

riate forme di banche dati, il ruolo prevedibile dei sistemi di rilevamento, di rappresentazione e dei sistemi informativi geografici è imponente. Tutti coloro che si occupano di tali sistemi evidenziano sistematicamente la necessità di una base geometrica omogenea, estesa a tutto il territorio nazionale. L'omogeneità richiesta si riferisce ovviamente in primo luogo all'adozione di un unico sistema di coordinate. Un efficace ed esplicito sistema di riferimento è dunque strumento indispensabile per un appropriato e corretto uso delle informazioni territoriali.

Accade oggi che tanti utenti di carte non conoscitori di coordinate diventino utenti di coordinate non conoscitori dei sistemi di riferimento. D'altra parte i processi di globalizzazione nel trattamento delle informazioni impongono l'adozione di un unico sistema di riferimento e le metodologie di acquisizione delle informazioni di posizione lo consentono.

Con la crescita delle applicazioni riferite ad osservazioni satellitari, il sistema di riferimento globale assume una importanza sempre maggiore sia nel settore della navigazione terrestre, marittima ed aerea, che nel campo cartografico e geodetico. Soprattutto una sua corretta realizzazione consente di poter mettere in relazione dati riferiti a sistemi di riferimento locali riducendoli tutti ad un sistema comune: sostituendo tanti sistemi di riferimento locali con uno globale è possibile far uso in maniera estremamente semplificata sia di prodotti cartografici che geodetici. L'avvento della cartografia numerica e del posizionamento satellitare impongono dunque una revisione dei sistemi di riferimento in uso e la loro sostituzione con un unico sistema appropriato, completo e d'immediata utilizzazione anche da parte di chi non abbia approfondite conoscenze geodetiche.

L'Italia è peraltro uno dei paesi più ricchi di sistemi di coordinate. Fattori contingenti hanno sicuramente determinato questo stato di cose, ma anche la mancanza di una visione globale ritenuta a suo tempo non essenziale, o meglio la persistenza utilitaristica di una visione provinciale dei problemi del rilevamento. La mancanza di standard nelle convenzioni può portare ad errori ed equivoci ad alto rischio e la mancanza di omogeneità nei sistemi di riferimento in uso può indurre ad una visione catastrofica della situazione cartografica nazionale, ma la confusione non è una caratteristica solo italiana: le considerazioni delle forze armate USA dopo la guerra del Golfo hanno evidenziato che c'è stata una confusione totale su sistemi di riferimento, ellissoidi e reticolati. La lezione principale è stata che bisogna sapere ciò che si fa e che non si può pretendere che ogni utente sia un geodeta.

Nel Pacifico ciascuna compagnia petrolifera ha i propri parametri di trasformazione dal WGS84 al sistema locale, cosicché punti posti al confine delle aree di rispettiva competenza hanno coordinate che differiscono anche di centinaia di metri. Ciò vuol dire che una ditta di rilievi usa uno stesso punto ben materializzato per differenti clienti, ma deve usare per quel punto differenti coordinate per ciascun cliente. Lo stesso accade per i confini di stato su terra; tragica è poi la

delimitazione delle acque territoriali e degli spazi aerei.

L'ellissoide di Everest (1830) è un classico della confusione: definito originariamente in piedi da George Everest per i rilievi dell'India, successivamente trasformato in metri per mezzo di differenti fattori di conversione e quindi "pseudo-clonato", dà luogo a differenti coordinate per gli stessi punti in sistemi di riferimento che formalmente appaiono gli stessi (stesso ellissoide e stesso orientamento), salvo scoprire, approfondendo l'analisi di documentazione non sempre disponibile, che le dimensioni dell'ellissoide di riferimento, univocamente definite all'origine, sono diverse in funzione di chi ha operato il cambiamento di unità di misura. Altrettanta confusione è riscontrabile tra i sistemi cartografici.

