una matrice di output di 8000 righe per 14500 colonne: 116 milioni di nodi in totale. Il calcolo del DTM HD-1 viene descritto nel Capitolo 9.

HD-2 viene generato utilizzando come base HD-1 e correggendolo ove sono disponibili dati locali a maggiore risoluzione e accuratezza. Da un punto di vista teorico, HD-2 potrebbe essere costruito con risoluzione migliore di HD-1 nelle zone in cui sono disponibili i dati ad alta risoluzione: però le tecniche per memorizzare DTM multirisoluzione sono oggetto di ricerca (Biagi et al., 2012) e ristrette all'ambito scientifico e non costituiscono uno standard per la pubblicazione dei dati. Nel contesto HELI-DEM sono viceversa da adottare soluzioni standard che permettano la maggior distribuzione possibile dei prodotti alla comunità. Per cui anche HD-2 viene memorizzato come raster con la medesima risoluzione di HD-1, semplicemente correggendone i valori ove sono disponibili DTM a alta risoluzione. A tale riguardo si noti che allo stato attuale, e nell'ambito di validità temporale del progetto, è disponibile solo il DTM PST-A, per le aree tratteggiate nel capitolo 3: non si esclude per il futuro, in continuità scientifica, di poter fare ulteriori correzioni quando saranno disponibili ulteriori DTM ad alta risoluzione.

Da ultimo, i DTM locali ad alta risoluzione saranno pubblicati in accordo ai permessi che gli Enti distributori accorderanno al termine del progetto.

3 CONCLUSIONI

I due prodotti principali previsti dal progetto HELI-DEM sono il DTM e il modello di geoide che vengono ottenuti unificando i relativi dati disponibili in input. Il presente capitolo ha affrontato il problema della stima del DTM. Si sono considerate le tipologie di dati di input disponibili: si è quindi deciso di pubblicare il modello in tre livelli distinti di accuratezza e risoluzione. Il primo livello è il DTM HD-1, a bassa risoluzione (2×10^4 °) ottenuto interpolando i DTM lombardo, piemontese e svizzero su una nuova griglia a copertura dell'area HELI-DEM ($7.80^\circ \text{ Est} \leq \lambda \leq 10.70^\circ \text{ Est}$, $45.10^\circ \text{ Nord} \leq \phi \leq 46.70^\circ \text{ Nord}$). Il secondo livello è costituito dal DTM HD-2, a copertura della medesima area e con la medesima risoluzione, ottenuto correggendo HD-1 con DTM ad alta risoluzione (nello specifico il DTM PST-A) ove disponibili. Infine è tecnicamente prevista la pubblicazione dei DTM ad alta risoluzione i cui Enti distributori accordino il permesso. Per la pubblicazione del DTM e del geoide, nonché di eventuali altri dati vettoriali, è stato implementato un geoservizio mediante il programma Geoserver e adottando gli standard OGC WMS, WFS e WCS. Il geoservizio è installato sul server del Politecnico di Milano, Laboratorio di Geomatica del Polo Territoriale di Como (<http://geomatica.como.polimi.it>).

BIBLIOGRAFIA

Baumann P., *OGC WCS 2.0 Interface Standard - Core*, OGC Document Number: 09-110r3, 2010

Biagi L., Brovelli M. A., Zamboni G., *A new multi-resolution algorithm to store and transmit compressed DTM*, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XXXIX-B4, 7-12, 2012

Brovelli M. A., G. Giori, M. Mussin, M. Negretti, *Improving the monitor of the status of the environment through web geo-services: the example of large structures supervision*, TGIS vol 15 - April 2011, Issue 2, pag. 173-188, 2011.

De La Beaujardiere J., *OpenGIS Web Map Server Implementation Specification*, OGC Document Number: 06-042, 2006

Michaelis C. D. and D P Ames, *Evaluation and implementation of the OGC Web Processing Service for use in client-side GIS*, OSGeo Journal 1: 50-55, 2007

Peng Z.R. and M.H. Tsou, *Internet GIS: Distributed Geographic Information Services for the Internet and Wireless Network*, New York, John Wiley and Sons, 2003

Vretanos P. A., *OpenGIS Web Feature Service 2.0 Interface Standard*, OGC Document Number: 09-025r1, 2010

CAPITOLO 9

INTERPOLAZIONE DEL DTM HD-1

Ludovico Biagi (1), Laura Carcano (1), Paolo Dabove (2), Alba Lucchese (1),
Ambrogio Maria Manzino (2), Fernando Sansò (1), Damiano Triglione (1)

(1) Politecnico di Milano, DICA, Laboratorio di Geomatica presso Polo Territoriale di Como, Via Valleggio 11, 22100 Como

(2) Politecnico di Torino, DIATI, Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture, Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino

SOMMARIO

Il DTM nominato HD-1, in accordo a quanto definito nel precedente Capitolo, deve coprire tutta l'area di progetto e avere una risoluzione confrontabile con quella dei dati in input. Esso viene realizzato tramite interpolazione individuale dei tre DTM di Lombardia, Piemonte e Svizzera sui nodi della griglia creata appositamente in modo da soddisfare i requisiti richiesti. Per effettuare l'interpolazione viene utilizzato ove possibile un modello locale polinomiale bicubico a minimi quadrati e, per i nodi in cui tale approccio non fornisce una stima affidabile, la superficie polinomiale viene ridotta a una bilineare. Nelle aree in cui sono presenti più DTM di input i loro risultati individuali di interpolazione vengono mediati.

Nel presente capitolo viene descritta nel dettaglio la procedura adottata per produrre il DTM unificato e per correggere le quote dei nodi che si trovano in aree lacuali. Vengono mostrati e discussi i risultati ottenuti.

ABSTRACT

The DTM named HD-1 in the previous Chapter must cover the whole project area and should have a similar resolution to the input data. It is realized through individual interpolation of the three DTMs of Lombardy, Piedmont and Switzerland on the nodes of the grid created for this purpose. To perform the interpolation, where possible, a local polynomial bicubic model is used; for the nodes in which this approach produces a bad result, the polynomial surface is reduced to a bilinear. In the overlapping areas where two or more input DTMs exist, the average of the interpolated elevations is then computed.

In this chapter the adopted procedure to produce the unified DTM and to correct the elevations of the nodes inside the lakes is described in detail. The results are shown and discussed.

INTRODUZIONE

Il Modello Digitale del Terreno HD-1 dovrà avere le caratteristiche esposte nel Capitolo precedente. Al riguardo dei dati di input si ricordano i seguenti aspetti. Tutti i tre DTM regionali sono stati trasformati a listati di punti in ETRF2000, coordinate geografiche. I grigliati di Regione Lombardia erano originariamente in coordinate cartografiche Roma40, Gauss-Boaga, avevano passo planimetrico di 20 m e accuratezza nominale verticale di 10-15 m: eliminati i no data e i punti esterni all'area HELI-DEM si hanno 29'287'577 valori validi. Il DTM di Regione Piemonte era originariamente in coordinate cartografiche ETRF89 - UTM, aveva passo planimetrico di 5 m e accuratezza nominale dell'ordine del metro; eliminati i no data si hanno 607'997'593 valori validi. I dati della Svizzera sono in coordinate geografiche ETRF89. Il passo planimetrico è di 25 m e l'accuratezza nominale è 2.5 m; in totale, si hanno 19'400'361 punti validi nell'area del progetto. Una rappresentazione delle aree di copertura dei DTM e delle relative sovrapposizioni è data in Figura 1 del Capitolo 3.

Il numero totale dei punti significativi usati in input è quindi di circa 650 milioni.

La catena di elaborazione dei dati può essere sinteticamente espressa come la successione di tre passi, all'interno di ciascuno dei quali avvengono diverse operazioni di calcolo numerico: pre-elaborazione, per la preparazione dei dati di input, elaborazione, ovvero interpolazione del DTM, e post-elaborazione, ovvero correzione per eventuali anomalie.

1 LA PRE-ELABORAZIONE

I circa 650 milioni di punti di input, seppure disposti quasi regolarmente, non costituiscono più un seminato perfettamente regolare e vengono quindi memorizzati come punti sparsi. Viene quindi definita una struttura dati detta a secchielli (*buckets*): tale accorgimento, realizzato tramite opportuni metadati, permette di ottimizzare le operazioni di ricerca dei punti prossimi tra loro (Samet, 1990a, 1990b).

Quindi si opera una validazione dei dati e in particolare si eliminano i punti duplicati, ossia i punti con coordinate planimetriche coincidenti. Questa operazione si è rivelata necessaria nei dati di input del Piemonte, in quanto le 464 griglie (file) in cui il DTM era originariamente memorizzato presentavano alcune sovrapposizioni: in esse, talvolta, i nodi con le stesse coordinate planimetriche forniscono dati di quota differenti. Nell'interpolazione, tali nodi rappresentano punti con osservazioni incongruenti che pongono problemi significativi. L'approccio usato per superare il problema è il seguente.

- Sia G un gruppo di punti P_i che hanno le stesse coordinate planimetriche (si noti che G talvolta arriva a quattro punti);
- siano H_{Max} e H_{Min} , rispettivamente, la quota massima e la quota minima assunte dai punti P_i ;
- se $\Delta H = H_{Max} - H_{Min} > 5$ metri i valori vengono rigettati come outlier;
- altrimenti il gruppo G viene sostituito con un solo punto P' avente le medesime coordinate planimetriche dei P_i e quota pari alla media delle loro quote.

Dopo l'analisi dei punti multipli (cioè con medesime coordinate planimetriche), si trovano:

- 8'762'749 coppie di punti coincidenti, di cui 14'725 sono da eliminare perché presentano differenze maggiori di 5m, mentre le restanti vengono mediate;
- 65'980 terne di punti coincidenti, di cui 47 da eliminare;
- 11'145 quaterne di punti coincidenti, di cui 36 da eliminare.

Le statistiche dei ΔH per i gruppi di punti coincidenti, inclusive di quelli maggiori di 5 m, sono le seguenti: media = 0.05 m, deviazione standard = 0.39 m, minimo = 0.0 m, massimo = 34.61 m. Circa 103'000 ΔH sono maggiori di 1 metro; circa 15'000 ΔH sono maggiori di 5 metri. Pertanto i ΔH decisamente anomali rispetto all'accuratezza del DTM sono pari allo 0.015 % del numero totale di nodi e al 0.12% del numero di gruppi di punti coincidenti.

2 L'ELABORAZIONE DEI DATI

Il DTM HD-1 sarà nel SR ETRF2000, memorizzato in forma di raster. L'area di interesse è interamente contenuta nel rettangolo geografico compreso in longitudine fra $\lambda=7.80^\circ$ Est e $\lambda=10.70^\circ$ Est, in latitudine fra $\phi=45.10^\circ$ Nord e $\phi=46.70^\circ$ Nord. Il passo delle celle è di 2×10^{-4} gradi sessadecimali. Per motivi che vengono discussi immediatamente sotto, si è deciso di produrre due DTM utilizzando due metodi distinti di interpolazione locale:

- 1) [Bilineare]: un primo DTM viene prodotto mediante interpolazione ai minimi quadrati con polinomio bilineare,
- 2) [Bicubica]: un secondo DTM viene prodotto mediante Interpolazione ai minimi quadrati con polinomio bicubico.

I due metodi sono ampiamente discussi in Rees (2010), Kidner (2012). Se ne presentano qui le caratteristiche principali. I modelli bilineare e bicubico sono rispettivamente dati dalle seguenti equazioni:

$$\text{Bilineare: } H(x, y) = a_{00} + a_{10}x + a_{01}y + a_{11}xy$$

$$H(x, y) = a_{00} + a_{10}x + a_{01}y + a_{20}x^2 + a_{11}xy + a_{02}y^2$$

$$\begin{aligned} \text{Bicubico: } & + a_{30}x^3 + a_{21}x^2y + a_{12}x y^2 + a_{03}y^3 \\ & + a_{31}x^3y + a_{22}x^2y^2 + a_{13}x y^3 + a_{32}x^3y^2 + a_{23}x^2y^3 + a_{33}x^3y^3 \end{aligned}$$

Per effettuare un'interpolazione locale, si devono innanzitutto stimare i parametri della superficie: a tal fine sono necessarie almeno 4 osservazioni per il modello bilineare e 16 osservazioni per quello bicubico. Inoltre, quando si utilizzano esattamente rispettivamente 4 e 16 osservazioni, si effettua un'interpolazione esatta, ovvero la superficie interpolante passa esattamente per i punti usati per la stima. L'utilizzo di un numero maggiore di punti porta ad una soluzione ai minimi quadrati (Koch, 1987) in cui la superficie non passa esattamente dai punti, ma viene eseguito un filtraggio delle osservazioni.

Con riferimento al modello bicubico, il sistema da risolvere può essere scritto come:

$$\mathbf{z} = \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ \dots \\ H_n \end{bmatrix} = \mathbf{A}\boldsymbol{\xi} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & \dots & x_1^3 y_1^3 \\ 1 & x_2 & y_2 & \dots & x_2^3 y_2^3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_n & y_n & \dots & x_n^3 y_n^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{00} \\ a_{10} \\ a_{01} \\ \dots \\ a_{33} \end{bmatrix}$$

in cui $\boldsymbol{\xi}$ è il vettore dei 16 parametri incogniti e la matrice disegno \mathbf{A} ha dimensione $[n \times 16]$, dove n è il numero di osservazioni, $n \geq 16$. Si ricava il vettore dei parametri incogniti:

$$\hat{\boldsymbol{\xi}} = \begin{bmatrix} \hat{a}_{00} \\ \hat{a}_{10} \\ \dots \\ \hat{a}_{33} \end{bmatrix} = (\mathbf{A}^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{z} = \mathbf{N}^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{z}$$

Nella nostra applicazione specifica si pone $\mathbf{Q} = \mathbf{I}$. Si noti che, ovviamente, nel caso di interpolazione esatta il precedente sistema si riduce a $\hat{\boldsymbol{\xi}} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{z}$. Una volta stimati i parametri, la quota di un punto P è data dalla:

$$\hat{H}_P = \begin{bmatrix} 1 & x_p & y_p & \dots & x_p^3 y_p^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{a}_{00} \\ \hat{a}_{10} \\ \hat{a}_{01} \\ \dots \\ \hat{a}_{33} \end{bmatrix}$$

Per il modello bilineare la soluzione è analoga ma con 4 parametri anziché 16. In un problema di stima operativa è opportuno ricorrere ai seguenti accorgimenti numerici:

- le coordinate $(x, y)_p$ del punto su cui si interpola vengono poste pari a $(0, 0)$,
- le coordinate (x, y) dei punti di input vengono trasformate nelle nuove coordinate (ξ, η) , ottenute normalizzando le coordinate originali in modo che scorrano fra -1 e +1, nel seguente modo:

$$\xi = \frac{x - x_p}{\Delta x} = \frac{x - x_p}{\max|x - x_p|}, \quad \eta = \frac{y - y_p}{\Delta y} = \frac{y - y_p}{\max|y - y_p|}$$

Tale trasformazione delle coordinate favorisce il buon condizionamento della matrice \mathbf{N} del sistema: in essa compaiono infatti prodotti misti di coordinate sino alla sesta potenza, che rendono la matrice instabile. La trasformazione risulta inoltre utile poiché la posizione nell'origine del punto di interpolazione fa sì che:

$$\hat{H}_p(0,0) = \hat{a}_{00}$$

Si noti inoltre che

$$\sigma_{\hat{H}} = \sigma_{\hat{a}_{00}} = \sigma[N^{-1}]_{11}$$

3.1 Algoritmo adottato con [Bilineare]. Per ogni nodo del DTM HD-1, si segue la seguente logica.

1. Tutti i punti originariamente appartenenti ai DTM piemontese, svizzero e lombardo vengono utilizzati congiuntamente come osservazioni di input per l'interpolazione.
2. Si apre una finestra con ampiezza di 2×10^3 gradi sessadecimali (circa $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$) intorno al nodo da interpolare: si estraggono tutti gli N punti nella finestra e li si ordina in base alla loro distanza dal centro.
3. Se esiste un punto esattamente nella posizione del nodo, si attribuisce la quota di tale punto.
4. Se $N < 16$ la stima non è possibile: il nodo viene etichettato come isolato.
5. Si utilizzano i 16 punti più vicini per il primo tentativo di interpolazione: $i = 1$, $n_i = 16$.
6. Si interpola la bilineare usando n_i punti.
7. Se la stima è affidabile, essa è il valore interpolato desiderato.
8. Se la stima non è affidabile, allora si aggiunge un altro gruppo di 16 punti a quelli già selezionati, sempre scegliendo i più vicini. Quindi $n_{i+1} = n_i + 16$ punti e si ripete il passo 5 fino a quando si arriva a una stima affidabile oppure si arriva a includere tutti gli N punti (STOP con fallimento).

3.2 Algoritmo adottato con [Bicubico]. Si usa la stessa logica con alcune variazioni.

1. I punti originariamente dei DTM Piemontese, Svizzero e Lombardo vengono interpolati individualmente sui nodi del grigliato finale.
2. Alla prima iterazione $n_1 = 32$, invece di 16.
3. In caso di stima non affidabile l'incremento fra n_i e n_{i+1} è di 32.
4. Al termine delle tre interpolazioni individuali di Piemonte, Svizzera e Lombardia, nei nodi del grigliato finale in cui si abbiano due o addirittura tre risultati, si esegue la loro media.
5. Al fine di evitare effetti di bordo ai confini delle regioni si svolge un'operazione di erosione morfologica, prima di mediare.

Nel caso di interpolazione bilineare, la stima è definita affidabile quando la matrice normale del sistema ai minimi quadrati ha un numero di condizione inferiore a 10^3 ; nel caso di interpolazione bicubica, la stima è definita affidabile quando la matrice normale del sistema ai minimi quadrati ha un numero di condizione inferiore a 10^5 . La scelta di una soglia maggiore per la bicubica è dettata dal fatto che essa presenta termini sino a grado 6, e quindi è comunque più difficile mantenere contenuto il numero di condizione.

Al termine delle interpolazioni, entrambi gli algoritmi generano alcune informazioni ausiliarie, utili per analizzare la qualità dei risultati. Per ogni nodo del DTM HD-1 vengono prodotti i seguenti output:

1. indice di qualità sulla stima, ossia l'elemento diagonale in prima riga e prima colonna della matrice dei cofattori dei parametri stimati,
2. tipo di risultato:

- 2 → il punto da interpolare è isolato,
 - 1 → non si riesce a ottenere una stima affidabile del punto,
 - 0 → il punto da interpolare coincide con un'osservazione,
 - 1 → il punto è stato interpolato con successo,
3. numero dei punti impiegati per la stima,
 4. valore del numero di condizione risultante dall'inversione di matrice.

In totale (si vedano le statistiche in Tab. 1), sia per la bilineare sia per la bicubica, vengono effettivamente interpolati circa 72 milioni di nodi: i restanti nodi della matrice rettangolare sono esterni all'area del progetto e quindi risultano come no data. Il DTM HD-1 risultante dall'interpolazione bicubica è rappresentato in Figura 1. Nel metodo bicubico, quando i punti di osservazione sono mal disposti spazialmente rispetto al punto di interpolazione, il numero di condizione rimane molto alto ed è difficile stabilizzarne la stima: per tali punti si è deciso di utilizzare le stime dell'interpolazione bilineare, che risulta più robusta rispetto alla geometria delle osservazioni. In generale, le stime di accuratezza delle quote interpolate risultano mediamente soddisfacenti. I valori migliori sono relativi a Lombardia e Svizzera; si hanno viceversa alcuni problemi residui per alcuni nodi del Piemonte.

	Media	S.Q.M.	Min	Max
Bilineare (72643606 nodi)				
NPti.	16.05	2.98	16	672
NCond	8.4	20.8	2.9	100
Sigma (m)	0.6	0.98	0.0	119.2
Bicubico, Lombardia (22822816 nodi)				
NPti.	32.00	0.28	32	96
NCond	9211	4226	2300	10000
Sigma (m)	0.1	0.14	0.0	27.7
Bicubico, Piemonte (33746321 nodi)				
NPti.	32.02	3.16	32	1392
NCond	9245	4369	2313	10000
Sigma (m)	0.6	0.63	0.0	91.2
Bicubico, Svizzera (35699169 nodi)				
NPti.	32.00	0.15	32	64
NCond	7927	3840	2593	10000
Sigma (m)	0.6	0.55	0.0	23.5

Tabella 1. Statistiche sui metodi di interpolazione; nel caso bilineare risultati generali su tutta l'area del progetto, nel caso della bicubica, risultati ripartiti per regioni individualmente interpolate, prima dell'operazione di media sulle zone di sovrapposizione. NPti: numero punti effettivamente usati per interpolare la quota in ciascun nodo; NCond: numero di condizione del sistema finale; Sigma: deviazione standard della quota interpolata

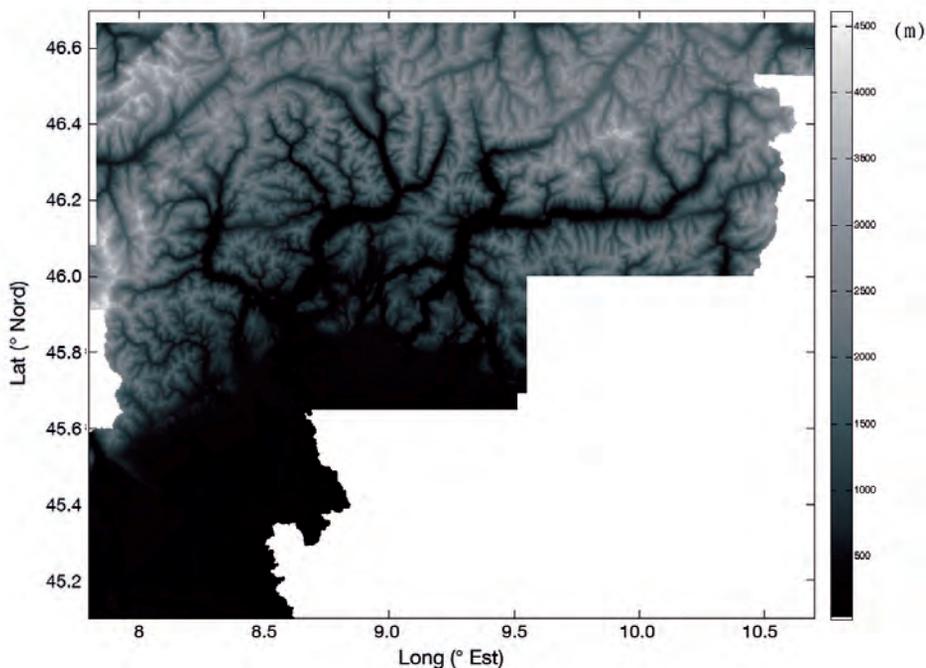


Figura 1. Il DTM HD-1 ottenuto mediante interpolazione bicubica dai DTM lombardo, piemontese e svizzero

3 LA POST-ELABORAZIONE DEI DATI E IL COMPLETAMENTO DEI LAGHI

Per quanto riguarda la quota della superficie dei laghi, si deve tenere conto che in alcuni DTM di input essi sono memorizzati con un valore di riferimento costante, mentre in altri il valore è spazialmente variabile (ovviamente di pochi decimetri); inoltre i laghi compresi in più DTM di input figurano con quote diverse. Nella creazione del DTM HD-1 si è deciso di usare un valore costante di riferimento per la quota della superficie di ogni lago: in particolare, effettuata l'interpolazione delle linee di costa, tale valore costante viene calcolato come la quota minima tra tutti i punti di costa.

