

Validazione di una campagna di misure micro-gravimetriche

Maria Grazia D'Urso (*), Giuseppina Costantino (**), Enrico Tallini (***)

(*) DICeM – Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale, Via G. Di Biasio, 43 – 03043 Cassino (FR);
tel: +39-0776 2994309; fax:089 2580897; durso@unicas.it

(**) Ingegnere libero professionista, tel: 3334322774; costgiusy@libero.it

(***) GEORES S.r.l. Piazzale De Matthaeis, 41, 03100 Frosinone, info@geores.it

Sommario

In questo lavoro è stato affrontato lo studio e l'analisi degli effetti della gravità e, in particolare, la interpretazione delle cosiddette "anomalie gravimetriche". A tale scopo è stato effettuato un confronto tra le anomalie di *Bouguer* osservate nel corso di un rilievo geofisico che ha interessato il *Tarhunah Campus* universitario, a sud-est di Tripoli, in Libia, e quelle ottenute applicando un approccio analitico recentemente proposto per il calcolo del potenziale gravitazionale. Tale approccio, basato su una opportuna applicazione del teorema di Gauss, consente di esprimere il potenziale gravitazionale e la gravità mediante semplici espressioni algebriche implementate in un codice Matlab. I valori di gravità misurati sono stati rilevati in un set di 1170 punti stazione microgravimetrici georeferenziati. Tali valori sono stati, poi, confrontati con i valori ottenuti dall'applicazione del nuovo approccio ove i valori di anomalia sono stati calcolati rispetto ad una densità costante di $2.67 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. L'accuratezza degli scostamenti tra le anomalie di *Bouguer* calcolate con entrambi i metodi è dell'ordine del $4.5^\circ/\infty$. I risultati del confronto tra i valori sperimentali e quelli teorici hanno permesso di rilevare che il recente approccio analitico è in grado di apportare un sostanziale contributo alla valutazione della variazione del campo gravitazionale terrestre.

Abstract

We illustrate a study and an analysis related to the gravity effects and, in particular, to the interpretation of the so-called "gravimetric anomalies". To this end it has been carried out a comparison between the Bouguer's anomalies observed during a geophysical survey at the University Tarhunah Campus, North-Eastern Tripoli, in Libya, and those carried out by an application of a recently formulated analytical approach for computing the gravitational potential. Such an approach, based upon a suitable application of Gauss theorem, allows one to express the potential and the gravity vector by means of simple algebraic expressions which have been implemented in a Matlab code. The measured gravity values have been derived from a dataset of 1170 geo-referenced micro-gravimetric station points. Subsequently, these values have been compared with those obtained from the application of new approach where the anomaly values have been calculated with a constant density 2.67 g/cm^3 . The accuracy between Bouguer's anomalies computed with both methods is of the order of $4.5^\circ/\infty$. The results of the comparison between the experimental and analytical values have allowed us to notice that the recent analytical approach proposed can yield an essential contribute to the evaluation of the gravity variation.

Introduzione

Durante i mesi aprile e maggio dell'anno 2010 è stato effettuato in Libia un rilievo geofisico avente lo scopo di valutare le condizioni del sottosuolo e rilevare la presenza di eventuali cavità carsiche. Normalmente le cavità possono essere riempite da acqua, sedimenti, materiale collassato, e, pertanto, risultano contraddistinte da una densità minore rispetto al materiale circostante. Questa densità di contrasto tra "vuoti" e roccia viene evidenziata dall'analisi delle anomalie di Bouguer poiché la variazione di massa nel sottosuolo, viene rilevata mediante una variazione della forza di

gravità della Terra. La microgravimetria risulta sensibile alle diverse tipologie di strutture, variazioni di densità degli strati profondi, spessori del riempimento di depositi (Benson and Baer, 1989; Roberts et al., 1990; Benson and Floyd, 2000) nonché alla disomogeneità geologica.

Comunemente utilizzata per rilevare cavità dal 1960 (Colley, 1963; Neumann, 1967) la microgravimetria è ancora oggi uno degli approcci più efficaci per la localizzazione e il monitoraggio di cavità nel sottosuolo, siano esse cavità naturali generate da collassi o fenomeni carsici che cavità determinate da attività antropiche, come, ad esempio, costruzioni di gallerie e pozzi di vecchie miniere (Butler, 1984; Hinze, 1990; Wenjin and Jiajian, 1990; Camacho et al., 1994; Yule et al., 1998; Beres et al., 2001). Tutto ciò è possibile poiché il metodo della microgravimetria risulta influenzato dalla distribuzione della densità nel sottosuolo e, quindi, dalla presenza di una variazione di massa rispetto al terreno circostante.