La potenzialità di un sistema informativo è basata soprattutto sulla possibilità di correlare informazioni di vario tipo secondo logiche flessibili e adattabili alle specifiche esigenze dell'utente. La particolarità dei sistemi informativi geografici consiste nel fatto che le informazioni, oltre ad avere una definizione quantitativa e/o qualitativa intrinseca, sono anche collocate spazialmente, cioè definite con affidabilità nota nella loro posizione spaziale rispetto ad un sistema di riferimento unificato. È allora intuitivo che uno dei più immediati e potenti strumenti di correlazione tra le informazioni è certamente costituito dalle coordinate che a ciascuna informazione vengono assegnate per definirne la posizione e attraverso cui si possono determinare relazioni di vicinanza, influenza, conflitto, appartenenza e così via. Tale potere di correlazione è pienamente sfruttabile se, prima dell'immissione delle informazioni, è stato correttamente definito il sistema di riferimento. Solo a tali condizioni la correlabilità spaziale tra dati qualitativi potrà diventare strumento efficace di ricerca ed interrogazione; e solo a tali condizioni si potrà sfruttare compiutamente l'ingente patrimonio di dati territoriali già acquisito e consegnato dall'opera dei rilevatori agli archivi cartacei (cartografici e alfanumerici). Infatti, comunque si articoli l'interazione tra utente e sistema informativo, essa non può non partire dalle domande elementari del *dove* (cioè in corrispondenza di quali coordinate si trovi un elemento informativo presente nel sistema o vada inserita una nuova informazione) e/o del *cosa* (cioè quali e quanti elementi informativi ricadono totalmente o parzialmente in una data area geografica definita da una sequenza di coordinate).

Il problema base della georeferenziazione è dunque la determinazione di posizione e la valutazione della relativa affidabilità; è l'attività fondamentale del Topografo, propedeutica a tutti gli altri campi di applicazione. Essa può essere considerata un fine per quella figura professionale, di modesto interesse per altri fino ad alcuni anni orsono. Lo scenario è in rapido e profondo mutamento...

Risulta dunque necessario esaminare i problemi posti dall'esistenza, storicamente consolidata, di differenti sistemi di riferimento rispetto ai quali sono referenziati i dati territoriali, ma tra i quali è spesso difficile, e talvolta impossibile, istituire

delle metodologie di trasformazione generalizzate. I parametri che descrivono compiutamente il sistema di riferimento e la rappresentazione cartografica adottata dovrebbero essere le informazioni minime di corredo quando lo strumento "coordinate" viene offerto all'utente, sia in forma analogica che digitale. Solo tali parametri consentono di definire univocamente a che cosa le coordinate sono associate nel mondo reale.

Purtroppo molte istituzioni e molti istitutori in giro non sembrano capaci di fornire tali informazioni ai propri utenti o d'impartire questo elementare insegnamento ai propri studenti; forse tentano di trattenerne in loro dominio il mistero della conoscenza?

No, piuttosto accade, come per le cose più comuni della vita, che mai ci si chieda come esse abbiano avuto origine, chi le abbia fatte e con quali mezzi e di quale travaglio esse siano il frutto; quasi fossero sempre esistite. Sono queste le cose che, per essere le più familiari e indispensabili, e continuamente sottomano, non stimolano in noi la molla della sorpresa a sollecitare la curiosità di sapere. Alcune di queste cose tanto familiari e indispensabili mi pare siano proprio la carta topografica e le coordinate, che ognuno di noi ha da sempre tra le mani; esse risultano per molti come un diritto acquisito e fondamentale del quale non occorre ricercare l'origine, così come mai ci si preoccupa delle cose più evidenti e naturali.

Sistemi di riferimento: definizione, realizzazione e utilizzazione

La definizione e la realizzazione di sistemi di riferimento appropriati per il posizionamento sono da sempre considerati un problema fondamentale della geodesia. Infatti la determinazione di precisione di punti sulla superficie terrestre è uno dei principali obiettivi di questa scienza e "i punti" costituiscono il servizio più tangibile fornito dalla geodesia alla collettività.

Nella storia della scienza la geodesia è una delle discipline più antiche. Essa ha obiettivi sia scientifici che operativi. Uno degli obiettivi scientifici fondamentali è la determinazione delle dimensioni e della forma della Terra, insieme allo studio del campo gravitazionale terrestre e delle relative variazioni temporali.

La geodesia operativa conduce invece le misure e i calcoli necessari per la descrizione geometrica della superficie della Terra. Il suo scopo principale è dunque la determinazione di coordinate. In tale ambito, operativo, è bene non dimenticare che esiste un'esigenza di rendimento e quindi di economia; un certo livello necessario di precisione deve essere raggiunto, ma non superato, pena il rischio di compromettere la rapidità d'esecuzione e l'economia di realizzazione.