L'interpolazione dei punti vicini ai contorni dei laghi si sono rivelate meno attendibili rispetto agli altri punti stimati poiché i punti relativi alla superficie del lago introducono quote fittizie nell'interpolazione. Per i laghi più importanti (ovvero Lago di Como, Lago Maggiore, Lago di Varese, Lago di Lugano, Lago d'Iseo, Lago d'Orta) sono stati attuati interventi correttivi. In ciascuno di essi, per i punti situati sulla costa (definita come un *buffer* con ampiezza di 100 m che dalla riva del lago si estende verso l'entroterra), si è proceduto nella stima dei punti interpolati a partire unicamente dai punti di ingresso che cadono in tale *buffer*.

4 APPROFONDIMENTO SU ALCUNE TEMATICHE TRATTATE NEL CAPITOLO

In questo paragrafo vengono discussi i motivi di alcune scelte metodologiche operate per la creazione del DTM HD-1 e vengono mostrati i risultati che aiutano a comprendere il motivo di tali scelte. I test qui discussi sono stati sviluppati su una piccola area di studio: la zona, in prossimità del Lago di Como, e mostrata in Figura 2, contiene 200000 (400×500) nodi della griglia finale. In tale area sono presenti due dei tre DTM di input, quelli svizzero e lombardo.



Figura 2. Area usata come caso di studio (Triangolo Lariano, fra Como e Lecco). Statistiche dei dati in input: quota media = 660 m, deviazione standard = 345 m, min = 197 m, max = 1679 m. Coordinate del punto centrale dell'area: $\lambda=9.22$ °Est, $\phi=45.86$ °Nord

Innanzitutto va detto che per preservare le informazioni di altezza contenute nei tre DTM di input, si era partiti con l'idea di utilizzare un'interpolazione bilineare o bicubica esatta: nel caso di modello bilineare si sarebbero quindi utilizzate 4 osservazioni, mentre nel caso di bicubico si sarebbero utilizzate 16 osservazioni.

Tale approccio però pone significativi problemi di condizionamento. A tale riguardo si presenta l'esempio di utilizzo della bicubica sul DTM lombardo. Le quote dei nodi vengono stimate cercando i 16 punti più vicini ad esso. In Figura 3 (a sinistra) è riportata la matrice contenente, per tutti i nodi della griglia, il numero di condizionamento del sistema risultante. Come si può vedere il numero di condizionamento è in generale molto elevato, raggiungendo

in alcuni nodi valori superiori a 10^{17} . A destra si può vedere il DTM così interpolato; alcuni nodi sparsi presentano quote chiaramente anomale e corrispondono ai casi di peggior condizionamento del sistema; molti nodi presentano un mediocre condizionamento e vengono male interpolati pur non mostrando valori visibilmente identificabili come anomali.

E' del tutto evidente che la struttura quasi regolare con cui si presentano valori anomali o mediocri di condizionamento è legata alla struttura ricorsiva con cui si presentano le posizioni relative dei punti utilizzati per l'interpolazione (ovvero i nodi del DTM originale) rispetto al nodo da interpolare. Da opportune analisi si è stimato che, nel caso della bicubica, vengono fornite stime affidabili della quota quando il numero di condizionamento è inferiore a 10^5 . Una possibile soluzione per ottenere tale condizione può essere quella di utilizzare un numero ridondante di osservazioni, ovvero passare da un sistema esatto ad un sistema a minimi quadrati. Per ogni nodo da interpolare, a partire dal sistema esatto costruito con i 16 punti più vicini, si procede iterativamente; ad ogni passo si aggiungono 16 punti (sempre i più vicini fra quelli disponibili) e si stima il numero di condizionamento della risultante matrice N: se il numero di condizionamento è inferiore alla soglia si effettua la stima; in caso contrario si procede con un'ulteriore aggiunta.

In Figura 4 viene riportato il numero di condizionamento della matrice N finale ottenuta in tal modo (a sinistra) e il DTM interpolato (a destra): il numero di condizionamento risulta ora inferiore alla soglia prestabilita e abbastanza stabile per tutti i nodi della griglia. Le quote stimate dei nodi non presentano più valori anomali e il risultato finale è decisamente soddisfacente: per verificarlo sono stati svolti confronti e analisi di tipo morfometrico (Li et al., 2005), che non vengono qui riportati per necessità di sintesi e saranno relazionati in un lavoro futuro. L' utilizzo di un numero ridondante di osservazioni è quindi stato adottato per il calcolo del DTM finale mediante interpolazione bicubica: in particolare si è scelto di adottare un principio conservativo, imponendo fin dalla prima iterazione un numero minimo di osservazioni pari a 32.

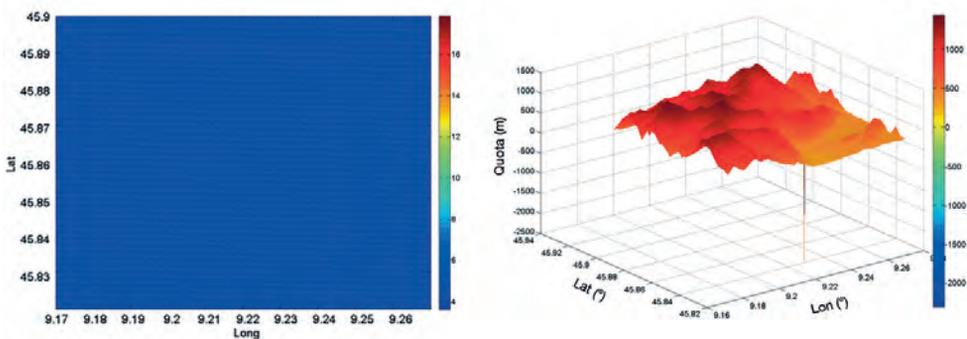


Figura 3. Interpolazione del DTM lombardo mediante modello bicubico esatto: a sinistra numero di condizionamento della matrice N del sistema (scala logaritmica), a destra DTM interpolato

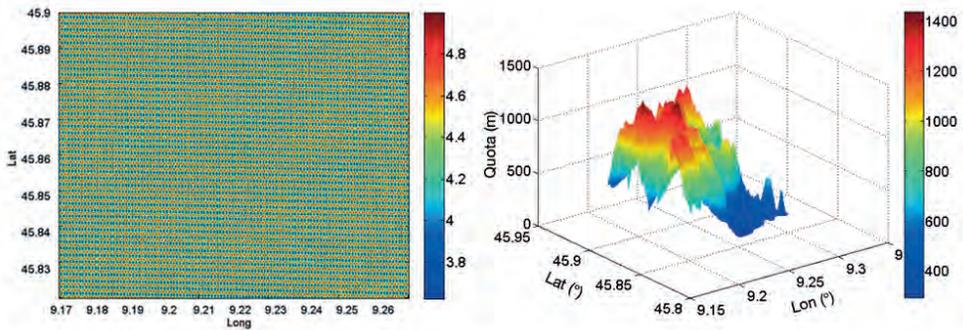


Figura 4. Interpolazione del DTM lombardo mediante modello bicubico con aggiunta di osservazioni e controllo sul numero di condizionamento: a sinistra numero di condizionamento della matrice N del sistema finale (scala logaritmica), a destra DTM interpolato

Si noti che per risolvere il problema del mal condizionamento di una matrice può anche essere utilizzato un approccio basato sulla cosiddetta Decomposizione a Valori Singolari (SVD, Singular Value Decomposition, Golub, 1996, Press et al., 1992). Ai fini del calcolo del DTM HELI-DEM, considerate anche le scadenze del progetto, non si è potuto investigare l'utilizzo della SVD, che viene viceversa approfondita in un lavoro in fase di scrittura e sottomissione (Biagi et Carcano, 2013).

Vengono infine fatte qui alcune considerazioni sui motivi per i quali, nel caso di modello bicubico, si è scelto di interpolare individualmente i tre DTM di input sui nodi del DTM HD-1 e poi mediare i risultati così ottenuti nelle zone di sovrapposizione, ovvero per i nodi che presentano due o tre risultati. Una possibile alternativa avrebbe potuto essere quella di unire prima i punti dei tre DTM originali in un unico listato e quindi interpolarli congiuntamente sulla griglia finale. Le due scelte alternative sono state confrontate nella zona di studio del Triangolo Lariano, che presenta sovrapposizione di DTM lombardo e svizzero.

La Figura 5 riporta l'aspetto del DTM così risultante per i due casi: già un'analisi visiva evidenzia come l'aspetto ottenuto dall'interpolazione congiunta (a sinistra) risulti significativamente peggiore di quello risultante dalla media delle interpolazioni individuali (a destra). In Figura 6 è mostrato invece il numero di condizionamento della matrice N del sistema corrispondente a interpolazione esatta mediante 16 punti nei due casi di interpolazione dal solo DTM lombardo, oppure di interpolazione dall'unione dei due DTM: si noti che, rispetto a Figura 4, la scala di colori relativa all'interpolazione del DTM lombardo è stata uniformata a quella dell'interpolazione congiunta. La prima interpolazione presenta numero di condizionamento in generale significativamente inferiore rispetto alla seconda: in realtà nella matrice di destra il numero di condizionamento non supera mai 10^{17} e il 99.5 % dei nodi della griglia hanno numero di condizionamento inferiore alla soglia di 10^5 . Nel caso invece di unione dei DTM e successiva interpolazione, il 99.99 % dei nodi presenta un numero di condizionamento superiore alla soglia. Dalle analisi effettuate quindi nella zona di studio risulta che l'interpolazione separata dei DTM seguita dal calcolo della media delle quote ottenute nelle zone di sovrapposizione sembra l'approccio preferibile, che quindi è stato adottato per la produzione del DTM che copre tutta l'area di progetto.

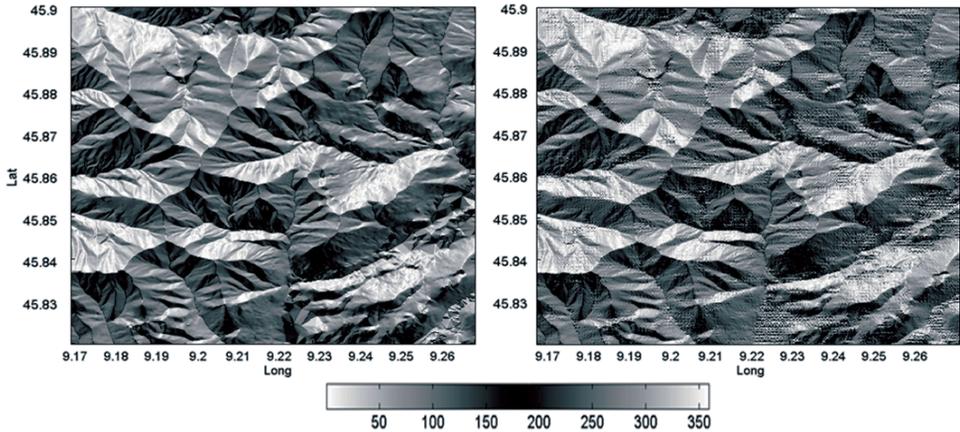


Figura 5. Aspetto del DTM risultante dall'interpolazione dei due DTM lombardo e svizzero sulla griglia finale (in gradi, dalla direzione Nord in senso orario): risultati dell'interpolazione individuale del DTM lombardo (a sinistra) e dell'interpolazione sull'insieme di dati risultante dall'unificazione dei DTM originali (a destra)

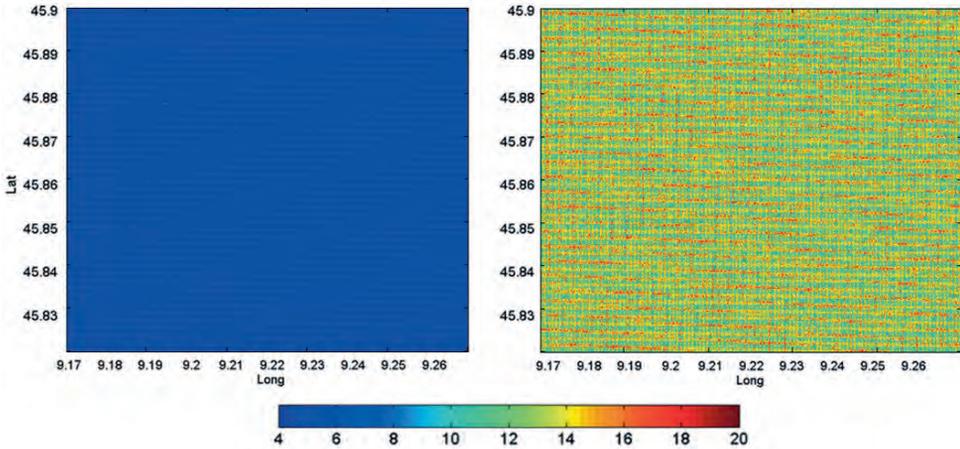


Figura 6. Numero di condizionamento della matrice N del sistema ottenuto mediante interpolazione bicubica esatta del DTM lombardo (a sinistra) e del dataset ottenuto dall'unificazione dei due DTM svizzero e lombardo (a destra)

5 CONCLUSIONI

Mediante interpolazione dei DTM lombardo, piemontese e svizzero è stato creato un DTM, che copre l'intera area di progetto HELI-DEM, ovvero l'arco transalpino fra Lombardia, Piemonte e Svizzera, con risoluzione di 2×10^{-4} gradi sessadecimali (circa 20 m)

e accuratezza dell'ordine di 10 m. Il metodo di interpolazione adottato è quello di una bicubica localmente stimata mediante minimi quadrati; nell'implementazione della stima si sono dovute analizzare e risolvere le problematiche relative al possibile malcondizionamento del sistema. E' stato inoltre prodotto un secondo DTM mediante interpolazione bilineare, che viene utilizzato per correggere i valori ottenuti dalla bicubica ove questi sono non affidabili in base a un criterio di buon condizionamento del sistema risolutivo. A conclusione si riporta un'unica nota finale. Tutte le procedure qui descritte e utilizzate sono, allo stato attuale, state implementate in ambiente di calcolo scientifico perchè erano necessarie le loro accurate tarature e valutazioni. Ora le procedure di interpolazione sono ben consolidate e sufficientemente generalizzate da poter essere applicata anche a altri contesti: ciò costituisce un risultato metodologico applicabile a casi di studio differenti e, auspicabilmente, all'intero arco alpino. Perciò le procedure verranno integrate come nuovi comandi all'interno del GIS Free e Open Source GRASS (Neteler et Mitsova, 2008): in tal modo saranno liberamente disponibili alla comunità scientifica all'interno di un ambiente GIS completo.

BIBLIOGRAFIA

Biagi L. e Carcano L., Methodological problems merging local DTMs: solutions and comparisons for a case study, in sottomissione per i Proceedings del VIII Hotine Marussi Symposium, Rome, 2013

Brovelli A.M., Reguzzoni M., Sansò F., Venuti G., *Procedure di ricostruzione del modello digitale del terreno da dati laser scanning*, Bollettino SIFET, Supplemento speciale al n.2/2001, 2001

Golub G.H., Van Loan C.F., *Matrix computations*, JHU Press, Baltimore, 1996

Kidner D.B., *Higher-order interpolation of regular grid digital elevation models*, International Journal of Remote Sensing, 2012

Koch K. R., Parameter estimation and hypothesis testing in Linear models, Springer Verlag, 1987

Li Z., Zhu Q., Gold C., *Digital terrain modeling: principles and methodology*. CRC, Boca Raton, 2005

Neteler M., Mitsova H., *Open Source GIS: A GRASS GIS Approach*, The International Series in Engineering and Computer Science, Springer, New York, 2008

Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P., *Numerical Recipes in C. The Art of Scientific Computing*, Cambridge, 1992

Rees W.G., *The accuracy of Digital Elevation Models interpolated to higher resolutions*, International Journal of Remote Sensing, 2010

Samet H., *The Design and Analysis of Spatial Data Structures*, Addison-Wesley, Reading, MA, 1990

Samet H., *Applications of Spatial Data Structures: Computer Graphics, Image Processing, and GIS*, Addison-Wesley, Reading, MA, 1990

CAPITOLO 10

CORREZIONE DEL DTM HD-1 CON IL DTM PST-A

L. Biagi (1), S. Caldera (2), L. Carcano (1)

(1) Politecnico di Milano, DICA, Laboratorio di Geomatica del Polo territoriale di Como, Via Valleggio 11, IT-22100 Como

(2) GReD srl, Geomatics Research & Development, via Morozzo della Rocca 3, IT-20123 Milano

SOMMARIO

In generale, si pone il problema di come correggere un DTM regionale a bassa risoluzione con dati locali a alta risoluzione. Nello specifico di HELI-DEM, il DTM definito HD-1, interpolato a partire dai DTM lombardo, piemontese e svizzero, non sfrutta tutte le informazioni di altezza disponibili: infatti molti bacini idrografici di Lombardia e Piemonte sono coperti anche dal DTM ad alta risoluzione LiDAR PST-A, la cui informazione più accurata può essere localmente utilizzata come correzione. La semplice sostituzione dei dati PST-A ai dati HD-1 non è però sufficiente, a causa della possibile presenza di bias locali tra i due modelli, che possono provocare discontinuità accentuate fra zone coperte e zone prive di dati di correzione. Una possibile soluzione è quella di calcolare le differenze fra i due DTM, filtrare tali differenze e quindi correggere il DTM a bassa risoluzione con le differenze filtrate. Nel presente capitolo viene descritta la metodologia ideata ed adottata e i risultati ottenuti sul caso reale. Vengono inoltre illustrati i risultati della validazione.

ABSTRACT

The present Chapter discusses a procedure to correct a regional low resolution DTM with local high resolution data, where they are available. In particular for HELI-DEM, the HD-1 DTM, that was obtained by merging the regional, medium resolution DTMs, does not exploit all the elevation data available: indeed, Lombardy and Piedmont river basins are covered by a LiDAR DTM, that is characterized by higher resolution and accuracy and could provide data to locally correct the HD-1 DTM. Anyway, the simple substitution of the HD-1 data with LiDAR data might be not sufficient, because of local biases between the two models; these can produce discontinuities at the borders of LiDAR area. A possible solution could be given by the following process: the differences between the two models are computed and are filtered by a low pass filter; then, the filtered differences are applied to correct the low resolution DTM. This chapter presents the adopted methodology and the results obtained by its application to the real HELI-DEM case. Moreover, validation results are discussed.

1 INTRODUZIONE

Nel Capitolo precedente si è spiegato come si sono interpolati i DTM lombardo, piemontese e svizzero a bassa risoluzione per ottenere un DTM unificato in coordinate ETRF2000 geografiche e caratterizzato da una risoluzione planimetrica di 10^{-4} gradi (circa 20 metri) che copre tutta la zona di interesse: al DTM interpolato è stato dato nome HD-1 (Fig. 1 a sinistra). In aggiunta ai dati di elevazione regionali usati per interpolare il DTM HD-1, è disponibile anche un DTM LiDAR ad alta risoluzione (con celle di 10^{-5} gradi sessadecimali ed accuratezza migliore del metro), prodotto dal Ministero dell'Ambiente italiano nell'ambito del Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale, che copre sostanzialmente le strisce corrispondenti ai fondovalle dei bacini idrografici principali delle Regioni Lombardia e Piemonte (Fig. 1 a destra) e nominato DTM PST-A.

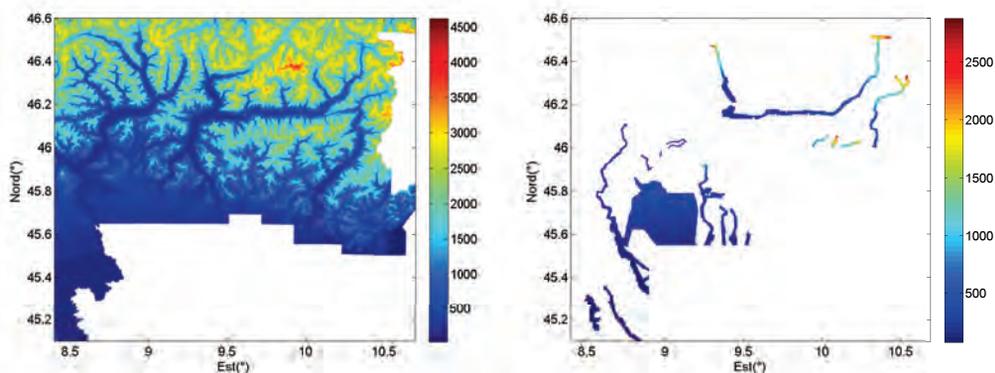


Figura 1. DTM HD-1 (a sinistra) e DTM PST-A (a destra), che è riportato solo nella porzione di sovrapposizione con il primo. Valori delle quote in metri

Le cross validazioni e validazioni esterne sui diversi DTM acquisiti per il progetto hanno evidenziato i seguenti aspetti (Cap. 6): i modelli lombardo e piemontese presentano quasi ovunque accuratèzze confrontabili con quelle nominali ma sono presenti alcune zone anomale ove le loro quote si scostano significativamente da quelle del DTM PST-A; in tali situazioni, successive verifiche a campione mediante rilievi GNSS RTK confermano la correttezza di quest'ultimo. Evidentemente il DTM HD-1 contiene le medesime anomalie dei modelli regionali da cui è interpolato: ci si pone dunque l'obiettivo di migliorarlo utilizzando le informazioni d'altezza piú accurate contenute nel DTM PST-A, perlomeno localmente ove queste sono disponibili.

