

Rimisura e compensazione della rete italiana di livellazione di alta precisione

Marianna Carroccio ^(a), Renzo Maseroli ^(b), Giacomo Stefanelli ^(c)

^(a) Istituto Geografico Militare, via Di Novoli 93, 50127 – caservopgeod@geomil.esercito.difesa.it

^(b) Istituto Geografico Militare, via Di Novoli 93, 50127 - maseroli@tin.it

^(c) Istituto Geografico Militare, via Di Novoli 93, Firenze – giacomostefanelli.99@gmail.com

1. Introduzione

La rete nazionale di livellazione di alta precisione attualmente in uso, comunemente indicata come "moderna", è stata realizzata fra il 1948 e il 1971, e comprende 13000 km di linee livellate con un caposaldo materializzato mediamente ogni chilometro (figura 1). Le quote ufficialmente adottate sono state ottenute dai dislivelli puri compensandoli manualmente e in blocchi separati, e quindi con criteri non del tutto rigorosi, in appoggio a tre differenti mareografi: Genova (1942) per la parte peninsulare, Cagliari (1956) per la Sardegna e Catania (1965) per la Sicilia. Il risultato della compensazione, che evidenzia un errore chilometrico medio di 1.3 mm, costituisce la materializzazione del sistema di riferimento altimetrico attualmente in uso, che, per la parte continentale, viene indicato con la sigla GE42(1971). Un ricalcolo delle stesse misure eseguito con software attuali ha mostrato una sottostima delle quote di circa 15 mm, crescente verso il Sud.

Le ricognizioni e le rimisure parziali eseguite negli anni 80 e 90 del '900, hanno evidenziato la scomparsa di buona parte dei caposaldi e la diminuita affidabilità di quelli rintracciati a decenni di distanza dalla loro istituzione.

Nel 1997 l'IGM ha dato avvio ad un importante progetto di completo riattamento e rimisura della rete con contemporaneo raffittimento dei poligoni, ritenuti non più sufficienti alle esigenze di un paese moderno, che prevede di portare la rete ad oltre 21000 km di livellazione di alta precisione a copertura di tutto il territorio nazionale (figura 3). Con il procedere degli interventi sulle linee è stato indispensabile eseguire un aggiornamento delle monografie, in modo da rappresentare la reale situazione dei siti spesso notevolmente modificata: scomparsa di contrassegni, aggiunta di nuovi, istituzione di caposaldi totalmente nuovi in luoghi completamente diversi, ecc. Per ciascuna linea è stato inoltre necessario ricalcolare le quote in modo da assegnare un valore alle nuove materializzazione ed aggiornare quelle rintracciate. E' stata quindi assegnata una quota provvisoria a tutti i caposaldi delle linee riattate, o di nuovo impianto, ottenuta compensando i dislivelli puri e fissando, fra i

contrassegni rintracciati in ciascuna zona, le quote di quelli ritenuti più stabili, in modo da avere risultati il più possibile coerenti con il riferimento altimetrico Ge42(1971).



Figura 1 - Moderna rete italiana di livellazione di alta precisione; comprende 13000 km di linee livellate, realizzate in 24 anni di lavoro, dal 1948 al 1971.

2. Progetto di rimisura e raffittimento

Il completamento delle misure era stato previsto per il 2016, ipotizzando la necessità incompressibile di 20 anni di lavori, ma con l'accortezza di intervenire prima nelle zone più stabili, e solo negli ultimi anni nelle aree caratterizzate da movimenti altimetrici più significativi, in modo da minimizzare gli effetti negativi dovuti alla notevole durata dell'attività.

In realtà è stato possibile attuare la suddetta strategia solo parzialmente, dovendo in certi casi operare nel territorio delle Regioni che di volta in volta

mettevano a disposizione del progetto importanti risorse economiche. Inoltre varie problematiche sopraggiunte hanno rallentato l'attività negli ultimi anni, e non hanno consentito di rispettare la tempistica, tanto che alla scadenza prevista (2016) risultavano rimisurati o istituiti ex novo 16685 km, dei quali 15884 nell'Italia continentale e 801 km in Sicilia (tabella 2).

Le risorse disponibili negli anni 2017 e 2018 sono state impiegate per la rimisura delle linee ricadenti nelle aree dell'Appennino centrale che, fra agosto 2016 e gennaio 2017, sono state interessate dalla nota sequenza sismica, che ha provocato movimenti altimetrici di eccezionale entità.