La determinazione delle posizioni è stata tradizionalmente scissa in due componenti: verticale e orizzontale. Ciò ha implicato che nel contesto classico sono definiti due sistemi di riferimento geodetico. In effetti il campo di variabilità della componente verticale è di gran lunga più piccolo rispetto a quello della componente orizzontale: in un modello in scala della Terra, costituito da

un globo del diametro di 2 metri (scala 1:6.000.000 circa), l'Everest è alto poco più di 1 mm, appena percepibile al tatto.

La Terra somiglia molto ad una sfera, ma in realtà non lo è e considerarla tale è un'approssimazione che può essere utile in certi casi, ma troppo grossolana per la maggior parte delle applicazioni.

La superficie fisica della Terra è invece molto vicina a quella di un ellissoide di rotazione, cioè un ellissoide biassiale, di forma e dimensioni assegnate attraverso due parametri e di posizione spaziale definita attraverso sei parametri. La superficie ellissoidica è regolare e facilmente trattabile dal punto di vista matematico e proprio per questo è diffusamente usata come superficie di riferimento per le coordinate planimetriche. Invece l'ellissoide è molto meno sfruttabile come superficie di riferimento per le coordinate altimetriche in quanto priva di significato fisico; al suo posto è utilizzato il geoide, definito come superficie equipotenziale nel campo della gravità che meglio approssima il livello medio del mare, anche se non coincidente con esso.

Una superficie di riferimento deve avere due caratteristiche:

- essere matematicamente trattabile;
- essere fisicamente individuabile con facilità.

La seconda caratteristica è facilmente riscontrabile nelle superfici equipotenziali del campo della gravità, almeno per quanto riguarda il loro orientamento locale, essendo in ogni punto ortogonali alla direzione del filo a piombo; il geoide, che è una di queste superfici, non possiede però la prima caratteristica, che invece è propria dell'ellissoide biassiale. Da ciò è discesa storicamente la dicotomia tra superficie ellissoidica, matematicamente trattabile con facilità, non individuabile fisicamente quindi senza significato fisico, cui affidare il posizionamento planimetrico, e superficie geoidica, fisicamente riproducibile e fisicamente significativa, ma matematicamente intrattabile in forma chiusa, cui delegare il compito di riferimento fondamentale per le quote.

Da questo dualismo di superfici di riferimento è poi discesa la separazione delle coordinate in planimetriche ed altimetriche, la separazione delle figure angolari in azimutali e zenitali, la separazione della rappresentazione cartografica in contenuto planimetrico e contenuto altimetrico.

Una carta topografica è in realtà la rappresentazione bidimensionale di due distinte superfici a curvatura totale non nulla: l'ellissoide, su cui si proiettano i punti della superficie fisica oggetto del rilevamento planimetrico, ed il geoide, definito in modo discreto attraverso le quote dei punti oggetto del rilevamento altimetrico.

Oggi con le determinazioni satellitari lo scenario è profondamente mutato: la crescente precisione di queste tecniche richiede in primo luogo un equivalente incremento di precisione nei sistemi di riferimento. In secondo luogo in geodesia satellitare i sistemi di coordinate sono per loro natura globali, geocentrici e tridimensionali, poiché il moto dei satelliti fa riferimento al centro di massa della Terra. Le misure terrestri sono invece per loro natura locali e sono normalmente riferite a sistemi locali.

