

Geofisica

Scienze Geologiche

AA 2018-2019

Corso di LT, Dip. Di Fisica e Scienze della Terra,
Università di Ferrara.

Docente: Prof. Nasser Abu Zeid

Studio: studio 215, lab. 215, Il piano, Blocco B

E-mail: a.nasser@unife.it

Orario di ricevimento: disponibile sempre previa appuntamento

Lunedì: 16.00-17.00

Martedì: 12.00-13.00

metodi gravimetrici

parte 2

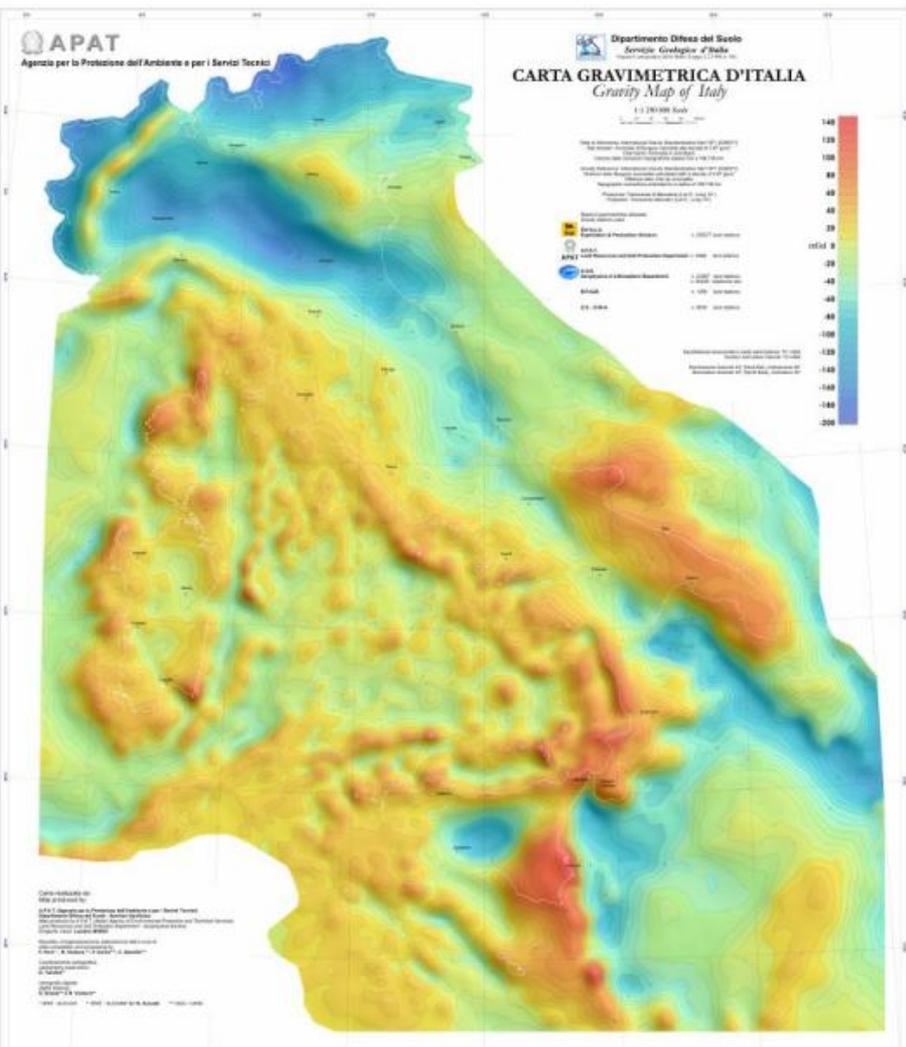
Gravimetria: carte d'Italia



ISPRA
Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale

CARTA GRAVIMETRICA D'ITALIA

Scala 1:1.250.000



Gravity Map of Italy

1:1 250 000 Scale



Rete di riferimento: International Gravity Standardization Net 1971 (IGSN71)
Dati terrestri: Anomalie di Bouguer calcolate alle densità di 2.67 g/cm³
Dati marini: Anomalie in aria libera
Calcolo delle correzioni topografiche esteso fino a 166.736 km

Gravity Reference: International Gravity Standardization Net 1971 (IGSN71)
Onshore data: Bouguer anomalies calculated with a density of 2.67 g/cm³
Offshore data: free air anomalies
Topographic corrections extended to a radius of 166.736 km

Proiezione: Transversa di Mercatore (Lat 0°, Long 14°)
Projection: Transverse Mercator (Lat 0°, Long 14°)

Stazioni gravimetriche utilizzate
Gravity stations used



ENI S.p.A.
Exploration & Production Division n. 235277 land stations



A.P.A.T.
Land Resources and Soil Protection Department n. 9398 land stations



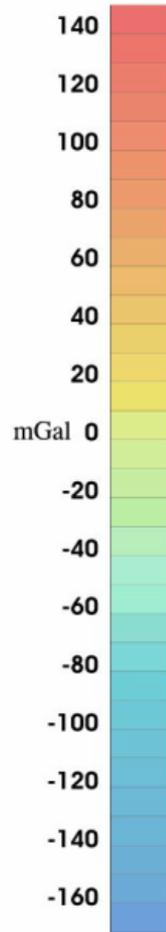
O.G.S.
Geophysics of Lithosphere Department n. 23387 land stations
n. 80228 shipborne obs

B.R.G.M. n. 1256 land stations

U.S. - D.M.A. n. 8545 land stations

Equidistanza isoanomale e scala colorimetrica: 10 mGal
Contour and colour interval: 10 mGal

Illuminazione Azimuth 45° (Nord Est), Inclinazione 45°
Illumination Azimuth 45° (North East), Inclination 45°

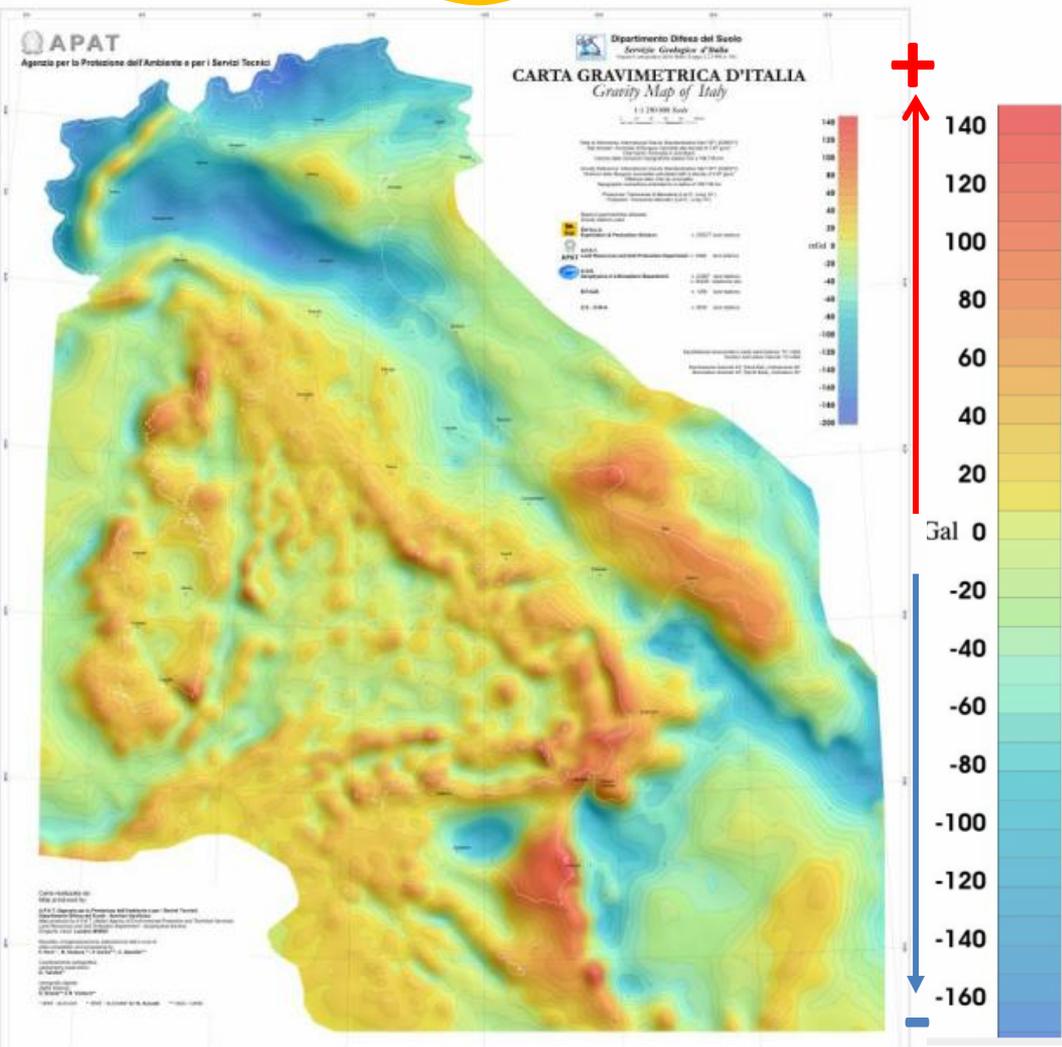


http://www.isprambiente.gov.it/Media/milione_grav/milionegrav_2004/milione.htm

Gravimetria: carte d'Italia

CARTA GRAVIMETRICA D'ITALIA

Scala 1:1.250.000



La carta contiene informazioni sulle anomalie di gravità a media scala e può essere considerata come uno strumento utile per l'identificazione e i principali lineamenti strutturali e per delineare i principali elementi geologici a scala regionale. Si riscontrano anomalie positive (**giallo rosso viola**) di Bouguer lungo **il margine ligure** e tirrenico della penisola con altri massimi relative nella zona del corpo **d'Ivrea** e dei **colli Euganei**. Queste anomalie positive sono generalmente **indice di una presenza di crosta assottigliata** (circa 20 km) che appare con forte evidenza dove la Moho risale fino a 5-10 km in alcune zone con **presenza di vulcani attivi**. Si riscontrano anomalie negative (**verde blu**) di Bouguer a grande lunghezza d'onda lungo le Alpi, in relazione ad **una radice crostale** ben definita (**anche 60-70 km**) con altre anomalie distribuite lungo la penisola dal **Piemonte alla Sicilia** ad indicare presenza di una **litosfera in subduzione e di bacini sedimentari** (alcuni dei quali con presenza di idrocarburi). Verso **lo Ionio** si osservano **gradienti che tendono verso valori fortemente positivi** in corrispondenza ad una **risalita del mantello** e alla presenza di un sottile strato di sedimenti

Gravimetria: carte d'Italia



ISPRA

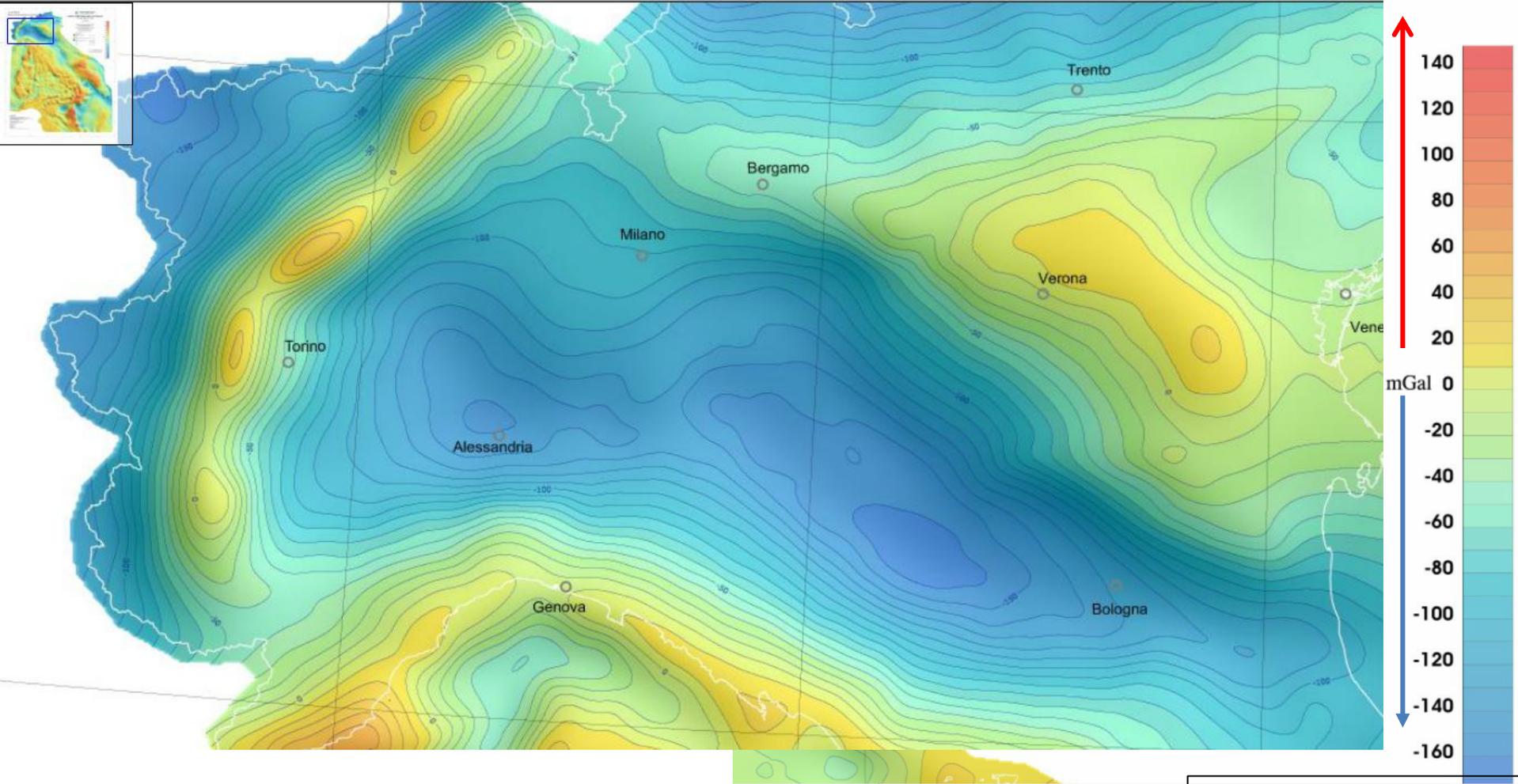
Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale

dietro

CARTA GRAVIMETRICA D'ITALIA

Scala 1:1.250.000

+ eccesso di massa



-mancanza di massa

http://www.isprambiente.gov.it/Media/milione_grav/milionegrav_2004/milione.htm

Anomalie gravimetriche possono essere positive, negative o nulle

Gravimetria: carte d'Italia



ISPRA

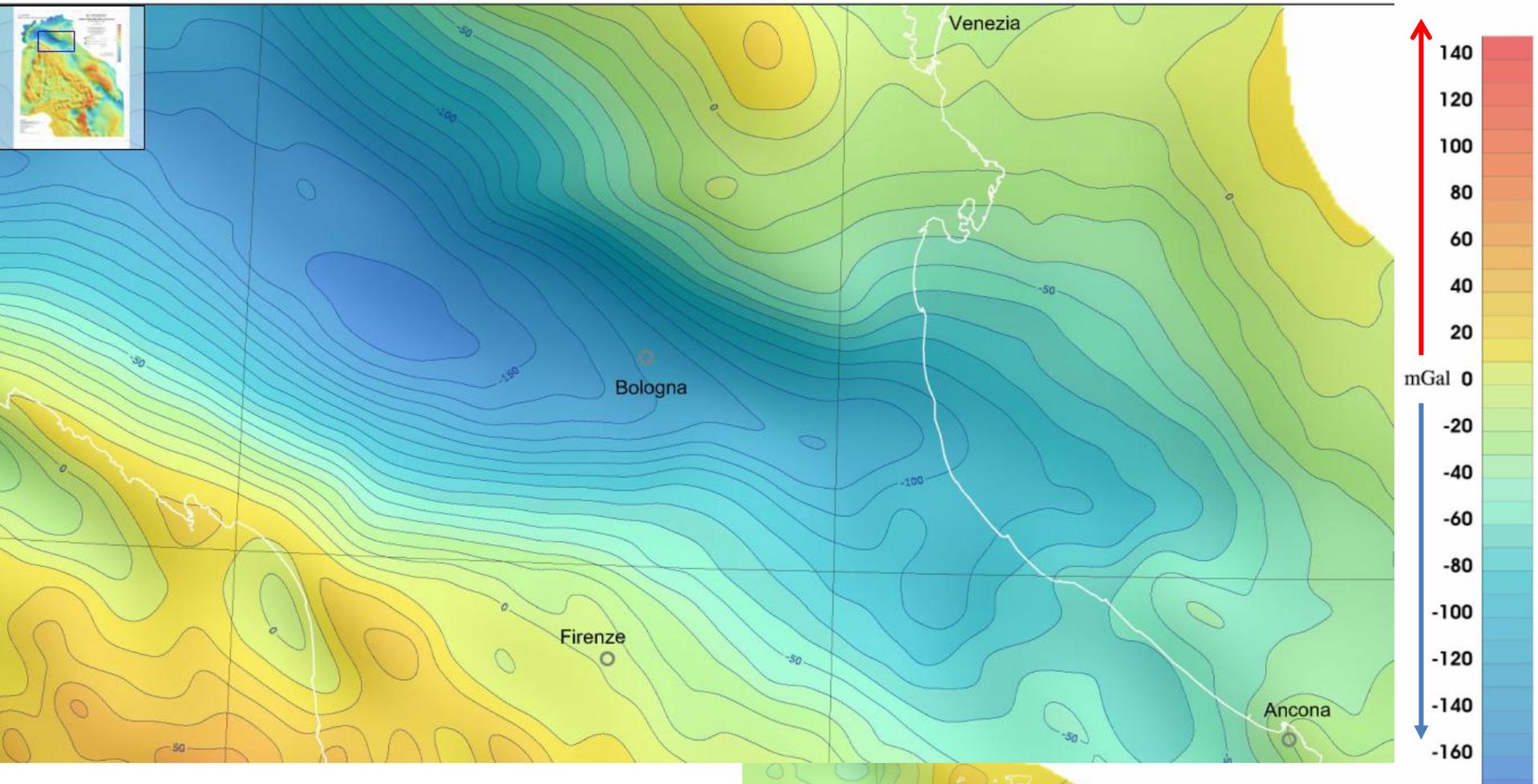
Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale

Indietro

CARTA GRAVIMETRICA D'ITALIA

Scala 1:1.250.000

+ eccesso di massa



http://www.isprambiente.gov.it/Media/milione_grav/milionegrav_2004/milione.htm

Interpretazione: localizzare zone arricchite di sostanze magnetizzate

-mancanza di massa

Gravimetria: carte d'Italia



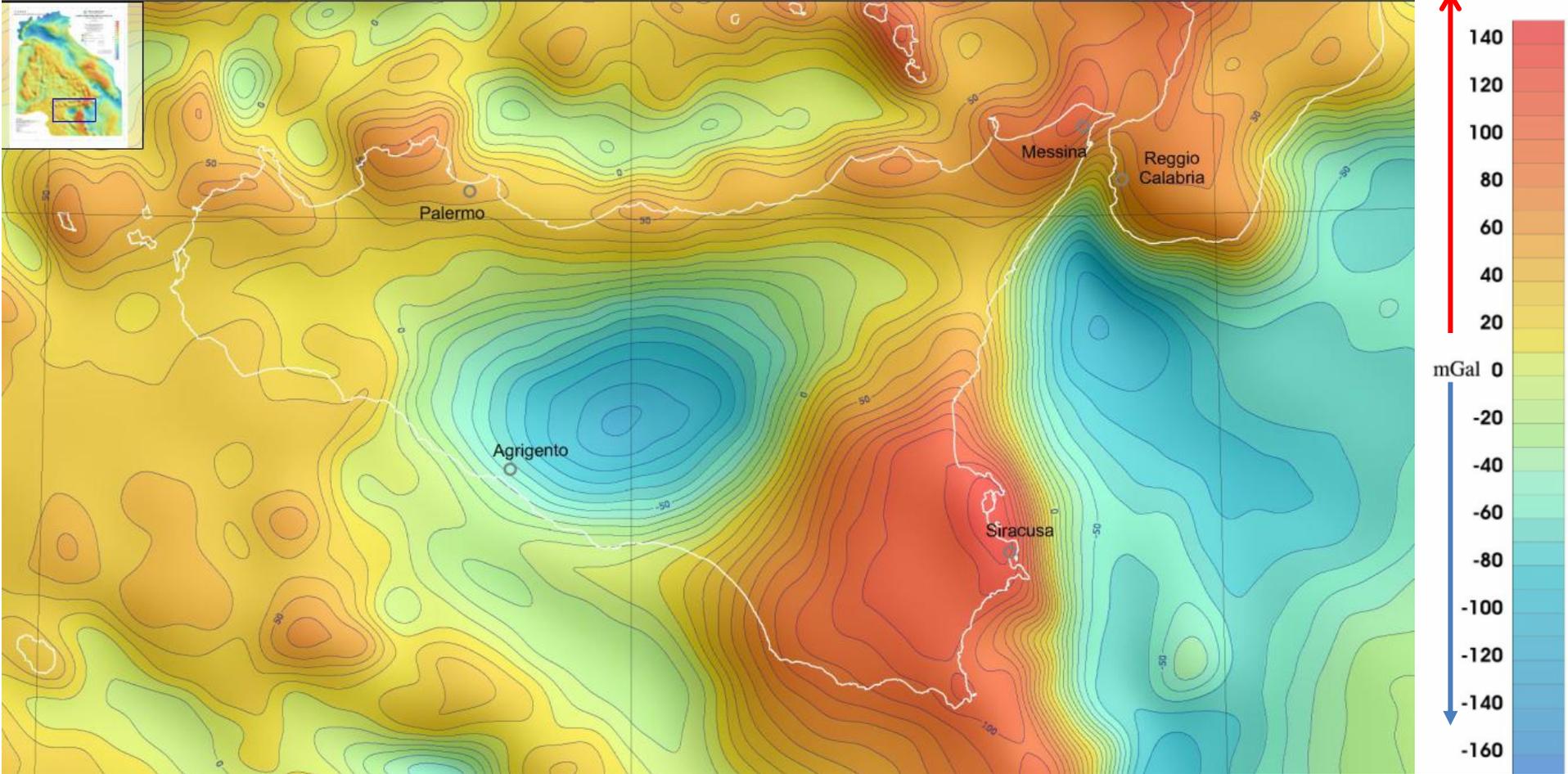
ISPRA

Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale

+ eccesso di massa

CARTA GRAVIMETRICA D'ITALIA

Scala 1:1.250.000



-mancanza di massa

[http://www.isprambiente.gov.it/Media/milione
e_grav/milionegrav_2004/milione.htm](http://www.isprambiente.gov.it/Media/milione_grav/milionegrav_2004/milione.htm)

Gravimetria: carte d'Italia



ISPRA
Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale



ISOANOMALE DI BOUGUER

(Equidistanza: 10 mgal)

DENSITÀ DI MISURA {
1 staz./km² in pianura;
0,7 staz./km² in aree appenniniche e del mare Adriatico;
0,1 staz./km² in aree alpine e del mare Tirreno;

+100

Anomalie gravimetriche positive

-50

Anomalie gravimetriche negative

+

Massimi gravimetrici

-

Minimi gravimetrici

g_n : gravità teorica o normale

QUOTA DI RIFERIMENTO: livello del mare.

GRAVITÀ NORMALE = $978\,049 (1 + 0,0052884 \sin^2 \varphi - 0,0000059 \sin^2 2 \varphi)$ mgal.

TOTALE DELLE STAZIONI GRAVIMETRICHE UTILIZZATE: n° 240 300

Gravimetria: carte d'Italia



ISPRA
Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale

QUOTA DI RIFERIMENTO: livello del mare.

GRAVITÀ NORMALE = $978\,049 (1 + 0,0052884 \sin^2 \varphi - 0,0000059 \sin^2 2 \varphi)$ mgal.

Mappa valori di anomalia di Bouguer

TOTALE DELLE STAZIONI GRAVIMETRICHE UTILIZZATE: n° 240 300

Stazioni di terra: AGIP n° 217 000; Servizio Geologico d'Italia n° 10 000; Istituti universitari, Enti vari e Società private n° 7 100.

Stazioni di fondo mare: AGIP n° 4 000; Osservatorio Geofisico Sperimentale-Trieste n° 2 200.

Anomalie secondo Bouguer calcolate a densità costante ($2,67 \text{ g/cm}^3$) assumendo il valore $g = 980\,362,40$ mgal per la stazione gravimetrica di Roma, Facoltà di Ingegneria, esterno, della Rete Fondamentale Italiana (R.F.I., 1955), con riduzione topografica estesa all'intorno di 166,736 km dalla stazione, secondo le norme della Commissione Geodetica Italiana (Comm. Geod. Ital., mem. 19, ser. 3°, Firenze, 1972). A tale stazione gravimetrica la "International gravity standardization net 1971" (International Union of Geodesy and Geophysics, 1974) attribuisce il valore della gravità osservata $g = 980\,347,80$ mgal.