Al fine di presentarsi con dati affidabili alle prossime compensazioni unificate delle reti altimetriche europee promosse dall'EUREF, alle quali negli ultimi anni l'Italia ha partecipato solo parzialmente, proprio a causa della carenza di misure attendibili estese a livello nazionale, ed anche in considerazione dell'inopportunità di lasciare senza un assetto definitivo le misure effettuate in oltre 20 anni di attività, si è deciso nel 2019 di procedere ad una compensazione definitiva dei 15884 km di linea misurati sull'Italia continentale, che collegano efficacemente la rete italiana con quelle europee e coprono in modo adeguato tutto il territorio peninsulare escluse la Calabria e parte della Puglia. I risultati ottenuti portano ad una revisione del datum altimetrico nazionale continentale, che diventa GE42(2019).

anno	Km	anno	Km
1996	58 ⁽¹⁾	2006	1822
1997	487	2007	1314
1998	254	2008	1106
1999	890	2009	478
2000	1295	2010	125
2001	1497	2011	335
2002	652	2012	557
2003	1286	2013	1114
2004	711 (dei quali 476 in Sicilia)	2014	352
2005	1556 (dei quali 325 in Sicilia)	2015	494
		2016	301
		Totale	16685

⁽¹⁾Linea 150 (Altamura-La Redenta)

Tabella 2 - Dettaglio dei chilometri di livellazione misurati in ciascuno degli anni dell'attività; la linea 150, misurata nel 1996 con la finalità di quotare Matera, è stata fatta rientrare nell'ambito del progetto di rimisura iniziato nel 1997.

3. Calcolo delle linee fondamentali

Oltre alla rimisura delle linee costituenti la rete "moderna" (1948-71), sono stati livellati numerosi nuovi percorsi, con i quali è possibile suddividere i poligoni originali portandoli da un perimetro medio di circa 600 km a quasi la metà. In alcuni casi, a seguito di situazioni particolari o di esigenze delle Amministrazioni locali, è stato eseguito un raffittimento di notevole densità in aree ristrette, come ad esempio sull'altopiano di Asiago o nell'area Pisana, quest'ultima soggetta ad forte subsidenza.



Figura 3 - Progetto di rimisura e densificazione della rete altimetrica italiana, che porterà a disporre di oltre 21000 km di livellazione di alta precisione; i colori delle linee si riferiscono al periodo della misura; in nero le linee non ancora rimisurate.

Al fine di ottenere una maglia principale, che costituirà l'ossatura fondamentale del rilievo altimetrico nazionale, non troppo discosta da quella finora in uso (1948-71), in modo da avere parametri di riferimento confrontabili con il passato, e trascurando i raffittimenti locali troppo densi, sono state selezionate

una serie di linee ritenute più significative, che coprono l'area rimisurata con 37 poligoni della lunghezza media di 400 km (linee blu in figura 5).

Poligono	Perimetro	Dislivello	Dislivello Ass.	Tolleranza	Differenza
n.	[km]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	160	29	29	25	-4
2	320	-24	24	36	12
3	393	1	1	40	39
4	322	17	17	36	19
5	456	42	42	43	1
6	446	13	13	42	29
7	436	3	3	42	39
8	370	-10	10	38	29
9	439	3	3	42	39
10	295	14	14	34	20
11	330	23	23	36	13
12	438	-21	21	42	21
13	312	-26	26	35	9
14	421	-4	4	41	37
15	212	27	27	29	2
16	474	50	50	44	-7
17	443	23	23	42	19
18	403	-16	16	40	24
19	353	-32	32	38	5
20	395	-26	26	40	14
21	470	-48	48	43	-4
22	464	15	15	43	28
23	434	-20	20	42	21
24	490	-25	25	44	19
25	515	-1	1	45	45
26	216	-16	16	29	13
27	597	-13	13	49	35
28	264	8	8	33	24
29	374	21	21	39	18
30	325	8	8	36	28
31	339	13	13	37	24
32	315	15	15	35	20
33	630	37	37	50	13
34	298	-4	4	35	30
35	429	-1	1	41	41
36	586	27	27	48	21
37	442	6	6	42	36

Tabella 4 - Caratteristiche salienti dei poligoni generati dalle linee selezionate come fondamentali che costituiranno l'ossatura del rilievo altimetrico nazionale.

Di tali poligoni, le cui caratteristiche salienti sono riportate in tabella 4, è stata verificata la chiusura con risultati molto soddisfacenti: tutti i poligoni rientrano ampiamente nella tolleranza calcolata con $2 \cdot \sqrt{L}$, esclusi i numeri 1 e 16 che presentano valori di pochi mm superiori al limite e pertanto sicuramente accettabili.