Un possibile approccio puó essere la semplice correzione del DTM HD-1, ovvero la sostituzione dei suoi valori con quelli del modello PST-A. Tale approccio semplicistico potrebbe creare problemi ai bordi delle aree coperte dal DTM PST-A: infatti, quando esistono dei sistematismi complessivi in quota o delle evidenti differenze puntuali al bordo, la semplice sostituzione introduce discontinuità. Un esempio è riportato nella Figura 2, dove si nota la presenza di un sistematismo medio di circa 8 m, con differenze al bordo di circa 4 m. In molte operazioni di analisi spaziale, l'introduzione di tali discontinuità artificiali puó risultare piú nociva degli errori e delle anomalie presenti nel modello non corretto.

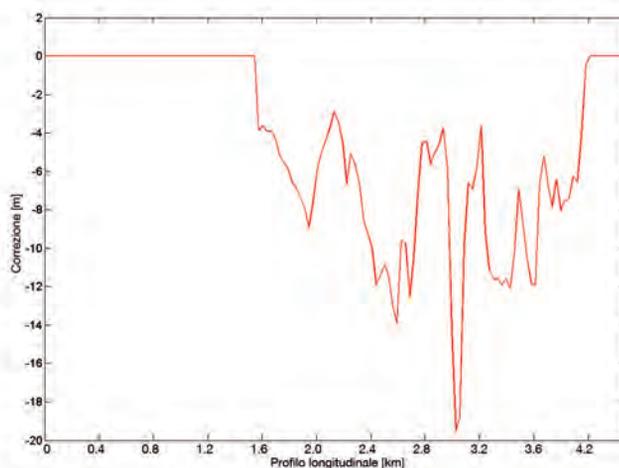


Figura 2. Esempio di discontinuità tra DTM PST-A e HD-1: valle del fiume Oglio

2 LA PROCEDURA ADOTTATA

In generale, si vuole correggere un DTM regionale a bassa risoluzione (modello da correggere) con un modello locale a risoluzione e accuratezza maggiori, evitando l'introduzione di discontinuità al bordo fra zone in cui sono e non sono disponibili i dati di correzione. Il problema può essere risolto semplicemente filtrando opportunamente le correzioni prima della loro applicazione. Il filtraggio deve essere studiato in modo da produrre un modello ragionevolmente liscio, preservando quanto più possibile l'accuratezza della correzione. La procedura proposta verrà prima tarata e testata su dati simulati, quindi verrà applicata allo specifico dei DTM HD-1 e PST-A del progetto HELI-DEM; è comunque una metodologia generale che viene schematizzata nel modo seguente:

1. calcolo delle correzioni,
2. filtraggio opportuno delle correzioni,
3. applicazione delle correzioni filtrate al modello da correggere.

Calcolo delle correzioni. Le correzioni devono essere calcolate sui nodi del modello a bassa risoluzione; a tal fine il modello ad alta risoluzione deve innanzitutto essere sottocampionato: ciò può essere effettuato mediante attribuzione del prossimo più vicino o opportune operazioni di media. La matrice sottocampionata coincide con quella del modello da correggere: i nodi in cui il modello ad alta risoluzione non esiste contengono valori *no data*. Si procede poi calcolando la matrice delle differenze fra modello ad alta risoluzione sottocampionato e modello da correggere: differentemente da quanto si applica in genere nell'algebra delle matrici, le differenze corrispondenti a *no data* del primo vengono poste a valore nullo. Nel seguito il modello delle differenze così ottenuto è definito modello delle correzioni.

2.1 Il filtraggio delle correzioni con filtri passabasso

Un filtro passa basso permette di lisciare le discontinuità di transizione delle correzioni da valore nullo a valore diverso da zero. Infatti un filtro passabasso applicato ad una funzione permette di produrre un segnale più liscio rispetto a quello originale; tale effetto viene realizzato attraverso la rimozione delle frequenze più alte che compongono il segnale. Nel caso in esame è possibile considerare le discontinuità come segnale ad alta frequenza che deve essere rimosso o perlomeno liscio. E' possibile descrivere l'applicazione di filtro passabasso sostanzialmente come la convoluzione di un segnale con una apposita maschera che, nel caso bidimensionale e discreto come quello in oggetto, può essere vista come una matrice $\{f(i,j)\}$ di coefficienti, ove i e j rappresentano la distanza nelle due direzioni dal punto origine del filtro, ovvero il centro della maschera; la somma di tutti coefficienti deve essere pari ad uno e i coefficienti sono nulli esternamente alla finestra in cui è definito il filtro. Il filtro passabasso più semplice è la *media mobile*, in cui i coefficienti all'interno della finestra hanno tutti valore costante. In questo caso i coefficienti passano senza continuità dal valore zero assunto esternamente alla finestra ad un valore costante, internamente ad essa (Fig. 3). Una volta applicata, la media mobile assegna all'elemento centrale il valore medio degli elementi circostanti.

$$\frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Figura 3. Esempio di matrice filtro passa basso di una media mobile 3×3

Altri filtri, come ad esempio il *Filtro di Butterworth*, presentano un comportamento più liscio. La formula che descrive il filtro di Butterworth è la seguente (Dermanis et Biagi, 2002):

$$f(i,j) = \frac{1}{1 + \left[\frac{i^2 + j^2}{D_0^2} \right]^n} = \frac{1}{1 + \left[\frac{d}{D_0} \right]^{2n}} = f(d) \quad (1)$$

dove n è l'ordine del filtro e descrive il fattore di attenuazione.

La funzione assume valore massimo nell'origine, in cui $f_{\max} = f(0,0) = 1$ e si dimezza alla distanza $d = D_0$. Il filtro di Butterworth è inoltre un filtro isotropo, ovvero è un filtro nel quale il valore $f(i,j) = f(d)$ dipende solo dalla distanza $d = \sqrt{i^2 + j^2}$ dall'origine. In Figura 4 è riportata la matrice di un filtro passabasso di Butterworth 5×5 :

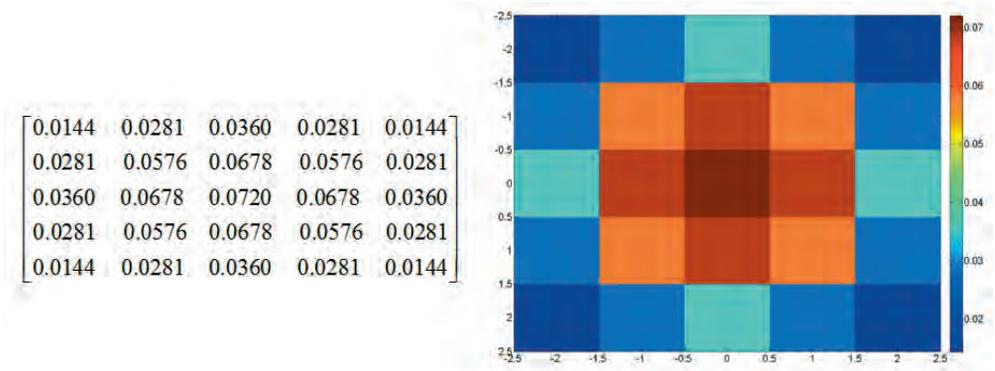


Figura 4. Esempio di matrice filtro di Butterworth passa basso ($D_0 = 2, n = 2$)

2.1.1 Il dominio delle frequenze e la trasformata di Fourier

Come detto nel paragrafo precedente, l'applicazione di un filtro ad un segnale può essere vista come la convoluzione del segnale stesso con una maschera di appositi coefficienti. A tal riguardo è utile introdurre il concetto di *trasformata di Fourier* e di *dominio delle frequenze*.

La trasformata di Fourier della funzione generica $f(x)$ è:

$$F(u, v) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) e^{-i 2\pi(ux+vy)} dx dy \quad (2)$$

dove si utilizza la frequenza lineare $u = 1/T$, ove T è il periodo corrispondente.

Nel caso di una matrice $N \times M$ di valori quale è quella che descrive un DTM, in cui i dati sono disposti su una griglia discreta e regolare (composta da N righe e M colonne), è più utile dare una definizione della trasformata di Fourier discreta in due dimensioni. In questo caso la trasformata viene chiamata DFT (Discrete Fourier Transform) ed è espressa come:

$$F_{uv} = \frac{1}{NM} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M f_{nm} e^{-i2\pi\left(\frac{un}{N} + \frac{vm}{M}\right)} \quad (3)$$

con $u = 1, 2, \dots, N$, $v = 1, 2, \dots, M$; la sua inversa (IDFT - Inverse Discrete Fourier Transform) è invece data dalla:

$$f_{nm} = \sum_{u=1}^N \sum_{v=1}^M F_{uv} e^{i2\pi\left(\frac{un}{N} + \frac{vm}{M}\right)} \quad (4)$$

Le matrici F_{uv} e f_{nm} sono in relazione esatta l'una con l'altra: se la DFT viene utilizzata

per il calcolo di F_{uv} , allora l'applicazione della DFT inversa riprodurrà esattamente la f_{nm} di partenza. I coefficienti di sviluppo per la trasformata discreta di Fourier F_{uv} sono numeri complessi $F_{uv} = F_{uv}^R + iF_{uv}^I$, ove F_{uv}^R rappresenta la parte reale e F_{uv}^I la parte immaginaria; tali numeri possono essere rappresentati anche in *forma polare*:

$$F_{uv} = F_{uv}^R + iF_{uv}^I = |F_{uv}|(\cos \Phi_{uv} + i \sin \Phi_{uv}) = |F_{uv}|e^{i\Phi_{uv}} \quad (5)$$

dove $|F_{uv}| = \sqrt{(F_{uv}^R)^2 + (F_{uv}^I)^2}$ rappresenta l'*ampiezza* o lo *spettro* e $\Phi_{uv} = \arctan \frac{F_{uv}^I}{F_{uv}^R}$ è la *fase*. Quindi la DFT di una matrice di valori genera due matrici delle medesime dimensioni, F_{uv}^R e F_{uv}^I oppure $|F_{uv}|$ e Φ_{uv} . Si noti che i coefficienti F_{uv}^R e F_{uv}^I non sono indipendenti: infatti, dalle relazioni facilmente dimostrabili

$$\cos \left[2\pi \left(\frac{un}{N} + \frac{vm}{M} \right) \right] = \cos \left[2\pi \left(\frac{(N-u)n}{N} + \frac{(M-v)m}{M} \right) \right] \quad (6)$$

$$\sin \left[2\pi \left(\frac{un}{N} + \frac{vm}{M} \right) \right] = -\sin \left[2\pi \left(\frac{(N-u)n}{N} + \frac{(M-v)m}{M} \right) \right] \quad (7)$$

segue che:

$$\begin{aligned} F_{uv}^R &= F_{N-u, M-v}^R & F_{uv}^I &= -F_{N-u, M-v}^I \\ |F_{u,v}| &= |F_{N-u, M-v}| & \Phi_{u,v} &= -\Phi_{N-u, M-v} \end{aligned} \quad (8)$$

Risulta inoltre opportuno combinare le prime due relazioni in forma complessa:

$$F_{uv} = F_{N-u, M-v}^* \quad (9)$$

dove $z^* = a - ib$ indica il coniugato del numero complesso $z = a + ib$. Ciò significa che non occorre calcolare tutti i coefficienti F_{uv}^R , F_{uv}^I , ma solo un quarto circa di essi.

Si consideri la convoluzione nel caso bidimensionale discreto fra due matrici f_{ij} e h_{ij} , in cui h_{ij} è la matrice che contiene il segnale da filtrare mentre f_{ij} è il filtro. La matrice g_{ij} risultante dalla loro convoluzione è data da:

$$g_{ij} = h_{ij} * f_{ij} \quad (10)$$

Passando al dominio delle frequenze, per il teorema della convoluzione applicato al caso discreto si ha:

$$g_{ij} = h_{ij} * f_{ij} \Rightarrow G_{uv} = H_{uv} * F_{uv} \quad (11)$$

in cui G_{uv} e F_{uv} sono le trasformate discrete di Fourier rispettivamente della matrice di partenza e del filtro.

Il teorema di convoluzione discreta può essere quindi schematizzato in Figura 5. Dal puro punto di vista computazionale, il calcolo di una DFT è un'operazione molto onerosa; esiste però la possibilità di sfruttare le caratteristiche ricorsive della funzione attraverso la cosiddetta *Fast Fourier Transform* (Brigham E.O., 1988) che nel caso bidimensionale di dimensione $N \times N$, permette la riduzione del numero di operazioni da N^4 a $N^2 \log_2(N)$: ad esempio, nel caso N sia 1000, il numero di operazioni scende da 10^{12} a circa 10^7 .

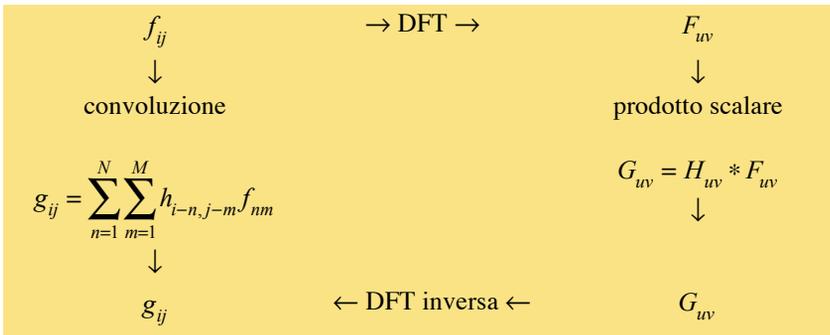


Figura 5. Convoluzione e relazioni nei domini dello spazio e delle frequenze.

2.1.2 Il filtraggio delle differenze fra modelli ad alta e bassa risoluzione

Si ritiene che il filtro di Butterworth fornisca una buona soluzione al nostro problema di filtraggio. Tale filtro infatti attribuisce maggior peso all'informazione nel nodo centrale della finestra e decresce con continuità. Nel caso in esame si ha a che fare con matrici molto grandi; si ricorda infatti che il DTM HD-1, e quindi anche la matrice delle sue differenze con il DTM PST-A, è formato da circa 116 milioni di celle. Una metodologia per il calcolo della convoluzione tra la matrice delle correzioni e il filtro è quindi rappresentata dall'applicazione del teorema di convoluzione discreta, attraverso cioè l'implementazione concatenata di due FFT, un prodotto scalare tra trasformate e infine una FFT inversa. Ovvero, riepilogando:

1. calcolo del modello delle correzioni,
2. costruzione del filtro di Butterworth,
3. calcolo della FFT delle correzioni e del filtro,
4. prodotto tra la FFT delle correzioni e del filtro,
5. FFT Inversa (IFFT) del prodotto per la ricostruzione delle correzioni filtrate,
6. somma delle correzioni al modello da correggere.

2.1.3 Taratura e applicazione ricorsiva del filtro

Per studiare il comportamento del filtro di Butterworth si è scelto di lavorare innanzitutto su modelli simulati, in modo da tarare empiricamente sia i parametri del filtro che le sue modalità di applicazione. Si è simulato quindi un modello da correggere su di una griglia con indici di riga e colonna (direzioni x e y) compresi fra 0 e 100 e passo uguale a 1 (ovvero $N = M = 101$). Si è simulato poi un modello di correzione già sottocampionato sulla griglia del precedente: tale modello occupa solamente la parte centrale della griglia (celle dalla 40 alla 60 in entrambe le direzioni), ed è caratterizzato da una differenza costante di quota pari a 3 metri rispetto a quello da correggere (Fig. 6).

Esiste quindi una discontinuità di 3 metri al bordo delle correzioni. Inizialmente si è generato un filtro di Butterworth con le seguenti caratteristiche: $D_0 = 2, n = 2, N = M = 5$. Il risultato dell'applicazione del filtro alle correzioni simulate è riportato in Figura 6: la discontinuità al bordo rimane troppo brusca anche dopo il filtraggio.

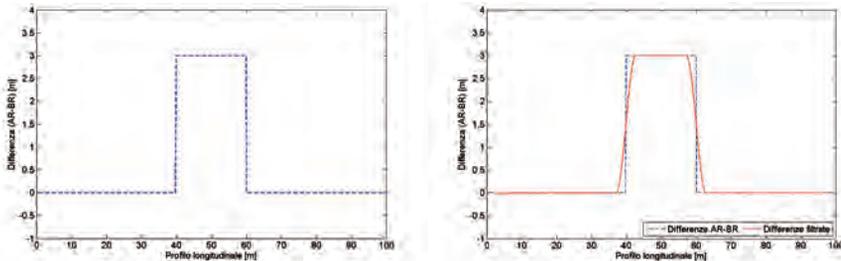


Figura 6. Dati simulati e primo filtraggio. A destra: correzioni originali; a sinistra: applicazione del filtro di Butterworth $D_0 = 2, n = 2, N = M = 5$

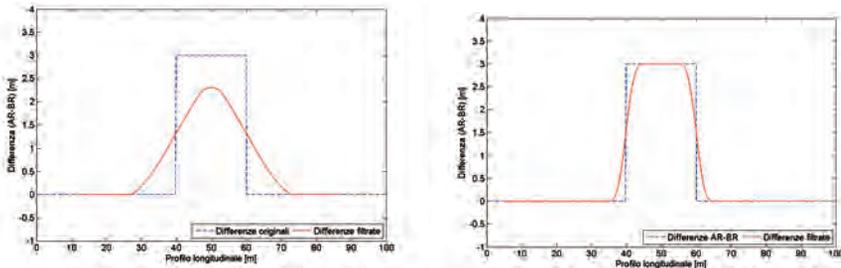


Figura 7. Filtraggio delle correzioni. A destra: applicazione di un filtro di Butterworth $D_0 = 20, n = 2, N = M = 51$; a sinistra: applicazione ripetuta due volte del filtro di Butterworth $D_0 = 2, n = 2, N = M = 5$

Naturalmente si possono ottenere risultati più lisci aumentando la dimensione del filtro: tuttavia ciò può comportare una significativa perdita di informazione nelle correzioni (Fig. 7). Una seconda soluzione è quella di applicare nuovamente il filtro alle correzioni già filtrate alla prima iterazione: anche in questo caso la discontinuità viene lisciata ma si perde

informazione (Fig. 7). Inoltre il filtro dovrebbe agire preferibilmente all'esterno del modello delle correzioni, in modo da lisciare le eventuali discontinuità, ma lasciare inalterati i dati al suo interno.

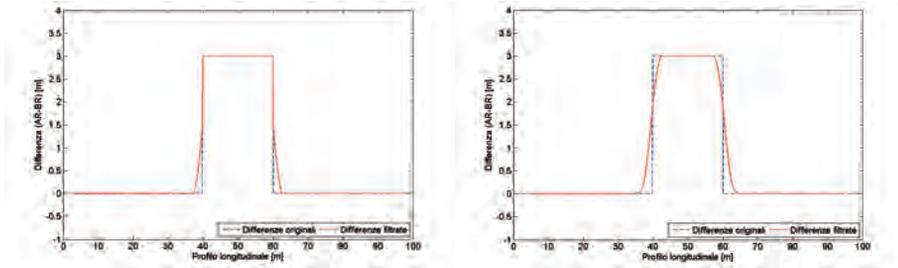


Figura 8. A destra, correzioni filtrate alla prima iterazione con seguente sostituzione delle correzioni originali: la linea rossa continua rappresenta il dataset di partenza per il secondo filtraggio. A sinistra: risultato alla seconda iterazione

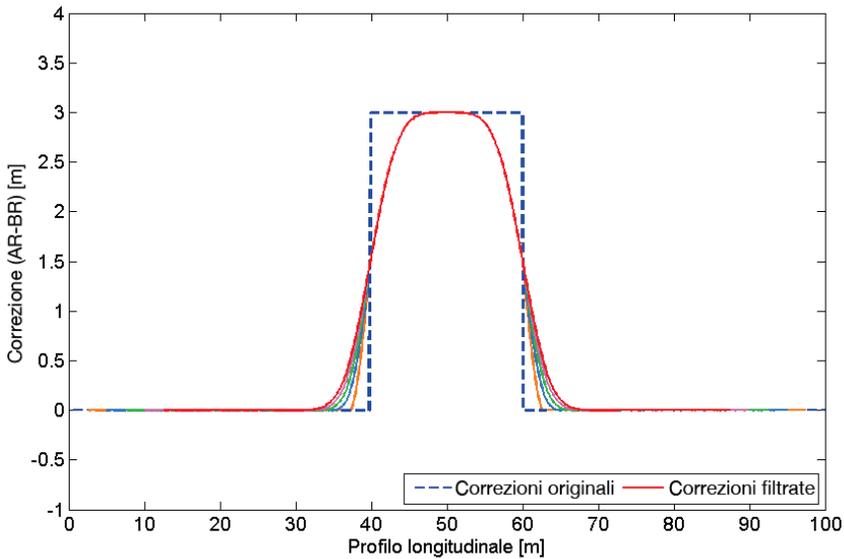


Figura 9. Correzioni filtrate dopo 5 iterazioni di filtraggio - sostituzione - filtraggio. Le linee di diverso colore indicano i diversi passi di iterazione; all'ultima iterazione (linea rossa) non viene effettuata la sostituzione

In alternativa, si può filtrare in modo iterativo sostituendo, ad ogni iterazione, le correzioni originali diverse da zero a quelle già filtrate (Fig. 8). In questo modo il filtro agisce prevalentemente sulla zona esterna alle correzioni, lisciando maggiormente la transizione e conservando il più possibile le correzioni all'interno. L'approccio di filtraggio – sostituzione – filtraggio può essere iterato un numero qualsivoglia di volte, in modo da lisciare

opportunamente le discontinuità: l'effetto prodotto è ben visibile in Figura 9, dove sono riportati sullo stesso grafico i risultati di cinque iterazioni consecutive.

Si noti un ultimo aspetto tecnico. Per l'ultima iterazione si sceglie di tenere le correzioni filtrate anche all'interno dell'area coperta dal relativo modello, anziché sostituirle ancora con i valori originali. Infatti, alcune analisi sulla distribuzione delle pendenze dei casi reali HELI-DEM hanno mostrato che il DTM PST-A, anche quando sottocampionato, presenta una rugosità maggiore rispetto al DTM HD-1. La scelta di utilizzare correzioni filtrate all'ultima iterazione evita di produrre un DTM finale con disomogeneità morfometriche. La procedura adottata viene schematizzata nel diagramma di flusso riportato in Figura 10.