Importante è la sua applicazione per esplorazioni mineralogiche e petrolifere: ripetute misure gravimetriche associate a tecniche topografiche di livellazione possono essere utilizzate per rilevare cedimenti e movimenti di masse causate dall'estrazione di petrolio, nonché fenomeni legati alla cessazione di tale attività. È sempre più diffuso l'utilizzo del metodo gravimetrico anche per il monitoraggio geotermico, sismico e vulcanico, nonché rilievi in aree urbane.

È fondamentale tenere in considerazione alcuni effetti di disturbo: la latitudine, la quota e la topografia influenzano le misure. In generale le mappe delle anomalie di Bouguer mostrano dei valori negativi che possono essere messi in relazione con distribuzioni di valori di basse densità e croste sottili. Tali anomalie sono principalmente correlate ai grabens e i loro bacini colmati da sedimenti.

Il dato gravimetrico può costituire il punto di partenza per una modellazione dell'assetto strutturale profondo; la correlazione tra anomalia di Bouguer locale e profondità della Moho, discontinuità che segna il limite crosta-mantello, ha permesso di ottenere anche una stima dello spessore della crosta di alcune aree della superficie terrestre.

Principali allineamenti tettonici sono stati individuati grazie all'elaborazione delle anomalie di Bouguer sviluppate con il metodo di Blakely and Simpson (1986), che ha permesso di definire i confini dei corpi anomali presenti nel sottosuolo i quali sono stati correlati alle note faglie superficiali. Infine il carattere di indagine "non distruttivo" di tale tecnica di misura pone la gravimetria in posizione preferenziale per quelle applicazioni in cui si rende necessaria la salvaguardia delle opere presenti nell'area di indagine, come ad esempio in ambito archeologico.

La variazione di gravità relativa al caso studio è stata calcolata per un dataset di 1170 punti di stazione microgravimetrica in funzione delle rispettive coordinate cartografiche. Tale variazione è stata sottratta al valore di gravità teorica o "gravità normale" che, in funzione della variazione della gravità con la latitudine, è valutata adottando, come modello rappresentativo della superficie terrestre, un ellissoide privo al suo interno di variazioni orizzontali di densità. In questo modo è stato ottenuto il valore della gravità ridotta al geoide, che, sottratta alla gravità misurata durante il rilievo microgravimetrico, ha permesso di ottenere la cosiddetta anomalia di Bouguer.

I dati di tale anomalia sono stati calcolati per un valore di densità costante di $2.67\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, e ciò ha consentito di isolare, a seguito dell'analisi della mappa gravimetrica ottenuta, elementi caratterizzati da una densità diversa.

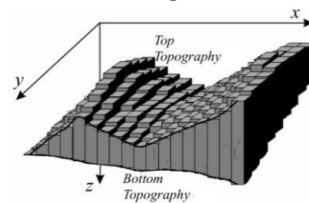


Figura 1 - Schematizzazione del terreno.

Approccio analitico proposto

I risultati dello studio microgravimetrico del *Tarhunah Campus* sono stati confrontati con i valori ottenuti dall'applicazione di un recente approccio computazionale che sfrutta le proprietà del teorema di Gauss (D'Urso, 2012). Tale approccio analitico calcola in un punto della superficie terrestre il potenziale gravitazionale e il suo gradiente, che, come è noto, rappresenta l'accelerazione di gravità, e si basa sulla modellazione del terreno in un adeguato numero di prismi, come mostrato in Figura 1.

A causa della sua semplicità, il prisma, parallelepipedo rettangolare, con le sue varie espressioni del potenziale in forma chiusa, è stato al centro dell'interesse scientifico per quasi due secoli.

Esso svolge un ruolo importante soprattutto nello studio della modellazione del campo gravitazionale terrestre locale quando la cosiddetta approssimazione *flat-Earth* è sufficiente. Inoltre i modelli di massa poliedrici tridimensionali offrono una grande flessibilità nella rappresentazione 3D delle strutture complesse.