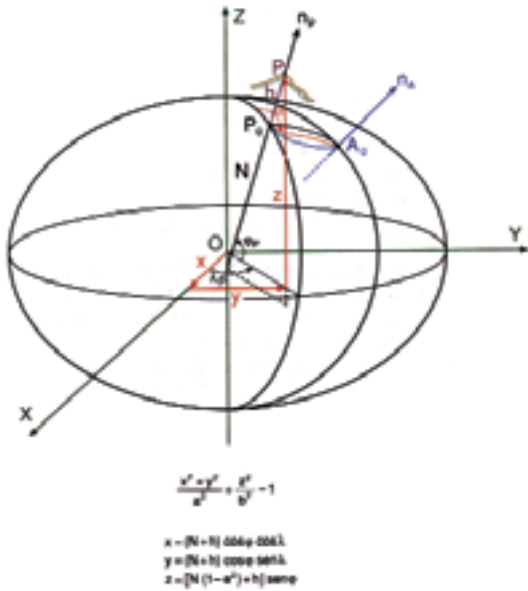


Figura 2

Una prima analisi potrebbe indurre ad ipotizzare, proprio alla luce di questi mutamenti, un facile superamento della dicotomia storica tra geoidi ed ellissoide: purtroppo l'unificazione dei sistemi di riferimento planimetrico e altimetrico è possibile solo quando non interessa una caratteristica non esplicitamente indicata tra le due condizioni prima espone (trattabilità matematica e individuabilità fisica): la significatività fisica. Esistono vasti campi di applicazione in cui tale condizione è verificata ed in tal caso l'ellissoide biassiale geocentrico garantisce, solo esso e solo ora con l'avvento delle metodologie satellitari, facile trattabilità matematica e facile individuabilità fisica, cioè facile e affidabile riproducibilità, attraverso la diretta e precisa determinazione di coordinate geocentriche (cartesiane o ellissoidiche). Sta in ciò il poderoso salto di qualità nel passaggio dagli ellissoidi locali ad un ellissoide geocentrico.

Purtroppo però, nella maggior parte delle applicazioni è necessaria una terza caratteristica, la significatività fisica, che in questo contesto vuol dire la capacità dell'informazione di posizione di denunciare al meglio possibile le differenze di potenziale della gravità. Questa caratteristica non è posseduta dalle coordinate ellissoidiche o cartesiane fornite dai metodi di posizionamento satellitare, perché i sensori di posizione, cioè i satelliti, per altro troppo lontani dalla superficie terrestre per risentire delle variazioni del campo della gravità nella misura che a noi interessa, forniscono all'utente finale solo un'informazione geometrica.

Ecco dunque che, con diverse motivazioni, resta al momento immutata l'esigenza del geode cui riferire la posizione altimetrica e dell'ellissoide, cui riferire quella planimetrica.

La novità, parziale, sta comunque nel fatto che fino a ieri, avendo fissato una coppia di sistemi di riferimento locali capaci di eliminare la deficienza di rango implicita nelle misure di grandezze relative, si passava dalla misura di grandezze geometriche (distanze, angoli, direzioni, dislivelli) al calcolo della posizione relativa rispetto ad un punto di coordinate note in quanto fissate in un sistema di riferimento scelto convenzionalmente in funzione di esigenze locali e quindi variabili nello spazio e nel tempo.

Oggi si ottengono direttamente coordinate rispetto ad un sistema fissato con una definizione, pur sempre convenzionale ma legata alla realtà fisica (origine del sistema coincidente con il centro di

massa e asse Z orientato al polo medio), non variabile dall'utente e condivisa internazionalmente.

La posizione geografica di un punto sulla Terra può dunque essere definita come la sua posizione relativa ad una superficie di riferimento utilizzata in sostituzione della reale forma della Terra.

Le superfici di riferimento più spesso utilizzate sono la sfera, l'ellissoide biassiale ed il geode (superficie equipotenziale del campo gravitazionale della Terra). Le prime due hanno una definizione puramente geometrica e sono alternative, la terza ha una definizione fisica ed è associata alle altre per la determinazione più utilizzata delle quote.

La posizione è solitamente definita per mezzo di una coppia di coordinate curvilinee come la latitudine, la longitudine e l'altezza sopra la superficie di riferimento. In questo senso si parla talvolta di posizionamento a (2 + 1) dimensioni.

È consuetudine corretta e necessaria distinguere tra coordinate sferiche, ellissoidiche e geoidiche, a secondo che siano utilizzate rispettivamente la sfera, l'ellissoide o il geode come superfici di riferimento. Le coordinate ellissoidiche sono anche dette geodetiche, mentre le geoidiche sono le coordinate astronomiche.

In accordo con questa interpretazione il termine "coordinate geografiche" è un termine generale che include i tre tipi menzionati sopra.

Superfici di riferimento

La superficie quadrica sulla quale tutte le curve d'intersezione con i piani sono ellissi è chiamata ellissoide. Dal punto di vista geodetico è consuetudine distinguere tra ellissoidi rotazionali o biassiali ed ellissoidi triassiali.

L'ellissoide biassiale (fig. 2) è generato dalla rotazione di un'ellisse attorno al suo asse minore ed è definito da due parametri, ad esempio dalla lunghezza dell'asse minore, o dall'asse maggiore e da una quantità ausiliaria dipendente dai due semiassi. L'ellissoide triassiale è definito da tre parametri, ad esempio dalla lunghezza dei tre assi mutuamente ortogonali. Il più utilizzato come superficie di riferimento è l'ellissoide di rotazione.