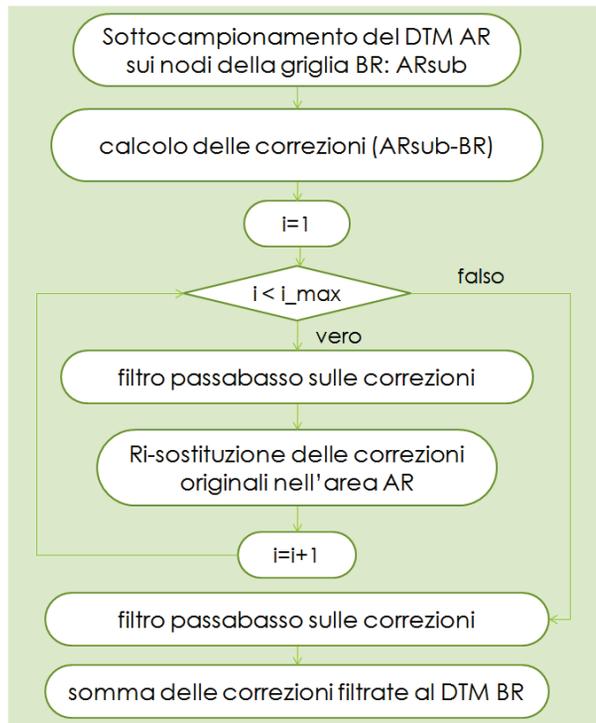


Figura 10. Diagramma di flusso della procedura di filtraggio

3 APPLICAZIONE DELLA PROCEDURA ADOTTATA AL DTM HELI-DEM

La procedura descritta nel paragrafo precedente è stata applicata per produrre il DTM finale HELI-DEM. Innanzitutto è stato prodotto il modello delle correzioni, calcolando le differenze (Fig. 11) tra il DTM PST-A sottocampionato e il DTM HD-1; alle correzioni è stato poi applicato il filtro di Butterworth, come descritto nella sezione precedente, con cinque iterazioni. Le correzioni filtrate sono quindi state applicate a HD-1. In accordo alla notazione introdotta nel Capitolo 8, tale DTM viene chiamato HD-2.

Per analizzare visivamente i benefici derivanti dall'utilizzo iterativo del filtro, a titolo di esempio vengono innanzitutto mostrati graficamente i risultati relativi a un'area localizzata nel bacino del fiume Oglio (Fig. 11 a destra). Inoltre, da questa, è stata estratta una sezione trasversale sulla quale si è valutato nel dettaglio l'effetto della procedura adottata: in Figura 12 la linea blu tratteggiata rappresenta le correzioni originali, mentre la linea rossa continua riporta le correzioni filtrate dopo l'ultima iterazione. Come si nota, le correzioni filtrate finali seguono l'andamento di quelle originali riducendone le alte frequenze.

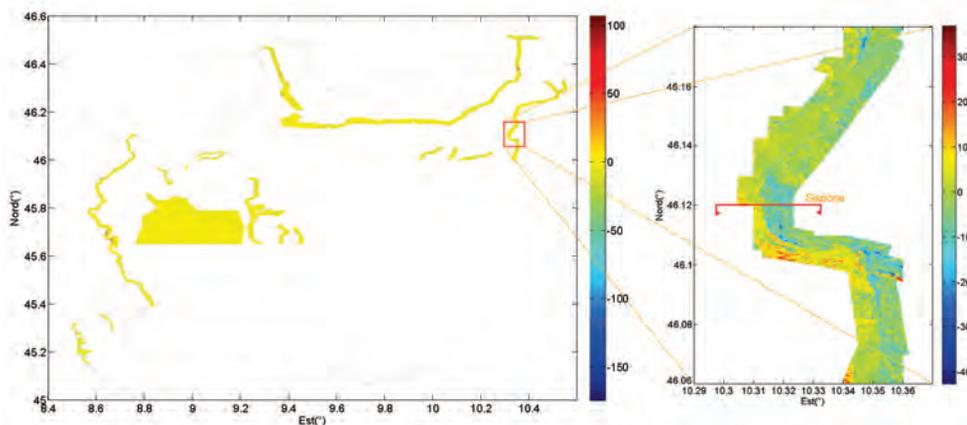


Figura 11. Differenze tra DTM PST-A e HD-1 (a sinistra) e georeferenziazione della sezione di esempio della Figura successiva (a destra): valori delle differenze in metri

Al fine di visualizzare l'effetto del filtro in modo tridimensionale, in Figura 13 si riportano le differenze tra PST-A e HD-1 nell'area di esempio, prima e dopo l'applicazione del filtro: si nota in modo particolare l'evidente effetto del filtraggio al bordo del DTM PST-A. Per la medesima valle, la Tabella 1 riporta le statistiche delle differenze, prima e dopo la correzione: il sistematismo viene rimosso e la deviazione standard diminuisce significativamente. Le piccole differenze residue sono dovute al fatto che all'ultima iterazione vengono utilizzate le correzioni filtrate e non quelle originali.

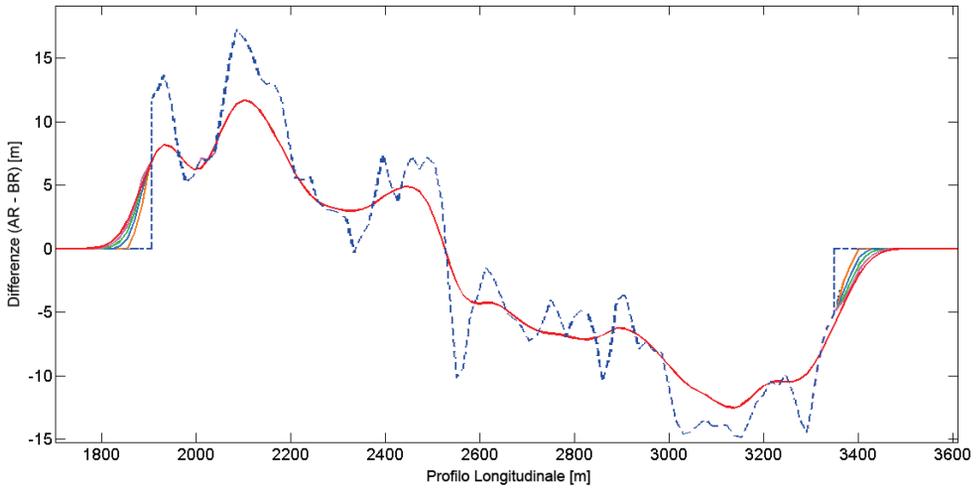


Figura 12. Profilo delle correzioni, originali (linea blu tratteggiata) e filtrate (linee continue, corrispondenti alle diverse iterazioni), della sezione lungo la valle del fiume Oglio

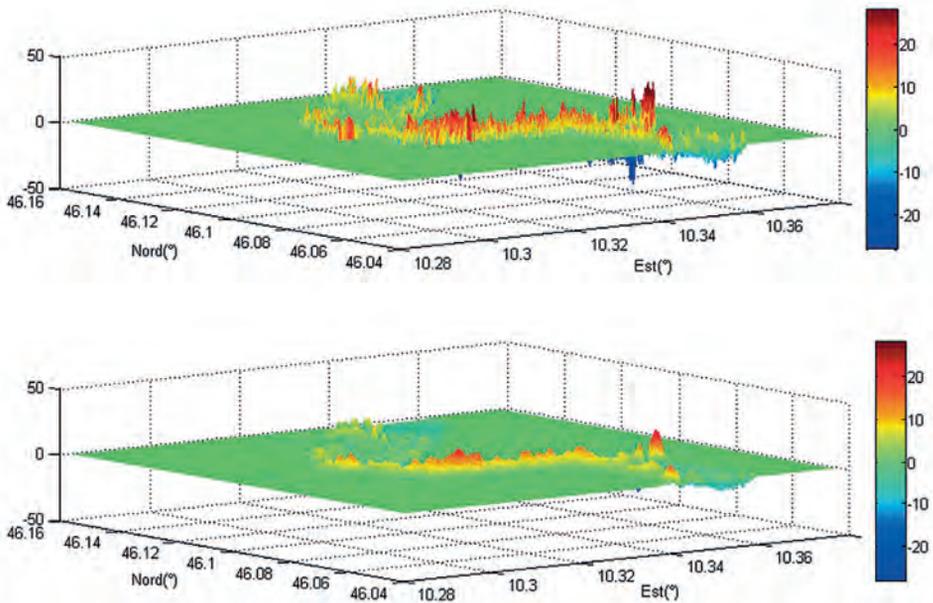


Figura 13. Correzioni, originali (sopra) e filtrate (sotto) lungo la valle del fiume Oglio

	media [m]	std [m]	min [m]	max [m]
PST-A - HD-1	-1.9	5.8	-42.7	36.7
PST-A - HD-2	0.0	1.1	-22.5	23.1

Tabella 1. Statistiche delle differenze tra DTM PST-A e HD-1 (DTM prima delle correzioni) / HD-2 (DTM corretto): area di esempio del fiume Oglio

Analogamente sono state calcolate le statistiche delle differenze anche per l'area globale di progetto (Tab. 2). In questo caso il miglioramento apportato è ancora più evidente: tali risultati, che possono essere definiti di validazione interna, sono del tutto soddisfacenti.

	media [m]	std [m]	min [m]	max [m]
PST-A - HD-1 originale	0.3	6.0	-174.6	186.8
PST-A - HD-2	0.0	0.4	-97.4	108.4

Tabella 2. Statistiche delle differenze tra DTM PST-A e HD-1 (DTM prima delle correzioni) / HD-2 (DTM corretto): intera area HELI-DEM

3.1 Validazione del DTM corretto con le misure RTK

La validazione interna del DTM HD-2, ovvero il suo confronto con il modello di correzione, fornisce risultati molto soddisfacenti. Per una ulteriore validazione esterna si sono utilizzati i punti GPS RTK raccolti nella zona della Valtellina e già descritti nel Capitolo 6.1. Tale analisi è utile per valutare se la correzione porta effettivamente ad un miglioramento del prodotto finale.

Le quote dei punti GPS (in totale 943 punti) di tutte le zone sono state raccolte e unite in un unico dataset. I DTM HD-1, PST-A sottocampionato e HD-2 sono quindi stati interpolati mediante interpolazione bicubica sui punti GPS. Si sono quindi calcolate nei tre casi le differenze tra i modelli e le quote GPS.

	media [m]	std [m]	min [m]	max [m]
HD-1 - RTK	3.4	5.5	0.0	24.2
PST-A - RTK	-0.3	1.0	0.0	7.2
HD-2 - RTK	-0.4	1.7	0.0	8.8

Tabella 3. Statistiche delle differenze tra quote dei diversi DTM e GPS RTK

La Tabella 3 riporta le statistiche per i tre confronti. Le statistiche di confronto tra PST-A e RTK sono significativamente peggiori di quanto riportato nel Cap. 6.1, semplicemente perchè in questo caso il DTM è sottocampionato a 2×10^{-4} gradi sessagesimali (circa 20 m), rispetto al passo originale di 10^{-5} (circa 1 m). In ogni caso esse sono, come ci si attende, molto migliori di quelle di HD-1. Le statistiche dimostrano inoltre l'efficacia della correzione applicata: la media e la deviazione standard delle differenze di HD-2 sono significativamente migliori di quelle di HD-1 e si avvicinano a quelle di PST-A. Le differenze residue sono dovute all'ultima applicazione del filtro che non presenta ricostituzione dei dati LiDAR

originali. Si noti che la verifica sul miglioramento apportato dalla correzione di HD-1 è stata effettuata solo all'interno delle zone in cui il DTM PST-A è presente, poichè in tali zone sono state condotte le campagne di rilievo RTK. E' utile confrontare l'efficacia delle correzioni anche nelle zone immediatamente esterne al bordo del DTM PST-A, poichè anche esse hanno subito l'azione del filtro. A tal fine si stanno effettuando apposite campagne di misura GNSS, i cui risultati non sono però ancora definitivi all'epoca di stampa del presente volume.

4 CONCLUSIONI

E' disponibile il DTM HD-1, che copre l'intera area di progetto HELI-DEM, ovvero l'arco transalpino fra Lombardia, Piemonte e Svizzera, con risoluzione di 2×10^{-4} gradi sessadecimali (circa 20 m) e accuratezza dell'ordine di 10 m. Per i fondovalle dei principali bacini idrografici nel settore italiano è disponibile anche un modello (DTM PST-A) ad alta risoluzione e accuratezza migliore di almeno un ordine di grandezza. Si è studiata una procedura per correggere il modello a bassa risoluzione con i dati più accurati. Tale procedura sfrutta un procedimento iterativo di filtraggio mediante filtro di Butterworth, la cui implementazione numerica è ottimizzata mediante applicazione di FFT. Per alcune aree erano disponibili valori di quota GPS RTK: questi hanno permesso di verificare la qualità della correzione e di validare, perlomeno a campione, il DTM corretto, denominato HD-2. Da ultimo si rimarca che le procedure descritte in questo capitolo, come quello discusse nel capitolo precedente, sono sufficientemente generalizzate da poter essere applicate anche ad altri contesti: quindi costituiscono un risultato metodologico.

BIBLIOGRAFIA

Dermanis A., Biagi L., *Telerilevamento. Informazione territoriale mediante immagini da satellite*. Casa Editrice Ambrosiana, 2002.

Brigham E.O., *The Fast Fourier Transform and its applications*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1988.

CAPITOLO 11

IL GEOIDE: FUSIONE DEI DATI DISPONIBILI

M. Gilardoni (1), M. Reguzzoni (2), D. Sampietro (3)

(1) Politecnico di Milano, DICA, Laboratorio di Geomatica presso Polo Territoriale di Como, Via Valleggio 11, 22100 Como

(2) Politecnico di Milano, DICA, Piazza Leonardo da Vinci 32, 20132, Milano

(3) GR&D srl, Geomatics Research & Development, via Morozzo della Rocca 3, IT-20123 Milano

SOMMARIO

Il geoide, ovvero la superficie equipotenziale del campo gravitazionale terrestre che meglio approssima il livello medio dei mari, ha una grande importanza nella cartografia perché permette di trasformare quote ellissoidiche in quote ortometriche e viceversa e nell'ingegneria ambientale e civile in generale, perché definisce implicitamente la direzione della verticale in un determinato punto.

Modelli locali del geoide di nazioni confinanti, oltre ad avere accuratèzze e risoluzioni differenti, presentano spesso inconsistenze e/o discontinuità. Queste anomalie sono dovute principalmente ai differenti datum d'altezza utilizzati nella stima dei geoidi locali. Tuttavia per alcune applicazioni ingegneristiche transfrontaliere l'unione di più geoidi locali è necessaria e non può basarsi su una semplice media dei due dataset nella zona di sovrapposizione senza tenere in considerazione i vari sistematismi presenti. Per risolvere questo problema è possibile sfruttare modelli del campo gravitazionale terrestre stimati da soli dati satellitari, questi modelli, non essendo affetti da bias locali perché non basati su dati di gravità a terra, possono infatti fornire una stima corretta delle basse frequenze dell'ondulazione del geoide (lunghezze d'onda maggiori di 100 km).

La strategia di unione applicata nel presente lavoro si suddivide in due passi: inizialmente, sfruttando il modello globale GOCE, si stimano i bias dei due geoidi locali con i minimi quadrati e successivamente si uniscono tali geoidi con una procedura di collocazione. Nello specifico dopo aver stimato un bias complessivo di circa 1 m per l'Italia e di circa 0.8 m per la Svizzera, è stato calcolato tramite collocazione un unico geoide italo-svizzero "unbiased" con un'accuratezza stimata dell'ordine di qualche centimetro.

ABSTRACT

The geoid, i.e. the equipotential surface of the Earth's gravity field that best approximates the mean sea level, has a great importance in cartography and in environmental and civil engineering in general. In fact it allows to convert ellipsoidal heights to orthometric ones (and vice versa) and it implicitly defines the direction of the vertical at given point.

Local geoid models of neighboring countries usually have different resolutions and accuracies and moreover often present inconsistencies and/or discontinuities at the borders.

These anomalies are mainly due to the different height datum used in the estimation of the local geoids. However, for some engineering applications cross-border merging of multiple local geoids is necessary and cannot be based on a simple average of the two datasets in the overlapping area without taking into account the various inconsistencies and biases.

To solve this problem one can take advantage of the global Earth's gravity field models estimated from satellite data: these models are not affected by local biases since they are not based on ground gravity data and therefore they may provide a correct estimate of the low frequency of the geoid undulations (wavelengths greater than 100 km).

In the present work a two-step algorithm to merge local geoids using GOCE global model is presented. Firstly we estimate the biases of the two local geoids by a least squares adjustment and after that the unbiased geoids are combine by means of a collocation procedure. Particular attention is given to the estimate of the covariance function of the high frequency signal and the covariance matrix of the error of the GOCE model. After estimating a bias of about 1 m for the Italian geoid and about 0.8 m for the Swiss one, a unique Italian-Swiss "unbiased" geoid with an accuracy of few centimeters has been computed.

1 INTRODUZIONE

Come ben noto in letteratura modelli locali di geoidi sono generalmente affetti da sistematismi (Colombo, 1980; Rummel e Teunissen, 1988; Xu, 1992) dovuti a diverse cause tra cui differenze nel mareografo preso come riferimento, disomogeneità nel sistema di riferimento utilizzato ed effetti di bordo.

I modelli locali di geoide infatti sono solitamente calcolati a partire da misure di livellazione in combinazione con dati di gravimetria lungo le linee di livellazione stesse in modo tale da poter determinare differenze di potenziale. Il problema presenta ovviamente una deficienza di rango in quanto per passare da differenze di potenziale (osservate) a potenziale è necessario fissare un valore di riferimento in un determinato punto. La scelta del punto e del valore di potenziale da fissare è sostanzialmente arbitraria ma siccome in generale si vogliono esprimere le altezze in funzione del livello del mare, questo punto viene generalmente determinato in corrispondenza del livello medio del mare osservato da un determinato mareografo. Con tale livello medio viene definita una superficie equipotenziale del campo di gravità terrestre a cui è associato il valore di riferimento del potenziale. Tale superficie è appunto il geoide.

Globalmente esistono differenti *datum* d'altezza che si riferiscono a superfici equipotenziali diverse (ogni nazione ha il suo mareografo di riferimento, caposaldo di partenza per la rete di livellazione nazionale), e in molti casi visualizzando i geoidi di nazioni confinanti si nota un salto lungo il confine. Questi *bias* devono essere tenuti in considerazione e opportunamente rimossi quando si vuole creare un unico geoide per più nazioni. La Figura 1 aiuta a comprendere questo concetto.

Nel caso della regione di interesse del progetto HELI-DEM, ovvero la fascia alpina e subalpina, tra Italia e Svizzera, costituita da parte del Piemonte, della Lombardia e dei Cantoni Ticino, Grigioni e Vallese i principali modelli di geoide locali ad alta risoluzione sono Italgeo2005 (Barzaghi et al., 2007) e CHGeo2004 (Marti, 2005). Inoltre sono disponibili i modelli globali del campo gravitazionale terrestre ad alta risoluzione EGM2008 (Pavlis et al.,

2012) e quello stimato a partire dalle osservazioni della missione satellitare dell'Agenzia Spaziale Europea GOCE (in particolare nel presente lavoro è stato usato il modello GOCESPWR2, Migliaccio et al., 2011).

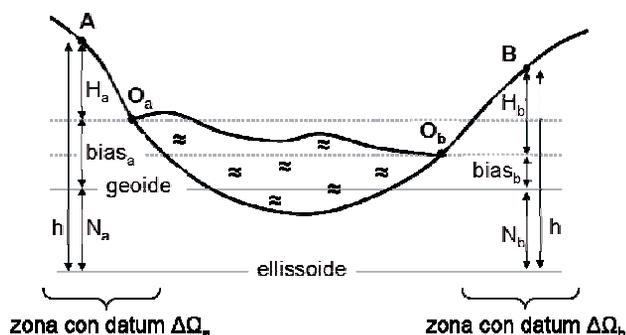


Figura 1. Relazione fra ondulazione del geoide (N), altezza ellissoidica (h) e altezza ortometrica nella zona con datum $\Delta\Omega_a$ (H_a) e $\Delta\Omega_b$ (H_b) per i due capisaldi A e B. La linea tratteggiata rappresenta la superficie equipotenziale passante per i punti O_a e O_b presi come origine del datum. N_a e N_b sono le corrispondenti altezze di queste superfici sopra l'ellissoide

La procedura qui presentata si avvale dell'utilizzo di questi modelli globali di gravità per la stima dei *bias*. In particolare la procedura per fondere geoidi locali è divisa in due parti: la prima consiste in una stima ai minimi quadrati dei *bias* presenti e la seconda in una procedura di collocazione standard per la fusione dei due geoidi, ora privi di *bias*, in un'unica soluzione locale sull'area di confine.

Nei seguenti paragrafi vengono dapprima presentati in modo dettagliato i dati disponibili, confrontando e validando i diversi modelli di geoidi. In seguito viene descritta la procedura utilizzata e come questa sia stata applicata al caso specifico e infine vengono presentati e validati i principali risultati ottenuti.

2 GEOIDI DI INTERESSE NEL PROGETTO HELI-DEM

I Geoidi disponibili nell'area di interesse HELI-DEM, considerati in questo studio, sono:

1. Italgeo2005,
2. CHGeo2004,
3. EGM2008,
4. GOCESPWR2.

Il geoide Italgeo, calcolato dal Politecnico di Milano in collaborazione con l'Istituto Geografico Militare (IGM) di Firenze, è il modello ufficiale italiano ed è valido solo sul territorio nazionale e nelle zone immediatamente adiacenti. Deriva da misure gravimetriche integrate ad osservazioni *GPS-leveling* (eseguite per collegare la rete geodetica IGM95 alla rete di livellazione nazionale) e a misure di deviazione della verticale (astronomiche) e tiene

conto della conformazione topografica del terreno. Le misure *GPS-leveling* hanno permesso di rendere il modello Italgoe, a partire dalla versione Italgoe99, congruente con il *datum* altimetrico nazionale realizzato dalla rete di livellazione di alta precisione dell'IGM, con zero sul mareografo di Genova (Catania per la Sicilia e Cagliari per la Sardegna). Il modello Italgoe è stato rilasciato in versioni successive via via più accurate, la più recente delle quali è Italgoe2005 al quale viene attribuita un'accuratezza assoluta dell'ordine dei 10 cm e una risoluzione di 3' (circa 5 km).