CARTA REALIZZATA DA:



AGIP

Direzione Generale
Servizi Centrali Esplorazione (°)
Studi e Metodologie Geofisiche
S. Donato Milanese (Milano)

- Calcolo correzioni topografiche estese fino a 20 km dal punto di stazione.
- Calcolo anomalie di Bouguer.
- Tracciamento delle curve isoanomale.

SERVIZIO GEOLOGICO D'ITALIA (°°)

Centro Studi Geofisici e
Geodinamici
Roma

- Raccolta ed omogeneizzazione di stazioni gravimetriche rilevate da Istituti universitari, Enti e Società private.
- Calcolo correzioni topografiche per un intorno esteso da 20 a 166,736 km dal punto di stazione.

Gravimetria: carte d'Italia

Scala 1:1000.000

In chiave geologica



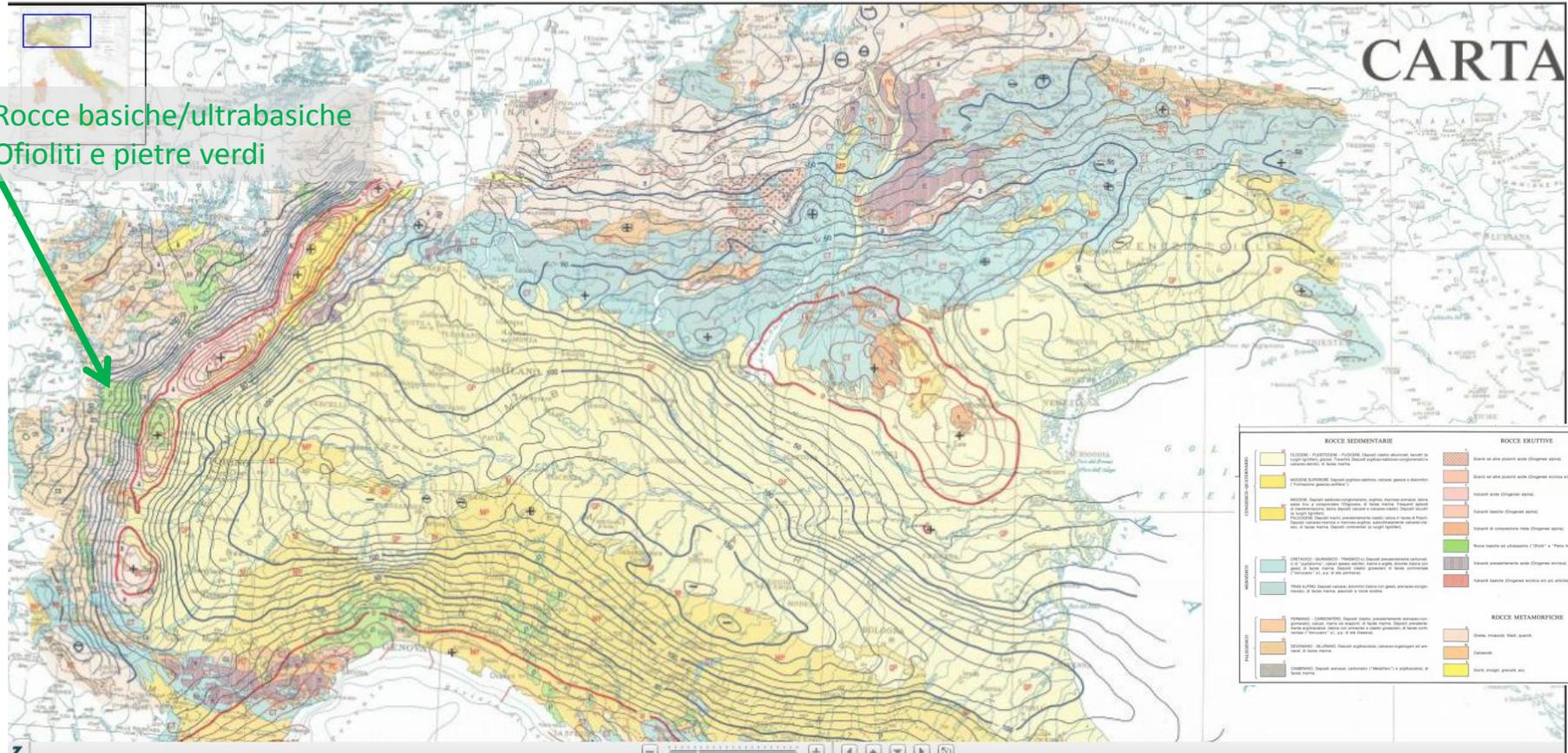
ISPRA
Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale

+ eccesso di massa

Mappa valori di anomalia di Bouguer

ndietro

CARTA GRAVIMETRICA D'ITALIA
Scala 1:1.000.000



-mancanza di massa

Gravimetria: carte d'Italia



ISPRA
Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale



Gravimetria: carte d'Italia

Scala 1:1.000.000

In chiave geologica



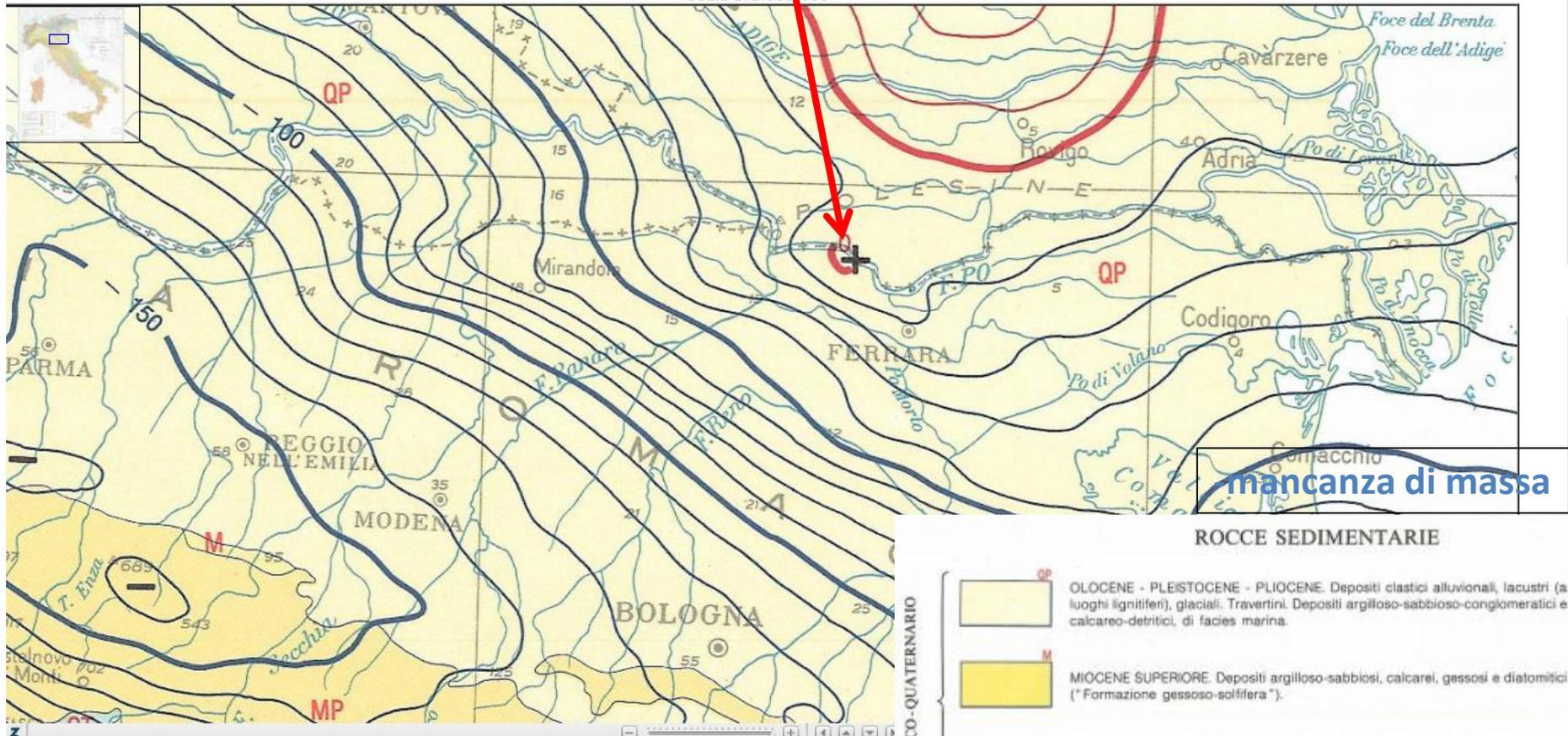
ISPRA
Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale

Alto strutturale di Casaglia (FE)

+ **eccesso di massa**

Mappa valori di anomalia di Bouguer

CARTA GRAVIMETRICA D'ITALIA
Scala 1:1.000.000



http://www.isprambiente.gov.it/Media/milione_grav/milionegrav_2004/milione.htm

Gravimetria: carte d'Italia

Scala 1:1.000.000



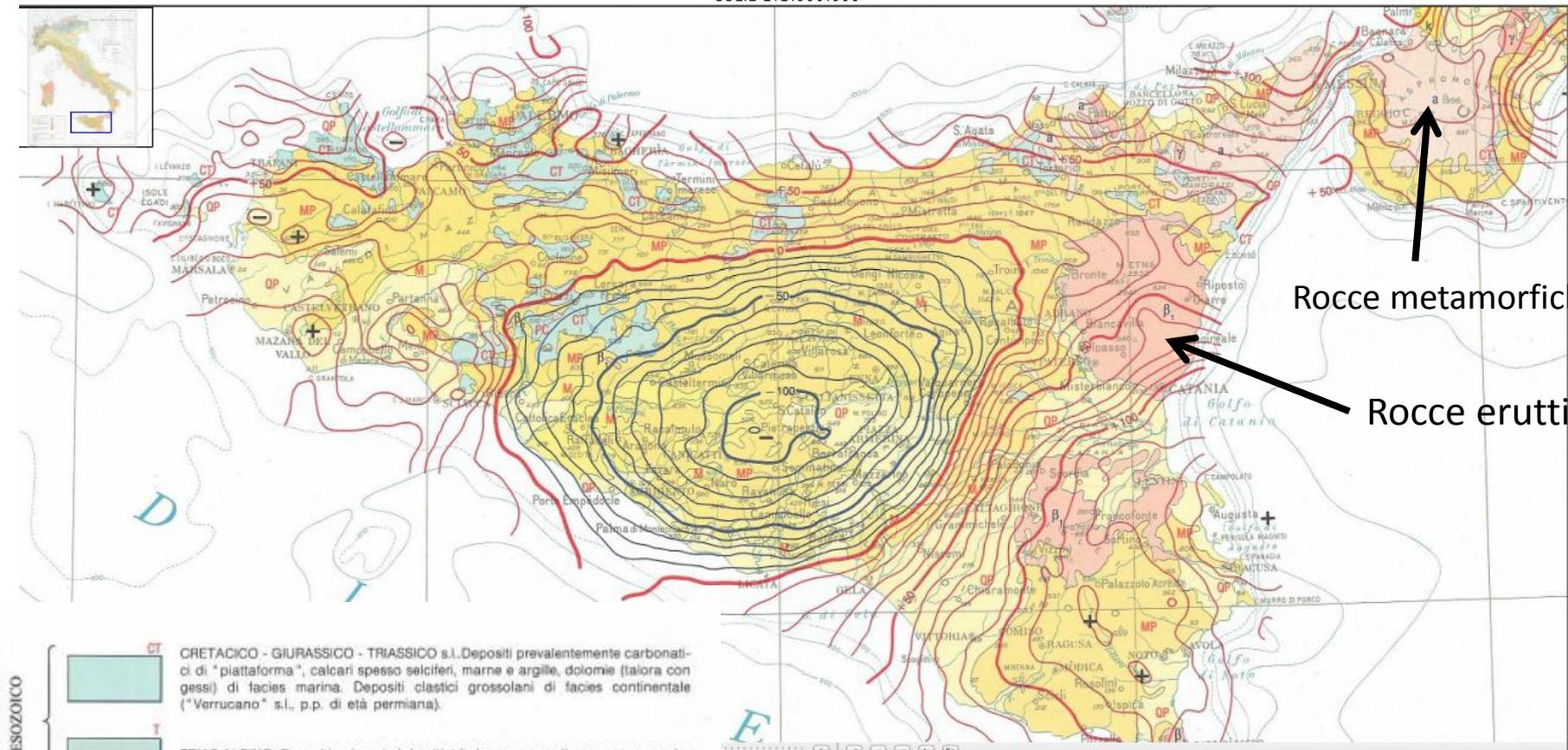
ISPRA
Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale

Mappa valori di anomalia di Bouguer

+ eccesso di massa

CARTA GRAVIMETRICA D'ITALIA
Scala 1:1.000.000

di dietro



Rocce metamorfiche

Rocce eruttive

MESOZOICO

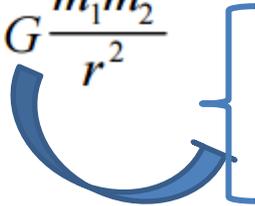
CT CRETACICO - GIURASSICO - TRIASSICO s.l. Depositi prevalentemente carbonatici di "piattaforma", calcari spesso selciferi, marne e argille, dolomie (talora con gessi) di facies marina. Depositi clastici grossolani di facies continentale ("Verrucano" s.l., p.p. di età permiana).

