



UNIVERSITÀ MEDITERRANEA DI REGGIO CALABRIA
DIPARTIMENTO PAU
Corso di Laurea Triennale in Scienze dell'Architettura – Classe L-17

LABORATORIO DI RAPPRESENTAZIONE - A.A. 2014 - 2015
Prof. Franco Prampolini

I Sistemi di Riferimento



Definizioni

Geodesia

Scienza per la determinazione della forma e delle dimensioni della Terra, cioè che definisce la superficie di riferimento nella sua forma completa (il geoide), e nella sua forma semplificata (l'ellissoide) e del suo campo gravitazionale esterno in funzione del tempo.

Topografia

Insieme delle procedure per il rilievo diretto del territorio. Ad essa sono affidati gli studi dei metodi e degli strumenti atti a misurare e rappresentare dettagliatamente i particolari di zone della superficie terrestre.

Cartografia

Insieme di conoscenze scientifiche, tecniche e artistiche finalizzate alla rappresentazione simbolica di informazioni geografiche, statistiche, demografiche, economiche, politiche, culturali, comunque in relazione al luogo nel quale si realizzano - su supporti piani (carte geografiche) o sferici (globi).



Definizioni 2

L'insieme delle tre discipline, quindi, raccoglie le conoscenze applicate, gli strumenti e i metodi operativi, di calcolo e di disegno, mediante i quali si producono modelli legittimi della realtà, operandone la discretizzazione tramite punti (e altre primitive geometriche), dei quali si definisce la reciproca posizione in un sistema dato di riferimento, così da permetterne una rappresentazione in una scala prestabilita.

Scopo finale del rilievo topo/cartografico è quello di rappresentare (normalmente su un piano) una serie di punti caratteristici del terreno determinandone la posizione plano-altimetrica, partendo da punti di posizione già nota, in modo da potere effettuare verifiche e controlli opportuni.

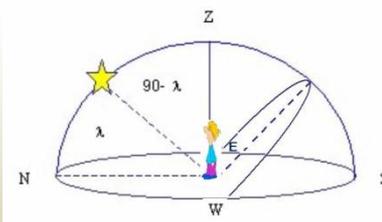
Alcune strane idee ...

B.C.

di John Hart



Muoversi sulla terra



... ma per muoversi sulla terra e, soprattutto, in mare l'uomo ha da sempre bisogno di punti di riferimento, noti e stabili che gli consentano di configurare uno spazio geometricamente conoscibile.

Questi punti di riferimento, dal principio, sono stati forniti dalle stelle e l'uomo ha cominciato a valutarne e definirne la posizione su quella immensa "tavolozza" che è la Volta Celeste. Ricordiamo Tolomeo, e il suo Almagesto.





L'Origine

Operativamente, l'origine di qualunque sistema astronomico, sia esso cartesiano che polare, è **il sito da dove si osserva**, e dunque l'osservatorio astronomico terrestre, oppure l'aereo o il satellite artificiale o il suolo marziano, etc.

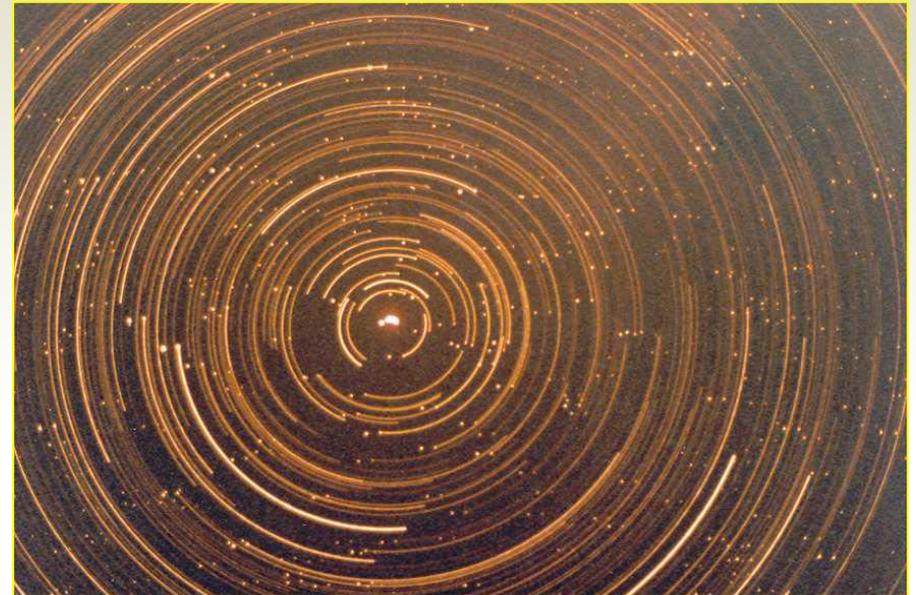
Da questa origine **topocentrica** ci si può trasferire, **per mezzo di operazioni matematiche quali le rotazioni e le traslazioni**, a un altro luogo non direttamente accessibile, ad es. al centro della Terra (coordinate **geocentriche**), oppure al centro del Sole (e si hanno coordinate **eliocentriche**) oppure a quelle del baricentro del Sistema Solare (coordinate **baricentriche**), oppure infine al centro della Via Lattea (coordinate **galattocentriche**, da non confondere con quelle **galattiche**, la cui origine è geocentrica) ...



l'Astronomia sferica

Con il nome di **astronomia sferica** si indica la rappresentazione formale e sistematica delle posizioni e movimenti apparenti degli astri sulla volta celeste. Le stelle si muovono apparentemente di moto circolare, attorno ad un asse (“Asse del Mondo”). Il loro periodo di rotazione definisce il “giorno siderale” (intervallo tra due passaggi della stessa stella al meridiano, ovvero tra due “culminazioni”) e mantengono le distanze relative (stelle “fisse”). Quelle adiacenti al PN non tramontano mai (stelle circumpolari).

È facile rendersi conto di tale realtà effettuando una foto con l'obiettivo di una macchina fotografica rivolta verso il polo celeste lasciandolo aperto. Ogni stella lascia sulla pellicola una traccia luminosa coincidente con un arco di circonferenza, il cui centro si trova nel polo e la cui lunghezza dipende sia dal tempo di esposizione sia dalla distanza sferica dell'astro dal polo.





I Sistemi Convenzionali Astronomici: SRCC

Da queste osservazioni astronomiche nascono due sistemi generali di riferimento che considerano, come si è detto, la volta celeste come una superficie ideale di rappresentazione dove le stelle si proiettano in modo indipendente dalla loro distanza effettiva.

COORDINATE ALTAZIMUTALI

Sistema di coordinate che prende come riferimento l'orizzonte e la verticale del luogo.

COORDINATE EQUATORIALI

Sistema che prende come riferimento l'equatore celeste e l'asse del mondo.

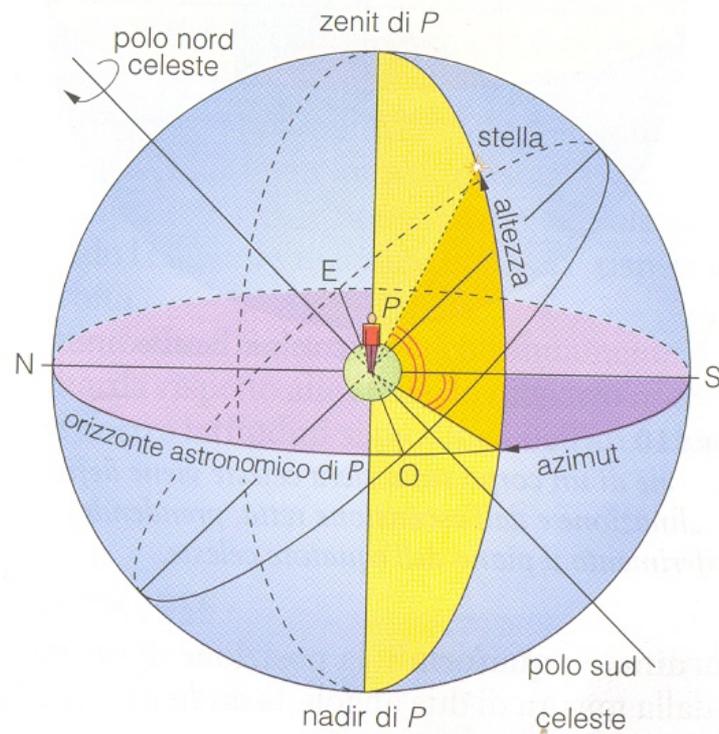
Le coordinate “altazimutali”

COORDINATE ALTAZIMUTALI

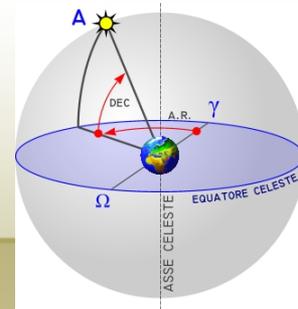
Comprendono le coordinate dette **azimut** ed **altezza** e, come si è detto, sono relative all'osservatore.

L'altezza si definisce come la distanza angolare di un astro dal piano dell'orizzonte astronomico. Se l'astro si trova alla massima altezza sopra il nostro capo, la sua altezza è di 90 gradi. Questo punto è detto **zenit**, il punto opposto allo zenit è il **nadir**. L'azimut è la distanza angolare tra il piano del circolo verticale passante per l'astro e il piano passante per il meridiano locale.

Le coordinate altazimutali hanno il difetto di variare continuamente col moto apparente della volta celeste. Per ovviare a questo, si usano le coordinate equatoriali che sono indipendenti da questo difetto.



Le coordinate “equatoriali”



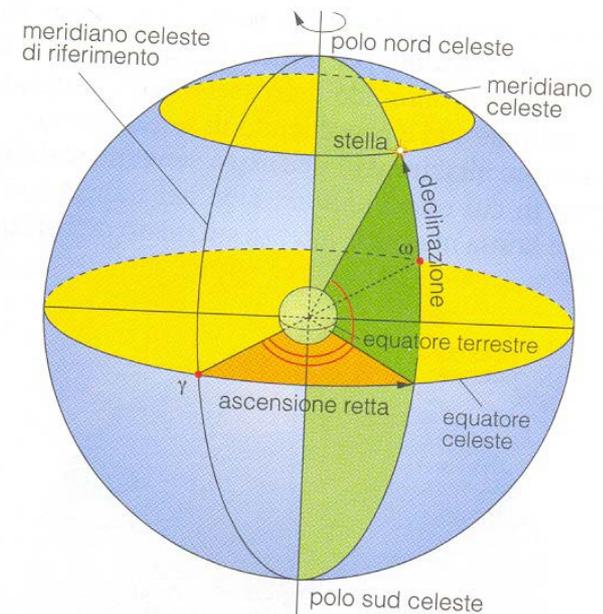
LE COORDINATE EQUATORIALI:

Comprendono le coordinate dette **ascensione retta** e **declinazione**.

L'ascensione retta è l'angolo compreso tra il meridiano celeste passante per l'astro e il meridiano fondamentale misurato a partire dal punto gamma in senso antiorario, lungo l'equatore celeste. Tutti i punti di ascensione retta sono misurati normalmente in ore, minuti e secondi.

Tenendo presente che ogni 4 minuti la volta celeste si sposta di circa 1° , se ad esempio una stella ha un'ascensione retta di 40 min, significa che si trova su un meridiano distante 10° dal meridiano passante per il punto gamma.

La declinazione viene, invece, misurata in gradi divisi in primi e secondi d'arco, variando dal valore di 0° per un astro posto all'equatore celeste fino al valore di 90° per un astro posto al Polo. Gli astri visti proiettati nell'emisfero nord celeste vengono definiti con valori positivi mentre, gli astri proiettati nell'emisfero sud celeste, con valori negativi. Le coordinate equatoriali sono quelle più in uso in ambito astronomico.

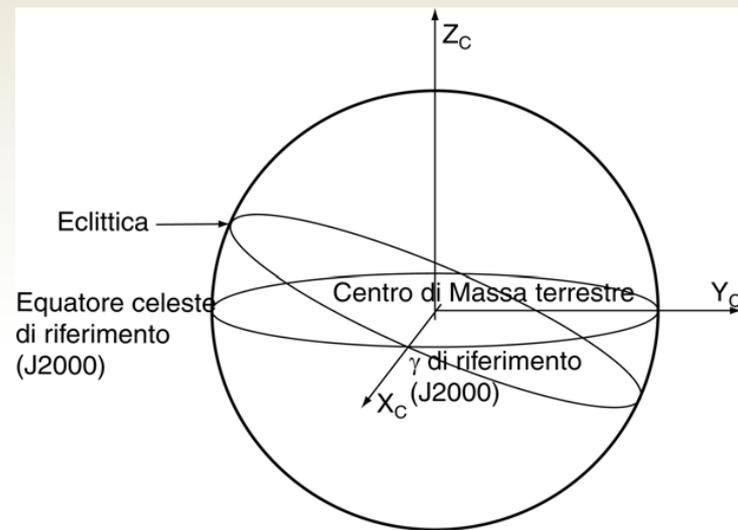
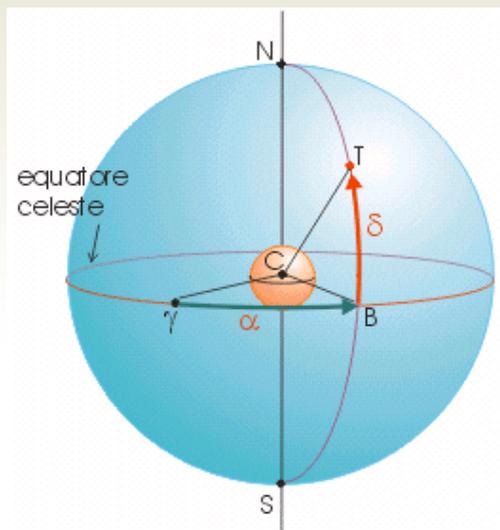
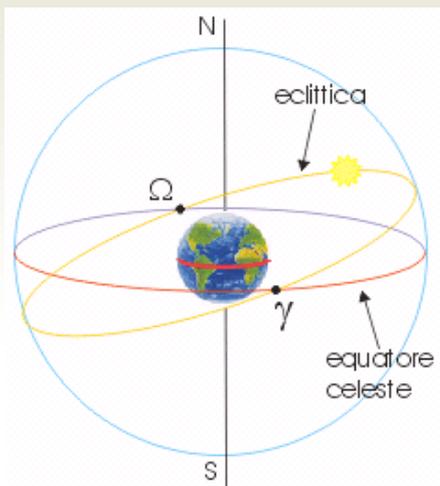


I Sistemi Convenzionali Astronomici: SRCC

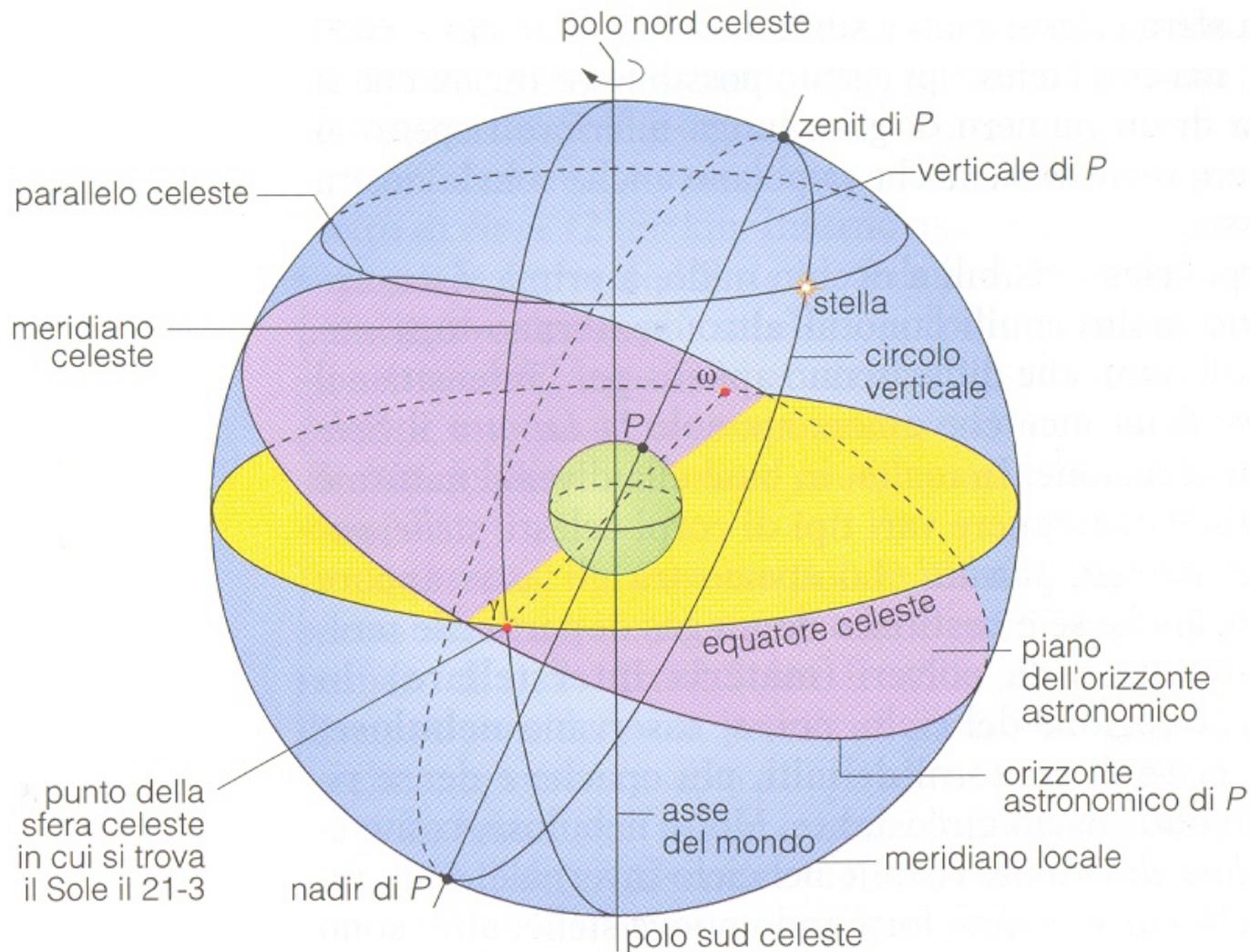
Il Sistema di Riferimento Convenzionale Celeste (**SRCC**) è definito da:

- origine nel baricentro terrestre;
- asse Z ortogonale all'Equatore Celeste di Riferimento;
- asse X definito dal Punto Equinoziale γ di riferimento,
- asse Y tale da completare una terna destrorsa.