CHGeo2004 è il geoido ufficiale svizzero, è stato determinato combinando osservazioni di gravità, deviazione della verticale e *GPS-leveling*. La sua precisione (1σ) è dell'ordine di 2-3 cm. Nelle regioni al di fuori della Svizzera, non sono presenti osservazioni dirette, ma il geoido è regolarizzato utilizzando modelli di geoidi locali dei paesi confinanti o il modello di geoidi europeo EGG97 (Denker and Torge, 1998). Oltre ai modelli standard (topografia e modello geopotenziale globale EGM96), un semplice modello 3D di densità della crosta terrestre è stato introdotto per la riduzione delle osservazioni. Il modello ha una risoluzione di 30" (meno di 1 km).

EGM2008 è un modello globale del campo gravitazionale terrestre, calcolato e distribuito come coefficienti di una serie di armoniche sferiche con grado armonico massimo di 2159 (corrispondente a una risoluzione spaziale di circa 10 km). Il modello EGM2008 è calcolato combinando in un sistema ai minimi quadrati osservazioni della missione satellitare GRACE con un *dataset* di anomalie di gravità *free-air* medie con risoluzione di 5' x 5'. L'accuratezza stimata per il modello EGM2008 nella zona di interesse è dell'ordine di 5-7 cm (deviazione standard), tuttavia poiché EGM2008 ha un elevato contenuto di osservazioni di gravità terrestre nell'area considerata è anch'esso affetto dai problemi di *bias* descritti nell'introduzione di questo capitolo.

L'ultimo modello utilizzato è il modello sviluppato dal Politecnico di Milano GOCEPWR2. Tale modello è, come EGM2008, distribuito in termini di coefficienti di una serie di armoniche sferiche, tuttavia in questo caso il massimo grado armonico del modello è 240 (corrispondente a una risoluzione spaziale di circa 80 km). La caratteristica principale di questo modello è quella di essere derivato solamente da osservazioni satellitari, ovvero osservazioni acquisite sempre dallo stesso strumento e nella stessa modalità sul mondo intero, e quindi di essere privo da ogni tipo di sistematismo. L'accuratezza di tale modello alla massima risoluzione è di circa 4 cm (standard deviation).

Al fine di validare i diversi modelli di geoidi disponibili sono stati eseguiti due diverse tipologie di confronti:

- confronti diretti tra griglie di geoidi dove tutti i modelli sono disponibili,
- confronti tra ogni geoido e una serie di punti *GPS-leveling*.

In particolare per il primo confronto i due geoidi locali sono stati ricampionati sulla stessa griglia, nel rettangolo geografico 7°- 10° 30' Est 45°45'-47° Nord con risoluzione di 3' (pari a quella di Italgoe2005). Sugli stessi punti è stata calcolata anche l'ondulazione del geoido del modello EGM2008. In questi primi confronti il modello GOCE non è stato utilizzato, infatti considerando che la sua risoluzione massima è di circa 80 km, i residui sarebbero stati completamente dominati dalle alte frequenze del segnale.

Analizzando i risultati ottenuti si può vedere come le differenze tra CHGeo2004 e

Italgeo2005 siano notevoli, 13.3 cm di deviazione standard, ma consistenti con gli errori dichiarati per i due modelli. Tuttavia dal confronto tra CHGeo2004 e Italgeo2005, in Figura 2, si vede come le differenze tra geoidi italiano e svizzero siano particolarmente importanti sulla zona di confine e presentino *features* di carattere topografico/geologico (ad esempio è ben riconoscibile la diversa modellizzazione del corpo di Ivrea 8°E 45.75°N che produce una differenza tra i due modelli dell'ordine di 40 cm oppure la regione dei laghi Maggiore e di Como anch'essa con residui dell'ordine di 40 cm). Inoltre sempre dalla Figura 2 si può notare come le differenze tra i due modelli locali presentino una forte correlazione spaziale e una media significativamente diversa da zero (30 cm).

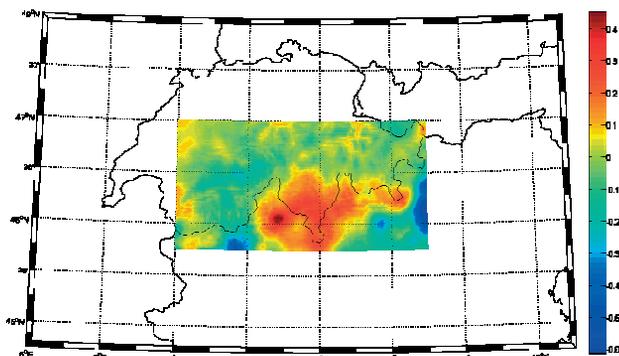


Figura 2. differenza in metri tra geoidi italiano e svizzero (CHGeo2004 - Italgeo05) nella zona di confine

Inoltre è possibile distinguere chiaramente (differenze fino a 60 cm) le zone dove l'anomalia di altezza del modello di quasi geoidi europeo EGG97 è stata usata come input per il calcolo del geoidi CHGeo2004 (cfr. Marti, 2005). È da sottolineare che i dati di EGG97 sono stati introdotti in CHGeo2004 solo all'esterno del territorio svizzero per stabilizzare la stima delle basse frequenze del campo di gravità. È in ogni caso noto in letteratura che il quasi-geoidi EGG97 presenta errori generalmente inferiori ai 5 cm nel territorio europeo ma con comportamenti anomali proprio nella regione alpina e con discrepanze ad esempio rispetto alla rete EUVN_DA che possono arrivare anche a 40 cm (Kenyeres et al., 2007).

Le differenze tra EGM2008 e i geoidi locali (Figure 3 e 4) mettono in evidenza la mancanza delle alte frequenze nel modello globale (specialmente nel confronto con il geoidi svizzero). In particolare nella differenza tra Italgeo2005 e EGM2008 appare nuovamente una differenza importante (maggiore di 30 cm) in corrispondenza del corpo di Ivrea, questo fa pensare a una non corretta modellizzazione in Italgeo2005 dell'anomalia di densità in questa zona.

Nella differenza tra CHGeo2004 e EGM2008 compare nuovamente la regione dove sono stati introdotti in CHGeo2004 le anomalie d'altezza di EGG97 (scarti che arrivano fino a 90 cm). A parte questo, le differenze maggiori sembrano essere correlate con le alte frequenze della topografia e sono probabilmente dovute al fatto che la correzione da quasi-geoidi a geoidi in EGM2008 è calcolata a partire da un modello digitale del terreno sviluppato in termini di armoniche sferiche fino a grado 2159 e quindi con risoluzione di circa 10 km

(Lemoine et al., 1998), probabilmente non sufficiente per descrivere la complessità della topografia nella regione alpina.

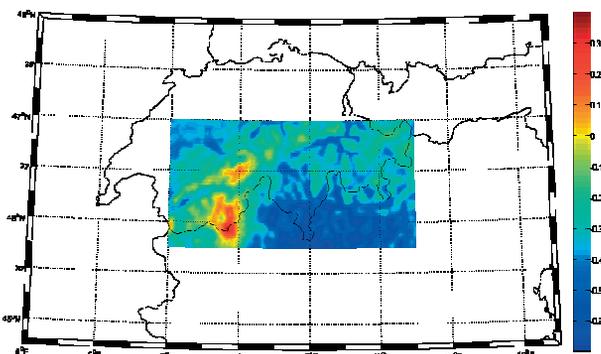


Figura 3. differenza in metri tra geoidi italiano e EGM2008 (Italgeo05 - EGM2008) nella zona di confine

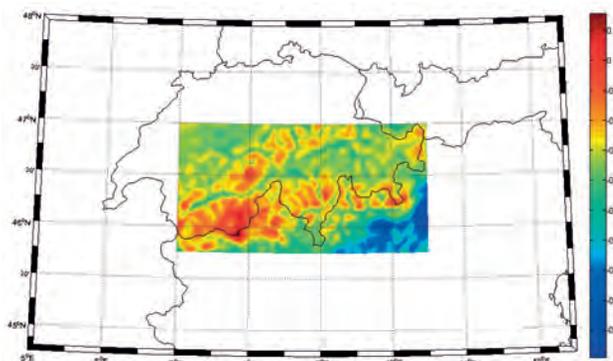


Figura 4. differenza in metri tra geoidi svizzero e EGM2008 (CHGeo2004 - EGM08sw) nella zona di confine

Per quanto riguarda il secondo confronto, ovvero il confronto tra l'ondulazione del geoidi ottenuta mediante la differenza tra quota ellissoidica da misure GNSS e quota ortometrica da livellazione e i modelli di geoidi considerati, sono stati usati i punti *GPS-leveling* del dataset "Swiss GPS-Leveling data" del Federal Office of Topography e i punti della rete nazionale italiana (Surace, 1997), in particolare sono stati utilizzati 45 punti del *dataset* italiano e 91 punti del *dataset* svizzero (Figura 5).

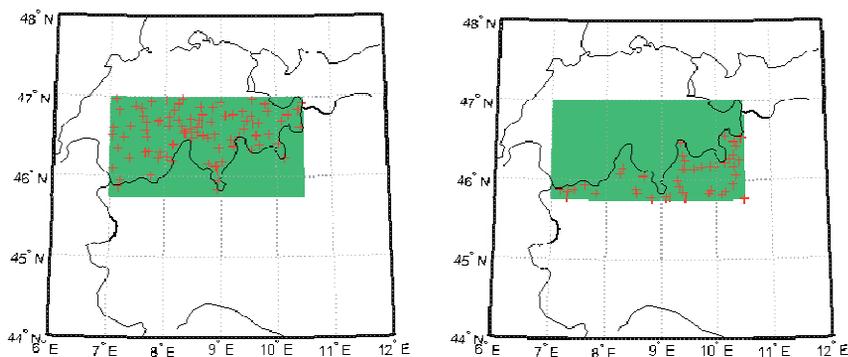


Figura 5. punti di *GPS-leveling* usati per il confronto, in verde la zona di sovrapposizione dei geoidi considerata per la cross-validazione

I risultati ottenuti sono riassunti nella Tabella 1 dove si può vedere come i geoidi locali risultino consistenti con i rispettivi punti *GPS-leveling* in particolare il Italgeo2005 presenta differenze rispetto ai punti *GPS-leveling* italiani dell'ordine di 2-3 cm (deviazione standard) mentre CHGeo2004 presenta differenze rispetto al database nazionale di soli 6 mm (deviazione standard). È interessante inoltre notare come i punti *GPS-leveling* svizzeri siano consistenti con EGM2008, a meno di una costante di 0.347 m (imputabile a un *bias* nell'altezza ortometrica dei punti *GPS-leveling*) e un errore ad alta frequenza di 0.06 m (deviazione standard) comparabile con l'errore di commissione di EGM2008 nella regione alpina (Pavlis et al., 2008).

	Geoid-GPS/lev. punti italiani	Geoid-GPS/lev. punti svizzeri	Geoid-GPS/lev.
ITALGEO2005 (media)	0.001 m	0.012 m	0.008 m
CHGeo2004 (media)	0.006 m	-0.002 m	0.001 m
EGM08 (media)	-0.445 m	-0.347 m	-0.380 m
ITALGEO2005 (std)	0.024 m	0.094 m	0.078 m
CHGeo2004 (std)	0.180 m	0.006 m	0.103 m
EGM08 (std)	0.165 m	0.064 m	0.117 m
ITALGEO2005 (max)	0.060 m	0.283 m	0.283 m
CHGeo2004 (max)	0.441 m	0.015 m	0.441 m
EGM08 (max)	0.151 m	-0.166 m	0.151 m
ITALGEO2005 (min)	-0.040 m	-0.168 m	-0.168 m
CHGeo2004 (min)	-0.239 m	-0.031 m	-0.239 m
EGM08 (min)	-0.684 m	-0.472 m	-0.684 m

Tabella 1. Statistiche dei residui dei geoidi considerati rispetto ai punti GPS/leveling

Inoltre da questo confronto emerge come i residui di CHGeo2004 e EGM2008 rispetto ai punti italiani presentino caratteristiche spaziali e forme simili che possono quindi esser imputati a qualche problematica nei punti *GPS-leveling* (ad esempio effetti dovuti alla correzione

ortometrica che possono arrivare anche fino a una decina di centimetri in zone di alta variabilità della crosta).

3 IL PRINCIPIO DI COMBINAZIONE

I modelli di geoidi nazionali forniscono l'ondulazione del geoide per determinati punti di cui è nota la posizione (latitudine, longitudine) in un dato sistema di riferimento. Questa osservazione può essere considerata come composta da tre termini: il valore di ondulazione vero (funzione lineare del potenziale anomalo; Sansò et Sideris, 2013), un *bias* dovuto a tutti gli effetti presentati nell'introduzione, che in questo studio si suppone costante, e l'errore d'osservazione.

I modelli globali di gravità invece forniscono una rappresentazione del campo gravitazionale tramite i coefficienti dello sviluppo in serie di armoniche sferiche del potenziale e le relative accurattezze; lo sviluppo è troncato ad un grado massimo che contraddistingue la risoluzione spaziale del modello globale. A partire dai coefficienti si può calcolare tramite una sintesi armonica il valore del potenziale anomalo, e di conseguenza l'ondulazione del geoide, in un qualsiasi punto dello spazio (Heiskanen et Moritz, 1967).

È importante notare che negli ultimi decenni diverse missioni satellitari hanno permesso di conoscere sempre meglio il campo di gravità terrestre. La missione GRACE basata sul principio del *satellite-tracking* in *low-low mode* (JPL, 1998) ha permesso di conoscere con precisione centimetrica i bassissimi gradi armonici del potenziale (lunghezze d'onda superiori a 160 km). Successivamente il satellite GOCE, lanciato nel 2009, (Drinkwater et al., 2006) misurando le derivate seconde del potenziale tramite un gradiometro di precisione montato a bordo, ha permesso di incrementare la conoscenza anche a frequenze superiori. Questo satellite, che vola ad una quota di circa 260 km, ha permesso infatti di conoscere il geoide con un'accuratezza di 1-2 cm ad una risoluzione di 100 km. Per risoluzioni superiori l'errore di stima crescerebbe fino a diventare maggiore del segnale derivato da gravimetria e di conseguenza non è sensato proseguire nello sviluppo armonico oltre al grado tra 250 e 360.

La procedura qui presentata si basa su un'analisi in frequenza dei segnali sopra descritti: il potenziale anomalo può essere scomposto in una parte a bassa frequenza (fino a grado 200 circa, che equivale a 100 km di risoluzione) e da una parte ad alta frequenza (per risoluzioni superiori).

I modelli locali, calcolati a partire da misure di gravimetria terrestre, contengono un'informazione su tutto lo spettro di frequenza mentre i modelli globali, essendo la serie di armoniche sferiche troncata a un certo grado massimo implicitamente definito dall'accuratezza e dalla risoluzione dei dati disponibili per la stima del modello, forniscono informazioni accurate solo ai bassi gradi.

Rimuovendo ad un geoide locale la componente di bassa frequenza (N_{bassa}) data da un modello globale GOCE *satellite-only* (ciò che si sottrae è la sintesi dei coefficienti da grado 0 a grado 200) si ottiene quindi la somma del *bias* b (per definizione a bassissima frequenza e di cui la componente maggiore è una costante), della componente di alta frequenza del geoide N_{alta} e dei vari errori di misura (errore delle osservazioni di GOCE, e_{GOCE} , propagate al

geoide e *noise* del modello locale v):

$$N_{res} = N - N_{bassa} = b + N_{alta} + e_{GOCE} + v \quad (1)$$

Si può quindi utilizzare una procedura ai minimi quadrati per stimare il *bias* incognito b come:

$$b = (D^T Q^{-1} D)^{-1} D^T Q^{-1} N_{res} \quad (2)$$

$$Q = C_{N_{alta}} + C_{e_{GOCE}} + C_v \quad (3)$$

dove le osservazioni sono date dai residui (N_{res}) ottenuti come sopra, D è la matrice disegno la cui struttura dipende dalla forma del *bias* che si vuole stimare (ad esempio nel caso si voglia stimare una costante, D è una matrice di 1) e la matrice dei cofattori Q tiene in opportuna considerazione la struttura stocastica, vale a dire la matrice di varianza-covarianza, della parte ad alta frequenza del segnale ($C_{N_{alta}}$) considerato interamente come un residuo stocastico, dell'errore dei coefficienti del modello globale *GOCE-only* propagata al geoide ($C_{e_{GOCE}}$) e dell'errore del modello locale (C_v). Quest'ultimo termine può essere ipotizzato, in mancanza di ulteriori informazioni, come errore bianco e la sua matrice di varianza e covarianza viene quindi modellizzata come una matrice diagonale in cui i valori sulla diagonale sono tutti uguali alla varianza fornita da chi ha calcolato il modello. È bene precisare che questa ipotesi di rumore bianco è piuttosto forte e poco plausibile poiché nel calcolo del geoide locale a partire da dati di anomalia di gravità attraverso le tecniche classiche di geodesia fisica (Sansò et Sideris, 2013) si creano significative correlazioni. La matrice di varianza-covarianza dell'errore di GOCE viene calcolata, nota la relazione fra coefficienti armonici e geoide, attraverso la legge di propagazione applicata alla matrice di varianza-covarianza dei coefficienti armonici fornita da chi calcola il modello globale. Infine per la parte ad alta frequenza del segnale, la matrice di varianza-covarianza può essere calcolata a partire da una funzione di covarianza teorica stimata a sua volta da un variogramma empirico. Questo variogramma è calcolato dai residui dei due geoidi nella parte di sovrapposizione. Per definizione infatti il variogramma (Wackernagel, 2003) è una funzione che non risente delle costanti all'interno dei dati (i *bias* che si vogliono stimare) ed è ragionevole pensare che nella zona di sovrapposizione del modello di geoide locale (a meno del cosiddetto *nugget effect*, che può essere considerato una stima della varianza dell'errore ipotizzato bianco), il variogramma empirico calcolato sui residui dell'uno o dell'altro geoide abbia la stessa forma.

Una volta stimati con i minimi quadrati, i *bias* vengono rimossi da N_{res} ottenendo le componenti *unbiased* ad alta frequenza del geoide e attraverso una procedura di collocazione standard si predice la componente ad alta frequenza del nuovo geoide. Infine sommando alle stime ottenute il contributo a bassa frequenza (da grado 0 a grado 200) del modello globale *GOCE-only* si ottiene il geoide unificato nell'area di confine.

4 COMBINAZIONE DEI DATI ESISTENTI

La procedura descritta in precedenza è stata utilizzata per unire il geoide italiano Italgeo2005 e quello svizzero CHGeo2004 attraverso l'utilizzo del geoide GOCESPWR2, ottenuto sintetizzando un modello di gravità globale *GOCE-only*, precisamente il modello ottenuto a partire dalle osservazioni GOCE attraverso la soluzione *space-wise*. La Figura 6 mostra i geoidi italiano e svizzero usati per la fusione nell'area di confine. Il geoide italiano nell'area di interesse ha una risoluzione di $3' \times 3'$ e ricopre un'area geografica avente la seguente estensione: 9° E, 11° E, 44.5° N e 47° N.

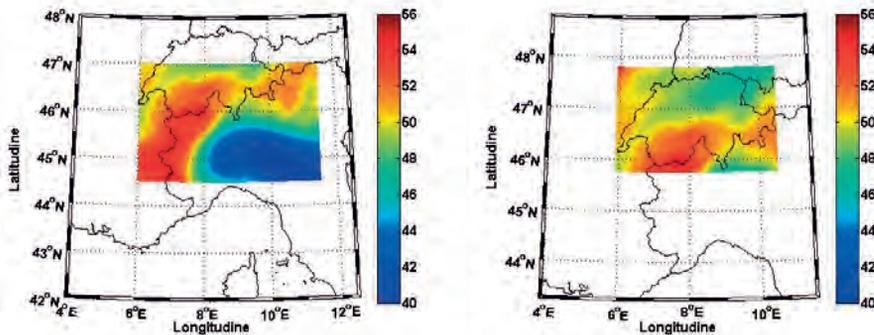


Figura 6. Geoidi gravimetrico italiano nella zona di confine (sinistra) e svizzero (destra).
L'ondulazione del geoide è espressa in metri

Il geoide svizzero ha una risoluzione iniziale di circa $30'' \times 30''$ ed è stato sottocampionato per avere la stessa risoluzione del geoide italiano. I limiti dell'area in cui è fornito sono: 5.9° E, 10.5° E, 45.75° N e 47.8° N.

Il *bias* dei due geoidi è stato calcolato considerando i residui di 200 punti appartenenti al geoide svizzero e 200 punti appartenenti al geoide italiano (vedi Figura 7, immagine di sinistra). È utile sottolineare come i punti selezionati siano contenuti all'interno del confine nazionale; infatti la qualità del geoide di una nazione degrada rapidamente una volta attraversato il confine. Il *bias* stimato per il geoide italiano è di -110 cm (con un sigma pari a 5 cm) mentre quello svizzero è pari a -83 cm (sigma pari a 4 cm).

Successivamente questi *bias* sono stati sottratti ai rispettivi geoidi per ottenere i residui *unbiased* (a meno del modello globale GOCE) da usare come osservazioni del metodo di fusione basato sulla collocazione (Figura 7, immagine di destra).

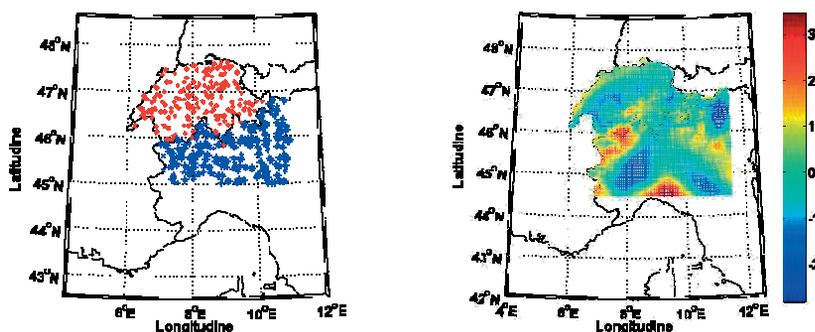


Figura 7. Posizione dei punti utilizzati per la stima dei bias (sinistra) e residui unbiased del geoidi svizzero ed italiano all'interno dei rispettivi confini nazionali in metri (destra)

5 RISULTATI

Il geoidi unificato è stato predetto nell'area: 9° E, 11° E, 44.5° N e 47° N su una griglia di risoluzione pari a $3' \times 3'$ come rappresentato in Figura 8.