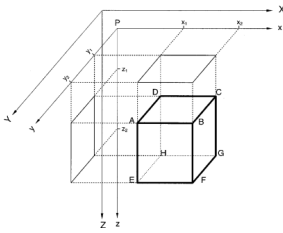


Figura 2 - Il prisma.

Dalla schematizzazione del terreno è stato ricavato un singolo prisma, rappresentato in Figura 2, delimitato da piani paralleli agli assi del sistema di riferimento e definito dalle coordinate X_1, X_2, Y_1, Y_2, Z_1 e Z_2 ; mentre il punto P, per il quale si andrà ad esplicitare l'espressione del potenziale, è posto per semplificazione nell'origine degli assi del sistema di riferimento x, y, z . È possibile esplicitare il potenziale gravitazionale nel punto P, ottenuto risolvendo l'integrale triplo esteso a tutto il dominio del prisma ABCDEFGH indicato con Ω

$$U(P) = G\delta \int_{\Omega} \frac{1}{(r \cdot r)^{1/2}} dV \quad [1]$$

ove $r(x, y, z) = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ è il vettore che congiunge P con un punto arbitrario di Ω ; G è la costante di gravitazione universale che nel Sistema Internazionale (S.I.) vale $6.67 \cdot 10^{-11} m^3 kg^{-1} sec^{-2}$ e δ la densità considerata costante. Le nuove formule, ottenute mediante applicazione del teorema di Gauss, mettono in evidenza le potenziali fonti di singolarità e indicano come tenerne conto in modo corretto. L'espressione del potenziale gravitazionale è stata esplicitata limitandoci al caso in cui P coincida con uno dei vertici del prisma. Quindi, consideriamo un sistema di riferimento cartesiano x, y, z avente origine in P e con assi paralleli ai lati del prisma, le cui lunghezze saranno indicate rispettivamente con a, b, c , come rappresentato in Figura 3.

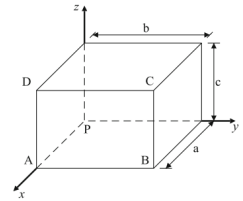


Figura 3 - Il prisma e il sistema di riferimento 3D.

Il nostro scopo è quello di calcolare il potenziale attraverso due applicazioni consecutive del teorema di Gauss; in primo luogo, l'integrale di volume viene trasformato nella somma di integrali 2D estesi ad ogni faccia del prisma e, successivamente ciascuno degli integrali 2D viene espresso come somma di integrali 1D estesi ad ogni lato della generica faccia. Tuttavia, nell'applicazione del teorema di Gauss, particolare attenzione deve essere posta alle possibili singolarità del campo scalare che compare nella [1]. È infatti evidente che il potenziale non è ben definito se $P \in \Omega$, vale a dire se $r = 0$. Per gestire formalmente questo caso dobbiamo ricordare alcune proprietà dell'operatore di divergenza e della delta di Dirac (D'Urso 2012; Tang, 2006). Grazie alle proprietà di tale funzione l'espressione del potenziale U può essere espresso, a prescindere dalla posizione di P rispetto al dominio Ω , mediante la formula

$$U(P) = G\delta \int_{\Omega} \frac{1}{(r \cdot r)^{1/2}} dV = \frac{G\delta}{2} \int_{\Omega} \text{div} \frac{r}{(r \cdot r)^{1/2}} dV \quad [2]$$

che rappresenta la formula di base per il calcolo effettivo del potenziale gravitazionale. Infatti, indicando con n il vettore unitario rivolto verso l'esterno, sulla frontiera $Fr(\Omega)$ si ha

$$U(P) = \frac{G\delta}{2} \int_{Fr(\Omega)} \frac{r \cdot n}{\sqrt{r \cdot r}} dA = \frac{G\delta}{2} \sum_{i=1}^6 \int_{F_i} \frac{r_i \cdot n_i}{\sqrt{r_i \cdot r_i}} dA_i \quad [3]$$

dato che Ω è un prisma e F_i una delle sue facce. Per esprimere il precedente integrale 2D in termini di integrale di linea, è necessaria una ulteriore applicazione del teorema di Gauss, ora nel piano di ciascuna faccia. A tal fine si considera la proiezione ortogonale del punto P sulla faccia i -esima, che verrà indicata con P_i , e si assume questo punto come origine di una sistema di riferimento locale