Il SRCC viene utilizzato per il calcolo e la descrizione delle orbite dei satelliti terrestri, come quelli GPS. Non è solidale alla rotazione della Terra, quindi non è adatto per rappresentare la posizione di punti materializzati sulla sua superficie.



I Sistemi Convenzionali Astronomici: SRCC





I Sistemi di Riferimento Terrestri

I Sistemi di Riferimento Terrestri

Servono per la georeferenziazione di punti solidali con i moti della Terra e Si distinguono in:

SR globali: Definiti e coerenti su scala planetaria, realizzati mediante reti globali di stazioni permanenti che utilizzano metodi della geodesia satellitare (VLBI, SLR e, di recente, GPS) per stimare la propria posizione e il proprio spostamento nel tempo.

SR locali: Orientati e definiti su scala locale mediante reti locali, regionali, nazionali (per l'Italia Roma40), continentali (per l'Europa: ED50) di punti fondamentali determinati planimetricamente e altimetricamente, la cui posizione relativa viene stimata mediante misure topografiche di precisione.

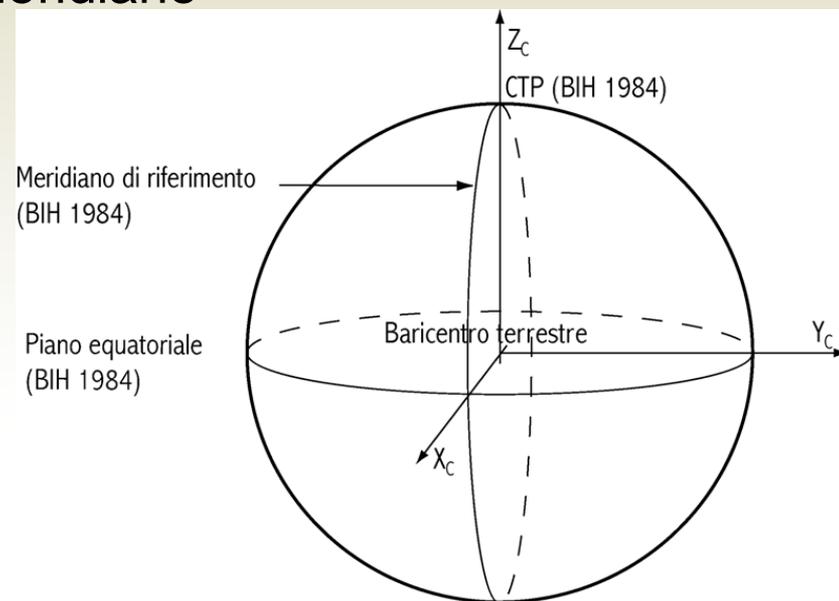
I SR globali costituiscono, per le metodologie di misura e la precisione delle stime, lo stato dell'arte. I SR locali hanno valenza storica poiché vennero realizzati prima dell'avvento della geodesia satellitare, ricorrendo a metodologie di misura e di stima meno precise di quelle oggi disponibili. Hanno però importanza fondamentale poiché spesso costituiscono il riferimento ufficiale cartografico per il territorio cui si riferiscono.

Lo stato attuale: ITRS

Riassumendo, ed entrando un po' più nel dettaglio, quando si parla di sistemi Globali viene utilizzato l'**ITRS** (International Terrestrial Reference System) che è un sistema terrestre convenzionale definito da una terna cartesiana destrorsa con le seguenti regole.

- Origine delle coordinate coincidente con il centro di massa della Terra.
- Asse Z diretto verso il Polo Nord terrestre convenzionale.
- Asse X è l'intersezione fra il piano meridiano di Greenwich e il piano equatoriale.
- Asse Y completa la terna destrorsa.

La terna ruota in modo solidale con la rotazione terrestre.

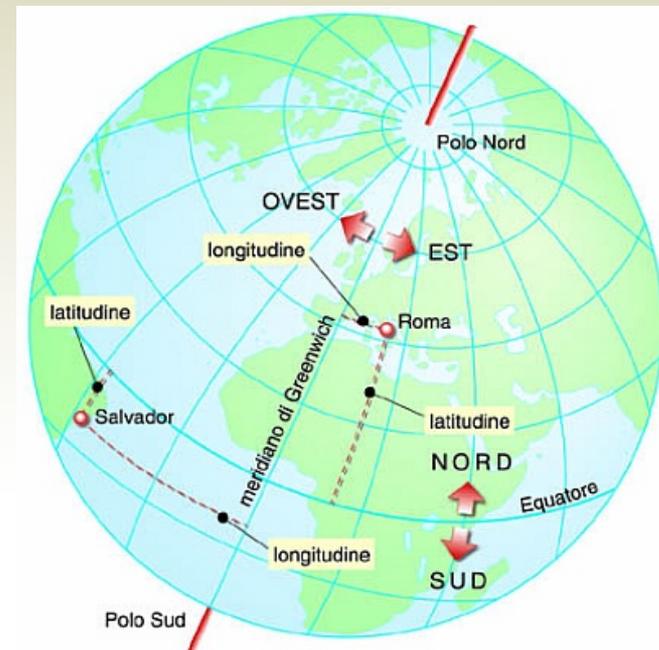
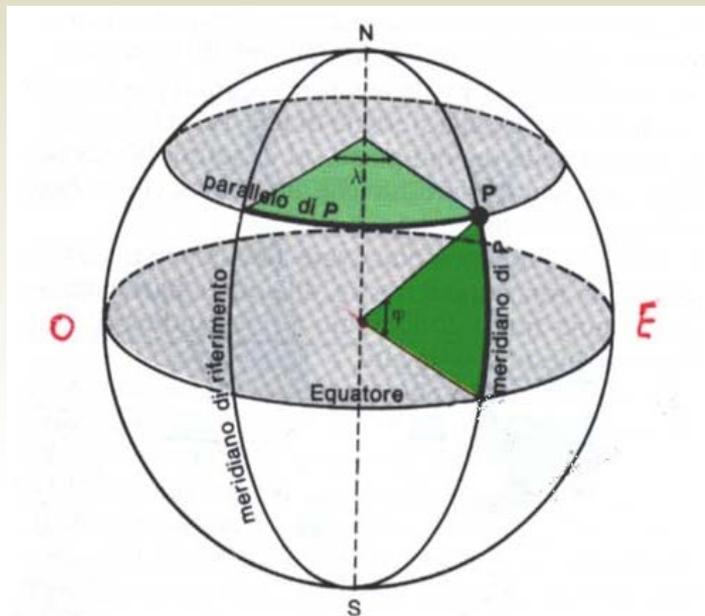


Latitudine e Longitudine

Analogamente ai sistemi di coordinate celesti, sulla superficie terrestre vengono definite analoghe coordinate “sferiche”: le **Coordinate Geografiche**.

Latitudine: condotta per P la normale all'ellissoide la Latitudine (λ) del punto è l'angolo di inclinazione di tale normale sul piano equatoriale.

Longitudine: fissato un piano di riferimento che contiene l'asse di rotazione terrestre si chiama Longitudine (φ) del punto P l'angolo diedro formato da tale piano e il piano contenente l'asse di rotazione e passante per P. Tale sistema dà origine al reticolato geografico, formato dai paralleli e dei meridiani





Lo stato attuale: ITRF

Un primo concetto importante è non confondere l'ITRS con le sue realizzazioni materiali. Infatti l'ITRS è solo un insieme di regole precedentemente elencate, e non fornisce elenchi di coordinate; questi sono presenti nelle realizzazioni denominate **ITRF** (International Terrestrial Reference Frame): Esempio: **ITRF89 (1988.0)**

Il nome di una realizzazione è caratterizzato da due coppie di numeri, una xx compresa nella parola ITRFxx e l'altra (t_0) tra parentesi tonde: xx (nell'esempio 89): fa parte del nome e costituisce l'anno in cui è stata calcolata ed ufficializzata la realizzazione, t_0 (nell'esempio 1988) è l'epoca a cui vengono riferite le stime di coordinate.

Le reti di stazioni permanenti per la realizzazione dell'ITRS sono realizzate mediante metodi affini (ma non identici) di osservazione:

VLBI: Very Long Baseline Interferometry

SLR: Satellite Laser Ranging

GPS: Global Positioning System

realizzati da stazioni di osservazione monumentate in modo stabile, che operano continuamente nel tempo.

Definizioni

Le realizzazioni ITRFxx sono quelle effettivamente utilizzabili dall'utenza topografica: esse sono materializzate nei diversi territori nazionali attraverso vertici statici (esempio rete IGM95) oppure reti di stazioni permanenti (esempio rete RDN). Però un altro punto va prima affrontato: i vari ITRF poco si adattano ad essere utilizzati per applicazioni cartografiche in ambito europeo, in quanto in essi le coordinate dei punti si modificano troppo velocemente nel tempo, rendendo necessario modificare le realizzazioni ufficiali troppo spesso.

Differenza: ITRF2000 – ITRF92

9 anni

	spostamento	azimut
	<i>m</i>	<i>gradi</i>
GRAS	0.252	42
GRAZ	0.254	52
MEDI	0.205	50
MATE	0.200	46
NOTO	0.172	43

Media europea: 2.7 cm/y





ETRF89 - IGM95

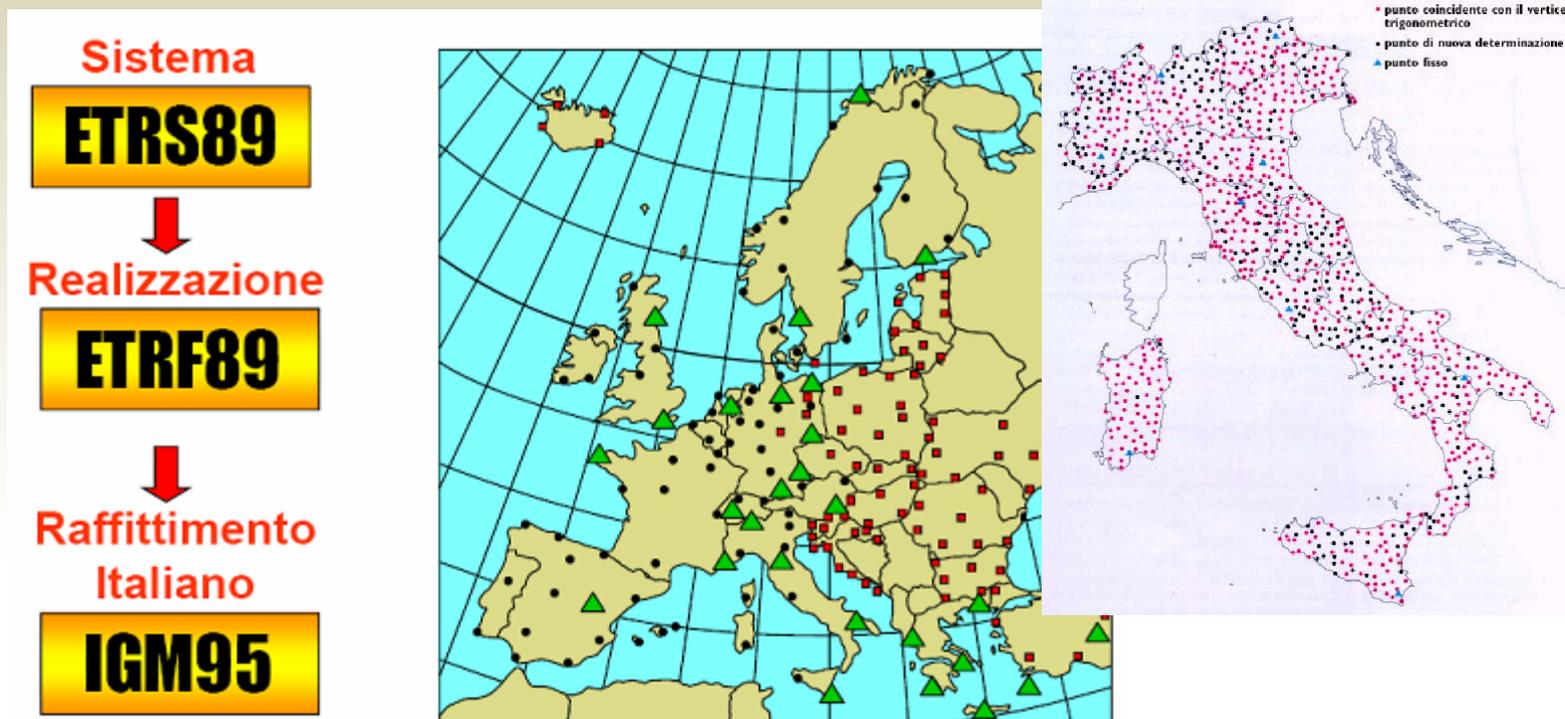
Passando dall' ITRF92 all'ITRF2000, per le stazioni ITRF più vicine all'Italia ci sono spostamenti di circa 20 cm in 9 anni, che sono troppi le applicazioni di cartografia. Questo, visto alla scala del continente Europa, porta al passo successivo, ossia di utilizzare una realizzazione più solidale con la placca europea che prende il nome di ETRF.

Il sistema di riferimento europeo chiamato ETRS89 (European Terrestrial Reference System) è così definito: la realizzazione ETRS89 coincide con ITRS all'epoca 1989.0, ma segue un moto solidale con la placca media europea; al sistema ETRS89 è associato un ellissoide di riferimento GRS80.

In Europa la prima realizzazione dell'ETRS89 è l'ETRF89, in Italia questa realizzazione è stata raffittita mediante una rete che prende il nome di **IGM95**.

La Rete IGM-95

Questa realizzazione di punti statici (ad oggi circa 2000 vertici) ha una precisione intrinseca data dall'Istituto Geografico Militare di 22 millimetri di scarto planimetrico e 36 mm di scarto altimetrico per il 95% dei vertici, per un vettore spaziale complessivo di circa 5 cm: pertanto una base tra due punti della rete IGM95 può avere, statisticamente, un'incertezza di 7 cm.





ETRF-2000

Con l'avvento delle stazioni permanenti e il posizionamento in tempo reale le precisioni richieste dall'utenza in campo sono via via aumentate e il sistema di riferimento deve avere una precisione non inferiore a quella delle misure a cui esso si riferisce: oggi ETRF89 non è sempre in grado di fornire un adeguato supporto in termini di precisione, in quanto lo spostamento geotettonico dell'Italia non è omogeneo in direzione e velocità, ma alcune zone tendono a ruotare in modo diverso dalle altre.

Inoltre negli ultimi 20 anni molti capisaldi possono avere subito fenomeni di cedimento locale, indipendenti dalla geodinamica. Pertanto l'Istituto Geografico Militare ha deciso di ufficializzare dal primo gennaio 2009 un nuovo sistema di riferimento: **ETRF2000(2008.0)**

La Rete Dinamica Nazionale - RDN

Il sistema non è materializzato con dei vertici statici come l'ETRF89 bensì da una rete di stazioni permanenti diffuse su tutto il territorio nazionale denominata **RDN (Rete Dinamica Nazionale)**.

La RDN è stata istituita selezionando 99 stazioni permanenti GPS fra quelle già esistenti in Italia, di proprietà di Enti Pubblici ed omogeneamente distribuite, in modo da consentire in seguito l'accesso al Riferimento Globale su tutto il territorio nazionale.