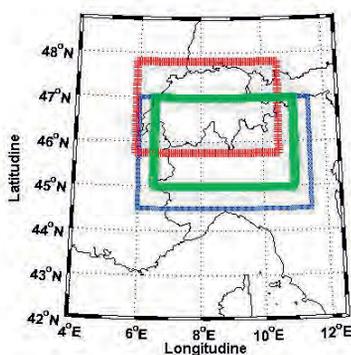


Figura 8. Zona di ricoprimento del geoidi gravimetrico svizzero CHGeo2004 (rosso), del geoidi gravimetrico italiano ITALGEO2005 sull'area di confine (blu), del geoidi unificato GISGeo2012a (verde)

In Figura 9 sono riportati il geoidi unificato predetto sull'area di confine fra Italia e Svizzera (denominato GISGeo2012a) e il suo errore di predizione. In Figura 10 si può vedere come per un determinato profilo, corrispondente ad una longitudine di 8.5° est, il salto presente inizialmente fra geoidi italiano (ITALGEO2005) e svizzero (CHGeo2004) sia stato eliminato attraverso la stima del geoidi *unbiased*.

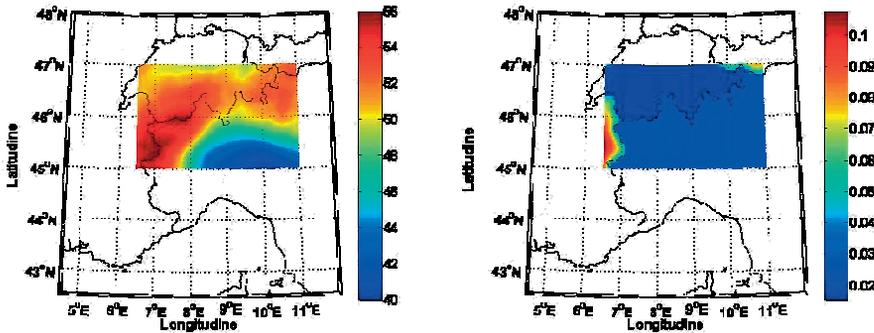


Figura 9. Geoidi stimato sull'area di sovrapposizione italo-svizzera GISgeo2012a (a sinistra) e relativo errore di stima (a destra) espresse in metri

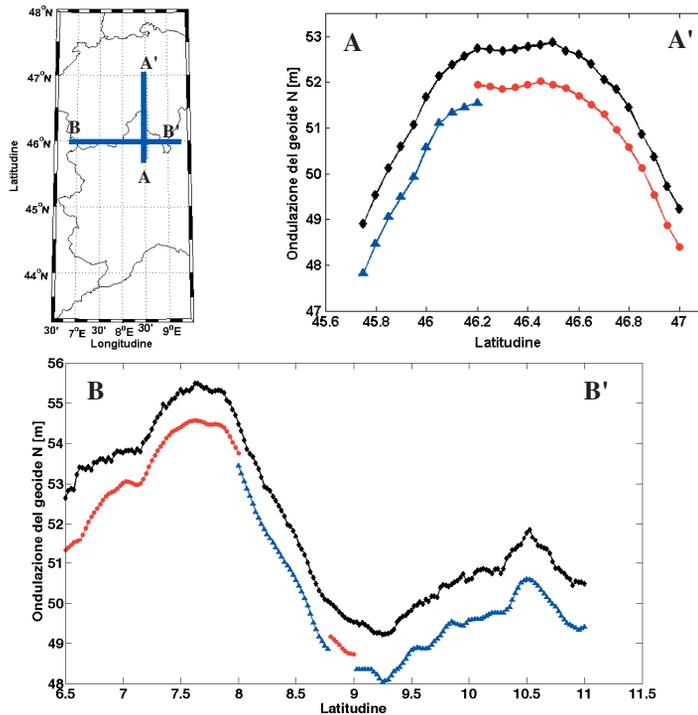


Figura 10. Profili considerati (alto a sinistra), geoidi italiano ITALGEO2005 (triangoli blu) e svizzero CHGeo2004 (cerchi rossi) e geoidi unificato (rombi neri)

Il geoidi predetto è stato validato considerando i dati disponibili di *GPS-leveling* della rete di livellazione svizzera (visibile in Figura 11, immagine di sinistra). In particolare per una serie di coppie di punti P e Q (vedi Figura 7, immagine di destra) è stata calcolata la differenza Δ fra le variazioni di geoidi ottenute dal *GPS-leveling* e quelle ottenute dal modello locale di geoidi:

$$\Delta = [N_{GPS}(P) - N_{GPS}(Q)] - [N_{modello}(P) - N_{modello}(Q)]. \quad (4)$$

In questo modo si supera il problema del *bias* nel geode derivante da *GPS/levelling*.

I dati italiani non sono stati utilizzati nella validazione perché a tutt'ora l'Italia non dispone di una rete di livellazione compensata in vere quote ortometriche, derivate cioè applicando ai dislivelli osservati le necessarie correzioni ortometriche. Il confronto fra le statistiche ottenute utilizzando il modello gravimetrico originale svizzero e quello unificato sono riportate in Tabella 2.

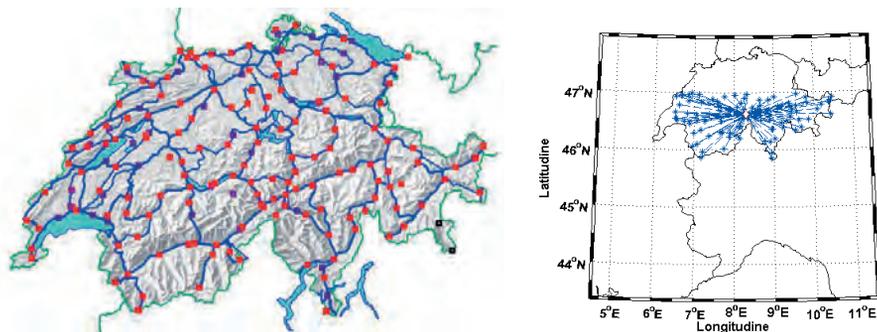


Figura 11. Rete di livellazione GPS utilizzata per la validazione (sinistra) e schema di rete (a stella, per considerare solo coppie indipendenti) per la valutazione della differenza fra variazioni di geode ottenute dal GPS-levelling e dai modelli locali (destra)

Statistiche	Geoide CHGeo2004	Geoide GISgeo2012a
Min	-2.67	-19.67
Max	16.63	8.13
Media	5.47	2.02
Dev. St.	0.40	0.03

Tabella 2. Statistiche in centimetri inerenti alle differenze di variazioni di ondulazione del geode fra modello di geode e dati di GPS-levelling

Da questo confronto emerge come il geode unificato stimato a partire dai modelli locali e dal modello GOCE, oltre a essere privo di sistematismi e non mostrare nessuna discontinuità sulle zone di confine presenti statistiche comparabili se non migliori rispetto al modello svizzero.

RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano il Dr. Urs Marti (Ufficio Federale di Topografia SwissTopo) e il Prof. Riccardo Barzaghi (Politecnico di Milano) per avere fornito i geoidi gravimetrici di dominio non pubblico.

BIBLIOGRAFIA

Barzaghi R., Borghi A., Carrion D., Sona G., *Refining the estimate of the Italian quasigeoid*. Bollettino di Geodesia e Scienze Affini, 3, 2007.

Colombo O. L., *A world vertical network*. Report 296. Department of Geodetic Science and Surveying, Ohio State University, Ohio, 1980.

Denker H., Torge W., *The European gravimetric quasigeoid EGG97-An IAG supported continental enterprise*. Geodesy on the Move. Springer Berlin Heidelberg, 1998. 249-254.

Drinkwater M.R., Haagmans R., Muzi D., Popescu A., Floberghagen R., Kern M., Fehring M., *The GOCE gravity mission: ESA's first core Earth explorer*. Proceedings of the third International GOCE User Workshop, Frascati, Italy, 2006.

Gatti A., Reguzzoni M., Venuti G., *The height datum problem and the role of satellite gravity models*. Journal of Geodesy, 87, 15-22, 2012.

Gerlach C., Rummel R., *Global height unification with GOCE: a simulation study on the indirect bias term in the GBVP approach*. Journal of Geodesy, 87, 57-67, 2012.

Heiskanen W. A., Moritz H., *Physical Geodesy*. Freeman, San Francisco, 1967.

JPL, *GRACE Science and Mission Requirements Document (SMRD)*. GRACE327-200 JPL D-15928, 1998.

Marti U., *Comparison of high precision geoid model in Switzerland*. Dynamic Planet, Tregonig P. e Rizos C. Editore, 377-382, 2005.

Migliaccio F., Reguzzoni M., Gatti A., *A GOCE-Only Global Gravity Field Model by the Space-Wise Approach*. In: Proc. of the 4th International GOCE User Workshop, 31 March - 1 April, Munich, Germany, ESA SP-696, ISBN:978-92-9092-260-5, ISSN:1609-042X, 2011.

Migliaccio F., Reguzzoni M., Sansò F., *Optimal multi-step collocation: application to the space-wise approach for GOCE data analysis*. Journal of Geodesy, DOI: 10.1007/s00190-004-0396-z.

Pavlis NK, Holmes SA, Kenyon SC, Factor JK. The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 EGM2008. Journal of Geophysical Research 117(B4), doi:10.1029/2011JB008916

Reguzzoni M., Tselfes N., *Optimal multi-step collocation: application to the space-wise approach for GOCE data analysis*. Journal of Geodesy, 83.1: 13-29, 2009.

Rummel R, Teunissen P. *Height datum definition, height datum connection and the role of geodetic boundary value problem*. Bulletin Geodesique 62, (4): 477-498, 1988.

Sansò F., Sideris MG. *Geoid Determination: Theory and Methods*. Springer, 2013.

Wackernagel H. *Multivariate geostatistics: an introduction with applications*. Springer Verlag, Berlino, 2003.

Xu P., *A quality investigation of global vertical datum connection*. Geophysical Journal International, 110.2: 361-370, 1992.

CAPITOLO 12

IL GEOPORTALE HELI-DEM

Massimiliano Cannata, Milan Antonovic, Monia Molinari

Istituto scienze della Terra, Dipartimento ambiente costruzione e design, Scuola universitaria professionale della Svizzera italiana, Campus Trevano CH-6952 Canobbio, Svizzera

SOMMARIO

Il capitolo presenta il geoportale HELI-DEM che fornisce un punto di accesso sia al modello digitale del terreno transfrontaliero elaborato da questo progetto, sia ad una serie di funzionalità di analisi basate su modelli altimetrici. Il sistema è costituito da una componente server ed una client. La parte server adotta un'architettura orientata ai servizi, dove diversi server che implementano diversi servizi Web sono orchestrati opportunamente. La parte d'interfaccia è progettata per fornire agli utilizzatori un accesso intuitivo alle funzionalità offerte dai servizi. Il sistema, basato interamente su tecnologie Open Source e standard aperti, è un valido esempio di come più servizi interoperabili possano interagire ed è una dimostrazione della maturità delle soluzioni Open Source adottate.

ABSTRACT

This chapter presents the geoportal HELI-DEM which provides the cross-border Digital Terrain Model developed by this project and exposes some capabilities of analysis based on elevation models. The system is composed by a server and a client component. The server adopts a service-oriented architecture, where different servers implementing different web services are properly orchestrated. The interface is designed to provide an intuitive access to the features offered by the services. The system, based entirely on open source technologies and open standards, shows how interoperable services can interact and demonstrates the maturity of the Open Source solutions adopted.

1 INTRODUZIONE

I modelli digitali del terreno trovano particolare utilizzo nell'ambito ingegneristico e di pianificazione territoriale. Queste superfici nella pratica sono spesso utilizzate per estrarre curve di livello o profili che consentono di valutare l'andamento del terreno e realizzare i propri progetti di conseguenza. Un altro uso ricorrente di queste superfici è legato alla protezione idrogeologica e alla gestione delle acque: in questo caso i modelli di superficie sono usati per calcolare i bacini imbriferi e le loro caratteristiche, informazioni utili per eseguire successive modellazioni idrologiche e dimensionamenti di opere ingegneristiche.

Nell'ottica quindi di promuovere l'uso dei modelli digitali del terreno, quali quelli generati in questo progetto, la SUPSI ha condotto delle ricerche volte alla creazione di un portale cartografico in grado di offrire a un vasto pubblico di utenti alcune tra le funzionalità più comunemente usate nell'analisi del terreno.

Il requisito principale del portale è di saper offrire queste funzionalità senza che gli utenti debbano disporre di computer particolarmente performanti o di alcun software: l'utente dovrebbe poter lanciare l'operazione desiderata da un qualsiasi *device* moderno connesso al Web e accedere all'informazione derivata sia come visualizzazione sia come download del dato elaborato. In questi ultimi anni, grazie alla larga diffusione di Internet ed allo sviluppo degli standard aperti di tipo geo-spaziale, si sono resi disponibili una serie di tecnologie e servizi standard che sono in parte già largamente utilizzati in ambienti produttivi ed in parte ancora in fase di valutazione e perlopiù utilizzati in ambiti sperimentali.

Come già introdotto nel Capitolo 8, i servizi Web geo-spaziali più diffusi, sono certamente quelli definiti dall'Open Geospatial Consortium (OGC). Le operazioni supportate da questi servizi possono essere istanziate inviando ai server delle richieste HTTP mediante l'utilizzo dei metodi GET o POST: il primo permette all'utente di inviare coppie chiave-valore (KVP, Key Value Pair) come parte di un indirizzo Internet (URL, Uniform Resource Locator) mentre il secondo consente di inviare la richiesta codificata in un file XML (Extensible Markup Language) aderente a precise specifiche. In alcuni casi è possibile inviare i file XML contenenti la richiesta codificata anche tramite il protocollo SOAP. Le risposte vengono in genere fornite come documenti XML compatibili con specifici schemi; in alcuni casi il dato binario può essere restituito direttamente (anche in streaming).

Il portale HELI-DEM orchestra quindi una serie di servizi OGC, quali WMS (Web Map Service), WFS (Web Feature Service), WCS (Web Coverage Service) e WPS (Web Processing Service). Per informazioni sui servizi WMS, WFS e WCS si rimanda al Capitolo 8, mentre qui di seguito è brevemente descritto il WPS.

Web Processing Service (WPS). Il WPS (OGC, 2007) è lo standard sviluppato e promosso per fornire l'accesso dell'utente tramite Internet ad elaborazioni pre-programmate e/o a modelli di calcolo che operano su dati spaziali. Questo standard offre praticamente qualsiasi tipo di calcolo attraverso Internet mediante la definizione di una comunicazione standard tra un fornitore di servizi e il suo potenziale utilizzatore. A questo proposito, sono supportate le richieste:

- **GetCapabilities (M)**, fornisce informazioni sul servizio (descrizione, versione, parole chiave, costi, vincoli di accesso), sul fornitore del servizio (nome, luogo, contatto) e le lingue ed operazioni supportate. Inoltre, restituisce anche un elenco dei processi offerti specificando per ciascuno di essi l'identificatore e una breve descrizione.
- **DescribeProcess (M)**, restituisce informazioni dettagliate su un particolare processo di interesse fornendo un elenco degli input e degli output obbligatori e/o opzionali con la descrizione delle loro caratteristiche; per ogni parametro sono specificati occorrenza minima e massima, valore predefinito (se esiste), unità di misura, tipologia (dati complessi, dati letterali o regione geografica) e formato (tipo MIME, la codifica e lo schema).
- **Execute (M)**, consente all'utente di eseguire il processo d'interesse e recuperare il risultato secondo le regole specificate nella risposta del DescribeProcess.

2 ARCHITETTURA DEL SISTEMA

In linea con le più recenti tecnologie, il portale cartografico HELI-DEM implementa un'architettura distribuita basata sui servizi (SOA, Service Oriented Architecture) incentrata sull'utilizzo degli standard internazionali aperti brevemente descritti nell'introduzione, la cui schematizzazione è rappresentata in Figura 1. Come si può osservare, nel Web sono stati resi disponibili i quattro servizi OGC, di cui il solo WPS interagisce direttamente con gli altri servizi utilizzando come fonte di dati su cui eseguire dei processi di elaborazione, e/o come archivio per salvare i risultati e renderli disponibili su Internet.

Tutti i servizi sono esposti al Web, e sono quindi utilizzati dal portale HELI-DEM per l'offerta di funzionalità e dati predefiniti secondo una logica di accesso definita dalla sua interfaccia grafica. Va comunque notato come questi servizi possano essere utilizzati anche tramite altri strumenti purché su dispositivi connessi al Web, come ad esempio: alcuni software GIS, semplici chiamate di tipo HTTP, o particolari *apps* per *smart phones*.

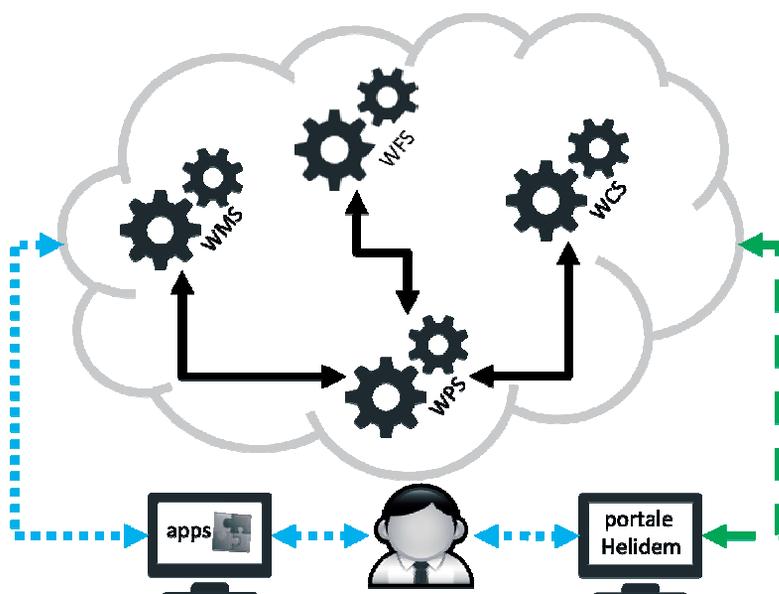


Figura 1. Schematizzazione dell'architettura orientata agli oggetti del progetto HELI-DEM

L'architettura descritta è stata implementata su più server dislocati fisicamente presso l'Istituto scienze della Terra della SUPSI e presso il Laboratorio di Geomatica del Politecnico di Milano, Polo Territoriale di Como. Di particolare interesse è lo sviluppo delle componenti che permettono di effettuare un processamento dei dati in quanto più innovative e meno utilizzate rispetto alle altre. In particolare sono state sviluppate una parte server, da qui in avanti indicata come “*Server Computazionale*”, ed una parte client, da qui in avanti indicata come “*Client di calcolo*”. Le Figure 2 e 3 riportano le tecnologie utilizzate rispettivamente dal *Server computazionale* e dal *Client di calcolo*.

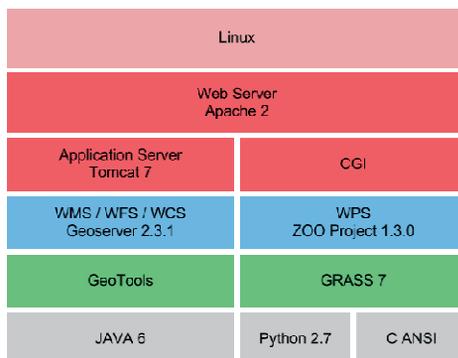


Figura 2. Software e linguaggi utilizzati dal server computazionale

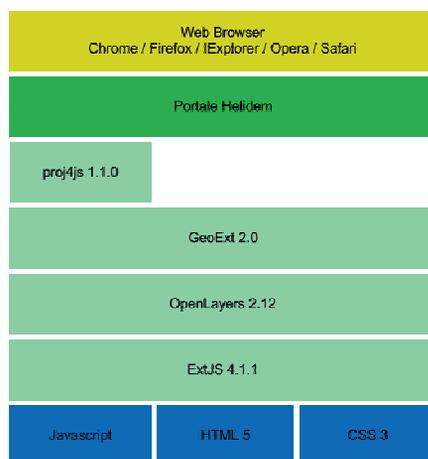


Figura 3. Software, librerie e linguaggi utilizzati dal client di calcolo

Il Server di calcolo è stato basato sul sistema Linux e sui software *Geoserver* (Giannecchini and Aime, 2011) e *Zoo-project* (Fenoy et al., 2010) che implementano gli standard WMS, WFS, WCS e WPS: se il primo è un software maturo ed ampiamente utilizzato in numerosi casi produttivi a scala globale, il secondo è un software che si sta affermando solo in questi ultimi anni e che è attualmente in fase di accreditamento da parte della fondazione per il software open source geografico (OSGeo).

Da un punto di vista logico, il *Server computazionale* gestisce tramite *Apache* (The Apache Software Foundation, 2013a) le richieste di processamento reindirizzandole a *Zoo-project*; questo a sua volta istanzia delle procedure di calcolo che eseguono opportuni algoritmi e producono i risultati desiderati sotto forma di elementi geografici (layers o features), file generici (immagini o documenti) o variabili (stringhe o numeri); i risultati sono

incapsulati all'interno di file XML aderenti alle specifiche WPS, come *complex output* (formato grezzo degli elementi) o *simple output* (stringhe o link alle risorse), e inviati all'utente ancora tramite *Apache*.

In questo progetto le routine che orchestrano gli algoritmi necessari a produrre i risultati richiesti sono state scritte in *Python* (Van Rossum, 2003) avvalendosi dei moduli del *GIS GRASS* (Neteler and Mitasova, 2008) per eseguire larga parte delle operazioni. I risultati sono sempre restituiti come *simple output* in modo che sia più semplice la loro integrazione con terze parti. In particolare, per restituire risultati di tipo geografico, il portale HELI-DEM si avvale di *Geoserver*: le routine del processo WPS una volta calcolati i risultati li registra opportunamente su *Geoserver* che, utilizzando le librerie *GeoTools* (Turton, 2008) in *Java* (Gosling et al., 2013) ed appoggiandosi all'application server *Tomcat* (The Apache Software Foundation, 2013b), li pubblica secondo le specifiche WMS o WFS. Parte dell'innovazione di questo progetto, per quel che riguarda il lato server, risiede proprio nell'integrazione di *GRASS 7* con *ZOO-project* e di *ZOO-project* con *Geoserver*.

Il *Client di calcolo* si basa sull'uso delle tecnologie Web più attuali quali CSS 3 e HTML 5 e di codice scritto in linguaggio *Javascript* (Flanagan, 2011); in particolare nella realizzazione del portale ci si è avvalsi delle seguenti librerie.