La forma del geode (fig. 3.a-b) dipende dalla distribuzione irregolare delle masse all'interno della Terra e non può essere descritta da un'equazione matematica chiusa come l'ellissoide; quindi, in senso convenzionale, essa è considerata una superficie fisica piuttosto che matematica. Le sue proprietà fondamentali, dalle quali dipendono tutte le altre, 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 geode è una superficie liscia senza lacerazioni o discontinuità.

Punti con la stessa latitudine o longitudine geoidica sono situati rispettivamente sullo stesso parallelo e meridiano geoidico (astronomico). Queste curve non sono né circonferenze né ellissi, come sulla sfera o sull'ellissoide, ma sono linee non piane né regolari (fig. 3.c).

Il sistema di riferimento planimetrico

La definizione di superfici di riferimento uniche per tutta la Terra, oggi indispensabile per l'utilizzo delle metodologie satellitari, è stata in passato di scarso interesse e di difficile realizzazione, a causa del carattere essenzialmente locale delle tecniche classiche di rilievo geodetico e topografico. Per questo motivo ci troviamo oggi ad avere nel mondo molti sistemi geodetici locali definiti storicamente con l'intento di ottenere una buona approssimazione unicamente nelle aree di interesse.

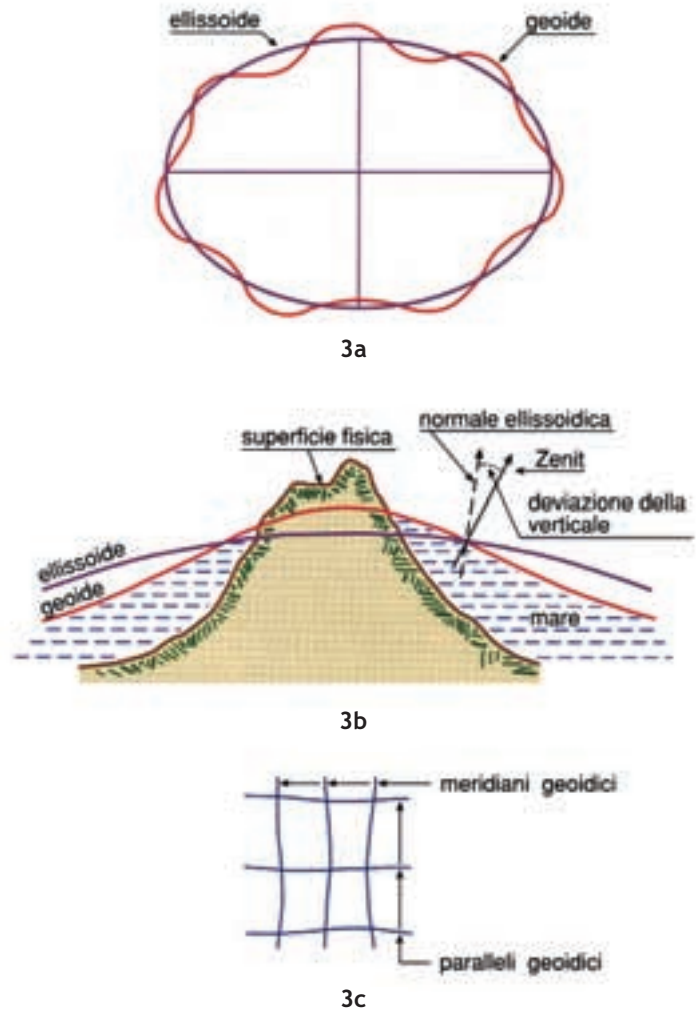
Considerando, come si è già detto, che il problema della determinazione dei punti è stato tradizionalmente affrontato, dalla geode classica, scindendo nettamente la parte altimetrica da quella planimetrica, troviamo normalmente due superfici di riferimento definite in maniera diversa in ogni nazione: un geoide e un ellissoide locali. Prima dell'avvento dei sistemi di posizionamento satellitare non sarebbe stato possibile realizzare ed utilizzare sistemi geocentrici. I sistemi di coordinate geodetiche locali, con ellipsoidi di riferimento scelti per approssimare la forma della Terra al meglio in una determinata regione (fig. 4), erano e sono ancora utilizzati in molti paesi. Esistono più di 150 di tali sistemi e talvolta le carte hanno più di un reticolato ed ogni reticolato si riferisce ad un differente sistema di riferimento o, come si denominerà nel seguito, ad un differente *datum*.