T TRIAS ALPINO. Depositi calcarei, dolomitici (talora con gessi), arenaceo-conglomeratici, di facies marina, associati a rocce eruttive.

-mancanza di massa

LEGGE DI NEWTON: IL POTENZIALE GRAVITAZIONALE

Legge di Newton e alcune conseguenze:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$


$6.6720 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 / (\text{g} \cdot \text{s}^2)$

$6.6720 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 / (\text{kg} \cdot \text{s}^2)$

ove ricordiamo si indica con G la costante di gravitazione universale; essendo

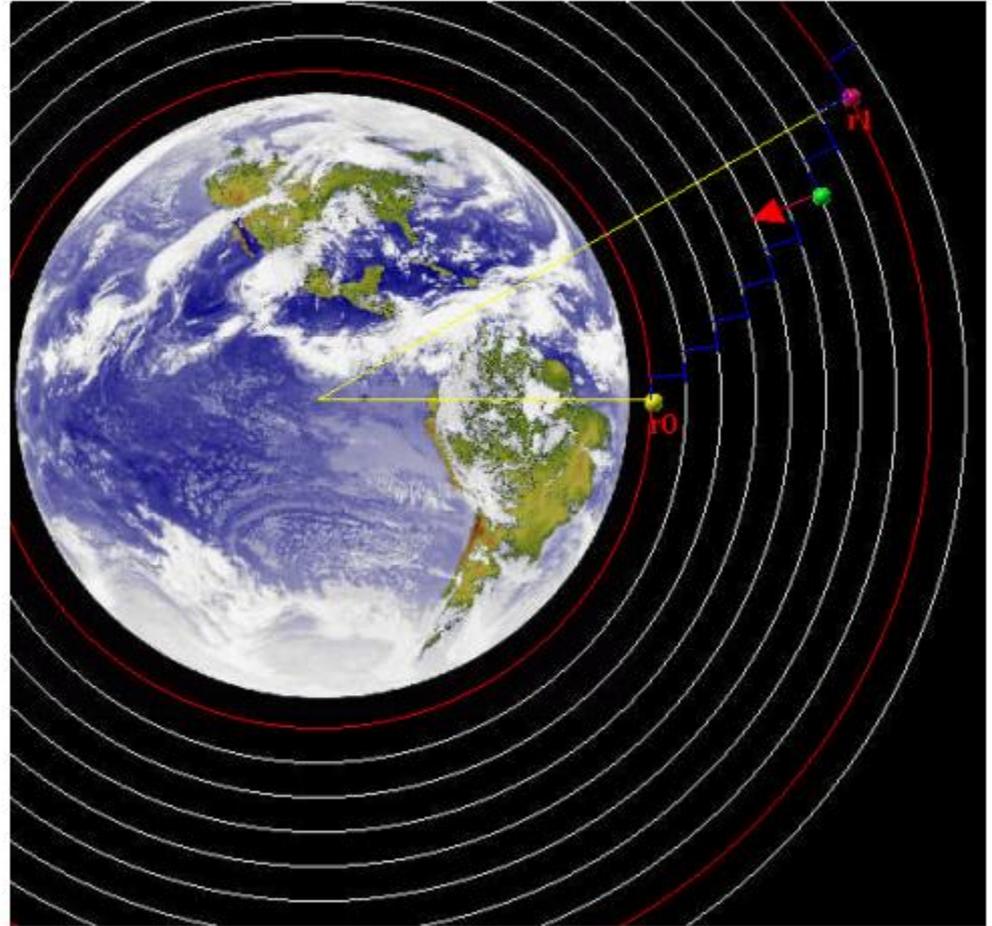
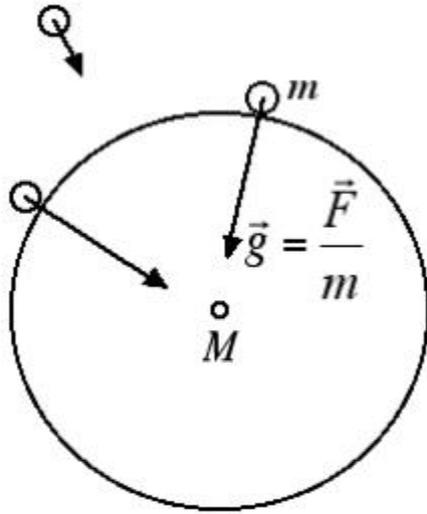
$$\vec{F} = m_2 \vec{a}$$

avremo conseguentemente che

$$\vec{g} = \frac{G m_1}{r^2} \vec{r}$$

$$1\text{N} = 1\text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

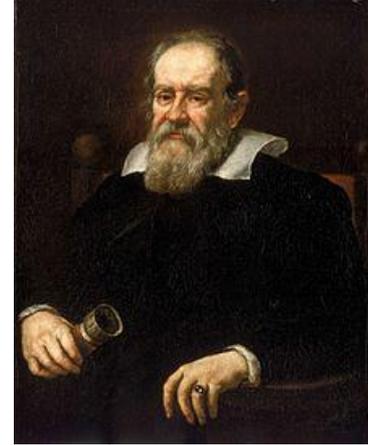
Direzione dell'accelerazione di gravità, variazione con la distanza dal centro della Terra e linee equipotenziali a partire dalla legge di Newton



La grandezza, \mathbf{g} «accelerazione di gravità terrestre», è una grandezza vettoriale che descrive l'andamento del campo di gravità terrestre il cui **modulo** è costante **in un punto** ma **varia da luogo a luogo sulla Terra**

Capitolo: Gravimetria – gravità - valori

posizione	Distanza Dal centro della terra (m)	Valore di g (m/s ²)
Superficie	6.38 x 10 ⁶ m	9.8
1000 km > Superficie T.	7.38 x 10 ⁶ m	7.33
2000 km > S.	8.38 x 10 ⁶ m	5.68
3000 km > S.	9.38 x 10 ⁶ m	4.53
4000 km > S.	1.04 x 10 ⁷ m	3.70
5000 km > S.	1.14 x 10 ⁷ m	3.08
6000 km > S.	1.24 x 10 ⁷ m	2.60
7000 km > S.	1.34 x 10 ⁷ m	2.23
8000 km > S.	1.44 x 10 ⁷ m	1.93
9000 km > S.	1.54 x 10 ⁷ m	1.69
10000 km > S.	1.64 x 10 ⁷ m	1.49
50000 km > S.	5.64 x 10 ⁷ m	0.13



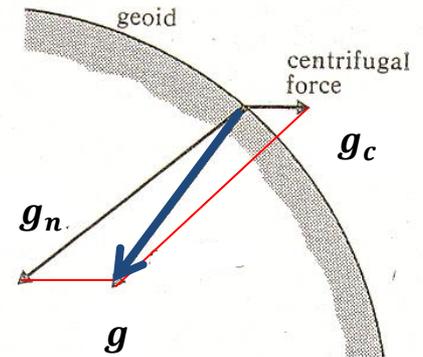
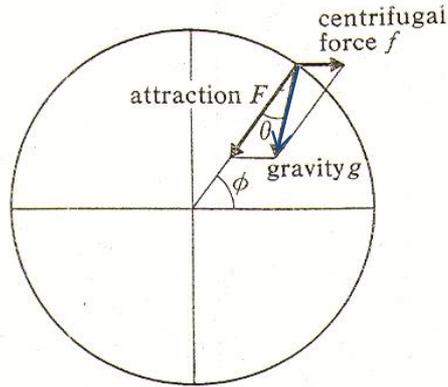
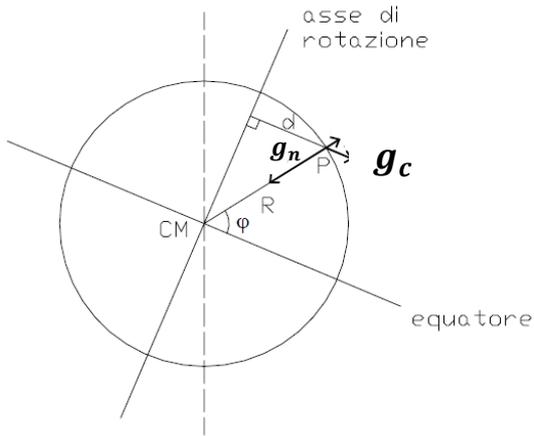
na	1564-
to	1642, Pisa
	Galileo

Legge all'inverso del quadrato

$$F_g = \frac{1}{r^2}$$

L'accelerazione di gravità

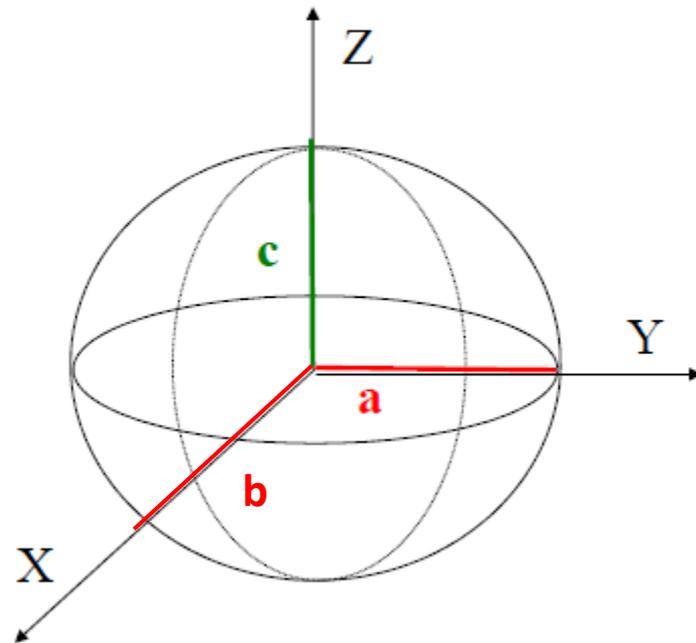
L'accelerazione di gravità (\mathbf{g}) è data da due componenti: \mathbf{g}_n , diretta verso il centro della Terra, e la (\mathbf{g}_c), centrifuga, perpendicolare all'asse terrestre.



La direzione di \mathbf{g} è definita dalla “linea a piombo” che è sempre perpendicolare alle superfici equipotenziali (**il geode è la superficie equipotenziale di riferimento**). Il verso è diretto verso il basso. Il modulo ha le dimensioni di un'accelerazione la cui unità di misura nel SI è il gal (1 cm/s^2), ma in geodesia e geofisica si usano i sottomultipli mgal ($1 \text{ mgal} = 10^{-5} \text{ m/s}^2 = 10^{-3} \text{ cm/s}^2$) e μgal ($1 \mu\text{gal} = 10^{-6} \text{ cm/s}^2$). $1 \text{ g.u. (gravity unit)} = 10^{-4} \text{ cm/s}^2$

Forma della Terra

superficie terrestre a forma di **ellissoide** (solido generato dalla rotazione di un'ellisse attorno al suo semiasse minore).



$$\frac{X^2}{a^2} + \frac{Y^2}{b^2} + \frac{Z^2}{c^2} = 1$$

$a \geq b \geq c$ *ellissoide scaleno*

$a = a = b > c$ *sferioide oblato*

$a = a = b$ *sfera*

Si ricorda che lo sferioide o l'ellissoide di rotazione è un caso specifico dell'ellissoide standard. Cioè quando due semi assi sono uguali.