Le stazioni considerate hanno una interdistanza media di 100 ~ 150 km, in modo da poter disporre, avendo avuto particolare attenzione alla copertura delle zone marginali, di una stazione ogni 3000 km² circa.



I Vertici RDN

Il sito dell'Istituto Geografico Militare Italiano (IGMI - <http://www.igmi.org/rdn/>) fornisce in tempo reale le monografie aggiornate dei vertici della rete.

Lo scopo della rete RDN non è quello di fornire un servizio di posizionamento in tempo reale ma di materializzare il nuovo sistema di riferimento italiano a ETRF2000, più aggiornato, preciso e accurato rispetto all'ETRF89.

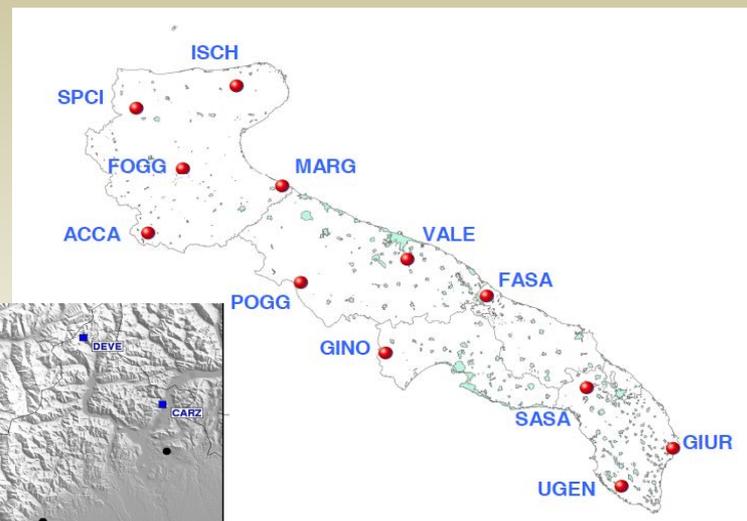
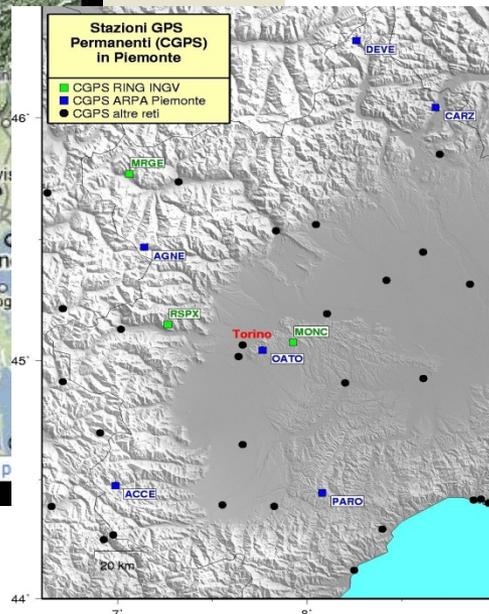
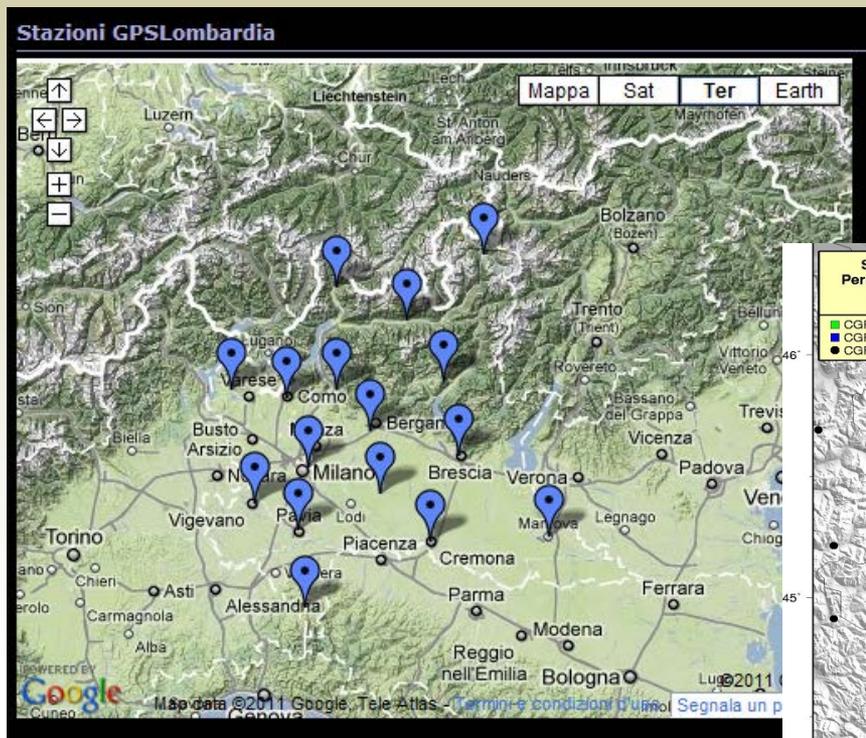
TGRC (Reggio Calabria)	
Four char ID: TGRC	IERS Domes ID: 00000M000
Site name: Reggio Calabria	
Location: Reggio Calabria (REGGIO CALABRIA)	
Antenna type: LEIAT504 (LEIS)	
ARP: BPA	ARP Up Ecc.: 0.0000 m
ARP North Ecc.: 0.0000 m	ARP East Ecc.: 0.0000 m
Receiver type: LEICA GRX1200GGPRO	
RDN inclusion since: 15/12/2007	
Date of last change: -	
ITRF2005 epoch 2008.0	
X	4838809.155 ± 0.001 m
Y	1355666.773 ± 0.001 m
Z	3914997.545 ± 0.002 m
ETRF2000 epoch 2008.0	
φ	38° 06' 29.9489" (± 0.8 mm)
λ	15° 39' 03.7000" (± 0.7 mm)
h	139.239 (± 1.8 mm)
ETRF2000 epoch 2008.0	
X	4838809.488 ± 0.001 m
Y	1355666.443 ± 0.001 m
Z	3914997.272 ± 0.002 m
Note: -	
Agency: name: Istituto Tecnico Statale per Geometri 'A. Righi' (SUD) - ITSG location: Reggio Calabria - RC	

missing photo

missing photo

I Vertici RDN

Accanto alla rete nazionale sono presenti, ormai in tutte le regioni, altre reti locali di stazioni permanenti GPS più fitte, con una distanza tra i vertici di circa 30~40 Km, in grado di estendere l'impiego del rilievo differenziale a livello capillare.



Le Reti permanenti GPS

In Italia esistono inoltre varie reti commerciali, collegate direttamente o parzialmente coincidenti con la RDN, che forniscono servizi per il posizionamento in tempo reale (RTK) o per il post processo dei rilievi GPS. **ITALPOS** (Leica Geosystem <http://www.italpos.it>) o **TOPCON** (Geotop <http://www.geotop.it/>)



Mappa delle Stazioni Permanenti
ITALPOS di Leica Geosystem



Mappa delle Stazioni Permanenti GNSS
Topcon in Italia

WGS84



Il SR globale WGS (World Geodetic System) viene sviluppato dal Defence Mapping Agency (DMA), ora NIMA (National Imagery and Mapping Agency), a partire dagli anni 60. È formalmente definito come ITRS, ma è realizzato mediante una rete di stazioni di controllo del NIMA.

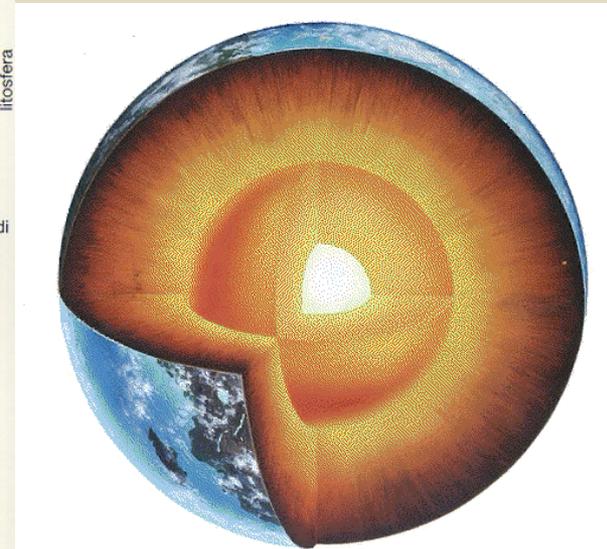
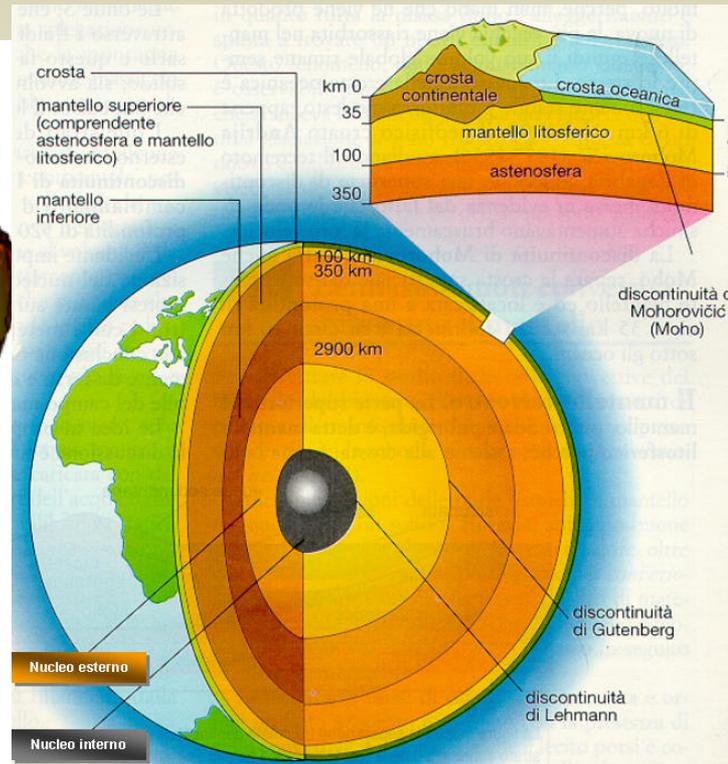
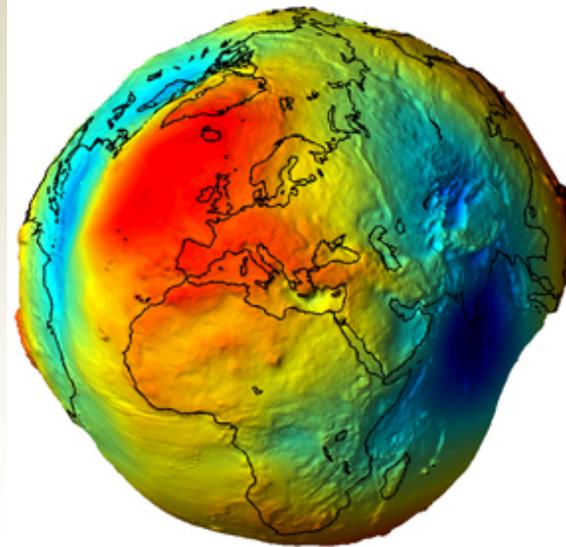
Negli ultimi 40 anni anche le realizzazioni del WGS84 si sono evolute in funzione dei dati e delle informazioni disponibili; attualmente siamo alla realizzazione WGS84(G1150). Il WGS84 è realizzato con minore precisione dell'ITRF: la coerenza fra i 2 SR è di alcuni centimetri.

È comunque un SR fondamentale, perché è il SR in cui vengono calcolate e fornite all'utenza le orbite dei satelliti GPS e ne riprenderemo la descrizione di dettaglio nell'U.D. dedicata.

Forma e dimensioni della Terra

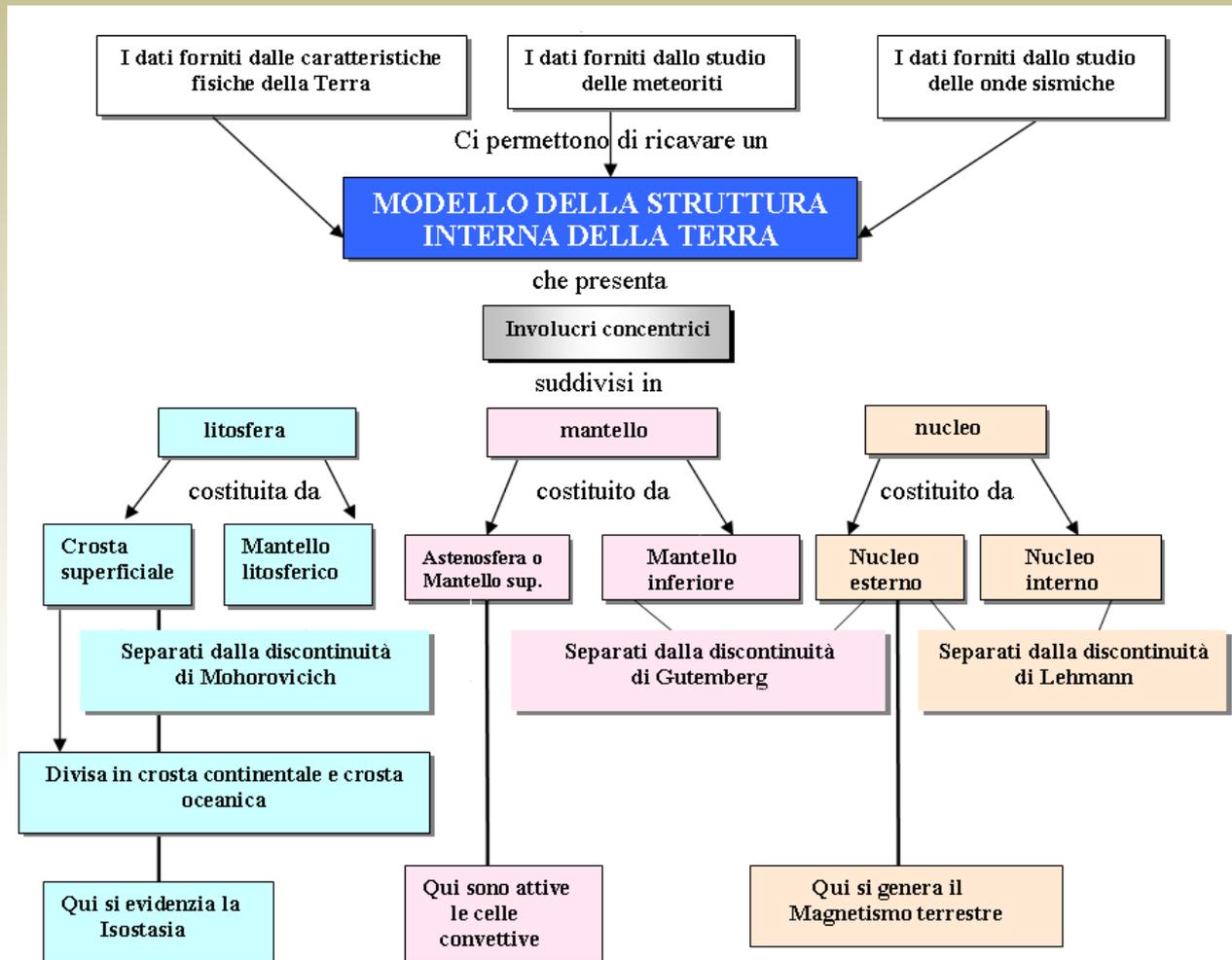
Abbiamo visto come i sistemi di riferimento celesti e terrestri abbiano come referenza una superficie immateriale di tipo sferico. Se la volta celeste può essere “idealizzata” come forma pura, per la terra il discorso cambia!

La forma della terra, è assimilabile ad una sfera con uno schiacciamento ai poli, e deriva da molteplici forze di attrazione gravitazionale, legate ai movimenti di rotazione, traslazione e rivoluzione, che agiscono sulle sue masse, solide e fluide.



Forma e dimensioni della Terra

Vediamo di seguito un modello a blocchi della struttura terrestre:



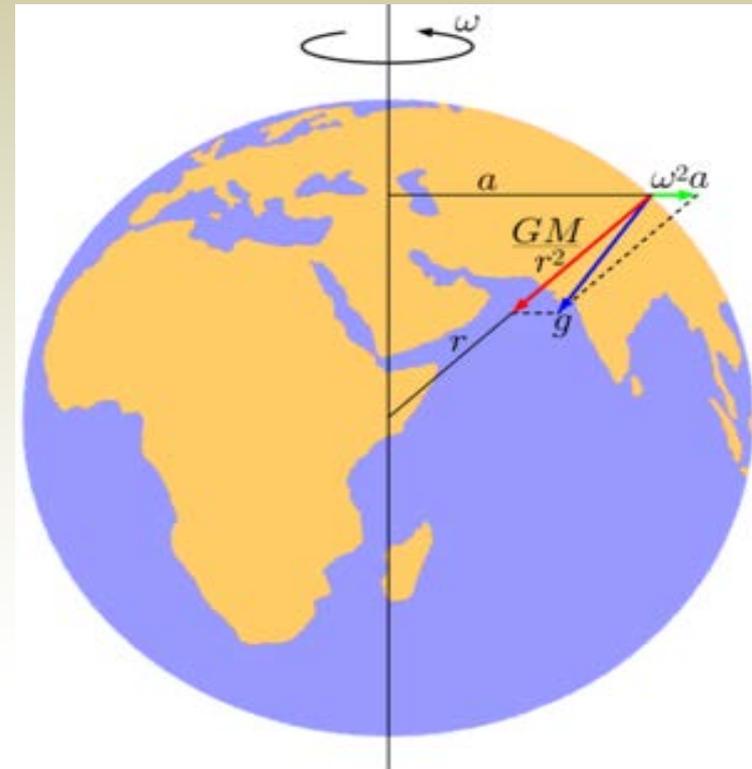
Il Campo gravitazionale 1

Ogni particella della Terra è animata nel cosmo da un movimento che deve essere considerato risultante di singoli moti elementari.