2D. Indicando con $\rho_i = (\xi_i, \eta_i)^T$ il vettore posizione di ogni punto della faccia i -esima rispetto al punto P_i e osservando che il prodotto $d_i = r_i \cdot n_i$ è costante su ogni faccia, l'espressione precedente può essere scritta:

$$U(P) = \frac{G\delta}{2} \sum_{i=1}^6 d_i \int_{F_i} \frac{dA_i}{(r_i \cdot r_i)^{1/2}} = \frac{G\delta}{2} \sum_{i=1}^3 d_i \int_{F_i} \frac{dA_i}{(\rho_i \cdot \rho_i + d_i^2)^{1/2}} \quad [4]$$

ove la sommatoria è stata limitata alle facce che non contengono P in modo che $d_i \neq 0$.

Eseguito la derivata del primo ordine del potenziale gravitazionale, sopra riportato, secondo lo sviluppo analitico riportato nel lavoro D'Urso 2012, si ricavano i valori di accelerazione di gravità, non riportati di seguito per brevità, da utilizzare per la validazione delle misure micro-gravimetriche in campo. Un codice in Matlab è stato implementato per il calcolo del potenziale gravitazionale e del suo gradiente.

Applicazione: descrizione e rilievo del sito

Lo scopo del sondaggio del rilievo di misure micro-gravimetriche eseguito da geofisici nel Tarhunah Campus, situato a circa 70 km a sud-est di Tripoli, nel periodo dal 15 aprile all'11 maggio 2010, è stato quello di valutare le condizioni del sottosuolo e identificarne le caratteristiche carsiche. La presenza di eventuali cavità carsiche, specie se superficiali, con forme, dimensioni e distribuzione estremamente variabile, può condizionare, in modo spesso determinante, le caratteristiche di stabilità del sottosuolo; pertanto la loro individuazione diventa un presupposto indispensabile sia per la minimizzazione dei rischi derivanti dalla loro presenza che per una ottimale pianificazione del territorio. Un vuoto rappresenta, dunque, una mancanza di massa nel sottosuolo che si traduce in una riduzione della forza di gravità della Terra, definita "anomalia gravimetrica negativa".

Figura 4 - Area di indagine con identificazione in rosso dei punti di osservazione microgravimetrica.



Il sondaggio geofisico ha interessato un'area totale di poco più di 162.000 m² e suddivisa in una griglia regolare di 10m x 10m, corrispondente a 1170 stazioni microgravimetriche, in cui la distanza massima tra due punti di lettura è circa 500 m. In generale il sito risulta caratterizzato nella parte sud e sud-est da formazione calcarea; la restante porzione è costituita, invece, da sedimenti fluvio-eolici composti da sabbia e limo, del periodo Olocene, Quaternario, e formazione di Nalut, una formazione risalente al Cretaceo superiore e costituita da sedimenti di carbonio. Calcarei dolomitici gialli e grigi e dolomie formano letti spessi con abbondanti sedimenti di selce tubolari e sferici e costituiscono la parte bassa della formazione. La parte alta è costituita, invece, da calcari dolomitici contenenti intercalazioni calcareo marnose giallastre e grigie. Caratteristica di questa formazione è la presenza di dolomie in rocce calcaree.

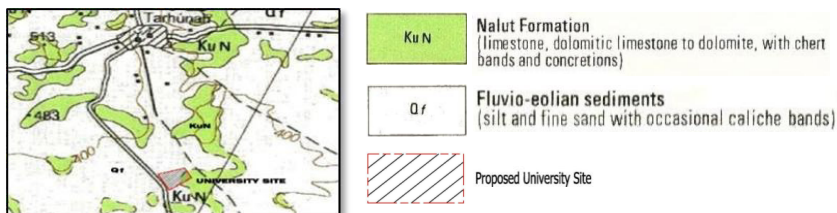


Figura 5 - Caratteristiche geologiche del Tarhunah.

Campagne di misura

Le misure microgravimetriche sono state effettuate utilizzando lo *Scintrex CG5*, gravimetro a lettura automatica che fornisce misure relative di gravità e adatto per eseguire rilievi ad alta risoluzione, in quanto sensibile a variazioni di accelerazione gravitazionale di 0.001 mGal.