Forma della Terra

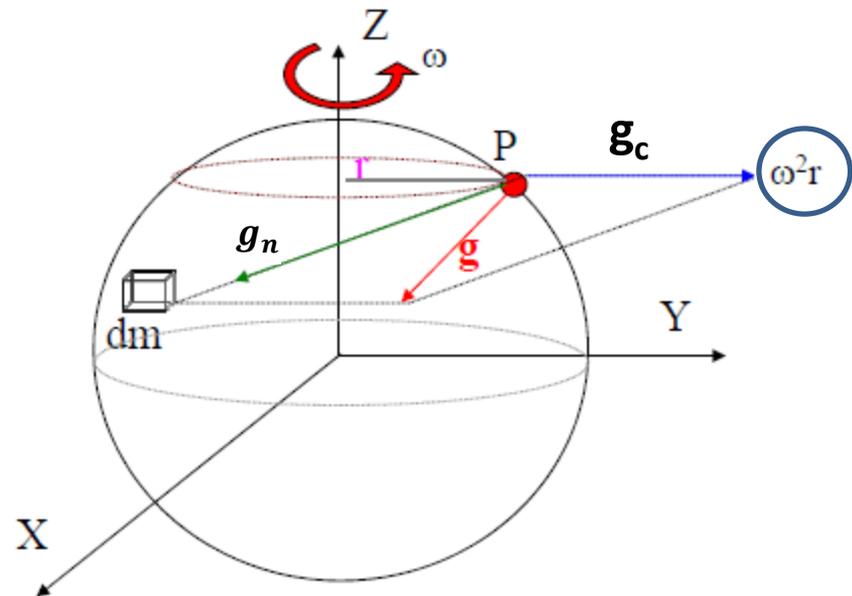
NEWTON (1670) → la superficie terrestre si discosta dalla sfera in base alle seguenti osservazioni:

Componente centrifuga (generata dal moto di rotazione) maggiore all'equatore rispetto a qualsiasi altro punto sulla superficie

$$g_c = \omega^2 * r$$

Componente newtoniana (diretta verso il centro della terra) maggiore ai poli rispetto a qualsiasi altro punto sulla superficie

$$g_n = g_n = G \frac{m_1 m_2}{R^2}$$



$$g = g_n + g_c = \text{accelerazione misurata}$$

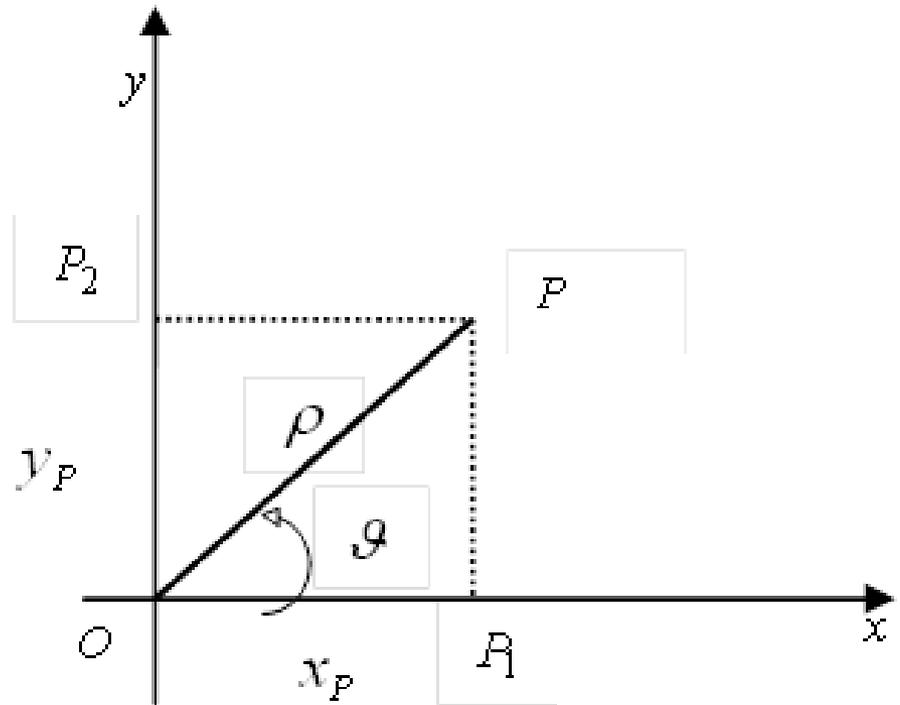
Coordinate polari: descrive la posizione di un punto nel piano

- P: posizione punto definito dalle coordinate cartesiane (X_p, Y_p)

$$x = \rho \cos \vartheta$$

$$y = \rho \sin \vartheta$$

$$\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$$



Coordinate cilindriche

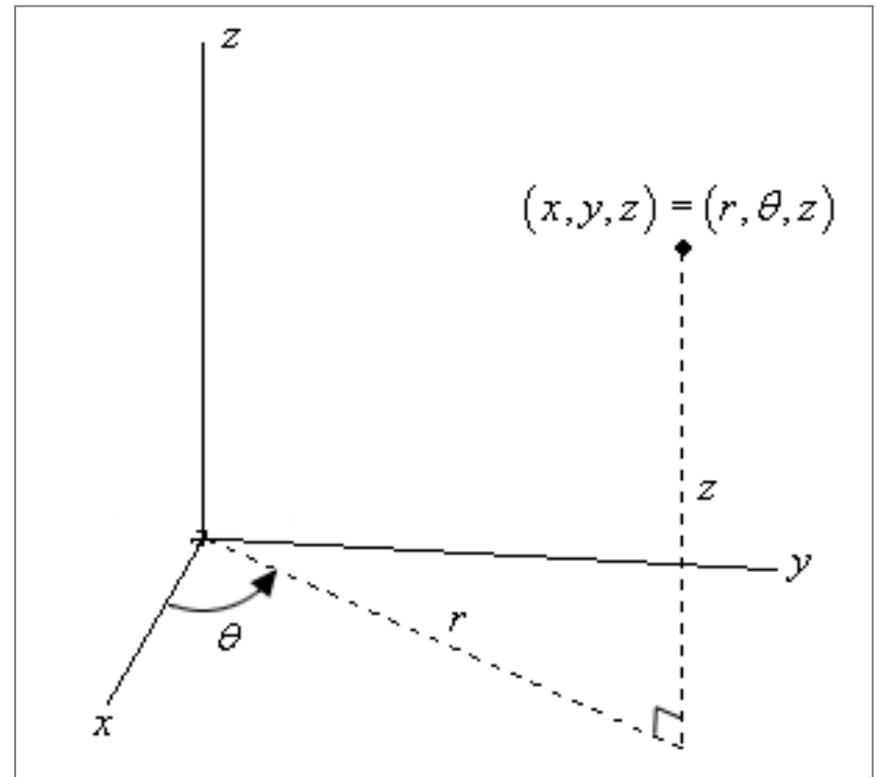
Le **coordinate cilindriche**:

un sistema di coordinate nello spazio determinate da tre parametri (r, θ, z) .

$$x = r \cdot \cos(\theta)$$

$$y = r \cdot \sin(\theta)$$

$$z = z$$

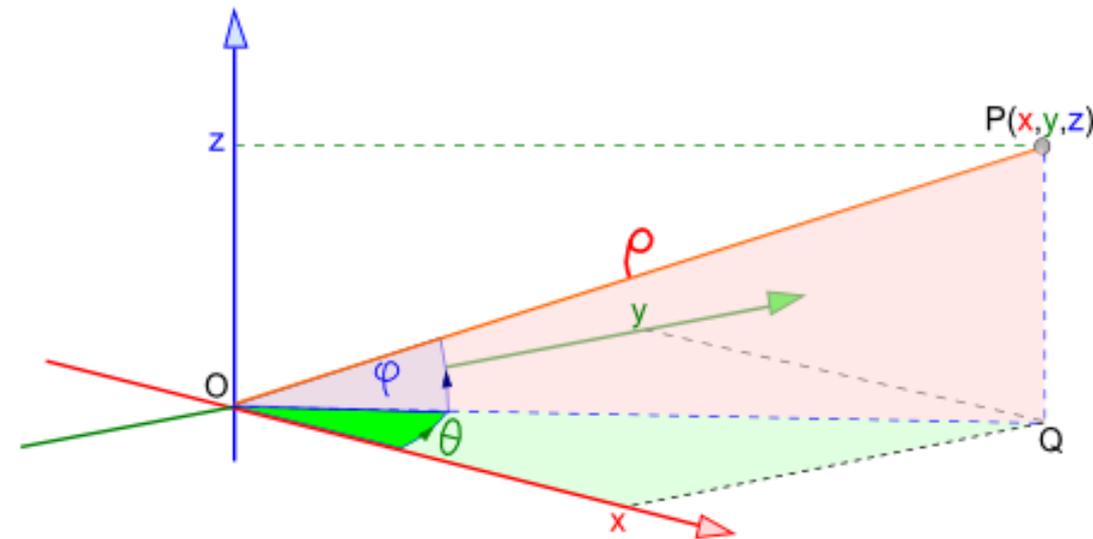


Coordinate sferiche

In **coordinate cartesiane** un punto P nello spazio viene individuato da una tripla di valori $P = (x, y, z)$, rispettivamente l'ascissa x , l'ordinata y e la quota z . Si tratta del sistema di coordinate cui siamo normalmente abituati, niente di più e niente di meno. In talune occasioni conviene però descrivere lo spazio in modo diverso e **passare in coordinate sferiche**.

(ρ, θ, φ)

φ latitudine



In questo caso le coordinate sferiche si possono scrivere in funzione delle coordinate cartesiane, latitudine e azimut

$$\begin{cases} x = \rho \cos(\varphi) \cos(\theta) \\ y = \rho \cos(\varphi) \sin(\theta) \\ z = \rho \sin(\varphi) \end{cases} \quad \text{con } \begin{cases} \rho \in [0, +\infty) \\ \theta \in [0, 2\pi) \\ \varphi \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}] \end{cases}$$

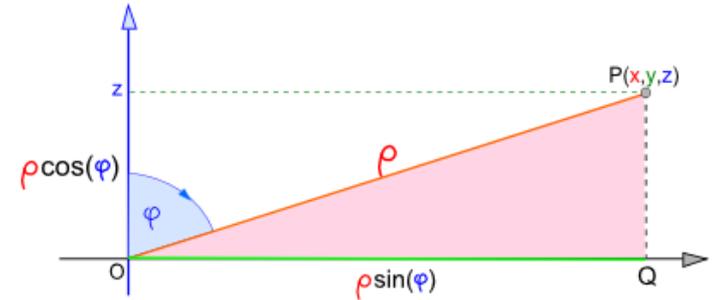
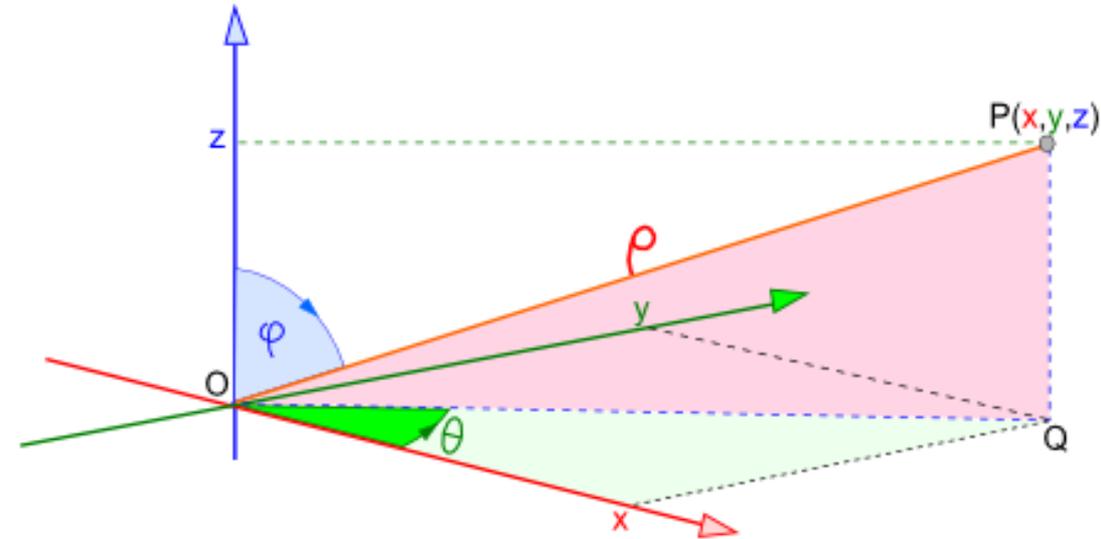
Definizione: Il complemento a 90° della latitudine è uguale alla distanza angolare del polo celeste dallo zenit

sito	Latitudine	Colatitudine
Polo nord	90°	0°
Equatore	0°	90°
Pole sud	-90°	180°

Coordinate sferiche

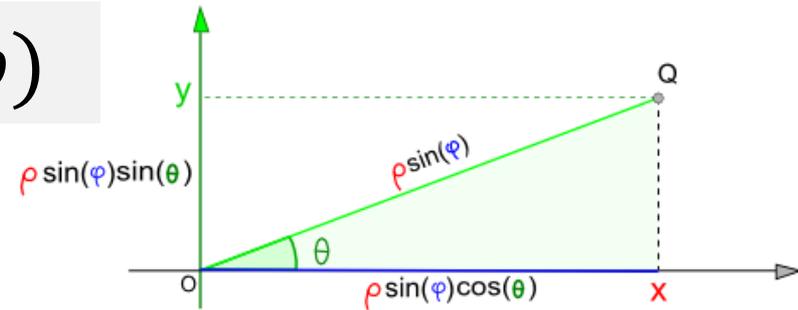
In funzione della colatitudine

φ colatitudine



$$z = \rho \cos(\varphi) \quad OQ = \rho \sin(\varphi)$$

$$x = \rho \sin(\varphi) \cos(\theta)$$
$$y = \rho \sin(\varphi) \sin(\theta)$$



- **Derivata potenziale gravitazionale U (o V)**
- **Derivata potenziale centrifugo**
- **g_normale o teorica**
- **g_c_radiale**
- **Velocità angolare (ω)**