Al fine del calcolo della gravità è sufficiente, per i nostri scopi considerare il moto di rotazione. La velocità angolare di rotazione ω è costante e vale $\omega = 2\pi/86164 \text{ sec}^{-1}$.

Su un punto P, dove è concentrata una massa m' , agisce una forza di attrazione diretta verso il centro di massa della terra. Il moto rotatorio della Terra intorno all'asse polare causa un'accelerazione $a = \omega^2 r$, dove r è la distanza del generico punto P dall'asse di rotazione e ω è la velocità angolare del moto di rotazione.

L'accelerazione determina una forza centrifuga pari a $f = m' a = m' \omega^2 r$. La forza di gravità g , semplificando, è la composizione di queste due forze





Il Campo gravitazionale 2

Ogni punto della Terra è soggetto alla forza di gravità ed ha un suo valore di **g**. La gravità costituisce un campo di forze che definiamo **CAMPO GRAVITAZIONALE**. Le linee di forza del campo gravitazionale, sono curve gobbe e si chiamano verticali: la tangente alla loro direzione in un punto è materializzata dal filo a piombo, che rappresenta la tangente alla linea curva del campo gravitazionale nel punto di applicazione.

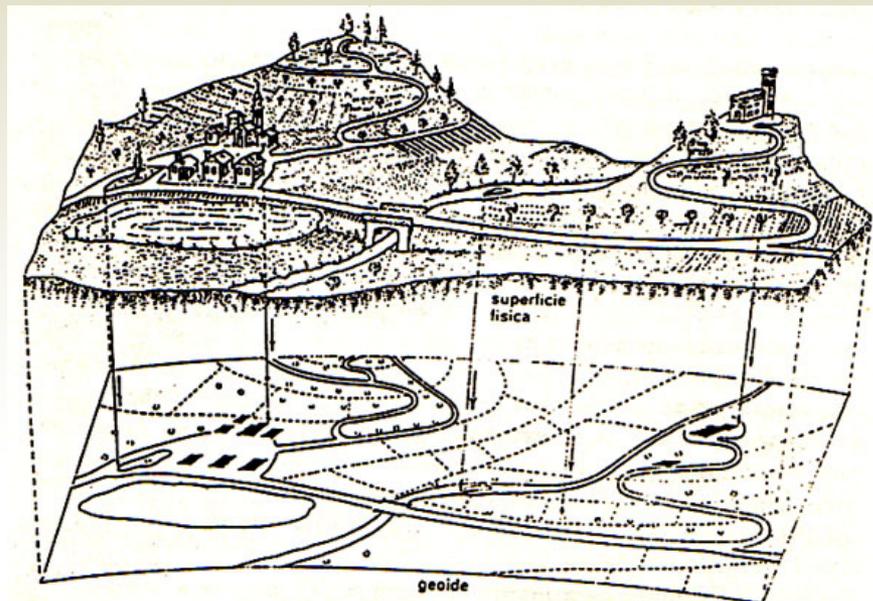
In ogni punto della Terra la forza di gravità può essere espressa come potenziale gravitazionale e si indica con la lettera **W**.

Ponendo **$W(x, y, z) = \text{cost}$** troviamo l'equazione di una superficie il cui potenziale ha valore costante, cioè una **Superficie Equipotenziale**. Facendo variare la costante in **$W = c_i$** , si ottiene una famiglia di superfici di livello, che in ogni loro punto sono normali alla direzione della **gravità** delle Linee di forza **$W = c_i$** . La superficie che ammette un potenziale gravitazionale uguale a quello del livello medio del mare si chiama **GEOIDE**.

La Superficie terrestre

La superficie fisica terrestre, poi, è molto irregolare per la presenza dei corrugamenti, delle depressioni, dei mari e delle opere dell'uomo.

Per effetto della sua forma e in particolare della forma della sua superficie esterna la terra non può essere immediatamente rappresentata, è necessario individuare superfici matematiche di riferimento, che fungano da modelli semplificati di rappresentazione, sostitutivi del modello reale di terra





Le superfici convenzionali

L'ideale sarebbe avere un superficie di passaggio che fosse facilmente identificabile. Su essa si potrebbero proiettare i punti della superficie fisica della Terra.

Se poi questa superficie fosse descrivibile con una formula matematica, si potrebbero applicare le formule della geometria proiettiva per passare a quello che vogliamo cioè ad un sistema cartesiano.

Poiché questa superficie ideale non esiste ci si avvale di 2 superfici di passaggio: il GEOIDE e l'ELLISSOIDE, la prima per la determinazione delle quote (altimetria) la seconda per la rappresentazione planimetrica.

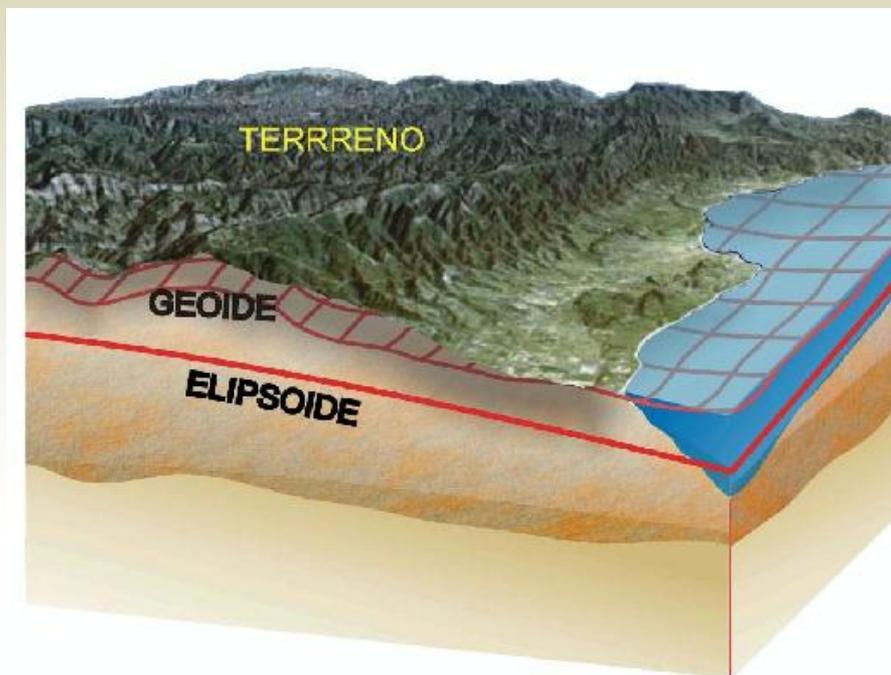
Geoide ed Ellissoide

Il “**Geoide**”: il luogo geometrico dei punti della terra che hanno il medesimo potenziale gravitazionale, coincidente idealmente col livello medio del mare in assenza di perturbazioni.

L’**ellissoide**: la forma geometrica rigorosa e modellabile matematicamente che meglio approssima la vera forma della terra, espressa dall’equazione:

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

dove “a” e “b” sono, i due semiassi, maggiore e minore.





Geoide ed Ellissoide 2

La forma del geoide dipende dalla distribuzione irregolare delle masse all'interno della Terra e non può essere descritta da un'equazione matematica chiusa come l'ellissoide; è quindi considerata una superficie fisica piuttosto che matematica. Le sue proprietà fondamentali, sono che il potenziale W del campo di forza della gravità è costante su di essa e che la linea di forza, cui è tangente in ogni punto la verticale, è perpendicolare ad essa ovunque. La tangente alla linea di forza coincide con la direzione della gravità e il geoide è una superficie liscia senza lacerazioni o discontinuità.

L'ellissoide biassiale è generato dalla rotazione di un'ellisse attorno al suo asse minore ed è definito da due parametri, ad es. dalla lunghezza dell'asse minore, o all'asse maggiore e da una quantità ausiliaria dipendente dai due semiassi. L'ellissoide triassiale è definito da tre parametri, ad es. dalla lunghezza dei tre assi mutuamente ortogonali. Il più utilizzato come superficie di riferimento è l'ellissoide di rotazione.

Le proiezioni cartografiche

Il passaggio da una superficie in doppia curvatura ad una piana non può avvenire tuttavia in modo rigoroso, senza cioè che intervengano deformazioni. Si ricorre quindi ad operazioni di **PROIEZIONE**.





Le proiezioni cartografiche 2

Nel passaggio da superficie di riferimento a piano della rappresentazione cartografica si hanno **deformazioni**

- deformazioni di **angoli** fra direzioni
- deformazioni di **aree**
- deformazioni di **distanze** fra i punti

CARTE CONFORMI (o isogone)

gli angoli restano inalterati nel passaggio da ellissoide a piano della carta (si conserva la similitudine fra figure infinitesime corrispondenti)

CARTE EQUIVALENTI

vengono conservati i rapporti fra aree infinitesime nel passaggio da ellissoide a piano della carta

CARTE EQUIDISTANTI

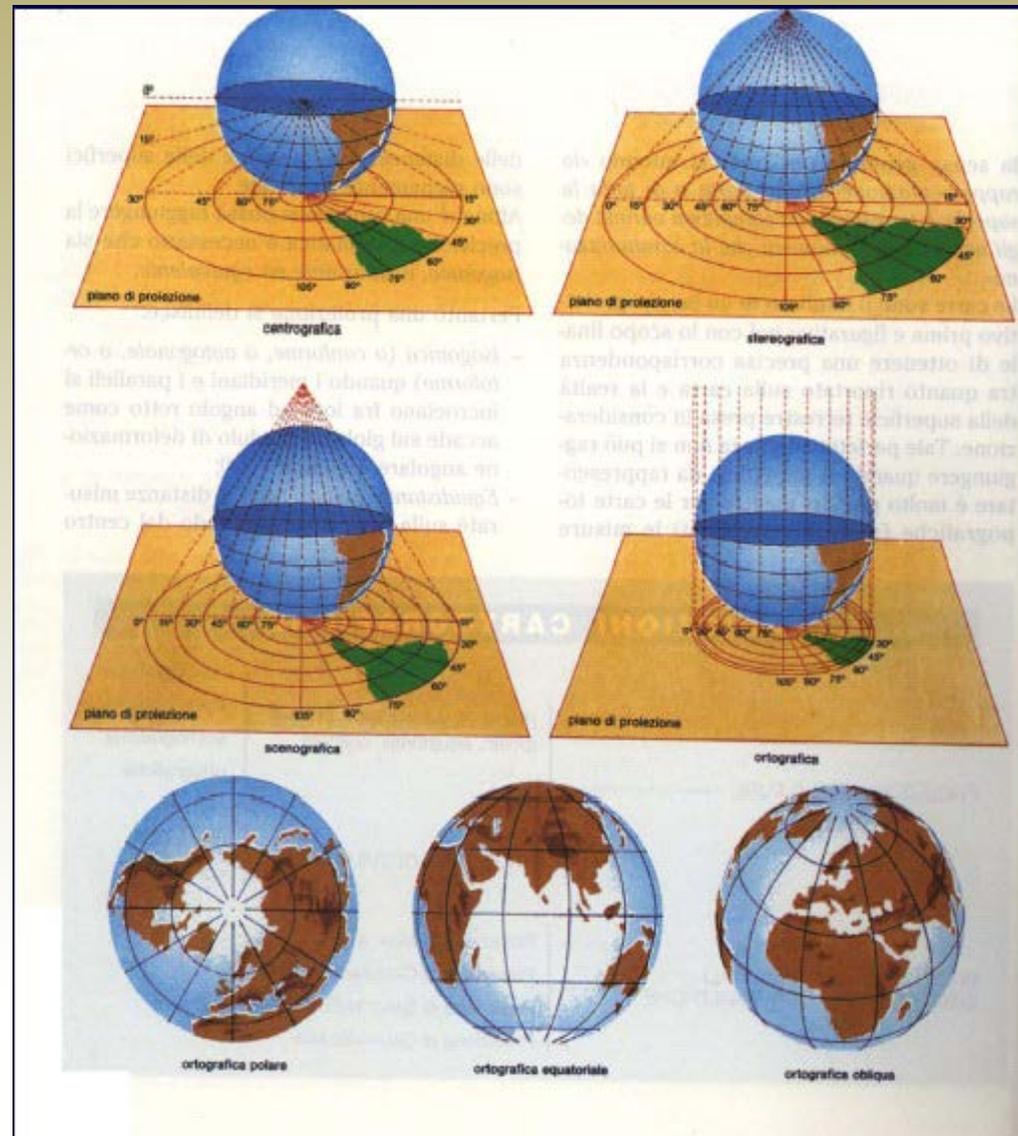
vengono conservati i rapporti fra lunghezze infinitesime nel passaggio da ellissoide a piano della carta

CARTE AFILATTICHE

sono carte che presentano deformazioni di diverso tipo, ma molto piccole

Proiezioni dirette

Le proiezioni cartografiche possono essere realizzate in forma diretta su una superficie piana da un centro di proiezione collocato al centro della terra (**gnomonica**, o **centrografica**), sulla superficie dal lato opposto a quello di tangenza (**stereografica**), al di fuori della superficie terrestre (**scenografica**), o con raggi paralleli (**ortografica**)

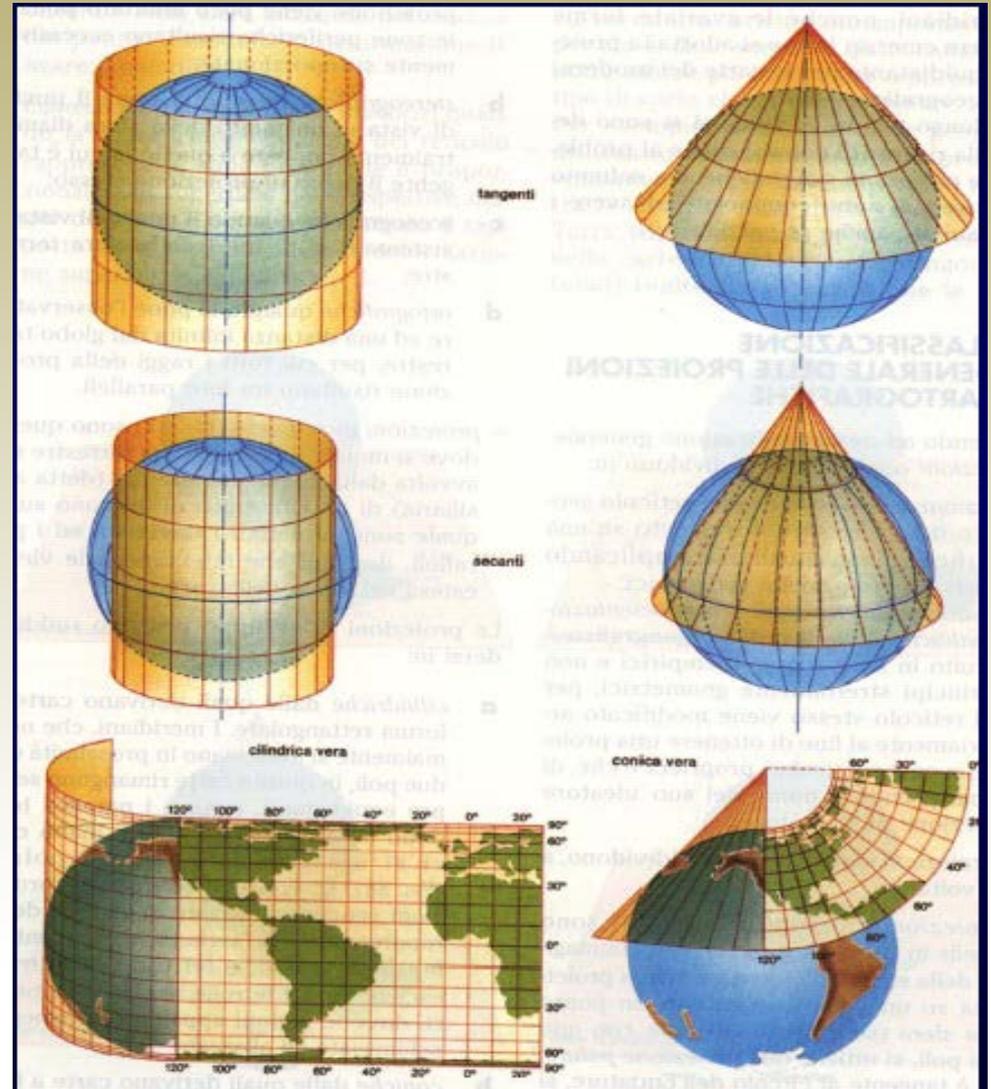


Proiezioni di sviluppo

Allo stesso modo è possibile proiettare la superficie terrestre non su un piano, ma su un'altra superficie in curvatura semplice (cilindro e cono) che poi può essere sviluppata rigorosamente. Il solido di proiezione può essere tangente o secante.