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 d'interesse, che lo materializza.

In uno stesso *datum* si possono usare molti sistemi di coordinate: le trasformazioni tra questi ultimi sono sempre puramente matematiche e non richiedono l'introduzione di misure. La trasformazione tra due *datum* può essere invece calcolata solo quando vi siano sufficienti misure che legano punti nei due sistemi.

Un ellissoide biassiale di riferimento associato ad un sistema locale costituisce il sistema di riferimento geodetico planimetrico (cioè bidimensionale). Un tale sistema di riferimento non è geocentrico, cioè il centro dell'ellissoide è spostato rispetto al centro di massa della Terra di quantità dell'ordine delle centinaia di metri. Anche l'asse di simmetria dell'ellissoide è disallineato rispetto all'asse di rotazione terrestre medio, ma gli scostamenti angolari sono comunque molto piccoli, dello stesso ordine di grandezza delle precisioni delle misure angolari più sofisticate.

L'ellissoide locale deve essere posizionato e orientato rispetto alla Terra. Precedentemente all'avvento delle tecniche satellitari, quando non era possibile il posizionamento geocentrico, l'unico modo per posizionare ed orientare i sistemi



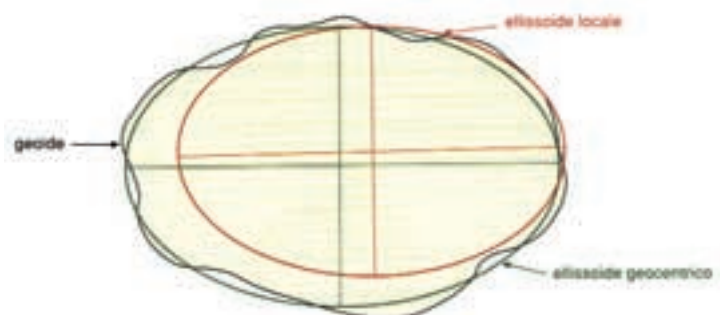
di riferimento consisteva nel collegamento, al sistema astronomico locale, di un punto scelto allo scopo, normalmente baricentrico rispetto alla zona d'interesse. Il sistema astronomico locale è definito dalla verticale locale e dall'asse di rotazione terrestre.

Sei parametri determinanti (i sei gradi di libertà di un corpo rigido nello spazio) devono essere scelti nel punto iniziale (chiamato anche *punto di emanazione*): latitudine e longitudine ellissoidica, altezza geoidica, due componenti della deviazione della verticale e l'azimut ellissoidico (o geodetico) di una direzione che ha origine in questo punto.

Stabilite preliminarmente, in modo opportuno, forma e dimensioni dell'ellissoide di riferimento da adottarsi, l'idea di base è quella di vincolare le due superfici fondamentali, geoide ed ellissoide. Scelto il punto di emanazione di quota geoidica