LEGGE DI NEWTON: IL POTENZIALE GRAVITAZIONALE

Legge di Newton e alcune conseguenze:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

$$6.6720 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 / (\text{g} \cdot \text{s}^2)$$

$$6.6720 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 / (\text{kg} \cdot \text{s}^2)$$

ove ricordiamo si indica con G la costante di gravitazione universale; essendo

$$1\text{N} = 1\text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\vec{F} = m_2 \vec{a}$$

avremo conseguentemente che

$$\vec{g} = \frac{Gm_1}{r^2} \vec{r}$$

Il campo gravitazionale e quello centrifugo sono campi di forza CONSERVATIVI

Quindi ammettono un 'potenziale' cioè una funzione scalare dei punti dello spazio in cui si esercita il campo

Perciò vale l'espressione:

$$dV \text{ (o } U) = -\mathbf{F} \cdot d\mathbf{s} \implies \mathbf{F} = -\mathbf{grad} V \text{ (o } U)$$

Il gradiente del potenziale gravitazionale è massimo nella direzione radiale

Per cui vale l'espressione

$$dV_n \text{ (o } dU_n) = -\mathbf{F}_n \cdot d\mathbf{R} \implies \mathbf{F}_n = -\frac{GM}{R^2} dR$$

Integrando da R all'infinito \implies

$$V_n \text{ (o } U_n) (R) = \frac{GM}{R}$$

legge della gravitazione universale

Ogni particella dell'universo attrae ogni altra particella con una forza che è direttamente proporzionale al prodotto delle rispettive masse e inversamente proporzionale al quadrato della distanza tra esse. Questa forza agisce lungo la linea congiungente le due particelle

In diversi testi la costante gravitazionale si scrive in due modi G e γ

$$\nabla U = \vec{F}/m = \vec{g}$$

$$U = -\gamma \frac{M}{r}$$

$U =$ funzione scalare \Rightarrow potenzial scalare

$$U = \phi = -\gamma \frac{M}{r}$$

$$\vec{g} = -\nabla \phi$$

adottando un sistema di g positive

$$V = -\phi$$

per una massa infinitesima dm

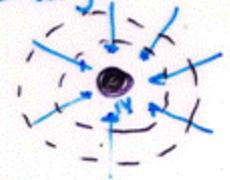
$$V = \gamma \int_V \frac{\rho}{r} dv$$

potenziale gravitazionale \vec{w}

$$= V + U_c = \gamma \int_V \frac{\rho}{r} dv + \frac{1}{2} w^2 r^2 \cos^2 \beta$$

$w =$ valore costante

- IL luogo dei punti per i quali vale la precedente \Rightarrow definiamo un insieme di superfici [Equipotenziiali]



Gradiente:

Si indica con il simbolo ∇ .

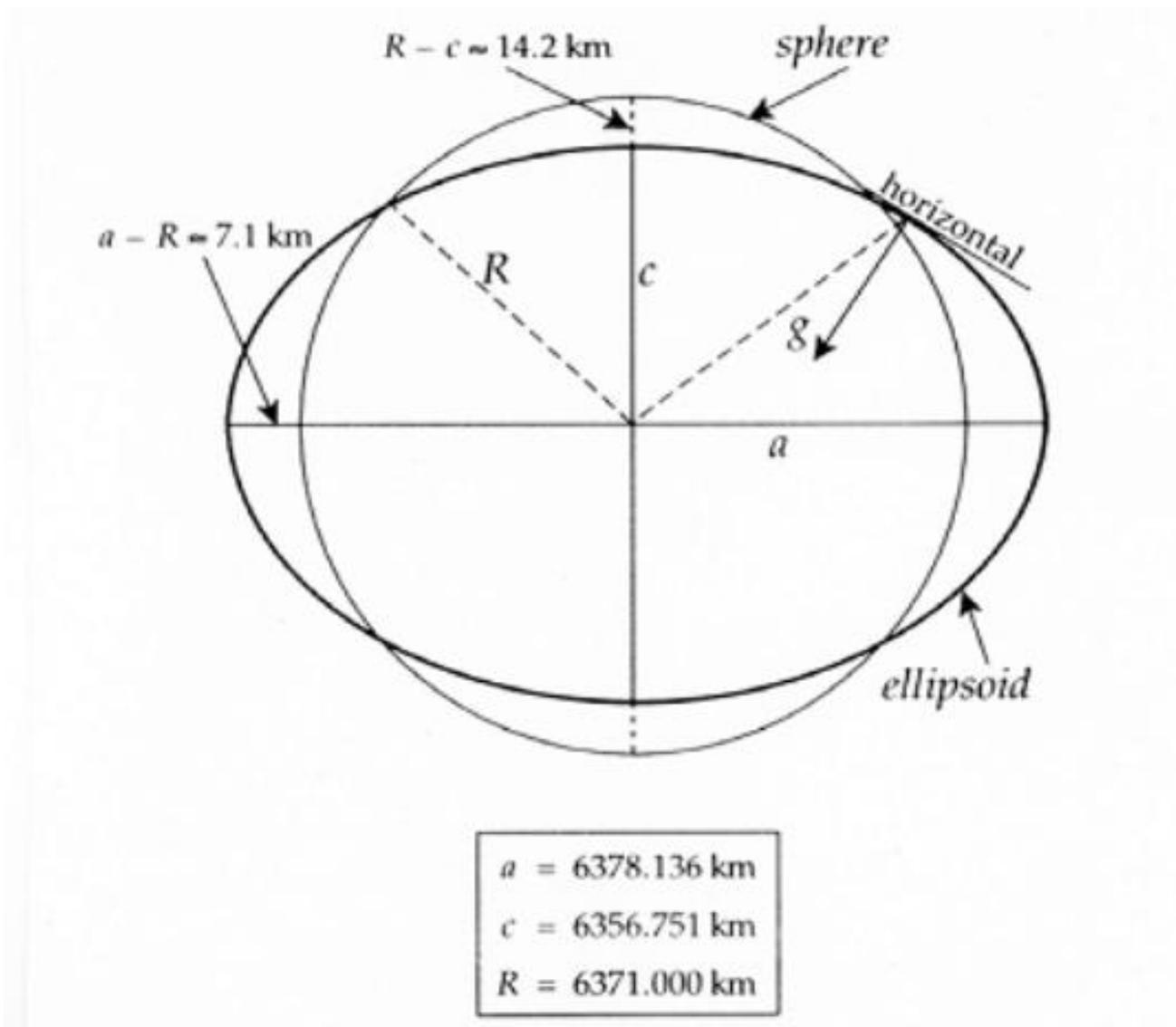
È un operatore che trasforma una funzione reale di $n \geq 1$ variabili in un campo vettoriale di \mathbb{R}^n .

Se f è una funzione differenziale, allora il gradiente di f è il campo vettoriale (∇f) definita da:

$$\nabla f = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial f}{\partial x_n} \right).$$

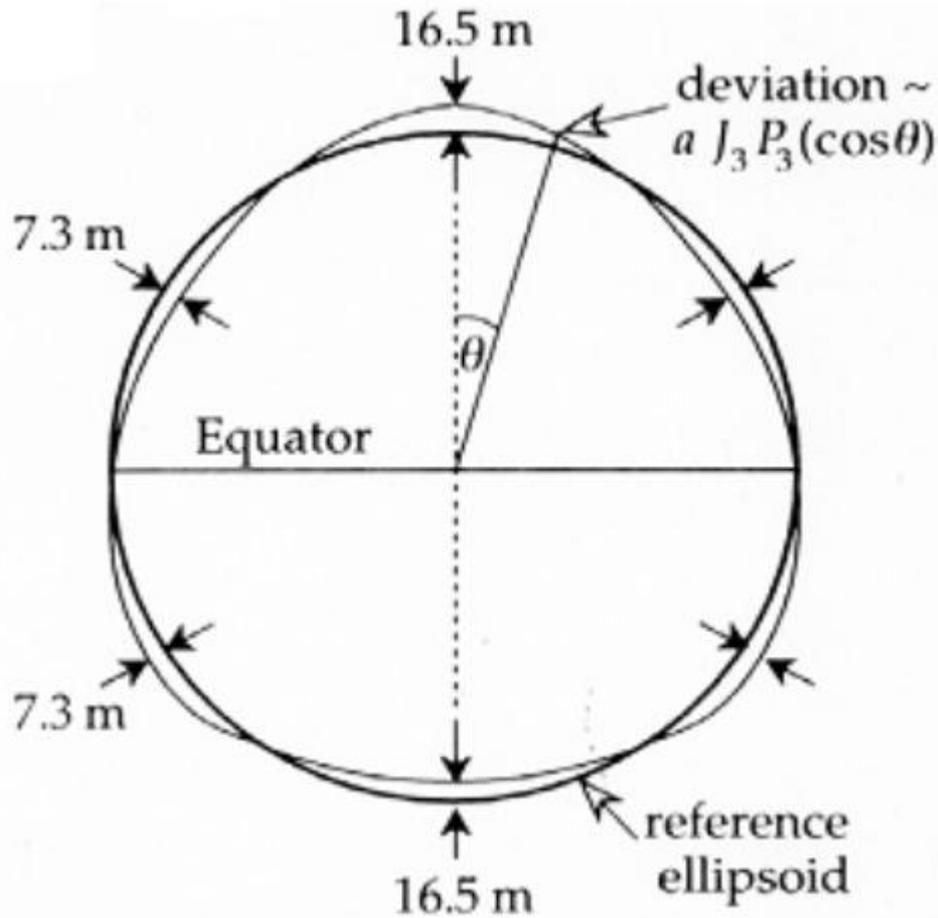
Forma della terra:

Ellissoide di rotazione vs forma sferica di volume uguale



Forma della terra:

Deviazioni rispetto allo sferoide di rotazione

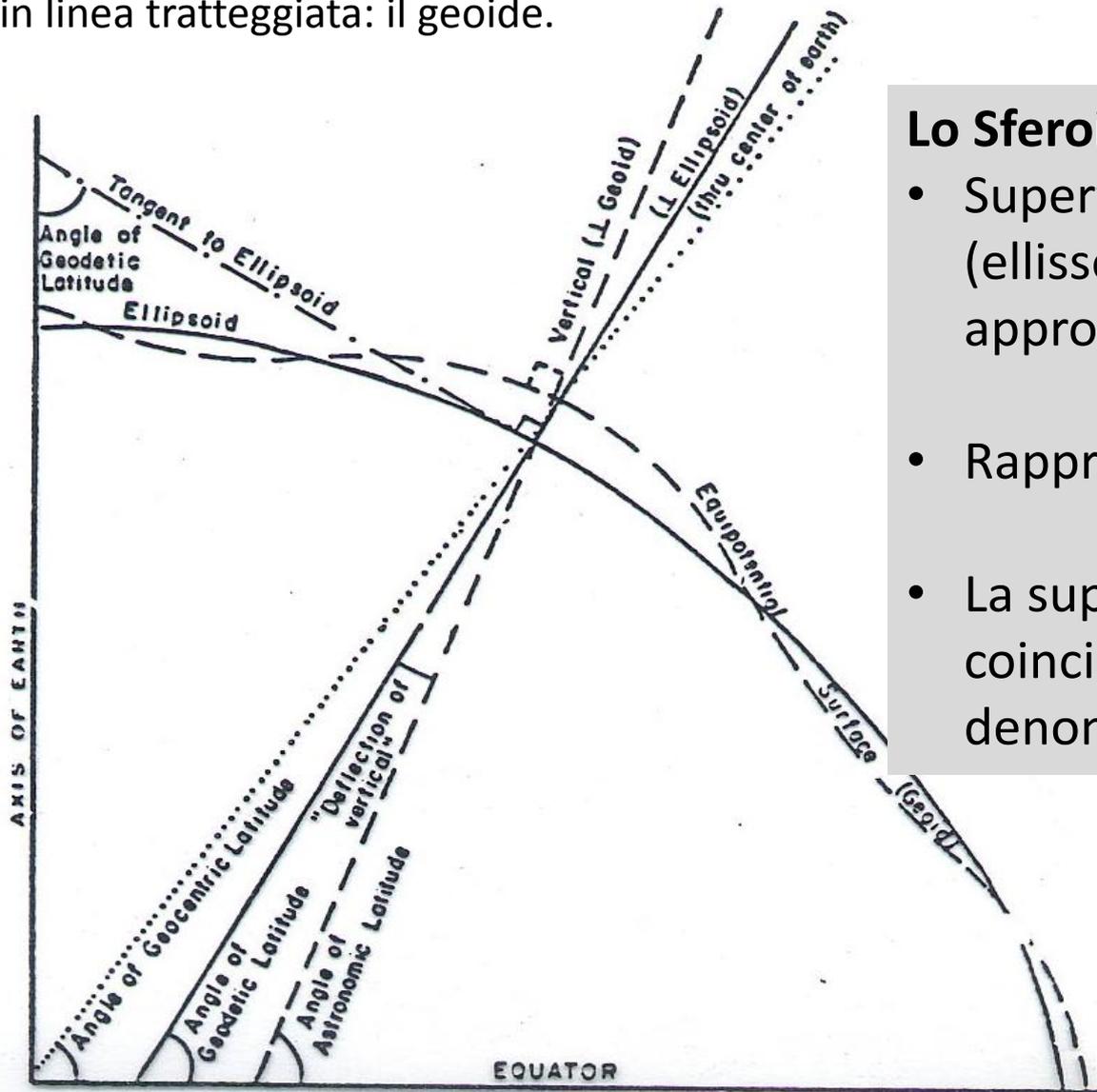


Le "latitudini":