Ogni proiezione, poi, può essere corretta analiticamente definendo comunque una corrispondenza biunivoca fra i punti della superficie terrestre e quelli della mappa.

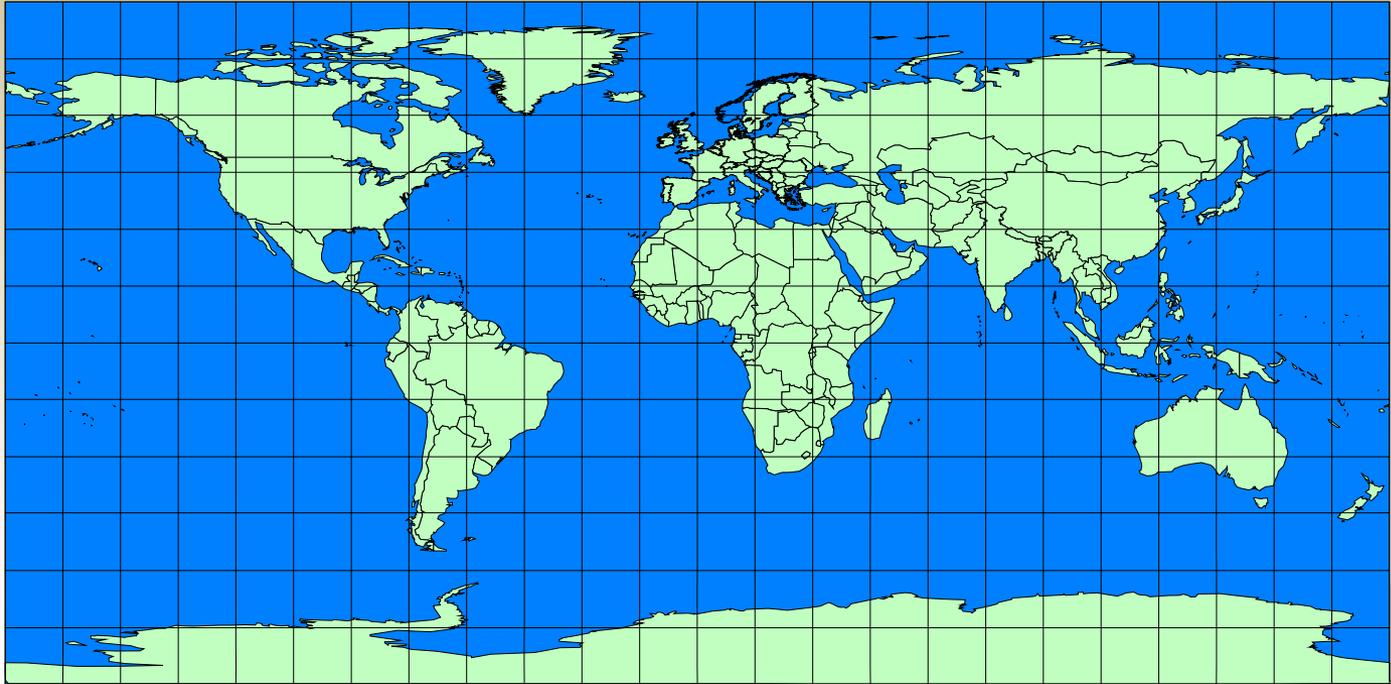
Le combinazioni possibili sono praticamente infinite.





Proiezione geografica conforme

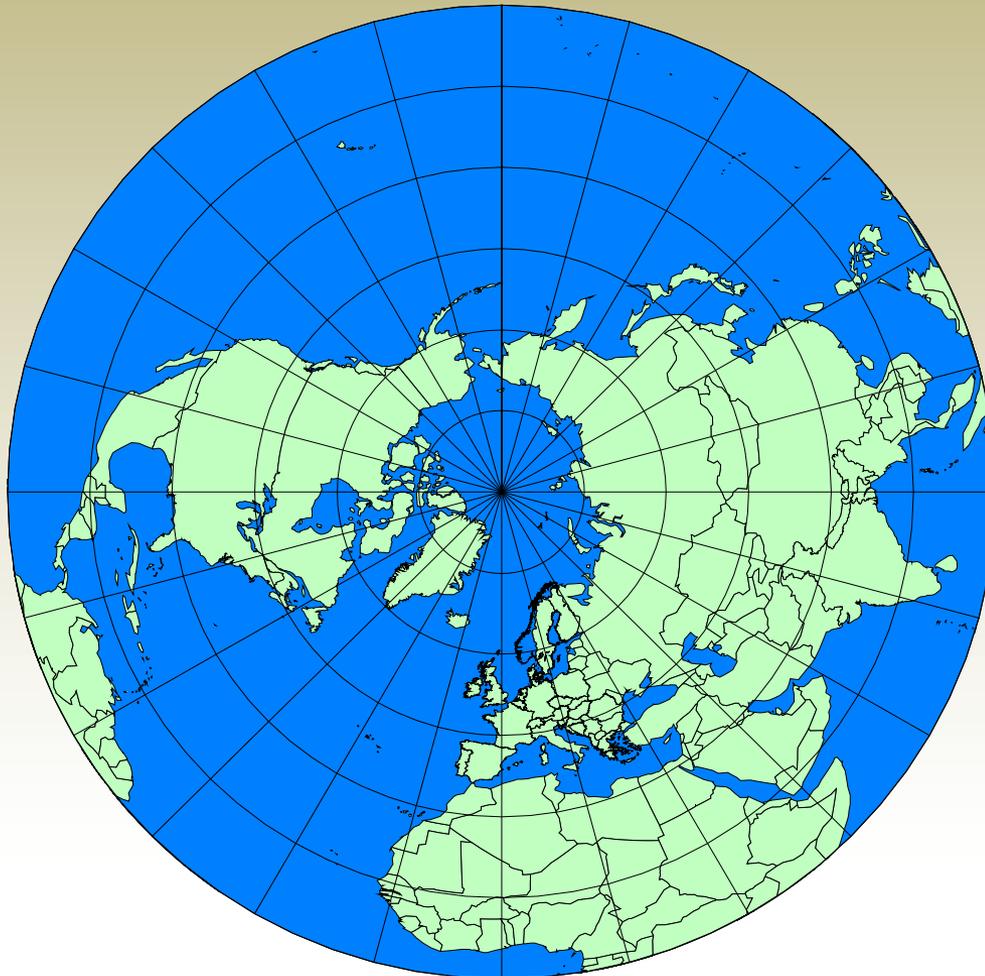
Proiezione geografica conforme





Proiezione Polare

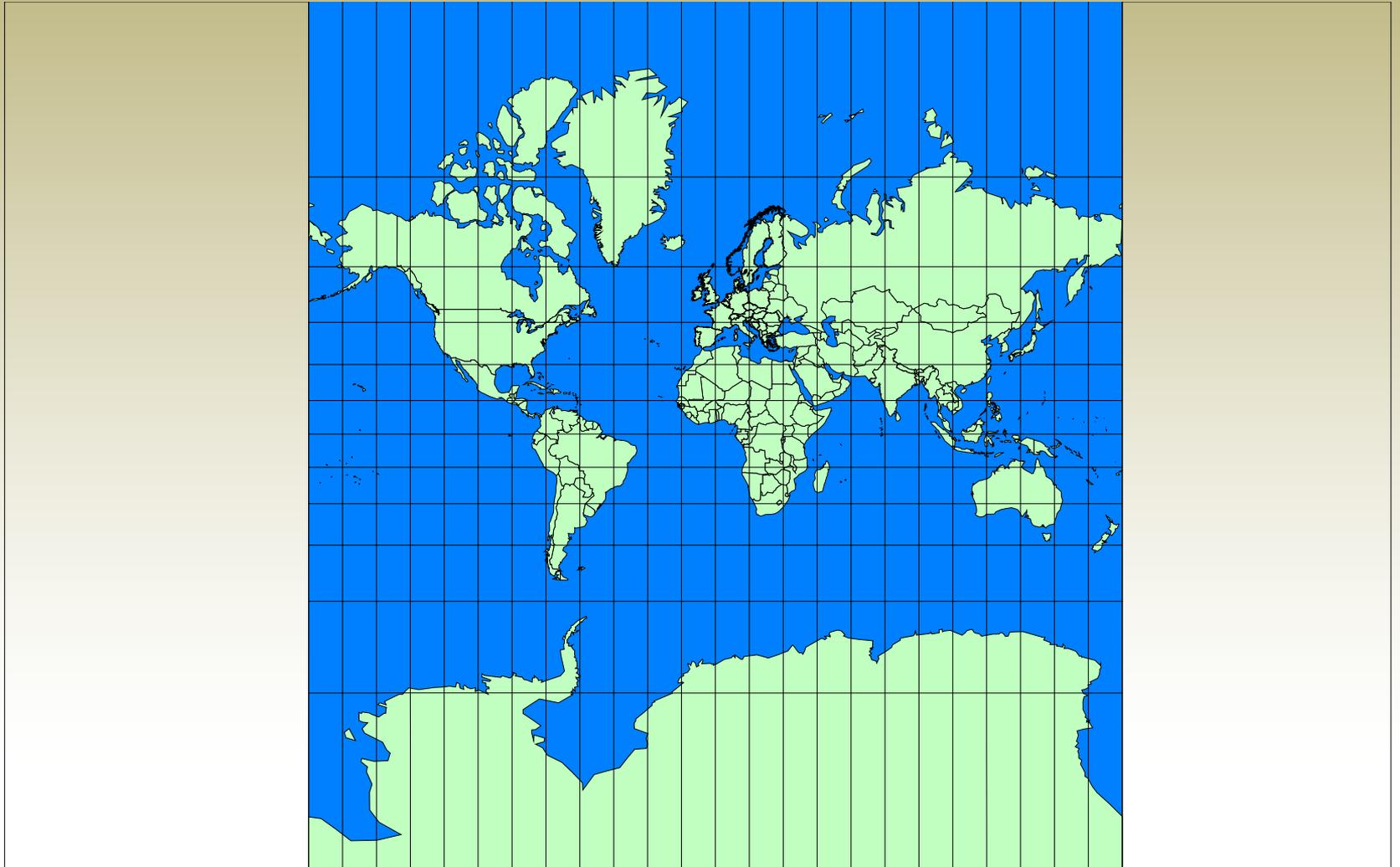
Proiezione azimutale equidistante Polo Nord





Proiezione di Mercatore

Proiezione di Mercatore





I principali ellissoidi

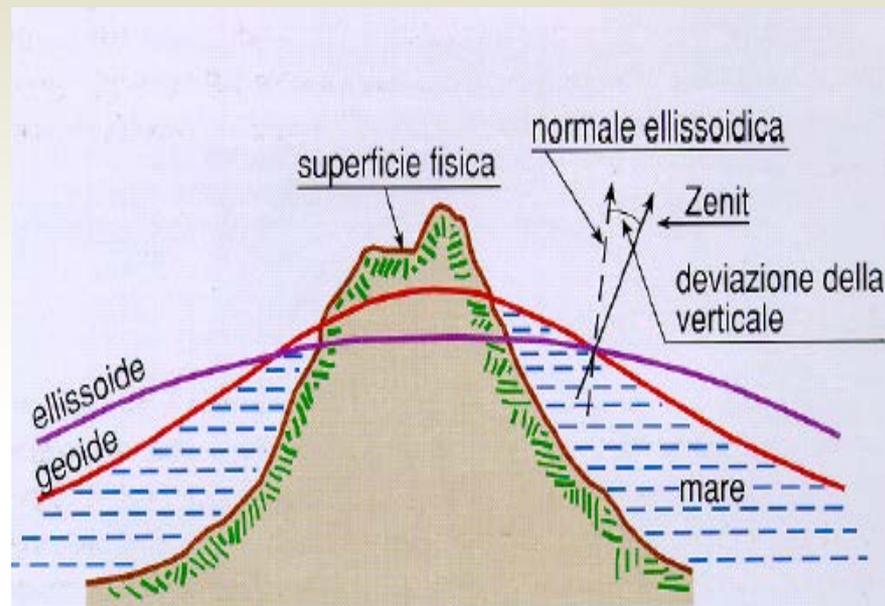
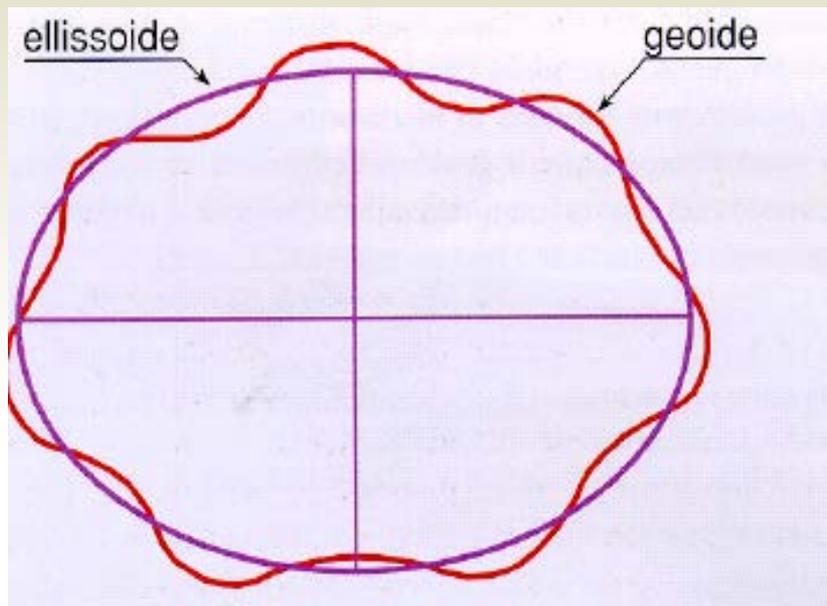
Nel corso del tempo sono stati definiti diversi Ellissoidi: in parte le differenze sono riconducibili a perfezionamenti delle tecniche di misura, ma per la maggior parte le ragioni della scelta di questa o quella soluzione sono di tipo operativo.

Ellissoide	a (semiasse maggiore)	α (rapporto di schiacciamento)
Bessel (1841)	6 377 397	1 / 299.200
Clarke (1880)	6 378 243	1 / 295.500
Helmert (1906)	6 378 243	1 / 298.300
Hayford (1909)	6 378 388	1 / 297.000
Camberra (1980)	6 378 137	1 / 298.257

Problemi altimetrici

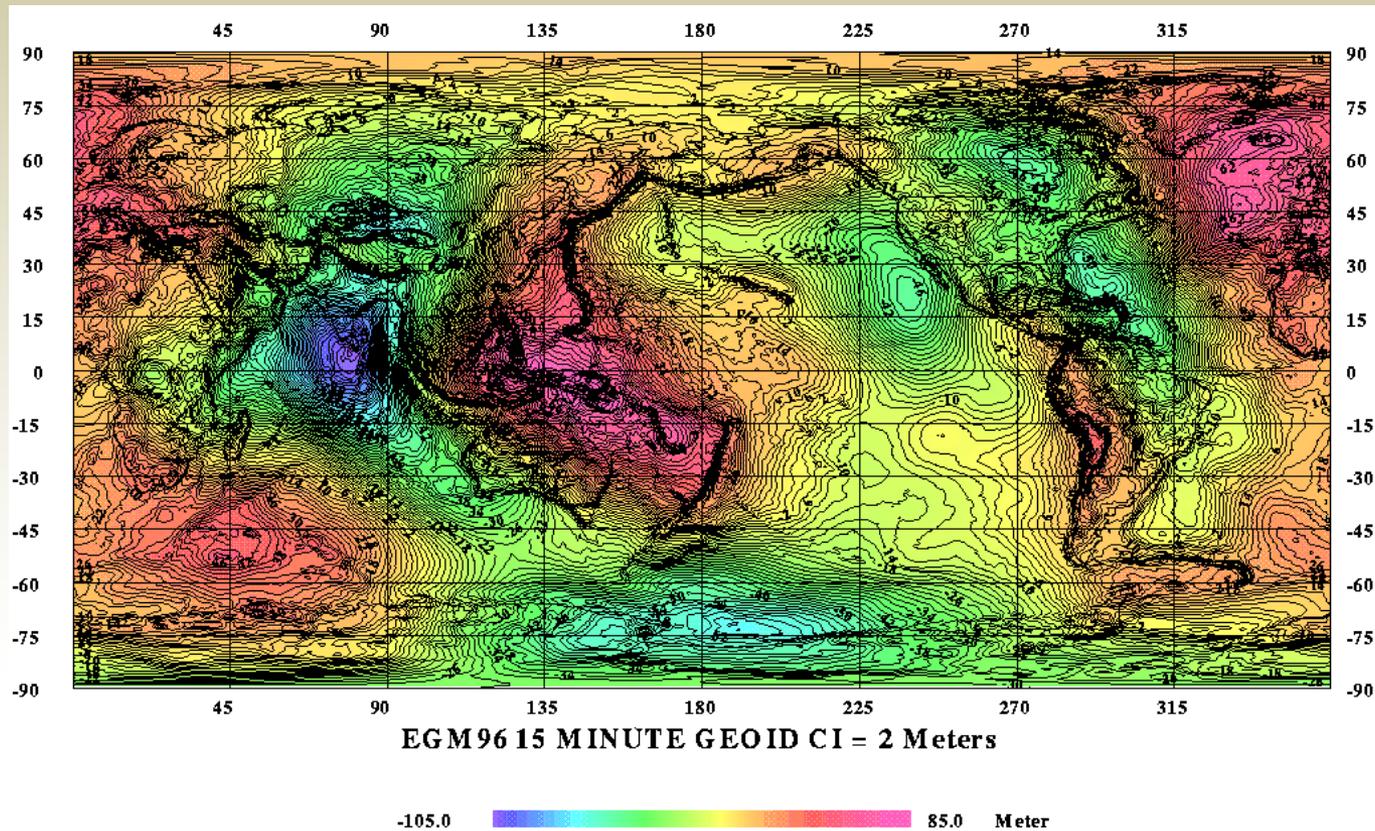
Tra Geoide ed Ellissoide non c'è, ovviamente, coincidenza e sono riconoscibili problematiche importanti, riferite in particolare alla questione altimetrica (quote) e alla direzione della Verticale.