Sono stati distinti 56 profili di gravità, la cui numerazione, incrementandosi verso est, va da 100 a

BASE	APRIL													MAY														
	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
22222																												
639																												
1339	X	X	X	X	X																							
100																												
1332																												
1328																												
619																												
1310																												
2109																												
2231																												
2422																												
2909																												
4009																												
4005																												

5701; le misure gravimetriche sono state effettuate seguendo un circuito chiuso "loop", per cui, la prima e l'ultima misurazione sono relative al medesimo punto; per ogni loop l'intera sessione di misura è stata della durata di circa 2-3 ore. Nella Figura 6 vengono rappresentate in giallo le stazioni di legame, utilizzate come stazioni di controllo, mentre le basi locali sono contrassegnate da una "X".

Figura 6 - Elenco delle stazioni di legame e delle stazioni base.

Elaborazione delle misure

L'accelerazione di gravità teorica determinata in un punto qualsiasi della superficie della Terra, è data dalla seguente relazione:

$$g_t = g_e(1 + c_1 \sin^2 \varphi + c_2 \sin^2 2\varphi)$$

dove φ è la latitudine geografica del punto considerato e g_e la gravità all'equatore che assume valore pari a 978031.846 mGal. In tale formula, detta della "gravità normale", le costanti c_1 e c_2 dipendono dal modello di Terra scelto; i valori qui utilizzati sono quelli forniti dalla Commissione dell'Unione Geologica e Geofisica Internazionale (I.U.G.G.) nel 1967, pertanto $c_1 = 0.0053024$ e $c_2 = -0.0000058$. Sulla superficie terrestre la gravità varia in funzione della quota del punto considerato e della morfologia ad esso circostante. Riducendo, mediante opportune correzioni, il valore teorico calcolato con la precedente relazione, e confrontandolo con quello misurato sulla superficie topografica, si rilevano delle differenze definite "anomalie gravimetriche" che sono legate a disomogeneità nella distribuzione di massa al di sotto della superficie di riferimento.

Le correzioni necessarie per giungere al corretto valore di anomalia gravimetrica, generata da un corpo a differente densità nel sottosuolo, si dividono in temporali e spaziali. Le correzioni temporali sono di deriva strumentale e di marea, mentre quelle spaziali sono di latitudine, di quota, chiamata anche correzione di aria libera, di *Bouguer* e topografica. La riduzione di *Bouguer*, dunque, presuppone che la superficie topografica del terreno sia piana. Se questa condizione non risulta soddisfatta è necessario tener conto sia degli avvallamenti, ossia delle masse introdotte nel calcolo della correzione di piastra ma in realtà inesistenti, sia di colline o di montagne, dunque a quota superiore rispetto a quella della generica stazione di misura, e non considerate. È per questo che risulta necessaria la correzione topografica. Data l'elevata precisione del rilievo, e nonostante il sito sia piuttosto pianeggiante, questa correzione è stata considerata per 1 km di raggio. Se al valore della gravità teorica, calcolata nell'ipotesi di una distribuzione omogenea di densità sull'ellissoide, si apportano tutte le correzioni sopra esposte, si ottiene la cosiddetta gravità ridotta (al geode):

$$G_{model} = g_t - (\delta g / \delta z - 2\pi G \rho_c)h - TC$$

ove $\rho_c = 2.67 g \cdot cm^{-3}$ è la densità media della crosta continentale, h la quota del punto di stazione (m), $\delta g / \delta z = 0.3086 mGal \cdot m^{-1}$ rappresenta la correzione di aria libera, $2\pi G \rho_c$ la correzione di piastra o correzione di Bouguer, mentre con TC si è indicata la correzione topografica.