Latitudini geocentrica, geodetica ed astronomica (da Cassinis, 1989).

In linea continua: l'ellissoide di rotazione o sferoide

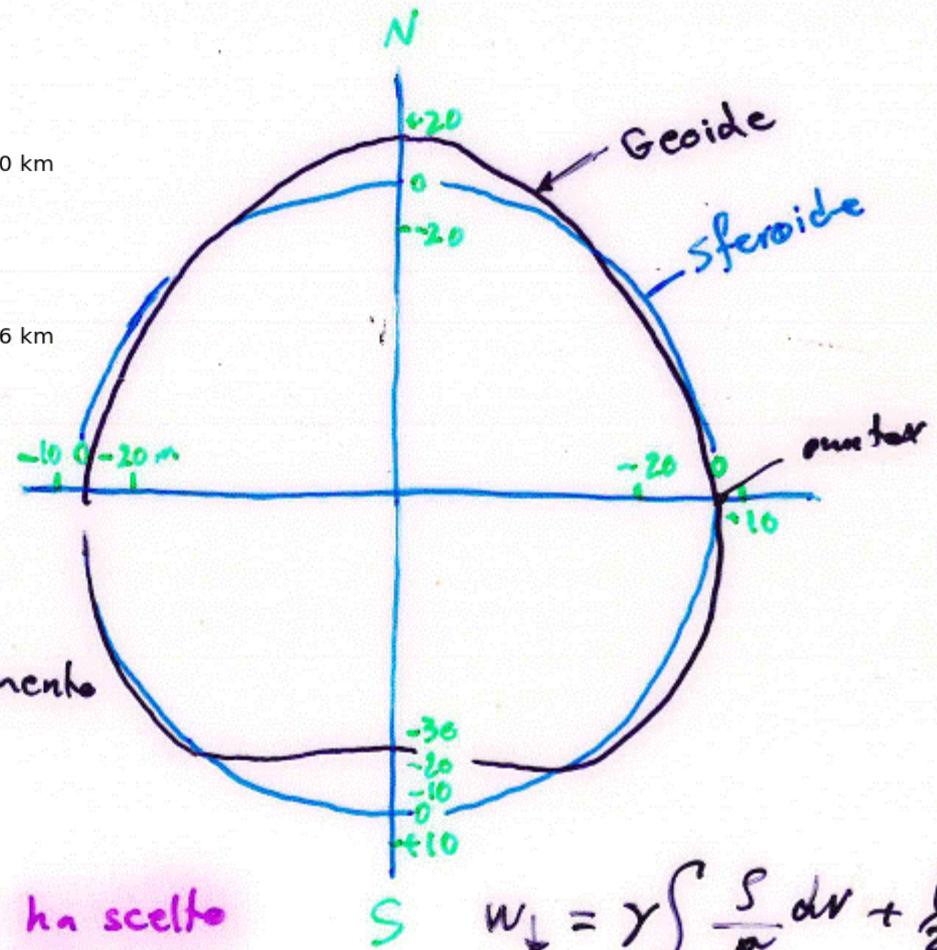
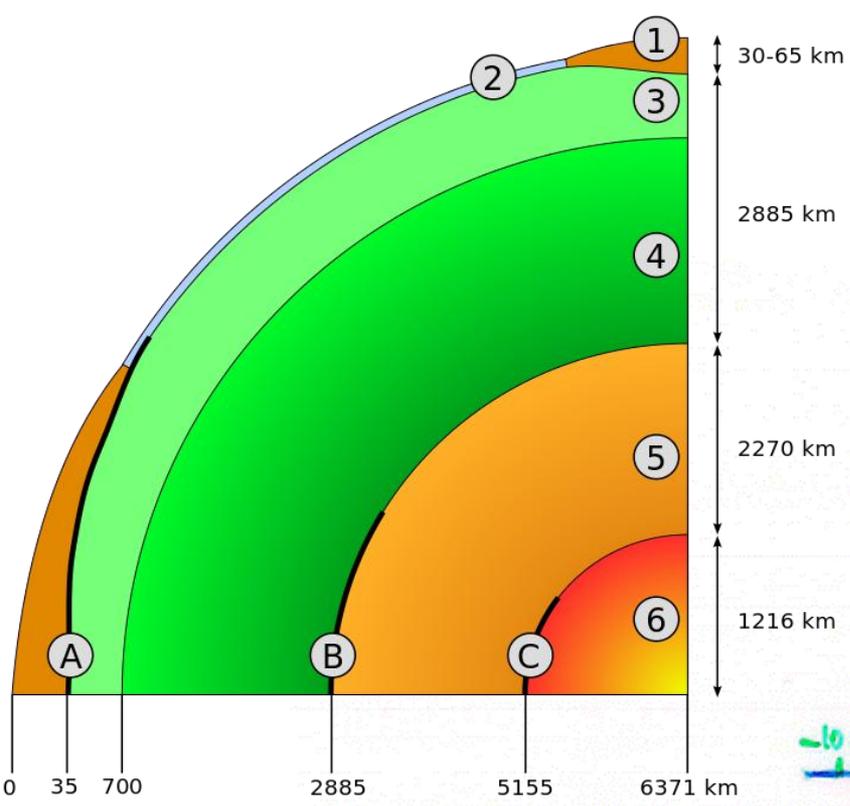
in linea tratteggiata: il geoide.



Lo Sferoide:

- Superficie equipotenziale (ellissoide di rotazione) che meglio approssima il **geoide**,
- Rappresenta la somma di V_n e V_c
- La superficie equipotenziale coincidente (parallela) col l.m.m. è denominata **geoide**

In diversi testi la costante gravitazionale
Si scrive in due modi G e γ



ellissoide di riferimento
= sferoide.

$$R = a(1 - a \sin^2 \phi)$$

p.es. IGM italiano ha scelto
l'ellissoide di Bessel

$a = 6377397 \text{ m}$ e $\alpha = \frac{1}{299.2}$
Carte Geologiche 1:100.000

$$W_x = \gamma \int \frac{\rho}{R} dv + \frac{1}{2} \omega^2 x^2$$

= Geoide

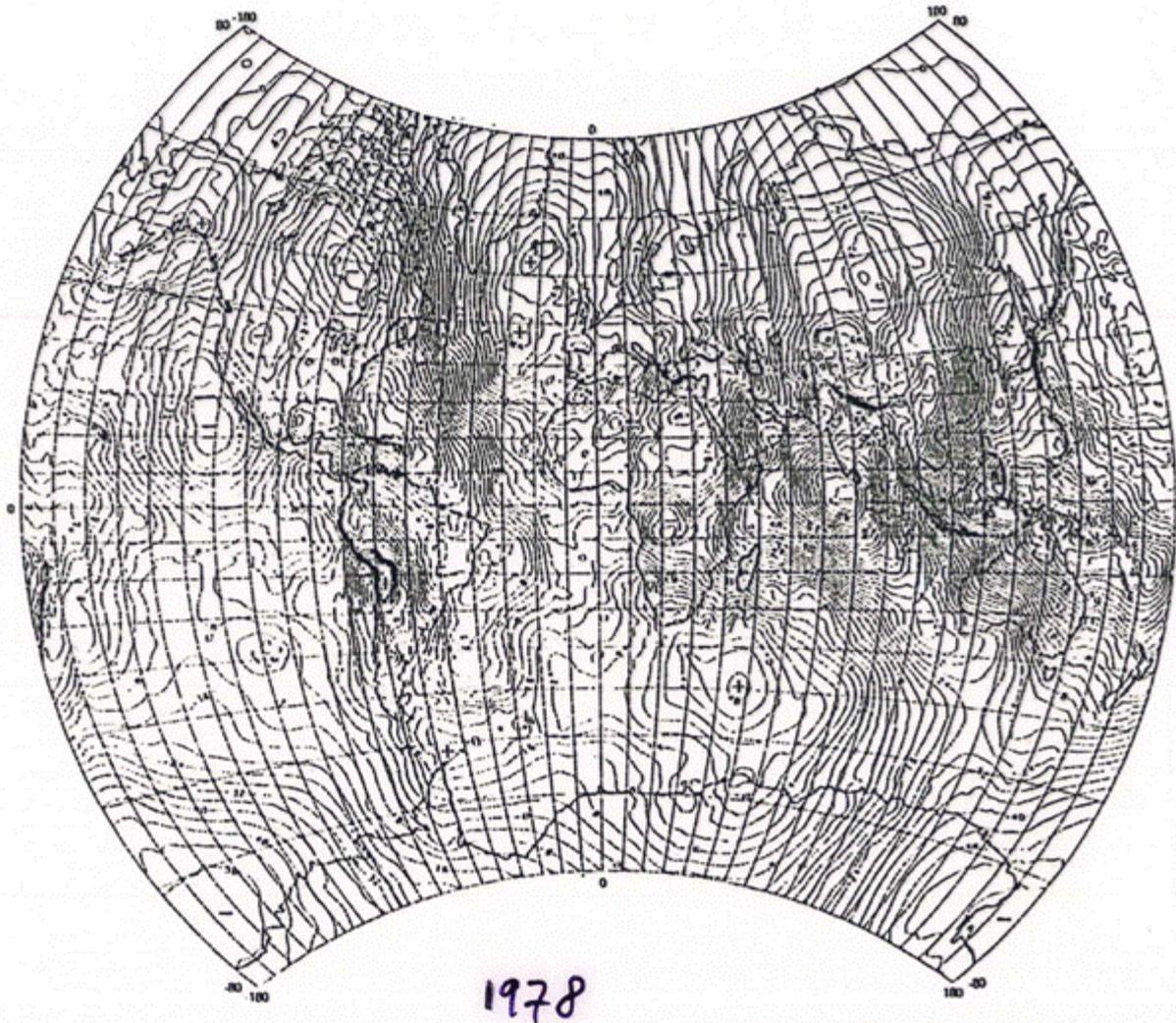
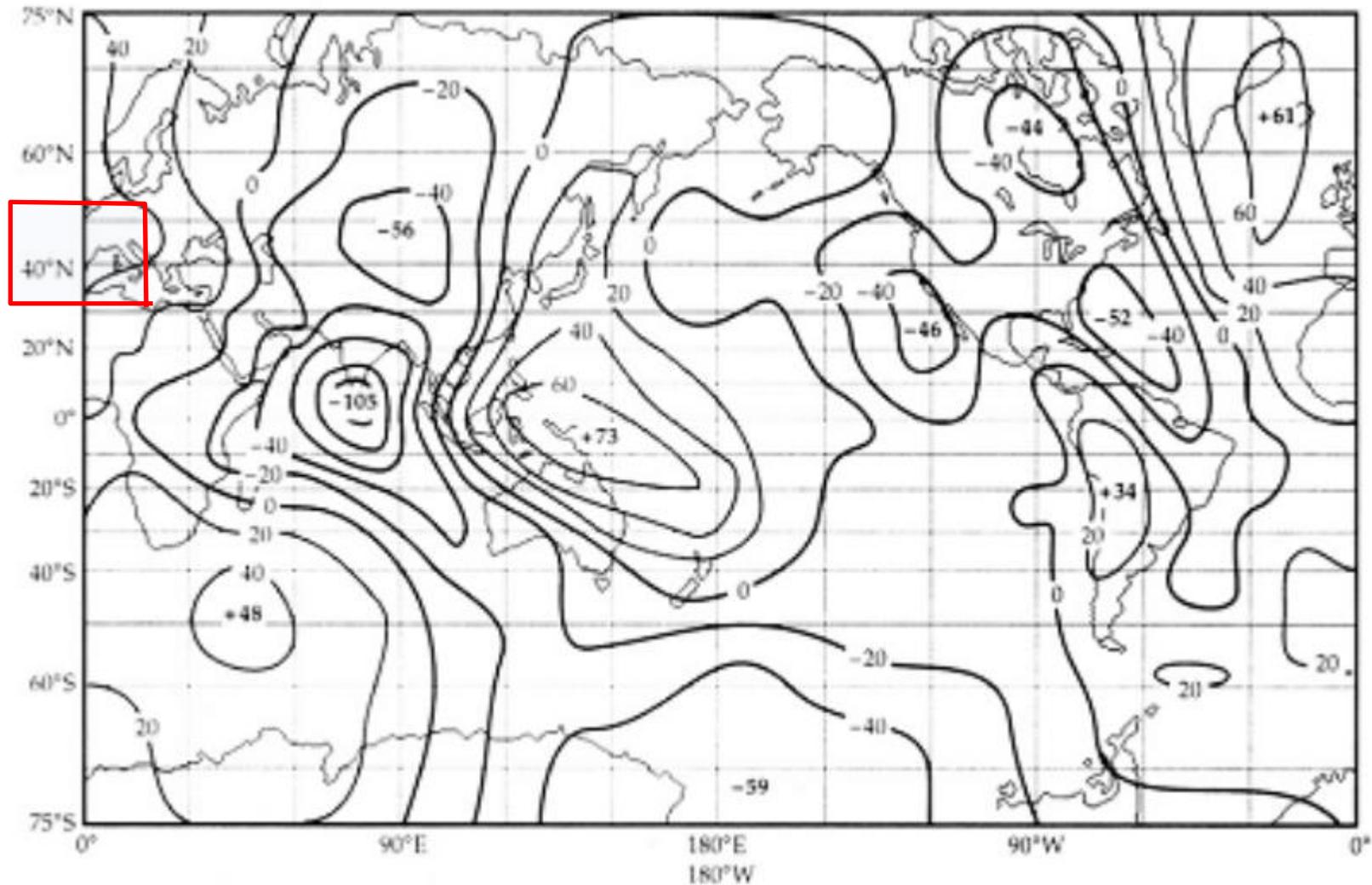