Si definisce **ondulazione del geoide** $N(\phi, \lambda)$ rispetto a un ellissoide di riferimento nel punto di coordinate geodetiche (ϕ, λ) lo scostamento del geoide rispetto all'ellissoide.



Le Oscillazioni geoidiche

Per quanto riguarda le quote occorre innanzi tutto tener conto delle cosiddette “oscillazioni geoidiche”, cioè degli scostamenti del Geoide dalla linearità ipotetica (dell’ordine di alcune decine di metri) dovute alla diversa distribuzione delle masse interne della Terra e quindi alle variazioni del Campo Gravitazionale.



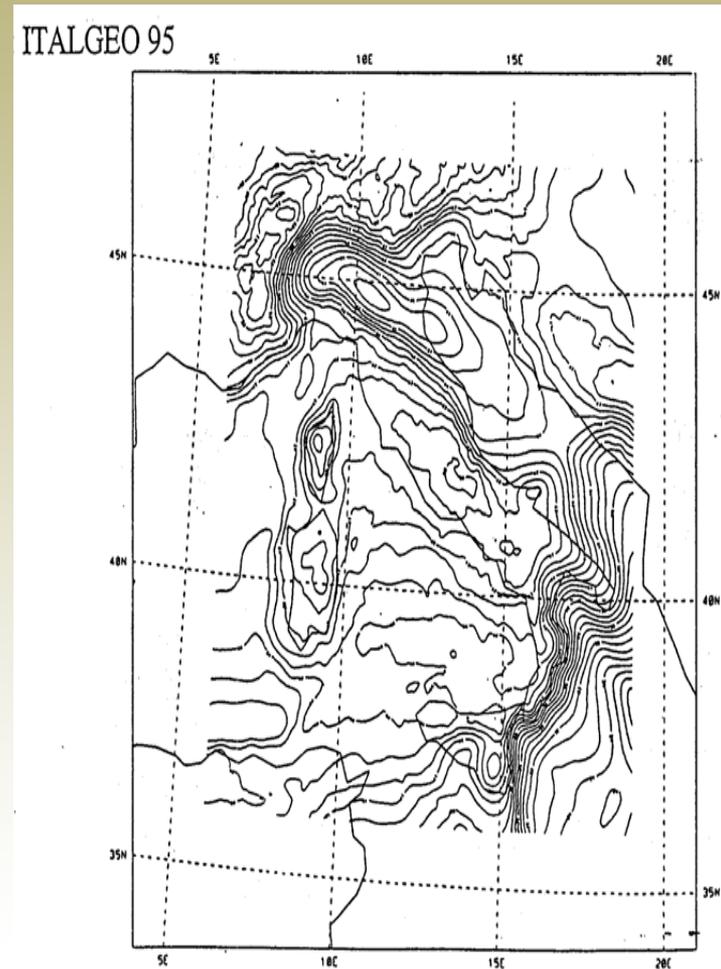
Le Oscillazioni geoidiche 2

ITALGEO è il modello locale ufficiale per l'Italia.

Viene stimato e periodicamente aggiornato dal DIAR del Politecnico di Milano, su convenzione per l'IGMI, che ne cura la distribuzione al pubblico. La stima più recente è ITALGEO99.

Le ondulazioni N sono stimate e memorizzate per i nodi di una griglia regolare in ϕ e λ (con passo di $2' \times 2'$) e sono riferite all'ellissoide GRS80. Per un generico punto del territorio la stima può essere ricavata (mediante interpolazione non banale) a partire dalle stime nei nodi circostanti il punto.

La precisione è decimetrica in assoluto, di circa 1 parte per milione (ppm) in relativo. In figura, ondulazione del geoide secondo il modello ITALGEO95 (Barzaghi et al., 1995)



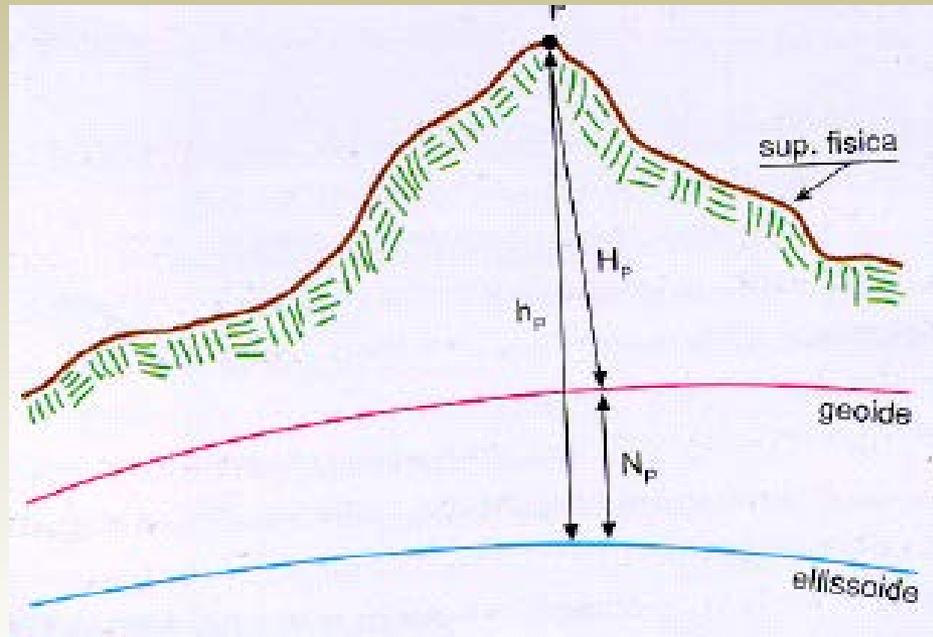


Quota Ellisoidica e Ortometrica

Il riferimento assoluto delle quote deve quindi essere riportato alla superficie fisica del geode e si distinguono due tipi di quote

Quota Ortometrica

Lunghezza dell'arco di linea del campo gravitazionale compreso tra il punto e il Geoide: si misura con livellazioni geometriche corrette con osservazioni gravimetriche



Quota Ellisoidica o Geodetica

Normale portata dal punto alla superficie dell'ellissoide di riferimento: è osservabile da rilevamenti GPS

$$h_p = H_p + N_p$$

La Rete di livellazione nazionale



Le quote sono storicamente materializzate tramite la **Rete di Livellazione Nazionale di Alta Precisione**, riferita al mareografo di Genova.

Il Livello medio del mare (l.m.m.) è una buona approssimazione per rappresentare il Geoid:

Genova: media 1937 – 46

Catania: media 1965

Cagliari: media 1955 - 57

Nazione	dh cm	Nazione	dh cm
Italia	0	Olanda	+33
Austria	+6	Finlandia	+54
Francia	+30	Germania	+31
Spagna	+25	Svezia	+4
Svizzera	+25	Ungheria	+49
Norvegia	+21	Portogallo	+45
Polonia	+49	Rep. Ceca	+49



Orientamento dell'Ellissoide

Tradizionalmente ci si è indirizzati a minimizzare gli scostamenti fra Geoide ed Ellissoide in sede locale, operando ciò che viene definito **ORIENTAMENTO** dell'Ellissoide, un'operazione tramite la quale in un punto particolare vengono fatte coincidere le direzioni delle verticali e l'Ellissoide viene traslato per adattarsi meglio alla superficie geoidica.

La scelta della forma dell'ellissoide e il suo orientamento rispetto al geoide prende nome di DATUM per cui, nel susseguirsi degli anni, si sono avute diverse soluzioni locali.

Recentemente, grazie alle misure da satellite si tende a estendere come abbiamo visto più sopra, l'impiego di un datum globale, tale cioè da costituire una unica superficie di riferimento per tutto il pianeta, consentendo una cartografia regionale perfettamente integrata con quella mondiale.



Il “Datum” geografico

Un *datum* «planimetrico» è il modello matematico della Terra che usiamo per calcolare le coordinate geografiche dei punti. Esso può essere definito rigorosamente come un complesso di prescrizioni ed un complesso di misure tali che le prescrizioni eliminano esattamente le deficienze di rango per la determinazione di tutti i punti legati dalle misure.

In pratica esso è costituito da un set di otto parametri, due di forma dell'ellissoide e sei di posizione e di orientamento, e da una rete compensata di punti, estesa sull'area di interesse, che lo materializza.



Le Reti Geodetiche

Una volta scelto l'Ellissoide e il suo orientamento occorre materializzare le due superfici in modo che risulti possibile impiegarle praticamente per l'esecuzione e la trascrizione delle misure e si possa procedere alla loro rappresentazione.

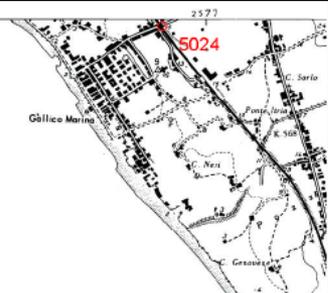
Questa materializzazione avviene, sempre storicamente, tramite l'impiego delle cosiddette “**RETI GEODETICHE**”. Queste reti sono costituite da punti materializzati sul terreno, descritti da monografie che ne consentono la reperibilità, e collegati tra loro da una serie di misure di alta precisione in modo da rendere possibile la definizione geometrica della rete stessa.

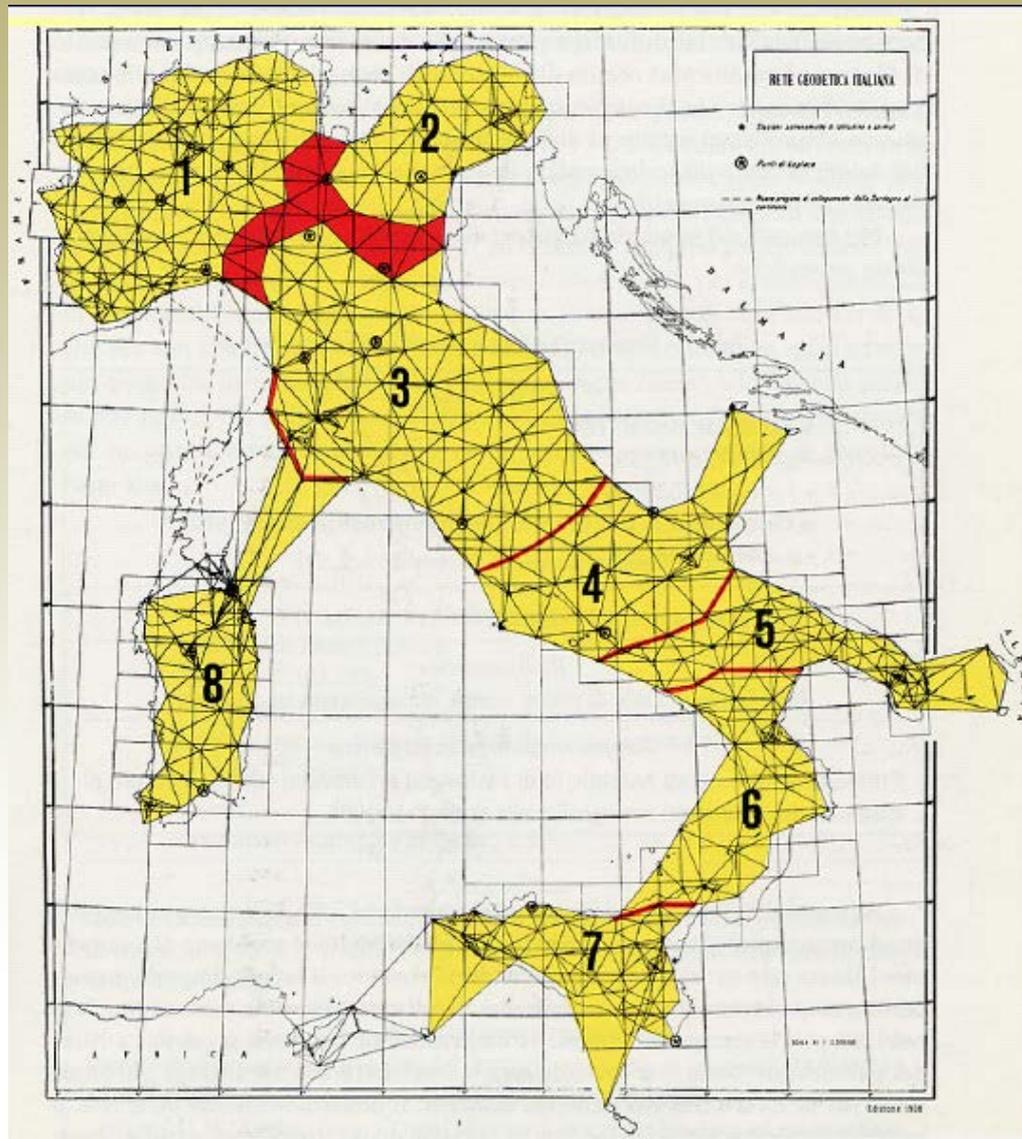
Le reti sono di vario ordine e consentono, gerarchicamente, di estendere all'intero territorio la reperibilità delle superfici di riferimento.

Reti Geodetiche 2

Rete Geodetica Italiana del Primo Ordine

Monografia di un vertice della Rete GPS Calabria

REGIONE CALABRIA - RETE GEODETICA FONDAMENTALE - GPS			
NOME PUNTO: 5024		50 0720 F471	
PROVINCIA: REGGIO CALABRIA	Descriz.: Centro metallico, materializzato su muro di sostegno sulla sinistra della strada.		
COMUNE: REGGIO CALABRIA			
LOCALITA':			
ANNO ISTITUZIONE: 2001	P.P. scemita		
PROPRIETA': Stg.	Tel. Opzione foglio di mappa Catastrale n° p.lla		
COORDINATE			
WGS 84 (geografiche)	UTM WGS 84	ROMA 40 (geografiche i. G.M.)	GAUSS - BOAGA
φ Latitudine 38° 10' 04,9371"	Nord 4224656,818	φ Latitudine 38° 10' 02,6694"	Nord 4.224.657,182
λ Longitudine 15° 38' 46,8645"	Est 556618,466	λ Longitudine 3° 11' 38,4646"	Est 2.576.621,491
H altitudine 49,68	H ellipsoide	H sferoide 9,121	H ortometrica
Accesso			
Da Gallico in direzione Gallico Marina, oltrepassato un sottopasso della Ferrovia, il punto è su muro di sostegno a ~ 30 mt.			
			