Si riporta di seguito un campione di dati rappresentativo dei 1170 punti di stazione oggetti del rilievo microgravimetrico nel *Tarhunah Campus*. Nella tabella si osserva il calcolo dell'anomalia

di *Bouguer*, come differenza tra il valore di gravità misurato, $G_{measured}$ e il valore G_{model} , ottenuto sottraendo alla gravità teorica g_t , il Δg output dell'implementazione dell'algoritmo.

$$Bouguer\ Anomaly = G_{measured} - G_{model}$$

Si noti come gli scostamenti tra le anomalie di *Bouguer* ottenute applicando il nuovo approccio computazionale (indicate con il termine "Anomalia") e quelle calcolate nel rilievo geofisico (indicate con il termine "Bouguer d=2.670"), sono risultati per tutti i 1170 punti di lettura, inferiori ai 2mGal; in particolare sono compresi nel range 1.79 - 1.92 mGal. In sintesi, all'aumentare della quota la correzione di *Bouguer* aumenta, e nella formula aumenta anche G_{model} ; di conseguenza a parità di $G_{measured}$ l'anomalia di *Bouguer* diminuisce.

	Gmeasured	gt	Δg	gt - Δg	Anomalia calcolata con l'alg.	Bouguer d=2.670	[Anomalia-Bouguer]	note
pt	[mGal]	[mGal]	[mGal]	[mGal]	[mGal]	[mGal]	[mGal]	
100	978999.87	979514.4680	73.1114	979441.3566	-441.487	-443.386	1.899	pt di min quota
101	978999.79	979514.4679	73.1803	979441.2876	-441.498	-443.378	1.880	
102	978999.78	979514.4679	73.2016	979441.2663	-441.486	-443.365	1.879	
107	978999.84	979514.4677	73.2666	979441.2011	-441.361	-443.212	1.851	
108	978999.72	979514.4677	73.3460	979441.1217	-441.402	-443.261	1.859	pt di max quota
200	978999.84	979514.4606	73.1553	979441.3053	-441.465	-443.357	1.892	
201	978999.87	979514.4605	73.1574	979441.3031	-441.433	-443.333	1.900	
202	978999.92	979514.4605	73.1349	979441.3256	-441.406	-443.299	1.893	
203	978999.91	979514.4605	73.1581	979441.3024	-441.392	-443.287	1.895	
204	978999.90	979514.4605	73.1760	979441.2845	-441.384	-443.273	1.889	
205	978999.86	979514.4605	73.2185	979441.242	-441.382	-443.267	1.885	
206	978999.83	979514.4604	73.2505	979441.2099	-441.380	-443.250	1.870	
207	978999.83	979514.4604	73.2719	979441.1885	-441.359	-443.237	1.878	
208	978999.84	979514.4604	73.2670	979441.1934	-441.353	-443.233	1.880	
300	978999.90	979514.4532	73.1219	979441.3313	-441.431	-443.327	1.896	
301	978999.90	979514.4532	73.1275	979441.3257	-441.426	-443.321	1.895	

	Gmeasured	gt	Δg	gt - Δg	Anomalia calcolata con l'alg.	Bouguer d=2.670	[Anomalia-Bouguer]	note
pt	[mGal]	[mGal]	[mGal]	[mGal]	[mGal]	[mGal]	[mGal]	
5405	978999.65	979514.0786	73.1220	979440.9566	-441.307	-443.187	1.880	pt di min quota
5406	978999.63	979514.0786	73.1170	979440.9616	-441.332	-443.215	1.883	
5407	978999.52	979514.0785	73.1929	979440.8856	-441.366	-443.240	1.874	
5408	978999.50	979514.0785	73.2073	979440.8712	-441.371	-443.244	1.873	
5409	978999.38	979514.0784	73.3096	979440.7688	-441.389	-443.247	1.858	
5410	978999.29	979514.0784	73.3802	979440.6982	-441.408	-443.255	1.847	
5411	978999.20	979514.0784	73.4455	979440.6329	-441.433	-443.269	1.836	pt di max quota
5500	978999.74	979514.0713	73.0777	979440.9936	-441.254	-443.141	1.887	
5501	978999.66	979514.0712	73.1255	979440.9457	-441.286	-443.168	1.882	
5502	978999.55	979514.0712	73.1803	979440.8909	-441.341	-443.217	1.876	
5503	978999.57	979514.0711	73.1613	979440.9098	-441.340	-443.218	1.878	
5504	978999.45	979514.0711	73.2495	979440.8216	-441.372	-443.239	1.867	
5505	978999.36	979514.0711	73.3254	979440.7457	-441.386	-443.241	1.855	
5601	978999.60	979514.0638	73.1961	979440.8677	-441.268	-443.142	1.874	
5602	978999.51	979514.0638	73.2105	979440.8533	-441.343	-443.216	1.873	
5701	978999.58	979514.0564	73.1908	979440.8656	-441.286	-443.154	1.868	

Tabella 1 - Confronto tra le anomalie di *Bouguer* ottenute dall'applicazione dell'algoritmo e quelle calcolate nel rilievo geofisico (1mGal = 10⁻⁵ m/s²).