Figura 1.10 – Il geoide sull'intera superficie terrestre, in base ad un modello del 1978 (da Lowman e Frey, 1978)

Deviazioni rispetto alle sferoide di rotazione a livello terra Anno 1979

In Italia le deviazioni: ~30m - ~60m



to be put in order

Deviazioni rispetto allo sferoide di rotazione a livello terra

Anno 1998

Dimensioni griglia: 15'x15'

Earth Geopotential Model 1996(EGM96)

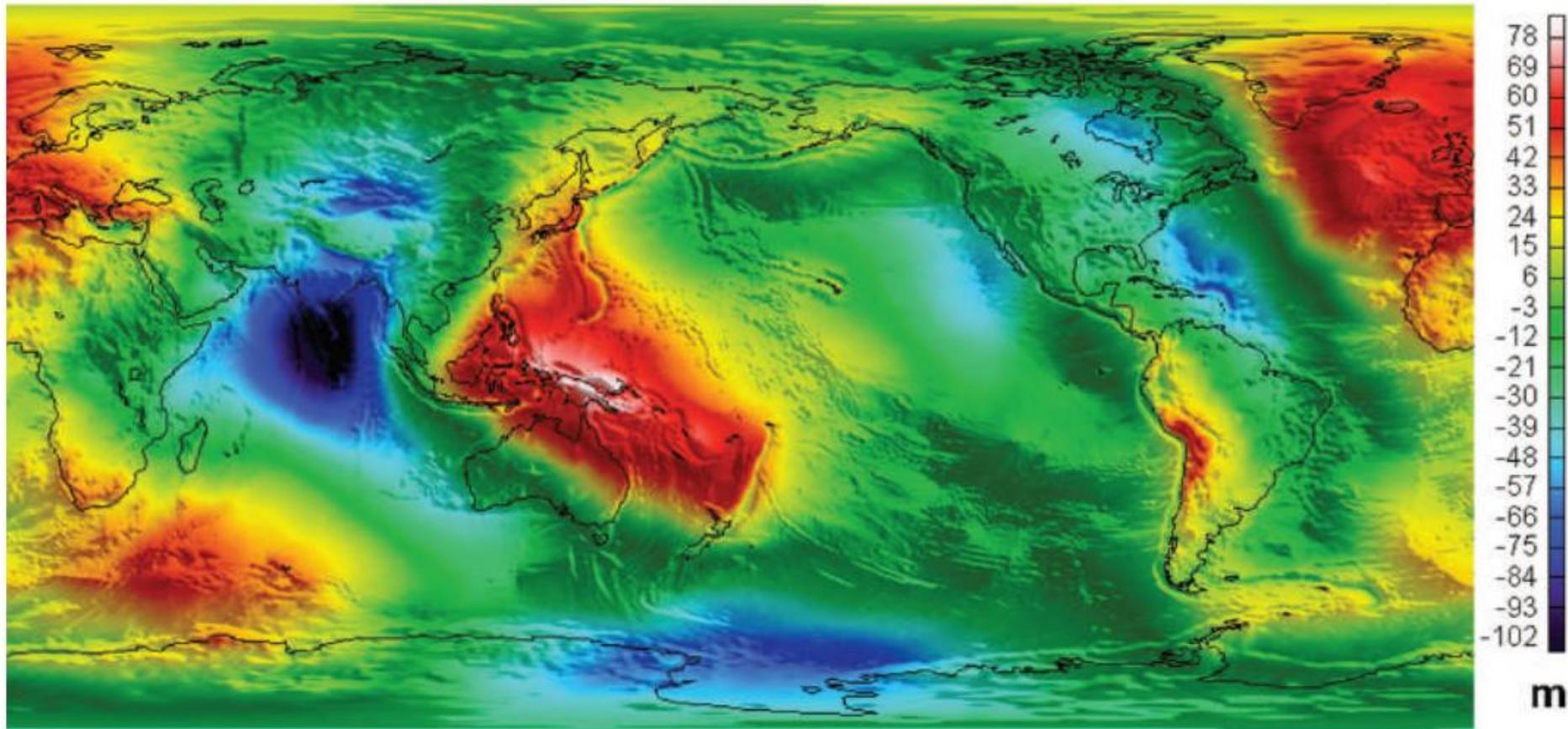


FIG. 3. The 15' x 15' global geoid undulations produced by EGM96 (Lemoine et al., 1998). The undulations range from -107 m to 85 m. Black lines indicate coast lines.

$$f = \frac{1}{298,2572235630}$$

Semiassa maggiore dell'ellissoide WGS84

$$a = 6378137,0 \text{ m}$$

To be put in order

Momento d'inerzia

I vincoli conseguenti la dinamica rotazionale

$$I_a = \sum_i m_i r_i^2 = \int r^2 dm$$



$$I(\text{sfera}) = 0,4MR^2$$

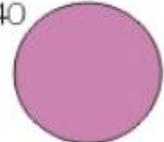
Momento d'inerzia
Corpo sferico



$$I = kMR^2$$

Massa (M) e raggio (R) di una sfera

k = 0.40

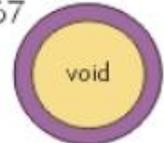


Modello sferico
Massa omogenea

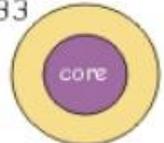
Massa concentrata
Guscio superficiale

Massa concentrata nel
Nucleo con densità
superiore 3x quella del
guscio superficiale

k = 0.67



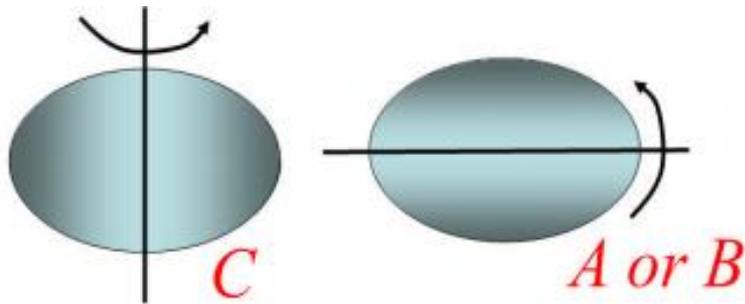
k = 0.33



Momento d'inerzia (I) della terra << 1 ovvero è minore di quello di una sfera omogenea

Momento d'inerzia

Il pianeta terra è schiacciato (schiacciamento f) \implies rotazione e g_c
Il valore di I non è costante



Generalmente $C > B > A$ (convenzionalmente $A \approx B$)

Differenze osservate in I_C rispetto a all'equatore (I_A o I_B) ed al polo rispetto ad un valore uniforme è indicativo della presenza di materiale più denso sotto la crosta.

I valori:

$$I_C : 0.3306 MR_E^2 \quad (\text{al polo})$$

$$I_A : 0.3295 MR_E^2 \quad (\text{all'equatore})$$

Momento d'inerzia (I) della terra $\ll 1$ ovvero è minore di quello di una sfera omogenea

Momento d'inerzia

$I_{\text{Terra}} \ll 1$

====> densità del nucleo interno è \gg
densità del mantello e della
crosta

Variatione della g

1. forma della terra

$$\alpha = \frac{R_e - R_p}{R_e} = \frac{1}{29825}$$

2. superficie della Terra $\bar{\sigma}$ irregolare [quota media continentale = 500m]
 Le depressioni oceaniche ≈ 9000 m

3. Effetto latitudine

4. Forza centrifuga

5. Effetto Maree = maree terrestri

ellissoide internazionale di riferimento e la gravità normale

$$g_\phi = g_0(1 + A \sin^2 \phi + B \sin^2 2\phi)$$

$$g_0 = 978.049 \text{ gal}$$

$$A = 0.0052884$$

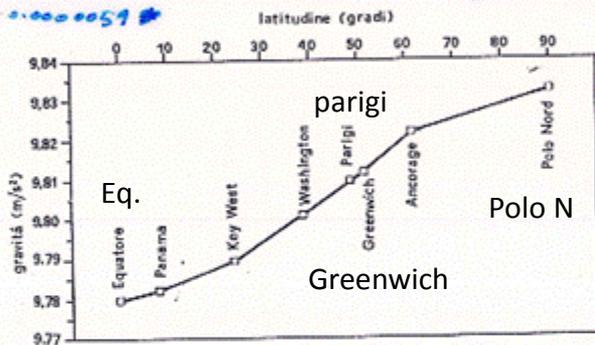
$$B = -0.0000059$$

1930

International gravity

formulas

costanti {
 A: schiacciamento
 B: velocità di rotazione



Variatione di g lungo il percorso equatore – polo nord

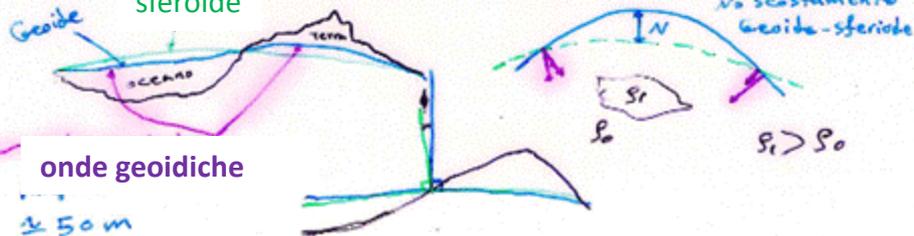
g_n : Geodetic reference System (1967)

$$g_\phi = 9.78031846(1 + 0.005278845 \sin^2 \phi + 0.000023462 \sin^4 \phi) \text{ m/s}^2$$

per passare da un sistema all'altro

$$g_\phi(67) - g_\phi(30) = (-172 + 136 \sin^2 \phi) \text{ } \mu\text{m/s}^2 \text{ (g.u.)}$$

Geoide
 sferoide



onde geoidiche

± 50 m

Variatione di g

1. Forma della terra

2. Superficie irregolare della terra

3. Effetto latitudine

4. Forza centrifuga

5. Effetto maree e maree terrestri