Figure 3a, 3b, 3c

Figura 4



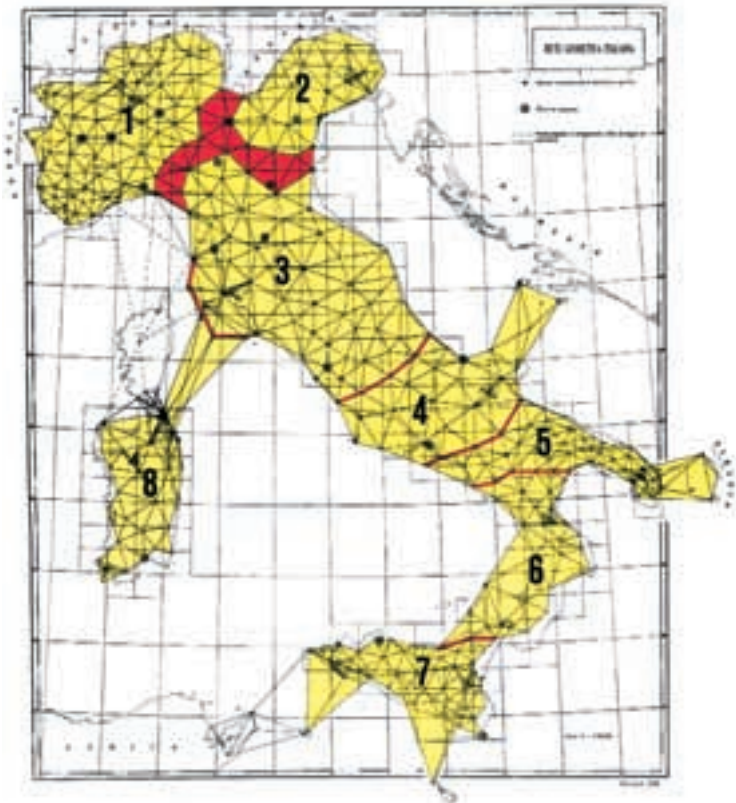


Figura 5 - Rete geodetica fondamentale 1908/1919

nota, si provvede a determinarne *latitudine e longitudine astronomica* (cioè assolute, da non confondersi con le analoghe ellissoidiche): senza entrare in dettaglio, questo significa individuare la posizione dello Zenit del punto (cioè "dell'orientamento" della verticale geoidica); nel sistema terrestre convenzionale (CTS - *Conventional Terrestrial System*), di cui si dirà tra breve.

È importante ricordare che, prima dell'avvento della geodesia satellitare, l'astronomia geodetica era l'unico metodo che consentiva di eseguire posizionamenti "assoluti", giacché tutte le possibili misure fra punti sulla Terra realizzano soltanto determinazioni relative.

S'impone quindi che le coordinate ellissoidiche del punto di emanazione coincidano con quelle astronomiche. Questa condizione ha per effetto sia di vincolare un punto prefissato dell'ellissoide ad una direzione nello spazio (il che elimina due "gradi di libertà") sia di assicurare in quel punto la coincidenza ellissoidica con la verticale geoidica (altri due gradi di libertà fissati dall'annullarsi delle due componenti della deviazione della verticale). Ciò implica il parallelismo dei piani tangenti alle due superfici, individuati dalla normale e dalla verticale.

I due rimanenti "gradi di libertà" dell'ellissoide rispetto al geode (scorrimento lungo la normale-verticale e rotazione intorno ad essa) vengono infine fissati attribuendo al punto di emanazione quota ellissoidica coincidente con quella geoidica nota (si realizza così la condizione di effettiva tangenza delle due superfici nel punto) e orientando l'asse di rotazione dell'ellissoide nella direzione del *Nord astronomico* (tale direzione viene in effetti preventivamente determinata insieme alla latitudine e alla longitudine astronomica). Al termine di queste operazioni, si dice che si è orientato l'ellissoide locale di riferimento sul punto di emanazione.

Per definizione, un sistema di coordinate geocentrico è invece un sistema la cui origine coincide con il centro di massa C della Terra e i cui assi sono fissati per convenzione.

Il più comune sistema geocentrico usato in geodesia è il Sistema Terrestre Convenzionale (CTS), orientato in modo che l'asse Z sia diretto verso l'Origine Internazionale Convenzionale (CIO), l'asse X complanare con il Meridiano Convenzionale di Greenwich e l'asse Y formi con gli altri due una terna cartesiana destrorsa.

Al sistema è associato un ellissoide di dimensioni predefinite. Le posizioni nel sistema CTS sono talvolta date in coordinate cartesiane e talvolta in coordinate ellissoidiche (j, l, h) cioè latitudine, longitudine e quota ellissoidiche.

La quota ellissoidica h , talvolta chiamata quota geodetica, è la distanza di un punto dall'ellissoide di riferimento, misurata lungo la normale all'ellissoide stesso.

Il sistema di riferimento geodetico del 1980 (GRS 80), raccomandato per l'uso in geodesia dall'Associazione Internazionale di Geodesia (IAG) nel 1980, utilizza un ellissoide di riferimento dimensionato per approssimare al meglio la forma attuale della Terra. Esso ha semiasse maggiore $a = 6.378.137$ m e schiacciamento approssimativamente eguale a $1/298,25$. È attualmente utilizzato, quasi universalmente, nei lavori geodetici.

I sistemi geodetico-cartografici d'interesse nazionale

La situazione dei sistemi di riferimento d'interesse nazionale merita un inquadramento schematico per non perdere di vista i problemi con cui è necessario confrontarsi, ma soprattutto quelli con cui è utile tale confronto. Pur rinunciando ad una dettagliata cronistoria dei vari sistemi di coordinate in uso in Italia, ritengo tuttavia necessario ricordare alcune tappe di quel processo, per certi aspetti perverso e diabolico, ma complessivamente il migliore possibile, dai cui effetti negativi oggi il GPS potrebbe porci al riparo. Un esame critico, non una critica.