- *ExtJS* (Sencha, 2013) che fornisce accesso a funzionalità ed elementi grafici evoluti garantendo la compatibilità con i più diffusi browsers (IE Explorer, Firefox, Safari, Chrome e Opera).
- *OpenLayers* (Perez, 2012) che consente di generare carte dinamiche che rappresentino diversi elementi grafici archiviati in diversi formati (gml, testo, shp, WMS, WFS, etc.).
- *GeoExt* (GeoExt Community, 2010) che aggiunge funzionalità aggiuntive ad *OpenLayers* sfruttando le potenzialità della libreria *ExtJS*.
- *proj4js* (Adair et al., 2012) che consente di effettuare trasformazioni di coordinate in ambiente *Javascript*.

Grazie quindi alle librerie utilizzate il portale è accessibile tramite i più recenti e diffusi browser Internet disponibili. In questo caso una parte consistente dello sviluppo è stata dedicata al design della *business logic* legata all'utilizzo del portale, altra parte del lavoro ha visto la sua traduzione in codice che generi l'interfaccia desiderata.

3 ALGORITMI DELLE FUNZIONALITÀ DEL PORTALE

In questa sezione si descrivono le funzionalità offerte dal portale, cioè i processi WPS implementati in *ZOO-project* e gli algoritmi sviluppati in *Javascript*. In particolare, tutti i processi WPS utilizzano classi che integrano *GRASS 7* con *ZOO-project* e classi che connettono *ZOO-project* con *Geoserver* secondo le modalità sotto riportate.

Integrazione di GRASS 7 con ZOO-project. Come già detto, le routine che orchestrano i calcoli necessari per portare a termine il processo si avvalgono spesso di algoritmi implementati nel *GIS GRASS*; questo ha nelle sue librerie un'interfaccia *Python*, che consente di accedere ai suoi diversi moduli ed ai loro risultati. Per poter eseguire però questi moduli occorre abilitare l'accesso alle variabili d'ambiente di *GRASS* e garantire l'integrità delle operazioni concorrenti.

L'accesso alle variabili è abilitato da apposite funzioni in *Python*, che all'avvio di ogni processo WPS, settano le variabili d'ambiente necessarie per accedere ai moduli di *GRASS*. Tra le variabili settate alcune delle più importanti sono: *GISBASE*, che indica il percorso alla directory d'installazione di *GRASS*; *PATH*, che contiene i percorsi alle cartelle *\$GISBASE/bin* e *\$GISBASE/script*; *GISRC*, che specifica il percorso al file di configurazione riguardante database, location e mapset; *GIS_LOCK*, che impedisce l'utilizzo di *GRASS* in parallelo, *LD_LIBRARY_PATH*, contenente il percorso alle librerie di *GRASS*.

L'integrità delle operazioni concorrenti è invece garantita creando delle *location* indipendenti per ogni processo istanziato: ad ogni chiamata WPS viene creato un codice univoco che viene utilizzato come prefisso nella denominazione della location di lavoro di *GRASS GIS* che verrà creata.

Connessione tra ZOO-project e Geoserver. I *layer* geografici prodotti dai diversi processi WPS sono pubblicati sul Web utilizzando le librerie *RESTFull* (Richardson and Ruby, 2007) di *Geoserver*. Queste consentono di caricare i diversi *layer* su *Geoserver* con semplici chiamate HTTP; in particolare utilizzando i metodi POST e PUT è possibile l'upload delle carte vettoriali in formato *shapefile* e dei dati raster in formato *GeoTiff*. Con delle ulteriori chiamate vengono caricati i fogli di stile in formato SLD utili per la vestizione grafica dei layers. Tutte le suddette chiamate sono effettuate utilizzando la libreria *requests* (Reitz, 2013) di *Python*.

Estrazione di porzioni di dati. Questa funzione è stata implementata sfruttando le funzionalità del servizio WCS e richiamandole in maniera opportuna tramite l'utilizzo di *Javascript*: una volta definito il *bounding box*, l'algoritmo compone una chiamata di tipo *getCoverage* e la inoltra al servizio che offre il DTM in questione. Il risultato è quindi reso disponibile all'utente come download.

Conversione di coordinate. Questa funzionalità è garantita dall'utilizzo di *Proj4js* che consente di convertire al volo coordinate tra differenti sistemi geografici di riferimento. Nessun server è quindi coinvolto nella fornitura di questo processamento, ma il calcolo è effettuato all'interno del Browser.

Calcolo curve di livello per quote predefinite. Questo processo WPS consente di estrarre delle curve di livello ad una serie di quote predefinite a partire da un modello digitale del terreno. La *routine* scritta in *Python* si avvale del modulo *r.contour* del modulo *r.contour* del *GIS GRASS*. Nelle Tabelle 1 e 2 sono descritti input ed output del processo.

Parametro	Tipo	Descrizione	O	M
covermap	string	Link a DTM in formato <i>geoTiff</i>	sì	1
coverSRS	string	Codice EPSG della covermap nel formato: <i>EPSG:21781</i>	sì	1
bbox	string	Coordinate della regione di interesse nel formato: <i>minX, minY, maxX, maxY, EPSG:21781</i>	sì	1
levels	decimal	Lista dei valori di quota da estrarre separati da virgola nel formato <i>12,15,18,21</i>	sì	M
oSRS	string	Codice EPSG dei dati in uscita nel formato: <i>EPSG:21781</i>	sì	1
oformat	string	Formato dei dati in uscita. Opzioni: Shapefile (default), GML, KML	no	1

Tabella 1. Parametri di ingresso del processo di calcolo delle curve di livello per quote predefinite con indicazioni del tipo, obbligatorietà (O) e molteplicità (M)

Parametro	Tipo	Descrizione	O	M
odata	anyURI	Link al file compresso contenente il layer delle curve di livello estratte	sì	1
WMS_URL	anyURI	Indirizzo del servizio WMS contenente i risultati del processo	sì	1
WFS_URL	anyURI	Indirizzo del servizio WFS contenente i risultati del processo	sì	1
layerName	string	Nome del layer delle curve di livello estratte per l'accesso tramite WMS e WFS	sì	1
Expiration Time	datetime	Data di scadenza dei risultati del processo (dopo tale data i risultati non saranno più disponibili sul server)	sì	1
message	string	Informazioni aggiuntive sul processo	sì	1

Tabella 2. Parametri di uscita del processo di calcolo delle curve di livello per quote predefinite con indicazioni del tipo, obbligatorietà (O) e molteplicità (M)

Calcolo curve di livello per intervalli regolari. Questo processo WPS consente di derivare delle curve di livello a intervalli regolari comprese tra due quote predefinite dall'utente. Anche in questo caso lo *script* è in *Python* e si avvale del modulo *r.contour* del *GIS GRASS 7*. Nelle Tabelle 3 e 4 sono descritti input e output del processo.

Parametro	Tipo	Descrizione	O	M
covermap	string	Link a DTM in formato <i>geoTiff</i>	sì	1
coverSRS	string	Codice EPSG della covermap nel formato: <i>EPSG:21781</i>	sì	1
bbox	string	Coordinate della regione di interesse nel formato: <i>minX, minY, maxX, maxY, EPSG:21781</i>	sì	1
step	decimal	Intervallo di estrazione delle quote	sì	1
minLevel	decimal	Quota minima richiesta	no	1
maxLevel	decimal	Quota massima richiesta	no	1
oSRS	string	Codice EPSG dei dati in uscita nel formato: <i>EPSG:21781</i>	sì	1
offormat	string	Formato dei dati in uscita. Opzioni: Shapefile (default), GML, KML	no	1

Tabella 3. Parametri di ingresso del processo di calcolo delle curve di livello per intervalli regolari con indicazioni del tipo, obbligatorietà (O) e molteplicità (M)

Parametro	Tipo	Descrizione	O	M
odata	anyURI	Link al file compresso contenente il layer delle curve di livello estratte	sì	1
WMS_URL	anyURI	Indirizzo del servizio WMS contenente i risultati del processo	sì	1
WFS_URL	anyURI	Indirizzo del servizio WFS contenente i risultati del processo	sì	1
layerName	string	Nome del layer delle curve di livello estratte per l'accesso tramite WMS e WFS	sì	1
Expiration Time	datetime	Data di scadenza dei risultati del processo (dopo tale data i risultati non saranno più disponibili sul server)	sì	1
message	string	Informazioni aggiuntive sul processo	sì	1

Tabella 4. Parametri di uscita del processo di calcolo delle curve di livello per intervalli regolari con indicazioni del tipo, obbligatorietà (O) e molteplicità (M)

Estrazione di profili. Questo processo WPS consente di ottenere, a partire da un profilo indicato dall'utente, il profilo altimetrico del modello del terreno sia in formato testuale che in formato immagine (*PNG*). La realizzazione del servizio è basata sul modulo *r.profile* di *GRASS 7* e su *matplotlib* (Hunter, 2007), libreria di *Python* per la creazione di grafici. Nelle Tabelle 5 e 6 sono riportati input e output del processo.

Parametro	Tipo	Descrizione	O	M
covermap	string	Link a DTM in formato <i>geoTiff</i>	sì	1
coverSRS	string	Codice EPSG della covermap nel formato: <i>EPSG:21781</i>	sì	1
coord	string	Coordinate del profilo di interesse nel formato <i>ewkt: SRID=21781; LINESTRING(X1 Y1, X2 Y2...)</i>	sì	1
oSRS	string	Codice EPSG dei dati in uscita nel formato: <i>EPSG:21781</i>	sì	1

Tabella 5. Parametri di ingresso del processo di estrazione dei profili con indicazioni del tipo, obbligatorietà (O) e molteplicità (M)

Parametro	Tipo	Descrizione	O	M
outImage	string	Immagine del profilo estratto in formato <i>PNG</i>	sì	1
outText	anyURI	File <i>TXT</i> contenente coordinate e valori di quota estratti lungo il profilo	sì	1
message	string	Informazioni aggiuntive sul processo	sì	1

Tabella 6. Parametri di uscita del processo di estrazione dei profili con indicazioni del tipo, obbligatorietà (O) e molteplicità (M)

Individuazione e caratterizzazione morfometrica dei bacini. Questo processo WPS consente l'individuazione e la caratterizzazione morfometrica di un bacino idrografico e si basa sul modulo di GRASS *r.basin* (Di Leo et al., 2010) opportunamente aggiornato alla versione 7.0 del software GIS e ottimizzato tramite l'integrazione di nuove funzionalità descritte in seguito.

A partire dal modello digitale del terreno il processo estrae le carte degli accumuli e delle direzioni di drenaggio avvalendosi di due possibili algoritmi: *Single Flow Direction* (SFD) e *Multiple Flow Direction* (MFD). Nel primo metodo il flusso è canalizzato da una cella all'altra considerando la direzione di massima pendenza; a seconda che l'analisi della pendenza sia effettuata su tutte le 8 celle adiacenti o solo sulle quattro 4 in direzione nord e sud si parla rispettivamente di algoritmi D8 e D4. Nel caso del MFD invece, il flusso viene ripartito proporzionalmente tra tutte le celle adiacenti poste a quota inferiore utilizzando la pendenza come peso.

Sulla base di due ulteriori input, le coordinate della sezione di chiusura e un valore limite di accumulo per la delimitazione della rete idrica, il processo individua l'area del bacino di interesse ed estrae il reticolo idrografico. Usando questi dati il servizio esegue una serie di analisi e calcoli per la caratterizzazione del bacino restituendo in uscita diverse tipologie di output:

- Carte raster: gerarchizzazione del reticolo secondo Horton, Strahler, Hack e Shreve, distanza dalla sezione di chiusura e lunghezza dei versanti. Per ciascuna carta è inoltre generato, tramite il comando *r.out.sld* appositamente implementato, un foglio di stile

(SLD) per la vestizione grafica.

- Grafici: curve ipsografica e ipsometrica e funzione di ampiezza.
- Rapporti: file *CSV* con un elenco di tutti parametri morfometrici di bacino calcolati, tra i quali baricentro, area, perimetro, pendenza media, quote caratteristiche, orientamento prevalente, fattori di forma, diametro topologico, magnitudine, rapporti di Horton e tempi di corrivazione. Gli stessi parametri sono inoltre riportati in un documento riassuntivo in formato *PDF* realizzato utilizzando *pyUNO bridge* (OpenOffice.org, 2010), libreria di *Python* che consente di generare documenti sfruttando le API di *libreoffice* (The Document Foundation, 2013).

Per garantire il corretto funzionamento del servizio, le coordinate della sezione di chiusura indicate dall'utente devono appartenere alla rete idrografica di calcolo. Nel caso in cui il punto identificato come outlet del bacino non ricada perfettamente sulla rete calcolata, sia a causa della sua non coincidenza con la rete idrografica naturale che a causa di un'impresione nell'individuazione a schermo delle coordinate (particolarmente frequente nella selezione da interfaccia Web), per ovviare a questo inconveniente abbiamo sviluppato un algoritmo (*r.nearest.coor*) di ricerca che riposiziona l'outlet sul punto più vicino, in un intorno definito dall'utente, appartenente al reticolo di calcolo. Nelle Tabelle 7 e 8 sono riportati i dati in ingresso e in uscita del processo.

Parametro	Tipo	Descrizione	O	M
covermap	string	Link a DTM in formato <i>geoTiff</i>	sì	1
coverSRS	string	string	sì	1
bbox	string	Coordinate della regione di interesse nel formato: <i>minX, minY, maxX, maxY, EPSG:21781</i>	sì	1
coord	string	Coordinate della sezione di chiusura del bacino nel formato ewkt: <i>SRID=21781;POINT(X1 Y1)</i>	sì	1
threshold	decimal	Valore limite di accumulo oltre il quale una cella viene considerata fiume	sì	1
method	string	Metodi di diffusione del flusso sulla superficie delle elevazioni. Opzioni: SFD-D4, SFD-D8, MFD	sì	1
flat_area	string	Miglioramento della carta di direzione di drenaggio in corrispondenza di aree pianeggianti	no	1
oSRS	string	Codice EPSG dei dati in uscita nel formato: <i>EPSG:21781</i>	sì	1

Tabella 7. Parametri di ingresso del processo di caratterizzazione morfometrica dei bacini con indicazioni del tipo, obbligatorietà (O) e molteplicità (M).

Parametro	Tipo	Descrizione	O	M
parameters	anyURI	Link al file in formato <i>CSV</i> contenente i parametri morfometrici estratti	sì	1
pdf_report	anyURI	Link al file in formato <i>PDF</i> contenente i parametri morfometrici estratti	sì	1
outmaps	anyURI	Link al file compresso contenente le carte di output del processo	sì	1
ipsographic_curve	anyURI	Link all'immagine in formato <i>PNG</i> della curva ipsografica	sì	1
ipsometric_curve	anyURI	Link all'immagine in formato <i>PNG</i> della curva ipsometrica	sì	1
width_function	anyURI	Link all'immagine in formato <i>PNG</i> della funzione di ampiezza	sì	1
WMS_URL	anyURI	Indirizzo del servizio WMS contenente i risultati del processo	sì	1
WFS_URL	anyURI	Indirizzo del servizio WFS contenente i risultati del processo	sì	1
networkLayer	string	Nome del layer del reticolo idrografico per l'accesso tramite WMS e WFS	sì	1
basinLayer	string	Nome del layer del bacino idrografico per l'accesso tramite WMS e WFS	sì	1
dist2outLayer	string	Nome del layer della distanza dalla sezione di chiusura per l'accesso tramite WMS e WFS	sì	1
accumulationLayer	string	Nome del layer degli accumuli per l'accesso tramite WMS e WFS	sì	1
hillslope_distanceLayer	string	Nome del layer della lunghezza dei versanti per l'accesso tramite WMS e WFS	sì	1
hackLayer	string	Nome del layer della gerarchizzazione di Hack per l'accesso tramite WMS e WFS	sì	1
hortonLayer	string	Nome del layer della gerarchizzazione di Horton per l'accesso tramite WMS e WFS	sì	1
shreveLayer	string	Nome del layer della gerarchizzazione di Shreve per l'accesso tramite WMS e WFS	sì	1
strahlerLayer	string	Nome del layer della gerarchizzazione di Strahler per l'accesso tramite WMS e WFS	sì	1
ExpirationTime	decimal	Data di scadenza dei risultati del processo (da cui i risultati non saranno più disponibili sul server)	sì	1
message	string	Informazioni aggiuntive sul processo	sì	1

Tabella 8. Parametri di uscita del processo di caratterizzazione morfometrica dei bacini con indicazioni del tipo, obbligatorietà (O) e molteplicità (M).

4 IL GEOPORTALE

In Figura 4 è riportata la pagina iniziale del portale HELI-DEM. L'interfaccia grafica è suddivisa in due sezioni: un menù con una breve descrizione dei servizi WPS disponibili ed una *map view* navigabile (funzioni di zoom in, zoom out e pan) per la visualizzazione dinamica dei dati cartografici. Una volta selezionato dal menù il servizio d'interesse, un *form* consente l'inserimento dei dati necessari per la sua esecuzione.



Figura 4. Pagina iniziale del portale HELI-DEM

Calcolo delle curve di livello. In Figura 5 è presentata l'interfaccia d'inserimento dati per il servizio di calcolo delle curve di livello. Il primo dato in ingresso richiesto è il sistema di riferimento dei dati di input e output, che può essere impostato dall'utente tramite i codici EPSG disponibili nell'apposito menù a tendina (*Processing EPSG*). Nel caso in cui il sistema di riferimento dei dati in ingresso non sia quello desiderato per i dati in uscita l'utente può avvalersi di un servizio di conversione al volo dei dati geografici: una volta inseriti i dati di input espressi in un determinato EPSG, la selezione di un nuovo codice comporta infatti la conversione automatica delle coordinate nel nuovo sistema di riferimento indicato.



Figura 5. Servizio di calcolo delle curve di livello: interfaccia di inserimento dati e visualizzazione grafica del layer vettoriale ottenuto

Oltre al codice EPSG, l'interfaccia richiede l'inserimento di un *bounding box*, ovvero la regione di interesse sulla quale il servizio effettuerà il processamento; tale informazione può essere inserita dall'utente secondo due modalità: inserimento manuale delle coordinate negli appositi *textbox* (*min X*, *min Y*, *max X*, *max Y*) oppure digitalizzazione sulla *map view* attraverso la funzione *start drawing*. Infine, il servizio richiede l'inserimento delle quote per cui estrarre le curve di livello. Anche in questo caso sono previste due diverse modalità di inserimento dati che rispecchiano i due processi WPS implementati per questo servizio (sezione 3): è possibile richiedere l'estrazione di curve di livello inserendo specifici valori di quota (separati da virgola) nella sezione *Extract from levels* oppure indicando un passo di estrazione, eventualmente tra una quota minima e massima, nella sezione *Extract by step*.

Inserite tutte le informazioni necessarie, il processo di calcolo viene avviato tramite il tasto *Execute process*. La *map view* di Figura 5 presenta la schermata del portale a processamento ultimato; un pop-up fornisce il link per il download del layer vettoriale delle curve di livello, la data oltre la quale tale dato non sarà più disponibile, il link ai servizi WMS / WFS e il nome del layer. Il layer viene inoltre caricato direttamente sulla *map view* per fornire all'utente un'anteprima grafica dei risultati.

Estrazione di profili. In Figura 6 è presentata l'interfaccia del servizio di estrazione dei profili altimetrici. Analogamente al servizio precedente, la prima informazione richiesta è il

codice EPSG dei dati di input e output; successivamente l'utente deve fornire la polilinea lungo la quale il profilo verrà generato, espressa tramite una lista di coordinate di vertici. Tale informazione può essere inserita manualmente nella *textbox Vertex Coordinates* oppure digitalizzando la polilinea nella *map view* tramite la funzione *start drawing*.



Figura 6. Servizio di estrazione di profili altimetrici: interfaccia di inserimento dati e visualizzazione del profilo ottenuto.

Una volta concluso il processamento, un pop-up mostra il profilo altimetrico ottenuto e fornisce il link per il download dell'immagine in formato *PNG*. Un ulteriore link mette a disposizione anche un file testuale contenente coordinate e valori di quota estratti lungo il profilo.

Individuazione e caratterizzazione morfometrica di bacini. Oltre al solito codice EPSG (*Processing EPSG*), l'interfaccia di questo servizio (Fig. 7) richiede in ingresso due input di carattere geometrico: il *bounding box* e le coordinate della sezione di chiusura del bacino (*Outlet*); anche in questo caso tali dati possono essere digitalizzati sulla *map view* o inseriti manualmente nelle apposite *textbox*. Ulteriori informazioni richieste sono il *threshold*, l'algoritmo per il calcolo della carta delle direzioni di drenaggio (*method*), a scelta tra MFD, SFD-D4 e SFD-D8. Un'apposita flag consente infine di attivare la funzione di miglioramento delle carte di direzione di deflusso in aree pianeggianti.



Figura 7. Servizio di individuazione e caratterizzazione di bacini: interfaccia di inserimento dati e visualizzazione dei risultati ottenuti

Concluso il processamento, un pop-up presenta i numerosi risultati: nella sezione *downloads* sono riportati i link alla cartella compressa dei layer prodotti, ai report in formato *PDF* e *CSV* dei parametri morfometrici ottenuti, alle immagini relative a curve ipsografica, ipso-metrica e alla funzione di ampiezza, una cui anteprima delle quali è presentata direttamente nel frame. La sezione *layer preview* consente di selezionare i diversi layer generati dal servizio per una loro visualizzazione sulla *map view*. Infine, sono forniti gli indirizzi ai servizi WMS e WFS.

Conversione di coordinate. In Figura 8 è presentata l'interfaccia relativa all'inserimento dati per il servizio di conversione coordinate. Tale servizio può essere richiesto per diverse tipologie di feature vettoriali: punto, linea, bounding box e poligono. Una volta selezionata, nella sezione *Source*, la feature di interesse (*Feature Type*), l'utente deve inserirne le coordinate dei vertici (*Feature*) specificando il sistema di riferimento. Come nei servizi descritti in precedenza, la feature può essere direttamente digitalizzata sulla *map view* oppure inserita in formato testuale. In tal caso il formato richiesto è il WKT (Well-known Text), linguaggio molto comune in ambiente GIS e che dunque consente un rapido interscambio di dati con questi software. Una volta indicato, nel box *Target*, il sistema di riferimento in uscita (*EPSG*), la nuova feature riproiettata viene rappresentata tramite WKT nella *textbox* sottostante (*Feature*).