Le Reti GPS

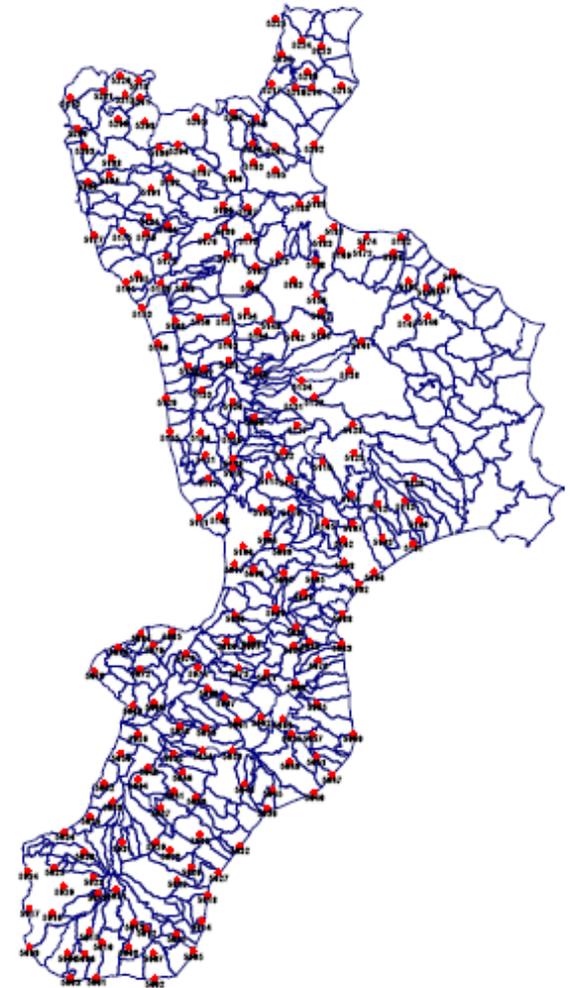
Reti Geodetiche GPS integrate a livello mondiale (EUREF), Italiano (IGMI 1995) e Regionale



- ▲ stazioni SLR e/o VLBI
- vertici di raffittimento EUREF '89
- vertici EUREF '90-'91-'92-'93-'94-'95



- punto coincidente co trigonometrico
- punto di nuova deter
- ▲ punto fisso





Datum Italiani: prima del 1940

Anteriori al 1940

- Ellissoide di Bessel (1841):
 - $a = 6\,377\,397.155$
 - $f = 1/299.1528128$
- Orientamento: Genova IIM (definizione astronomica 1902)
 - Lat. = $44^{\circ} 25' 08.235''$
 - Long. = $0^{\circ} (12^{\circ} 27' 08.400'' \text{ est da Greenwich})$
- Azimut su Monte del Telegrafo $\alpha = 117^{\circ} 31' 08.91''$
- **Realizzazione:** Rete di triangolazione fondamentale del Primo ordine realizzata su 8 basi
- **Rappresentazione cartografica:** Policentrica Naturale (Flamsteed modificata)
 - Riferita al centro di ogni elemento cartografico in scala 1 : 100.000



Datum Italiani: Il Catasto

CATASTO

- **Ellissoide di Bessel (1841):**
 - $a = 6\,377\,397.155$
 - $f = 1/299.1528128$
- **Orientamento: Genova IIM (definizione astronomica 1902)**
 - Lat. = $44^{\circ} 25' 08.235''$
 - Long. = 0° ($12^{\circ} 27' 08.400''$ est da Greenwich)
- **Azimut su Monte del Telegrafo $\alpha = 117^{\circ} 31' 08.91''$**
- **Realizzazione:** Rete di inquadramento costituita dalla triangolazione dell'I.G.M. (limitatamente ai vertici di 1°, 2° e 3° ordine), raffittita con la triangolazione catastale di rete, sottorete e dettaglio)
- **Rappresentazione cartografica :** Cassini-Soldner, con suddivisione del territorio nazionale in zone, riferita ciascuna ad una diversa origine («centro di sviluppo»), coincidente in molti casi con un vertice I.G.M. L'estensione di ogni sistema è in genere di di 70 km dall'origine in direzione Est-Ovest e a 100 km in direzione Nord-Sud.
- La maggior parte delle province è compresa in sistemi di grande estensione (31 origini); il rimanente territorio è suddiviso in sistemi più piccoli (oltre 800 complessivamente).



Datum Italiani: Gauss-Boaga

Gauss - Boaga

- **Ellissoide Internazionale (Hayford):**
 - $a = 6\,378\,388$ $f = 1/297$
- **Orientamento: Roma M. Mario (definizione astronomica 1940)**
 - Lat. = $41^{\circ}55'25.51''$
 - Long. = $0^{\circ}(12^{\circ}27'08.400''$ est da Greenwich)
- **Azimut su Monte Soratte $\alpha = 6^{\circ}35'00.88''$**
- **Realizzazione:** Rete di triangolazione fondamentale dell'I.G.M. (calcolo di compensazione del 1908-1919) e reti di raffittimento
- **Rappresentazione cartografica: Conforme di Gauss**
 - territorio nazionale praticamente compreso in due fusi, denominati rispettivamente Ovest ed Est, di 6° di ampiezza, con meridiani centrali a $-3^{\circ}27'08.400''$ e $2^{\circ}32'51.600''$ di longitudine da M. Mario
- **fattore di contrazione $m_0 = 0.9996$**
- **falsa origine per le coordinate Est:**
1500 km (fuso Ovest) - 2520 km (fuso Est)

Datum Italiani: U.T.M.



UTM – European Datum 1950

- **Ellissoide Internazionale (Hayford):** $a = 6\,378\,388$ $f = 1/297$
- **Orientamento:** medio europeo 1950 (ED50). Origine Longitudini: Greenwich
- **Coordinate di Monte Mario nel sistema UTM:**
 - Lat. = $41^{\circ}55' 31.487''$ Long. = $12^{\circ} 27' 10.93''$ est da Greenwich
- **Realizzazione:** selezione delle reti di 1° ordine europee; il calcolo di compensazione è stato eseguito nel 1950 dall'A.M.S. (Army Map Service), poi D.M.A. (Defence Mapping Agency), oggi N.I.M.A. (Imagery Mapping Agency). Le coordinate geografiche sono state ricalcolate in base a questa compensazione e al datum geodetico di cui sopra, con origine delle longitudini su Greenwich.
- **Rappresentazione cartografica:**
 - **Conforme di Gauss, proiezione Universale Trasversa di Mercatore**
 - territorio nazionale praticamente compreso in due fusi di 6° di ampiezza, con meridiani centrali a 9° e 15° di longitudine da Greenwich (fusi 32 e 33) + un piccolo pezzo nel 34.
 - fattore di contrazione $m_0 = 0.9996$
 - falsa origine per le coordinate Est: 500 km Est



Sistemi geocentrici

Sistemi Geocentrici

- **ECEF**: Earth Centered – Earth Fixed
 - WGS 60
 - WGS66
 - WGS72
- **WGS84**
- **1988**: l'**IERS** (Istituto per la rotazione terrestre) definisce **ITRS** (International Terrestrial Reference System) e pubblica annualmente i “Frame” (**ITRF**) che contengono le coordinate e i dati delle reti mondiali **VLBI** (very long baseline interferometry), **LLR** (Lunar laser ranging), **SLR** (Satellite laser ranging) e **GPS**.

WGS84 “World Geodetic System 1984”

- Il sistema geodetico mondiale WGS84 è il sistema di riferimento adottato nel posizionamento mediante satelliti GPS. È costituito da una terna cartesiana OXYZ con origine nel centro di massa convenzionale della Terra ed asse Z diretto secondo l’asse di rotazione terrestre convenzionale. Alla terna è associato un ellissoide con centro nell’origine ed assi coincidenti con quelli della terna stessa (ellissoide geocentrico).
- **Ellissoide:** $a = 6\,378\,137$ - $f = 1/298.257223563$ (Camberra 1980)
- **Realizzazione globale:** Rete di stazioni permanenti gestite dal DoD (Dipartimento della Difesa) USA Costellazione satelliti GPS.
- **Realizzazione europea:** Rete EUREF89 = ETRF89
- **Realizzazione italiana:** Rete IGM95
- **Rappresentazione cartografica:** Al WGS84 non è associato ufficialmente alcun sistema cartografico, anche se è sempre più frequente l’adozione, già attuata dall’I.G.M., della UTM con inquadramento WGS84 (in analogia all’UTM-ED50), denominato UTM-WGS84 o, più correttamente, UTM-ETRF89.

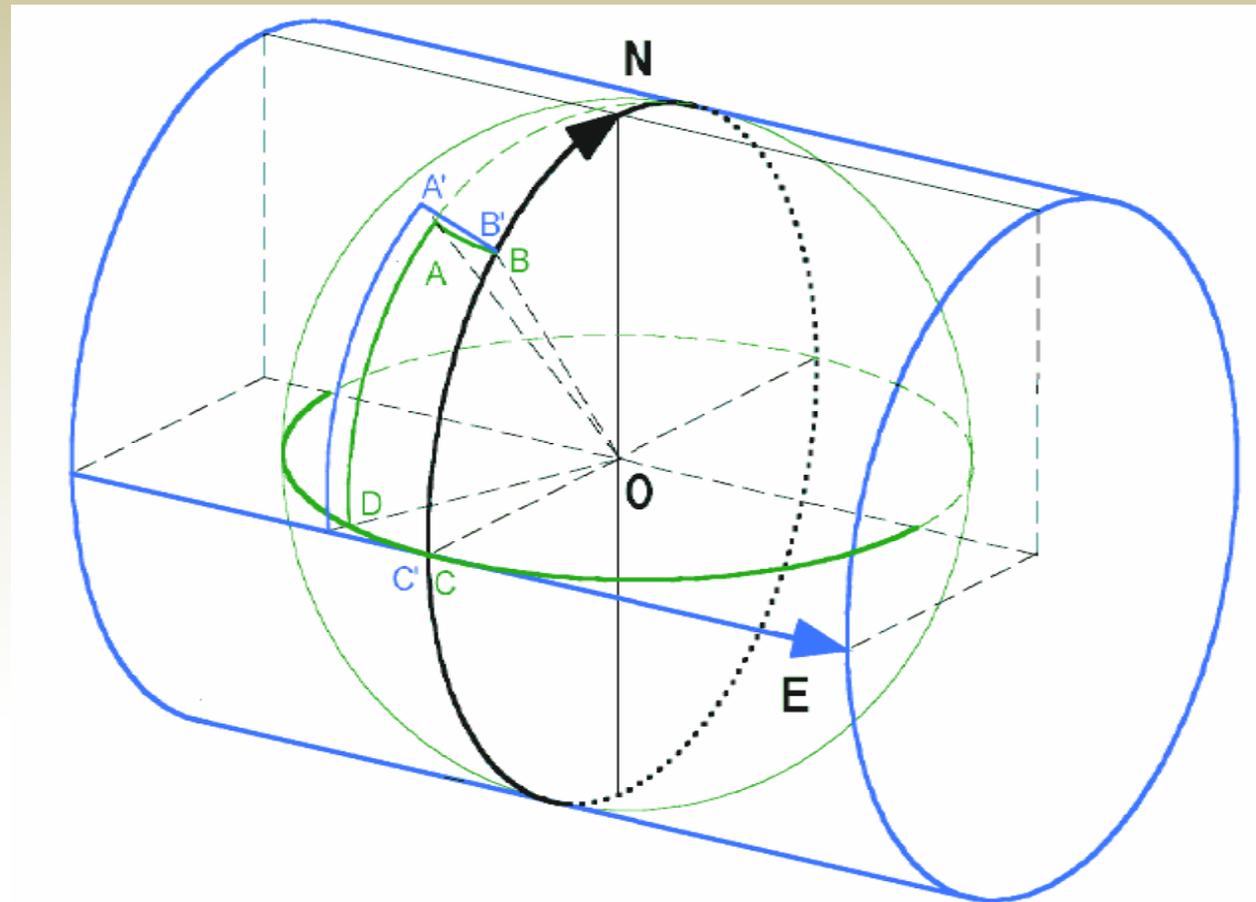


Proiezione **U**niversale **T**rasversa di **M**ercatore



Per la realizzazione della cartografia alle varie scale in Italia (e, sempre di più, nel mondo intero) si utilizza la rappresentazione di Gauss della Proiezione Universale Trasversa di Mercatore.

È **costruita analiticamente**. Dal punto di vista geometrico equivale ad una proiezione cilindrica inversa, cioè **l'asse del cilindro è ortogonale all'asse di rotazione terrestre**.



La Rappresentazione di Gauss



Quando parliamo di *Rappresentazione di Gauss* della Proiezione Universale Trasversa di Mercatore intendiamo un sistema di coordinate cartesiane piane N ed E e due funzioni f e g che mettono in relazione un generico punto P dell'ellissoide, dato in coordinate ellissoidiche ϕ e λ , e il punto corrispondente P' del sistema cartesiano.

Le formule di trasformazione f e g per passare dal sistema ellissoidico ad un sistema piano N , E sono state ricavate da Gauss imponendo le seguenti condizioni:

1. il meridiano ellissoidico assunto come origine delle longitudini deve trasformarsi nell'asse delle ordinate N ;
2. l'equatore ellissoidico deve trasformarsi nell'asse delle ascisse E ;
3. un arco di lunghezza m sul meridiano origine deve trasformarsi in un segmento di uguale lunghezza sull'asse delle ordinate N ;
4. l'angolo α formato da due direzioni uscenti da un punto sull'ellissoide deve mantenersi uguale a quello delle corrispondenti direzioni riportate nella carta;
5. il coefficiente di deformazione, pur variando da punto a punto, deve essere uguale in tutte le direzioni uscenti da un punto.

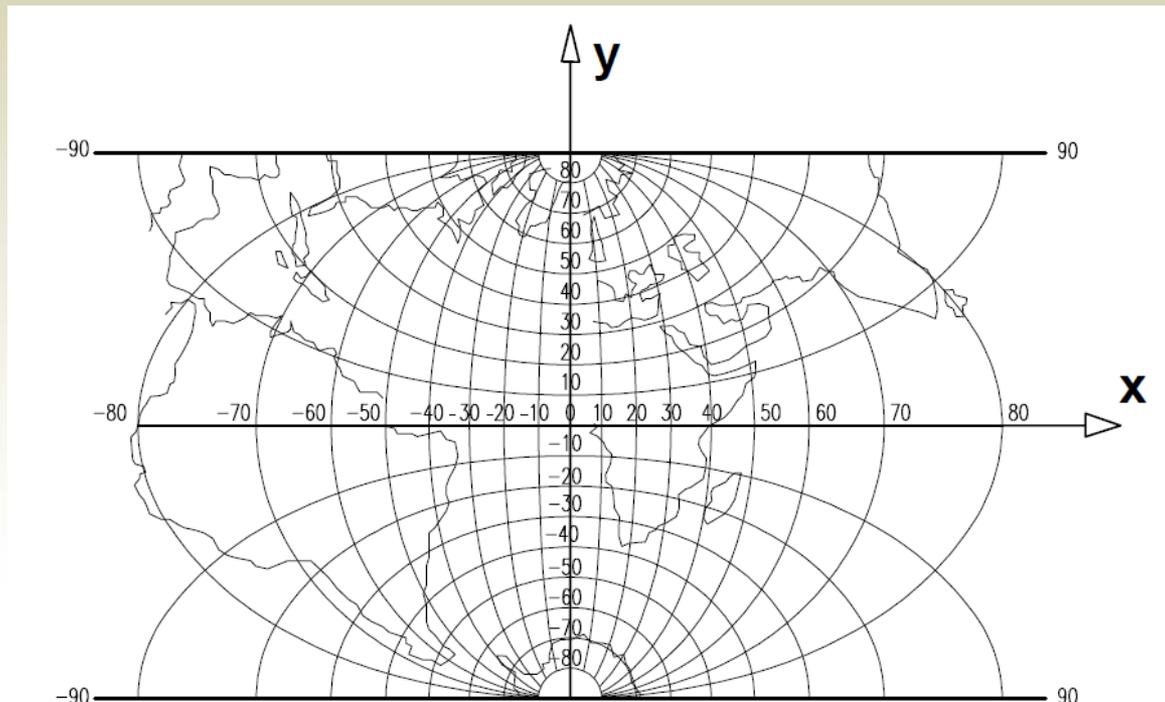


La Carta di Gauss



Le trasformate del meridiano centrale di tangenza e dell'equatore sono rette e coincidono con gli assi del sistema di riferimento. Le trasformate dei paralleli sono curve approssimativamente paraboliche; quelle dei meridiani sono più complesse e sono via via più inclinate con l'aumentare di j e l . Entrambe queste famiglie di curve sono tra loro ortogonali e simmetriche rispetto agli assi di riferimento