Dato che una delle principali finalità del presente calcolo è quella di partecipare alle compensazioni per l'unificazione del riferimento altimetrico europeo, promosse dell'EUREF, assumono particolare importanza le linee che vanno oltre confine e che collegano la maglia italiana con quella europea (in rosso in figura 5). Tali linee sono state pertanto inserite nel calcolo fondamentale, unitamente al poligono 8.1 che risulta indispensabile per alcuni collegamenti con la Francia

e la Svizzera, e che, pur presentando valori di chiusura anomali¹, non influisce sulla compensazione poiché è connesso alla maglia fondamentale tramite un solo punto (Nod. 17, Ivrea).



Figura 5 - In blu le linee selezionate come maglia fondamentale; in rosso le linee di collegamento con le reti europee; in arancio le linee calcolate come raffittimento.

Il poligono 8.1 ha caratteristiche molto particolari; partendo da Ivrea raggiunge Villeneuve seguendo due percorsi: il primo coincide con il fondovalle della Valle d'Aosta, mentre il secondo, procedendo verso Ovest, passa sull'anomalia gravimetrica nota come "corpo d'Ivrea", raggiunge il Colle di Nivolet a 2600 m di quota, e ridiscende a Villeneuve percorrendo la Valsavarenche. Tale situazione risulta particolarmente problematica per l'utilizzo dei dislivelli puri, cioè non corretti con la gravità, ed è stata pertanto utilizzata come banco di prova per il calcolo delle correzioni ottenute utilizzando il modello di geoidi nazionale ITALEO2005 (Gentile et al., 2011).

¹ Il poligono 8.1 ha una lunghezza di 203 km e presenta una chiusura di 70 mm, valore che risulta notevolmente fuori dalla tolleranza pari a 28 mm.

Come già detto il sistema altimetrico GE42(1971) ha lo zero sul mare medio di Genova alla data 01/01/1942. Dal mareografo la quota fu trasportata a breve distanza sul nodale di Genova (N. 30), punto di partenza del calcolo della rete "moderna". Al fine di preservare nel tempo il riferimento convenzionale, il Nod. 30 fu collegato, con misure del 1955, a tre caposaldi opportunamente posizionati sulle montagne in prossimità di Genova, in luoghi che, a seguito di un'indagine geologica, davano garanzie di notevole stabilità: *S. Ilario Alto*, *Prato Zanino* e *Madonna del Monte*, indicati come caposaldi di "ordine zero" (Gamboli, 1965). A seguito di rimisure effettuate nel 2001 i tre punti "zero" hanno dimostrato una notevole stabilità relativa, e sono stati pertanto fissati nel calcolo dell'attuale rete fondamentale, in modo da mantenere lo stesso "zero" della rete in uso, e rendendo così immediatamente significativi i confronti con il passato.

Il calcolo di compensazione della rete fondamentale, che istituirà il sistema altimetrico GE42(2019), ha riguardato complessivamente 258 caposaldi nodali collegati da 10310 km di linea, dei quali 9501 km costituenti 38 poligoni (compreso 8.1) e 809 km di linee aperte che si estendono verso i confini di Stato; i caposaldi quotati ammontano ad oltre 10000. L'errore quadratico medio dell'unità di peso, pari a 1.59 mm, evidenzia un'ottima congruenza delle misure. Il confronto con le quote GE42(1971), eseguito ad oggi solo sui 45 caposaldi nodali che mantengono invariata la materializzazione iniziale², mostra, escludendo le aree di pianura sicuramente caratterizzate da notevole subsidenza locale (Como, Mestre, Rimini, Bologna, Pisa, Pescara, ecc.), un leggero abbassamento del Nord-Ovest, ed un sollevamento sia in direzione Nord-Est che verso il Sud della penisola, crescente con la distanza, e solo in piccola parte riconducibile alla sottostima delle quote GE42(1971).

4. Calcolo del raffittimento

Tutte le linee non considerate nella rete fondamentale, per un complessivo di 5507 km (in arancio in figura 5), sono state calcolate fissando le quote dei caposaldi appartenenti alla nuova rete fondamentale. Al fine di evitare la presenza di salti repentini, sono state aggiunte al calcolo di raffittimento anche i 1606 km delle linee non rimisurate ricadenti in Calabria e in una parte della Puglia, ottenendo così anche in questi territori valori omogenei con la restante parte della penisola. Il calcolo di raffittimento ha quindi quotato 146 caposaldi nodali e oltre 7000 caposaldi di linea, collegati da 7113 km di linea, e risulta caratterizzato da un errore quadratico medio dell'unità di peso pari a 1.73 mm, che ha evidenziato una buona congruenza delle misure.