Figura 8. Servizio di conversione di coordinate: interfaccia di inserimento dati e visualizzazione dei risultati ottenuti

Estrazione di porzioni di dati. L'ultima figura proposta (Fig. 9) riguarda l'interfaccia del servizio di estrazione dei dati, che consente di eseguire il download di una porzione del modello digitale del terreno. L'utente in tal caso deve digitalizzare o inserire le coordinate dell'area di interesse (*bounding box*).

5 CONCLUSIONI

Il Capitolo ha presentato l'esperienza di sviluppo del geo-portale HELI-DEM: portale realizzato nell'ambito dell'omonimo progetto INTERREG allo scopo di promuovere l'utilizzo del modello digitale del terreno italo-svizzero prodotto tramite l'offerta di funzionalità di elaborazione remote volte a derivare informazioni altimetriche utili quali curve di livello, profili altimetrici, e caratterizzazione morfologica del territorio.

Il portale rappresenta un valido esempio di architettura orientata ai servizi (SOA) che, seguendo le specifiche di INSPIRE (direttiva europea 2007/2/EC del 14 Marzo 2007) si avvale degli standard definiti dall'Open Geospatial Consortium, quali WFS e WCS per la condivisione di dati geografici vettoriali e distribuiti e WMS per la distribuzione d'immagini. In questo quadro i servizi WPS sono in grado di valorizzare ulteriormente l'interoperabilità fornita

dai suddetti servizi, aggiungendo quelle capacità di elaborazione che consentono di accedere a informazioni derivate.

Il portale è costituito da servizi dislocati fisicamente su *server* differenti in località geografiche diverse: allo stato attuale il WCS, che fornisce il modello del terreno, è presso il Laboratorio di Geomatica del Politecnico di Milano, Polo Territoriale di Como, mentre i servizi WPS, WMS e WFS sono resi disponibili dall'Istituto scienze della terra – SUPSI. Infine, possiamo concludere che questo portale rappresenta un esempio che valida la maturità delle tecnologie Open Source adottate e disponibili di integrazione ed orchestrazione di servizi OGC eterogenei.

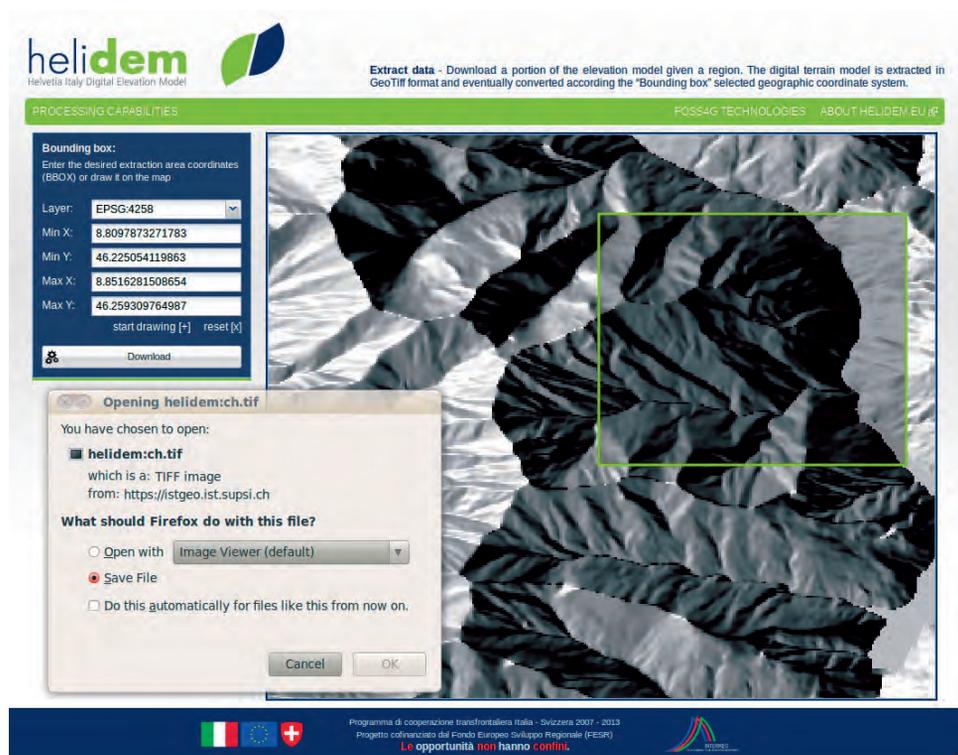


Figura 9. Servizio di estrazione dati: interfaccia di inserimento dati.

RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano il Canton Ticino e Swisstopo per il supporto del progetto, la comunità di OSGeo per il lavoro svolto in questi anni e per i prodotti di alta qualità disponibili con licenze Open Source. Si ringrazia inoltre la Dott.ssa Margherita Di Leo per i preziosi suggerimenti.

BIBLIOGRAFIA

Adair M., Greenwood R., Richard D., Irons S. , Terral O., Proj4js -- Javascript

reprojection library, <https://github.com/proj4js/proj4js>, 2012.

Di Leo M., Di Stefano M., Claps P. and Sole A., *Caratterizzazione morfometrica del bacino idrografico in GRASS GIS (Morphometric characterization of the catchment in GRASS GIS environment)*, Geomatics Workbooks n.9, 2010.

Fenoy G., Bozon N., Raghavan V., *ZOO Project: The Open Wps Platform*. Proceeding of 1st International Workshop on Pervasive Web Mapping, Geoprocessing and Services (WebMGS). Como, http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/4-W13/ID_32.pdf, 26-27 agosto 2010.

Flanagan D., *JavaScript: The Definitive Guide*. O'Reilly Media; 6th edition, ISBN 9780596805524, 2011.

GeoExt Community, *GeoExt Documentation*, <http://www.geoext.org/docs.html>, 2010.

Giannecchini S., Aime A., *GeoServer, il server open source per la gestione interoperabile dei dati geospaziali*. Atti 15a Conferenza Nazionale ASITA. Reggio di Colorno, 15-18 novembre 2011.

Gosling J., Joy B., Steele G., Bracha G., Buckley A., *The Java Language Specification, Java SE 7 Edition*. Addison-Wesley Professional, ISBN 9780133260229, 2013.

Hunter J.D., *Matplotlib: A 2D Graphics Environment*, Computing in Science & Engineering, vol. 9, no. 3, pp. 90-95, 2007.

Neteler M., Mitasova H., *Open Source GIS: A GRASS GIS Approach*. 3rd Ed. 406 pp, Springer, New York, 2008.

OGC, *OpenGIS Web Processing Service*, http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=24151, 2007.

OpenOffice.org, *Python-UNO bridge*, <http://www.openoffice.org/udk/python/python-bridge.html>, 2010

Perez A.S., *OpenLayers Cookbook*. Packt Publishing, ISBN 1849517843, 2012.

Reitz K., *Requests: HTTP for Humans*, <http://docs.python-requests.org/en/latest/>, 2013.

Richardson L., Ruby S., *RESTful Web Services*, O'Reilly Media, 1st edition, 2007.

Sencha, *Ext JS Sencha Docs*, <http://docs.sencha.com>, 2013.

The Apache Software Foundation, *Apache HTTP Server Version 2.2 Documentation*, <http://httpd.apache.org/docs/2.2>, 2013a.

The Apache Software Foundation, *Apache Tomcat 7 – Documentation Index*, <http://tomcat.apache.org/tomcat-7.0-doc/index.html>, 2013b.

The Document Foundation, *LibreOffice*, <http://www.libreoffice.org>, 2013.

Turton I., *Geo Tools*. In Open Source Approaches in Spatial Data Handling (Advances in Geographic Information Science), Brent G. Hall, Michael G. Leahy ed., pp 153-169, 2008.

Van Rossum G., *The Python Language Reference Manual*. Network Theory Ltd, 2003.

CAPITOLO 13

STRUMENTI DI CONDIVISIONE DEI RISULTATI DEL PROGETTO

Alessio Campi

Fondazione Politecnico di Milano, Piazza Leonardo da Vinci 32, Milano

SOMMARIO

Una delle principali richieste della Commissione Europea verso i beneficiari di Fondi CE è quella di dare visibilità del lavoro effettuato nel corso del progetto e diffondere i risultati dello stesso al più ampio numero possibile di utenti.

Il progetto HELI-DEM ha cercato fin dai primi mesi di attività di rispondere a questa richiesta non interpretandola come un vincolo formale ma come una importante occasione per approfondire i temi con soggetti esterni al progetto e discutere i risultati ottenuti con esperti, interessati e anche non addetti ai lavori.

A tal fine è stata implementata una strategia complessiva che partendo dalla realizzazione di un sito web dedicata si è sviluppata attraverso: la partecipazione a convegni e momenti di incontro, la pubblicazione di articoli a carattere scientifico e divulgativo, la realizzazione di una newsletter periodica, la distribuzione di brochure informative e la produzione della presente pubblicazione.

ABSTRACT

One of the most important request of the European Commission to the beneficiaries of EC funds is to give visibility to the work carried out during the project and to disseminate the results to the widest possible audience.

Since the beginning of the project, HELI-DEM partners tried to respond to this request in a positive way. Project themes were explored in collaboration with external stakeholders and results were discussed with sector experts and also non-specialists.

A comprehensive strategy has been implemented: creation of a dedicated website, participation to conferences and meetings, publication of articles in scientific and non-scientific magazines, realization of a regular newsletter, distribution of brochures and production of this publication.

INTRODUZIONE

Fondazione Politecnico ha supportato i partner di progetto nello sviluppo di tutte le attività non prettamente scientifiche. In particolar modo Fondazione ha coordinato le attività di gestione manageriale del progetto e le attività di divulgazione dei risultati cercando, da un lato, di garantire il raggiungimento degli obiettivi previsti nei tempi e coi costi preventivati, e, dall'altro, di dare adeguata diffusione e pubblicizzazione ai risultati ottenuti.

Per la divulgazione dei risultati del progetto si è cercato di implementare una strategia integrata così da utilizzare il più ampio ventaglio di opzioni possibili. Sono state, pertanto, utilizzate forme consolidate di diffusione quali articoli e pubblicazioni sia scientifici che a taglio divulgativo ma anche forme legate alle nuove tecnologie (pagine web, newsletter).

Sono stati, inoltre, integrati nella strategia di divulgazione anche appuntamenti collettivi destinati agli operatori del settore e agli interessati. Tali incontri son stati pensati per assicurare la massima diffusione dei risultati, anche in occasione di eventi significativi per il mondo scientifico e industriale di riferimento per il tema proposto.

I lavori del progetto sono stati conclusi con una presentazione pubblica presso la sede di Regione Lombardia in occasione della quale sono stati distribuiti i materiali prodotti tra cui anche la presente pubblicazione in formato elettronico.

Tutti i contributi pubblici possono e potranno essere consultati anche dal sito web dedicato www.helidem.eu che è stato gradualmente riempito di contenuti a valle dell'avvio del progetto.

1 IL SITO WEB

Fin dai primi mesi di avvio del progetto è stato avviato il sito www.helidem.eu. I partner hanno deciso di investire sulla realizzazione di un sito web dedicato per poter mostrare passo dopo passo l'avanzamento delle attività e contestualmente mettere a disposizione di tutti gli interessati uno spazio che potesse essere punto di riferimento anche a valle della chiusura delle attività.

Il sito è diviso nelle seguenti sezioni

- Home page: riporta un abstract del progetto, le notizie in Primo Piano (periodicamente aggiornate), immagini illustrative in rotazione del progetto, un riquadro per contattare i partner e i collegamenti alle altre sezioni del sito.
- Progetto: riporta un riassunto dettagliato degli obiettivi e delle finalità del progetto.
- Partners: riporta la descrizione dei soggetti che hanno partecipato allo sviluppo delle attività

- **Attività:** riporta i dettagli delle azioni (Work Packages). Ad inizio progetto il sito riportava quanto previsto da piano presentato in sede di richiesta di finanziamento. Allo svilupparsi del lavoro le brevi descrizioni sono state sostituite con quanto effettivamente svolto dai partner di progetto. In questo modo è stato anche possibile mostrare in tempo reale agli interessati il raggiungimento degli obiettivi dichiarati.
- **News ed eventi:** riporta tutte le novità inerenti il progetto: partecipazioni ad eventi, interventi a convegni e manifestazioni, presentazioni e articoli.
- **Download:** riporta la i documenti pubblici che possono essere scaricati da esterni quali presentazioni e articoli.

Il sito riporta anche i link per poter raggiungere le pagine della Commissione dedicata al programma Italia Svizzera e ai finanziamenti FESR.

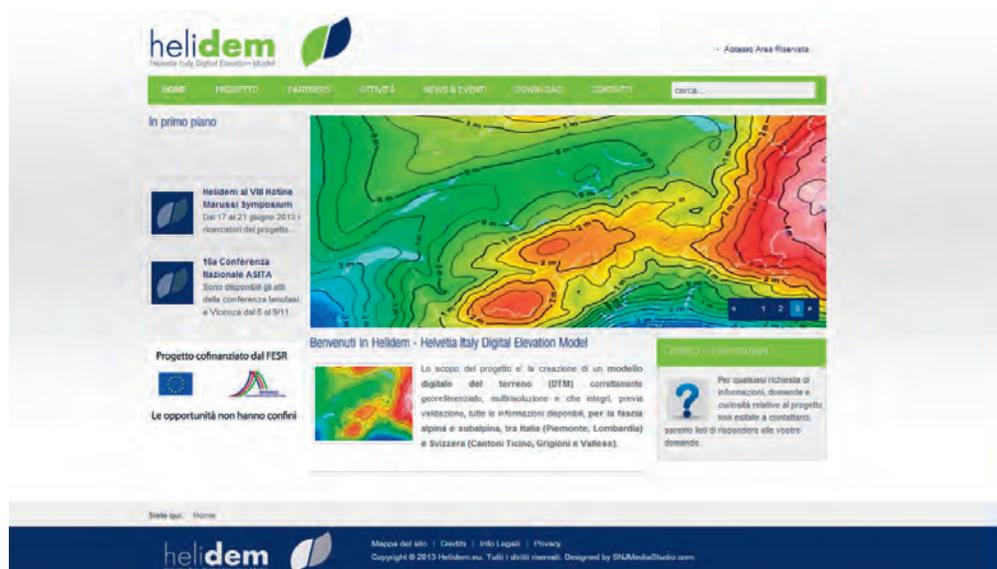


Figura 1. Home page del sito www.helidem.eu

2 LA NEWSLETTER

Per assicurare la massima diffusione proattiva (a differenza del sito web) delle attività di progetto fin dall'avvio dello stesso si è deciso di dare vita ad una newsletter dedicata (Fig. 2).

La newsletter è stata pensata come uno strumento agile per raggiungere direttamente le caselle di posta di potenziali interessati con una brochure di due pagine strutturata in sezioni.

In particolare:

- Riassunto delle azioni di progetto: riporta un sunto dettagliato di quanto svolto all'interno di una singola azione di progetto. Leggendo nel tempo le diverse newsletter è possibile cogliere i progressi del progetto e restare aggiornato sulle ricerche e sulle sperimentazioni
- In evidenza: riporta una serie di riquadri che presentano i partner di progetto (uno per numero), i momenti di confronto pubblici organizzati nell'ambito del progetto (convegni, workshop), o particolari elementi di rilievo emersi nel corso delle attività.

La newsletter è stata distribuita ad una mailing list di oltre 500 contatti di interessati, tecnici e esperti del settore.



Figura 2. Esempio di newsletter

3 CONVEGNI E MOMENTI DI INCONTRO

I partner di progetto fin dal primo anno di attività hanno partecipato ad eventi, fiere e convegni tematici così da poter presentare le attività HELI-DEM e potersi confrontare con esperti esterni ai progetti. Il confronto diretto è stato ritenuto molto utile per verificare quanto sviluppato e per indirizzare le successive attività. Le presentazioni mostrate ai vari eventi sono state rese disponibili sul sito di progetto nella apposita area “download”.

Oltre ad avere partecipato ad eventi realizzati da esterni sia a livello nazionale sia a livello internazionale (Australia, Cina , Vienna) il progetto HELI-DEM ha anche provveduto ad organizzare due workshop direttamente centrati sulle proprie attività.

Il primo momento è stato pensato come un convegno di medio termine collocato parallelamente al più ampio evento SIFET 2012. L’iniziativa è stata denominata “Colloquio sui Sistemi e Modelli delle Altezze” è stata realizzata a Modena presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia ed ha visto anche l’intervento di un importante esperto internazionale quale il professor Joao Torres, passato presidente di EUREF.

Il secondo evento è da considerarsi come convegno di fine progetto ed è stato realizzato presso la sede di Regione Lombardia nel mese di settembre 2013 con lo scopo di raggiungere il più ampio numero di utenti possibili e così da trasmettere i risultati finali ottenuti nello svolgimento del lavoro.

Nel corso di questi incontri sono stati distribuiti dei volantini-flyer informativi appositamente disegnati mantenendo il filo conduttore grafico che ha legato tutte le iniziative di progetto. I flyer sono stati stampati per oltre 1500 copie e diffusi sia in presenza sia attraverso le caselle di posta sfruttando il formato elettronico.

Infine, nel corso del convegno “Hotine-Marussi symposium” (Roma, Giugno 2013) oltre ad intervenire in sessioni di discussione e a distribuire i flyer illustrativi, i partner di progetto hanno anche organizzato una sessione poster dedicata. Per l’occasione sono stati stampati sei poster in formato A0 (un esempio in Fig. 4) che, esposti nello spazio dedicato sono stati utilizzati come base di discussione e confronto.



Figura 3. Flyer illustrativo

4 PUBBLICAZIONI

L'attività di divulgazione ha riguardato anche e in maniera attenta il settore scientifico di riferimento del progetto. Tutti i ricercatori coinvolti hanno cercato di tradurre i risultati ottenuti dalle sperimentazioni in articoli scientifici da pubblicare in riviste nazionali e internazionali. Si prevede che questa attività di promozione possa continuare anche a valle della chiusura del progetto in relazione ai lunghi tempi di validazione che le più importanti riviste scientifiche impongono garantire la qualità e la significatività degli articoli proposti. Si propone di seguito l'elenco delle pubblicazioni attualmente presentate e aventi come riferimento principale il progetto HELI-DEM.

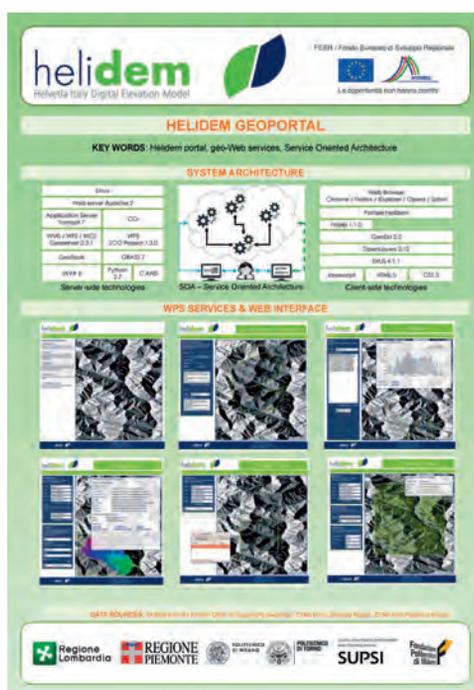


Figura 4. Uno dei poster predisposti per il convegno Hotine-Marussi

Biagi L., Brovelli M.A., Campi A., Cannata M., Carcano L., Credali M., De Agostino M., Manzino A., Peggion M., Sansò F., Siletto G. (2011). *Il progetto HELI-DEM (Helvetia-Italy Digital Elevation Model): scopi e stato di attuazione*. In: XV Conferenza Nazionale ASITA, Colorno (Parma), 15-18 Novembre 2011. pp. 347-348;

Biagi L., Brovelli M. A., Zamboni G., *A DTM multi-resolution compressed model for efficient data storage and network transfer*, Proceedings of WG IV/1,2,4,5,7 ICWG

IV/VIII joint Workshop on Geospatial Data Infrastructure: from data acquisition & updating to smarter services, 20-21 October 2011, Guilin, China, 2011;

Biagi L., Brovelli M. A., Zamboni G., *A new multi-resolution algorithm to store and transmit compressed DTM*, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XXXIX-B4, 7-12, 2012

Biagi L., Carcano L., De Agostino M., *DTM cross validation and merging: problems and solutions for a case study within the HELI-DEM project*, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XXXIX-B4, 265-270, 2012

Biagi L., P. Dabove, A. Manzino, C. Taglioretti, M.G. Visconti, 2012. *Il posizionamento NRTK in alta quota: applicazioni e risultati nell'ambito del progetto HELI-DEM*. Bollettino SIFET, vol. 3/2012, p. 9-26, ISSN: 1721-971X

Biagi L., Carcano L., Lucchese A., Negretti M., *Creation of a multiresolution and multiaccuracy DTM: problems and solutions for a case study*, Submitted to the International Workshop "The Role of Geomatics in Hydrogeological Risk" proceedings, Padua, 2013

Biagi L., Carcano L., *Methodological problems merging local DTMs: solutions and comparisons for a case study*, to be submitted to Hotine Marussi Symposium on Mathematical geodesy proceedings, 2013, Roma

Biagi L., Brovelli M.A., Campi A., Cannata M., Carcano L., Credali M., De Agostino M., Manzino A., Sansò F., Siletto G. (2011). *Il progetto HELI-DEM (Helvetia-Italy Digital Elevation Model): scopi e stato di attuazione*, in *Bollettino della Società Italiana di Fotogrammetria e Topografia*, n°1/2011, pp. 35-51, ISSN: 1721-971X.

Croci A., Dabove P., Manzino A.M., Taglioretti C., Biagi L., Visconti M.G., 2012. *La sperimentazione di una rete GNSS transfrontaliera per il posizionamento NRTK*. L'articolo è stato presentato alla XVI Conferenza Nazionale ASITA, Vicenza, 6-9 novembre 2012.

Dabove P., Manzino A.M., Taglioretti C., 2013. *What are the CORSs requirements to have an NRTK positioning even in areas with extreme changes in altitude?*. Il presente articolo è in fase di valutazione presso la rivista InsideGNSS.

Manzino A.M., Dabove P., Taglioretti C., 2013. *The importance of the orthometric correction in the North of Italy considering a global model of geoid: a real case study*. L'articolo verrà presentato al IAG Scientific Assembly 2013 che si terrà a Potsdam, 1-6 settembre 2013.

Finito di stampare nel mese di settembre 2013 presso le Arti Grafiche Pisano, Cagliari