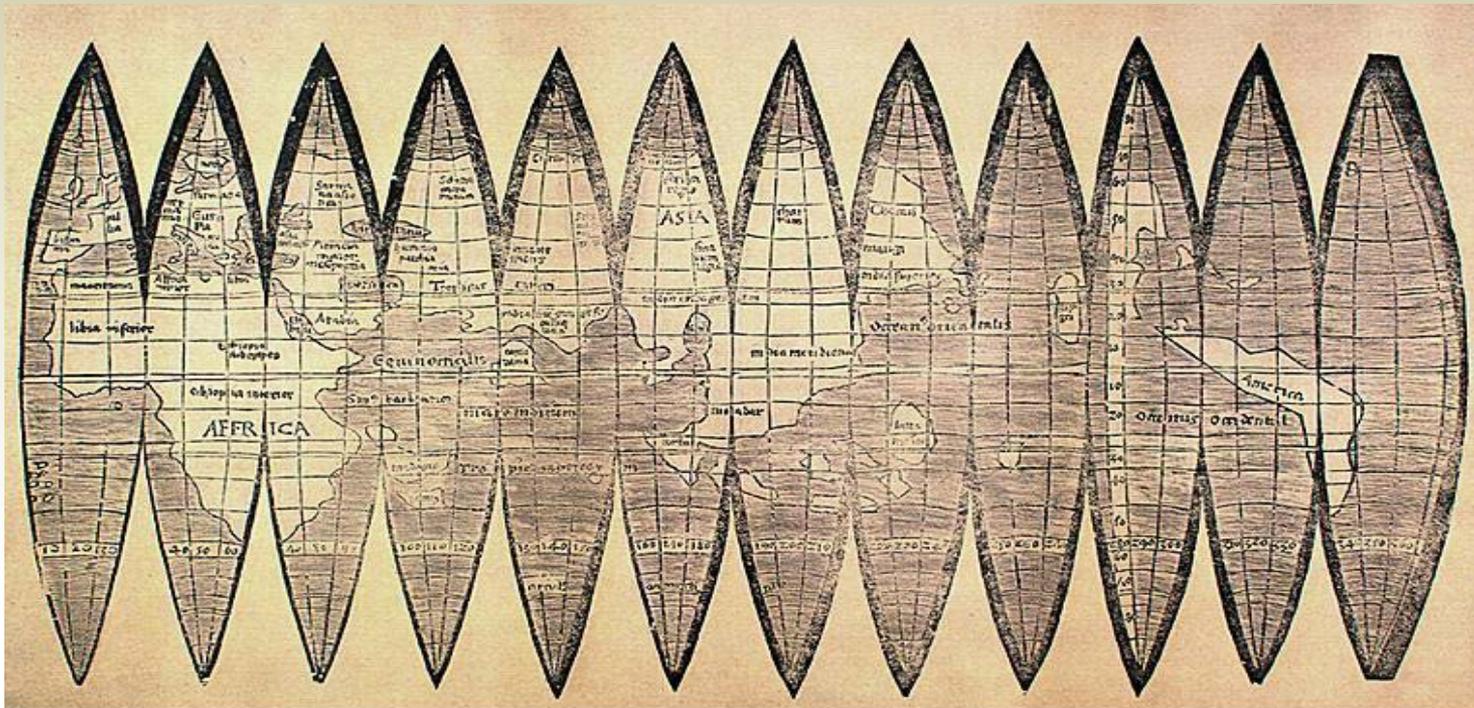
Si verifica che per $j = 0$, i moduli di deformazione lineare m_0 e m_p sono uguali e quindi la carta sull'equatore è sia conforme che equivalente.



I "Fusi" e l'America



Sul meridiano centrale la rappresentazione è equidistante. La deformazione cresce rapidamente quando ci si allontana dal meridiano centrale; per questo motivo si è scelto di rappresentare la superficie terrestre mediante diversi fusi, cioè di suddividendo l'ellissoide in tanti spicchi delimitati da due meridiani e di rappresentare ogni fuso considerando il meridiano centrale come meridiano di riferimento.

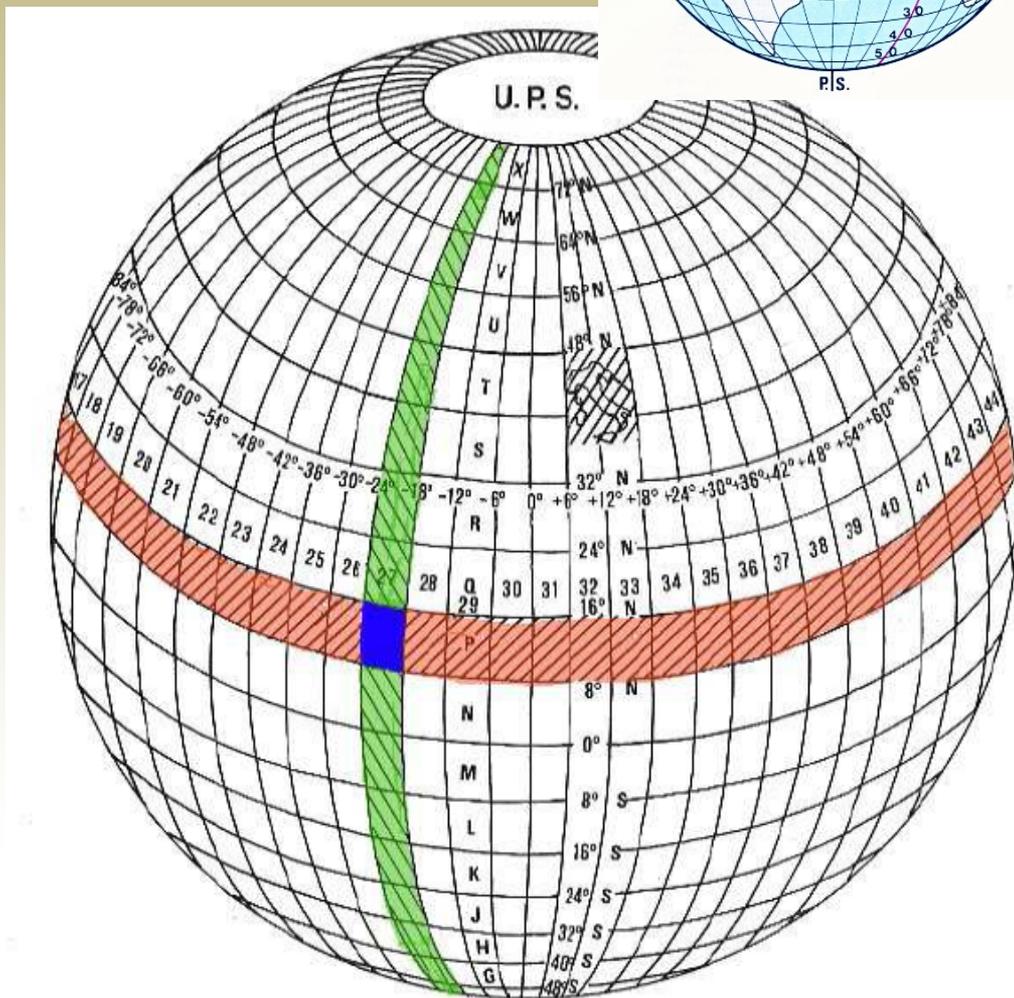
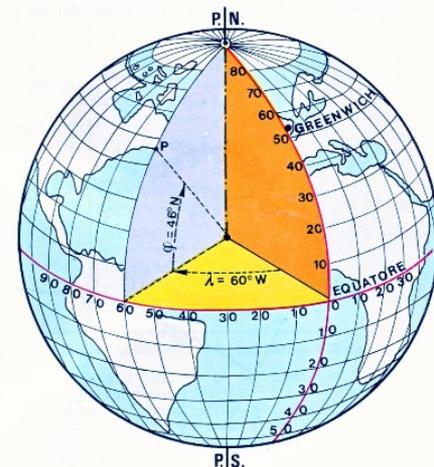


Planisfero del 1507 di Martin Waldseemüller

Il Sistema UTM (Mondo)

Il sistema **U.T.M.**, è utilizzato come base per la cartografia mondiale. La rappresentazione è costituita da 60 fusi di ampiezza 6° assumendo come meridiano fondamentale l'antimeridiano di Greenwich, per l'Italia i fusi 32, 33 e 34.

Ogni fuso è suddiviso in 20 zone di 8° di latitudine ciascuno, l'Italia è compresa nella zone S e T. Quindi, si rappresenta in un unico riferimento x, y una determinata porzione di territorio i cui punti abbiano differenze di longitudine inferiori o uguali a 3° , rispetto al proprio meridiano centrale.



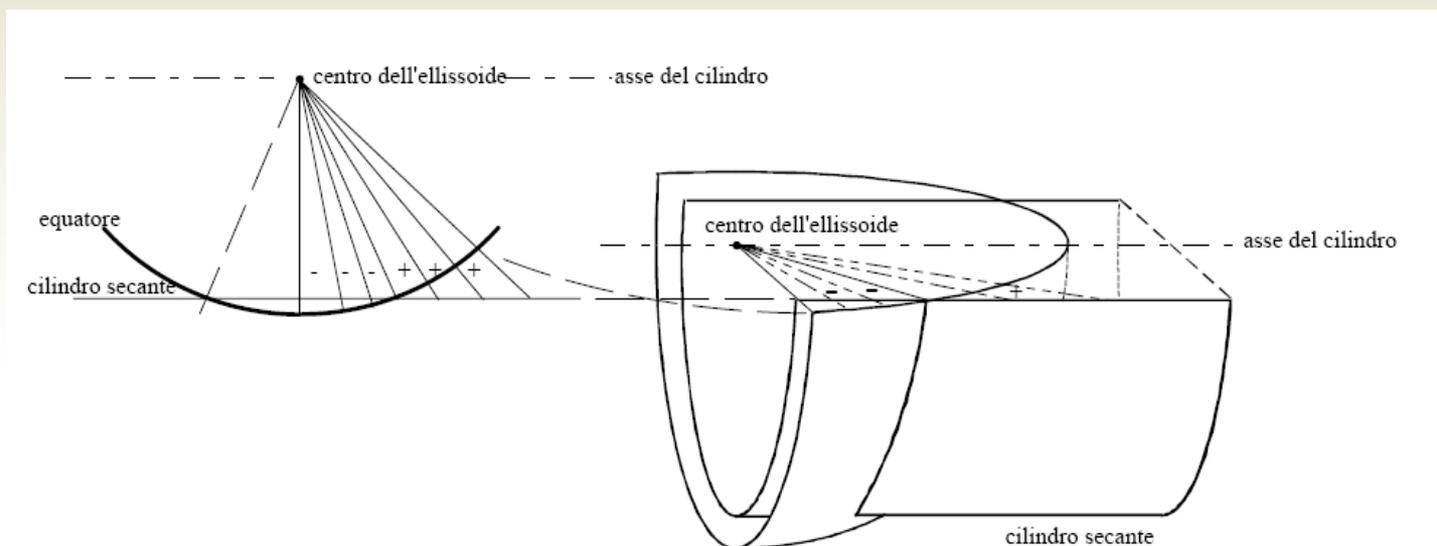
Il Modulo di Deformazione lineare



Il modulo di deformazione lineare dipende dalla longitudine rispetto al meridiano di tangenza del cilindro e, semplificando, vale $m_l = 1 + (\lambda^2/2 \cos^2\phi)$ e varia tra **1** ($\lambda = 0^\circ$) e **1.0008** ($\lambda = \pm 3^\circ$). In questo intervallo quindi le deformazioni si considerano accettabili. La dimensione del “Fuso” è stata quindi stabilita in $\pm 3^\circ$ rispetto al meridiano centrale, raggiungendo il valore complessivo di 60 fusi.

Al fine di contenere ulteriormente il valore assoluto delle deformazioni, si moltiplicano le coordinate per il **coefficiente 0.9996** definito **Fattore di Contrazione** allo scopo di ridurre a metà le deformazioni massime. In tal modo il modulo varia da 0.9996 sul meridiano centrale a **1.0004** agli estremi del fuso, cioè $\pm 4 \text{ ‰}$.

In pratica ciò significa che la proiezione avviene su un cilindro non tangente al meridiano centrale, ma secante in una posizione intermedia.

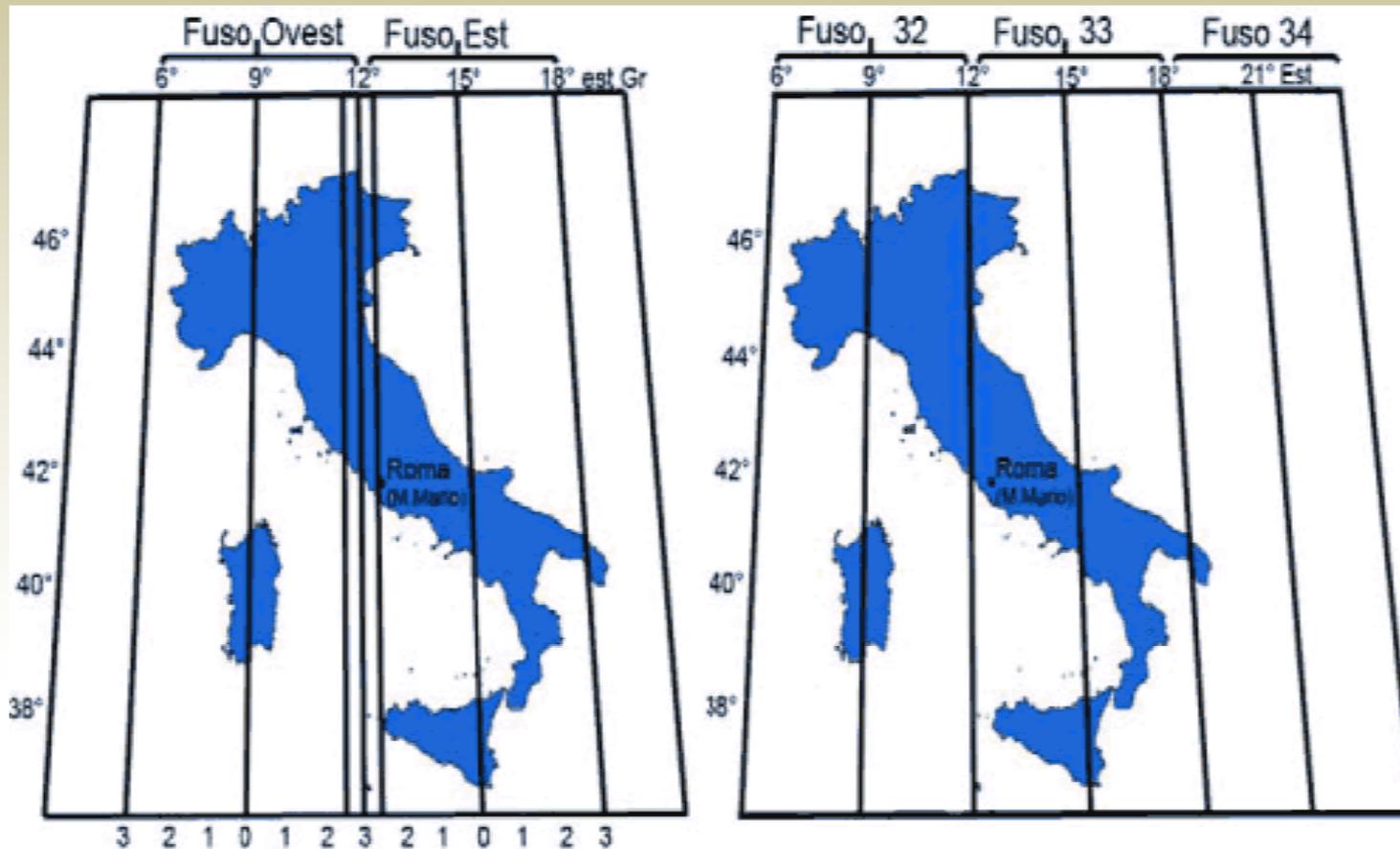




I "Fusi" Italiani



L'Italia si trova rappresentata in due fusi contigui, Est e Ovest nel sistema Gauss-Boaga, 32 e 33 (e un piccolo pezzo nel 34) nel sistema UTM ED 50. I meridiani centrali dei fusi sono il 9° e il 15° .





I Datum Italiani

Tutti i sistemi di riferimento utilizzati oggi in Italia per la cartografia generale e per la produzione delle nuove carte tecniche regionali utilizzano questa rappresentazione nelle sue varie declinazioni.

Rappres. Cartograf.	Datum	Ellissoide	Fuso Merid. Centr. Falsa orig.	Fuso Merid. Centr. Falsa orig.	Fatt. compress.
Gauss Boaga	Roma 40	Internazionale (Hayford)	Ovest	Est	0.9996
			9°	15°	
			1 500 000 m	2 520 000 m	
UTM	ED 50	Internazionale (Hayford)	32	33	0.9996
			9°	15°	
			500 000 m	500 000 m	
UTM	WGS 84	GRS80	32	33	0.9996
			9°	15°	
			500 000 m	500 000 m	



Conclusioni

La disponibilità di reti di inquadramento di alta precisione sempre più diffuse e capillari, assieme all'espansione sempre maggiore delle tecniche GPS per il rilievo di dettaglio consentono di estendere anche alle grandissime scale l'impiego delle logiche cartografiche nelle metodiche di rilevamento.

Anche alla scala urbana e monumentale, le applicazioni di cartografia tecnica a grande e grandissima scala (1:500 ~ 1:200) realizzata con criteri rigorosi di georeferenziazione consentono di estendere anche al rilievo di dettaglio la possibilità di essere inserito direttamente nel grande processo di accumulazione ordinata dei dati territoriali che si sta realizzando a livello planetario.

Google Earth ...



Il rilievo dell'Arena di Verona