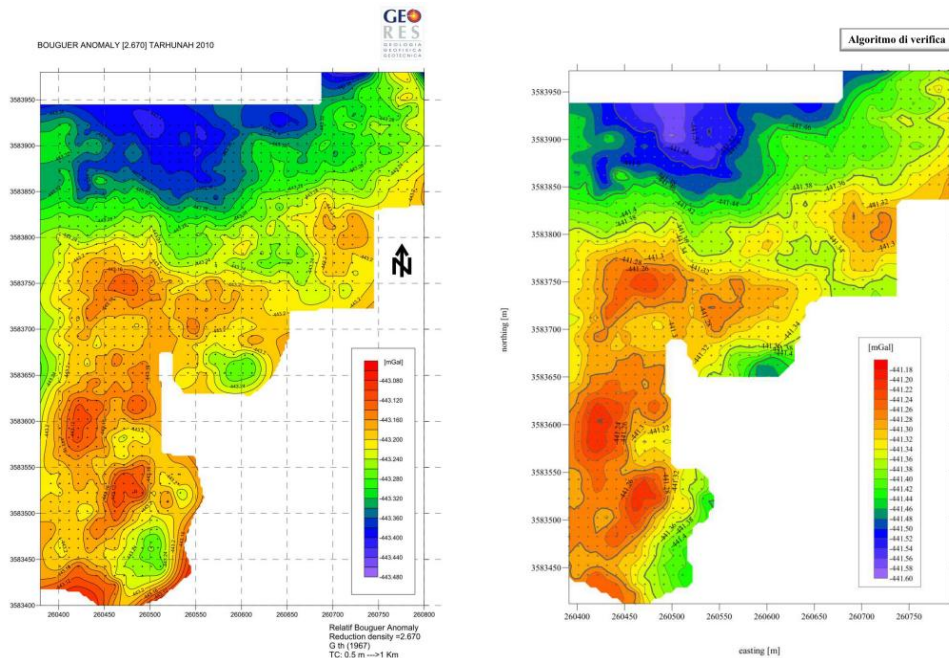


Figura 7 - Anomalie gravimetriche risultate dal confronto tra metodo sperimentale (a sinistra) e metodo analitico (a destra).

La variazione totale di anomalia è di 0.39mGal (min: -441.59 mGal; max: -441.20mGal). È altresì evidente una significativa differenza di gravità lungo il perimetro del caso studio. Nella parte settentrionale l'anomalia raggiunge i valori più bassi (indicati con il colore bleu) con un minimo all'incirca nella zona centrale; la transizione verso anomalie maggiori (zone in rosso) è chiaramente visibile e si possono distinguere, nella porzione centrale dell'area di rilievo, diversi raggruppamenti. La zona meridionale appare, invece, abbastanza complessa con massimi isolati circondati da valori più bassi.

Conclusioni

Lo studio microgravimetrico utilizza l'anomalia gravimetrica come strumento fondamentale per l'interpretazione della distribuzione non omogenea delle masse all'interno della Terra.

È sempre più diffusa l'applicazione di tale tecnica di rilievo per esplorazioni mineralogiche e petrolifere, monitoraggio geotermico, sismico e vulcanico. In questo lavoro le anomalie ottenute dal rilievo in campo sono state confrontate con quelle calcolate mediante l'applicazione di un nuovo approccio analitico proposto per il calcolo del potenziale gravitazionale e dell'accelerazione di gravità in un punto della superficie terrestre, sfruttando le proprietà del teorema di Gauss. Il metodo analitico permette di risolvere alcune singolarità dell'anomalia nel modello di calcolo e i risultati del confronto tra metodo sperimentale e metodo analitico hanno dimostrato l'affidabilità del nuovo approccio di calcolo; infatti, gli scostamenti tra le anomalie di Bouguer sono risultati inferiori ai 2mGal per un dataset di 1170 punti stazione geo-riferiti. Da tale confronto è possibile osservare come le anomalie più basse sono caratterizzanti della zona settentrionale del sito oggetto di studio. Viceversa, nella parte meridionale, in cui i massimi isolati sono evidenti, è possibile distinguere i più alti valori di anomalie gravimetriche che dimostrano la presenza di superficie rocciosa profonda. I minimi presentano una forma arrotondata il che risulta indicativo della possibile presenza di depressioni rocciose, cavità o vuoti nel terreno di copertura.