5. Calcolo del quote normali

Le quote adottate ufficialmente dall'Italia sono sempre state quelle derivanti dalla compensazione dei dislivelli puri, senza l'applicazione di nessuna correzione, preferite anche in considerazione dell'esigua entità delle correzioni stesse rispetto alla precisione con cui, fino a poco tempo fa, potevano essere calcolate. In oltre le quote "pure" risultano rispondenti alla maggior parte delle esigenze tecniche locali, e, come mostrano i valori riportati in tabella 4,

² Il confronto verrà successivamente esteso a tutti i caposaldi, anche a quelli di linea che mantengono invariata la materializzazione iniziale, con un dettaglio nettamente maggiore ed una statistica sui movimenti più affidabile.

consentono la chiusura di tutti i poligoni che costituiscono la maglia fondamentale, escluso quello di Ivrea che presenta una situazione veramente particolare. Oggi l'opportuna decisione dell'EUREF di unificare il sistema altimetrico europeo utilizzando le quote normali, rende necessario che anche il nostro Paese si doti di valori altimetrici corretti con la gravità, da affiancare alle quote tradizionali italiane senza sostituirle. D'altra parte la possibilità di ottenere dal modello di geoide ITALGEO2005 valori di gravità con precisioni sufficienti allo scopo, dimostrato dallo studio effettuato sul poligono d'Ivrea (Gentile et al., 2011), rende possibile il calcolo delle correzioni senza la necessità di dover procedere all'effettuazione di ulteriori misure. Sono già state consegnate all'EUREF le misure relative alla maglia fondamentale che consentiranno il calcolo dei valori di quota normale unificata. Anche l'IGM ha comunque avviato, in collaborazione con il Politecnico di Milano, una procedura di calcolo che porterà ad ottenere sia i numeri geopotenziali che le quote normali di tutta la rete.

6. Conclusioni

La misura di oltre 21000 km di linee di livellazione di alta precisione, necessaria per inquadrare altimetricamente un modo efficace e preciso la nazione, ha costituito un impegno notevole, durato già 20 anni e non ancora totalmente concluso. D'altra parte risultava importante procedere all'aggiornamento del dato verticale, essenziale per una efficace gestione del territorio e premessa indispensabile per diverse importanti attività, quali:

- la possibilità di definire un nuovo modello nazionale di geoide, migliorandone sensibilmente la precisione, attività già iniziata in collaborazione con il Politecnico di Milano, che dovrebbe consentire in futuro di non dover più ricorrere, almeno per l'ordinaria georeferenziazione, alla costosa e lenta livellazione geometrica;
- la possibilità di partecipare, con dati aggiornati ed affidabili, al calcolo unificato delle reti europee, che consentirà all'Italia di disporre dei valori di quota normale richiesti da Eurogeographics.

Il nuovo sistema GE42(2019) sarà adottato ufficialmente in concomitanza della disponibilità del nuovo modello di geoide (ITALGEO2020) e dell'aggiornamento delle quote dei punti IGM95, probabilmente nei primi mesi del 2020.

Riferimenti bibliografici

- Gentile G., Maseroli R., Sacerdote F., (2011), "Studio dell'effetto della gravità su circuiti chiusi della livellazione di alta precisione in presenza di dislivelli molto elevati", Atti della 15^a Conferenza ASITA, Colorno (PR), 15-18 nov.
- Gamboli E., (1965), "Sul caposaldo fondamentale di riferimento della nuova rete altimetrica di alta precisione", Bollettino di Geodesia e Scienze Affini, n 1.
- Baldi P., Barzaghi R., Sacerdote F. et al., (1999), "Sviluppi nella definizione del datum altimetrico" atti della 3^a conferenza ASITA, Napoli, 9-12 nov.
- Ihde J., Sacher M., Makinen J., "European Vertical Reference System EVRS 2007—a combination of UELN and ECGN" Activities of the technical Working Group EUREF.
- Sacher M., Ihde J., Makinen J. (2009), "EVRS2007 as realization of European Vertical Reference System", Bollettino di Geodesia e Scienze Affini, n. 1.