Bibliografia

- Barzaghi A., Sansò F. (1983), "Sulla stima empirica della funzione di covarianza", *Boll. Geod. Sci. Affini* 4, 389-415
- Behncke B., Berrino G., Corrado G., Velardita R. (2006), "Ground deformation and gravity changes on the island of Pantelleria in the geodynamic framework of the Sicily Channel", *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 150, 146-162
- Benson, A.K., Baer, J.L. (1989), "Close order gravity survey – a mean of fault definition in valley fill sediments", *Proc. 23rd Symp. On Engineering Geology and Soil Engineering*, 219-240
- Benson, A.K., Floyd, A.R. (2000), "Application of gravity and magnetic methods to assess geological hazards and natural resource potential in the Mosida Hills, Utah County, Utah", *Geophysics* 65, 1514-1526
- Beres, M., Luetscher, M., Olivier, R. (2001), "Integration of ground - penetrating radar and microgravimetric methods to map shallow caves", *Journal of Applied Geophysics* 46, 249-262
- Blakely, R.J., Simpson, R.W. (1986), "Approximating edges of source bodies from magnetic or gravity anomalies", *Geophysics* 51, 1494 -1498
- Butler, D.K. (1984), "Microgravimetric and gravity gradient techniques for detection of subsurface cavities", *Geophysics* 49, 1084-1096
- Camacho, A.G., Vieira, R., Montesinos, F.G., Cuellar, V. (1994), "A gravimetric 3D global inversion for cavity detection", *Geophysical Prospecting* 42, 113-130
- Casten U., Snopek K. (2006), "Gravity modelling of the Hellenic subduction zone - a regional study", *Tectonophysics* 417, 183-200
- Colley, G.C. (1963), "The detection of caves by gravity measurements", *Geophysical Prospecting* 11, 1-9
- D'Urso, M.G. "New Expressions of the Gravitational Potential and its derivatives for the prism", *Proceedings VII Hotine Marussi International Symposium on Mathematical Geodesy - July, 6th-10th 2009, Rome, Italy Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012 DOI 10.1007/978-3-642-22078-4, pp. 251-256*
- D'Urso M.G. (2013), "On the evaluation of the gravity effects of polyhedral bodies and a consistent treatment of related singularities" *Journal of Geodesy* 87:239-252 DOI:10.1007/s00190-012-0592 - 1 Springer Verlag Berlin Heidelberg
- D'Urso M.G., Bianchi I., Costantino G. (2013), "Determinazione degli effetti della gravità per modelli digitali del terreno", *Atti 17ª Conferenza Nazionale ASITA*, 529-536
- Hinze, W.J. (1990), "The role of gravity and magnetic methods in engineering and environmental studies". In: Ward, S.H. (Ed.), *Geotechnical and Environmental Geophysics*, vol. 1. *Society of Exploration Geophysicists*, Tulsa, Oklahoma, pp. 75-126
- Maouche S., Abtout A., Merabet N.-E., Aïfa T., Lamali A., Bouyahiaoui B., Bougchiche S., Ayache M., "Tectonic and Hydrothermal Activities in Debagh, Guelma Basin (Algeria)", *Journal of Geological Research* Volume 2013
- Neumann, R. (1967), "La gravimetrie de haute précision. Application aux recherches de cavités", *Geophysical Prospecting* 15, 116-134
- Wenjin, L., Jiajian, X. (1990), "Effectiveness of the high - precision gravity method in detecting sinkholes in Taian Railway Station of Shangdong province". In: Ward, S.H. (Ed.), *Geotechnical and Environmental Geophysics*, vol. 3. *Society of Exploration Geophysicists*, Tulsa, Oklahoma, pp. 169-174
- Yule, D.E., Sharp, M.K., Butler, D.K. (1998), "Microgravity investigations of foundation conditions", *Geophysics* 63, 95-103