È utile ricordare che, per utilizzare compiutamente un sistema geodetico-cartografico, è necessario precisare quali siano:

- il sistema geodetico di riferimento (*geodetic datum*);
- le misure ed i calcoli di compensazione della rete d'inquadramento che lo realizzano;
- la rappresentazione cartografica adottata e le condizioni di applicazione.

Un sistema di riferimento geodetico è realizzato attraverso l'istituzione di una rete compensata di punti che si estende sull'area d'interesse. Come è noto a tutti, i rilevamenti effettuati e che si effettuano nel nostro paese, hanno una base comune: l'inquadramento geodetico proveniente dai lavori dell'I.G.M.

In Italia la possibilità d'istituire un sistema di riferimento unico fu presa in considerazione, per la prima volta, dopo l'unificazione del Regno, quando l'allora "Ufficio Tecnico del Corpo di Stato Maggiore" ebbe l'incarico del rifacimento totale della triangolazione nazionale tramite l'u-

nificazione delle reti parziali preesistenti; ognuno degli Stati preunitari aveva infatti eseguito lavori geodetici sviluppandoli su propri sistemi di riferimento diversi l'uno dall'altro.

Nei lavori, completati alla fine del secolo scorso per la rete fondamentale, venne adottato l'ellissoide di Bessel con tre orientamenti differenti su tre punti di coordinate astronomiche note: Genova per il Nord, M. Mario per il centro e Castanea delle Furie per il Sud. L'orientamento venne ottenuto con altrettanti azimut astronomici, mentre il dimensionamento venne dato dalla misura di otto basi.

Per procedere allo sviluppo topografico e cartografico in sistemi cartesiani, vennero adottate le formule di corrispondenza della proiezione policentrica naturale (o di Flamsteed modificata) riferita al centro degli elementi cartografici alla scala 1:100.000; queste coordinate "cartografiche", che si possono definire di transizione, non ebbero alcun seguito, al di là della fase d'impianto, dopo l'utilizzazione ai fini del rilevamento, dapprima grafico (la "puntinatura" delle tavollette) e successivamente aerofotogrammetrico.

Nei cataloghi dei punti trigonometrici di allora sono riportate infatti le sole coordinate geografiche.

Ai primi del '900, quando i lavori di campagna, che si erano protratti per quasi mezzo secolo, volgevano al termine, fu affrontato il problema di compensare l'intera rete su un'unica superficie di riferimento. Il lavoro, impresa memorabile per quei tempi, fu condotto in due fasi distinte: la prima parte si concluse nel 1908 con la stampa del volume "Compensazione della rete geodetica a Nord del parallelo di Roma", la seconda terminò nel 1919 con un'analoga pubblicazione per la zona a Sud del parallelo di Roma. Il dimensionamento della rete, o meglio delle otto sotto reti in cui l'Italia era stata divisa (tre nel settentrione, quattro nel meridione più la Sardegna), avvenne tramite l'introduzione di otto basi misurate (fig. 5). Tali partizioni, rese necessarie dalle limitate potenzialità di calcolo dell'epoca, vanificarono parzialmente gli intenti di unificazione che il progetto si era proposto.

Il calcolo fu eseguito sull'ellissoide di Bessel (definizione 1841), orientato a Genova sul pilastro dell'Osservatorio dell'Istituto Idrografico della Marina azimut su Monte del Telegrafo.

Nel contempo il Catasto iniziò i suoi lavori e per quanto riguarda l'inquadramento venne stabilita la derivazione dalle reti di 1°, 2° e 3° ordine I.G.M., mentre per la rappresentazione sul piano venne adottata la proiezione di Cassini Soldner avente caratteristiche di deformazione più idonee alla misura delle aree. La rappresentazione richiede, com'è noto, la scelta di un centro di sviluppo preferibilmente baricentrico rispetto alla zona da rilevare; l'estensione di questa, per evitare deformazioni incompatibili con la scala, venne contenuta in un campo di circa 100 km di raggio. Ma non sempre sono stati adottati sviluppi di questa estensione, quali ad esempio quello che interessa quasi tutta la Toscana (origine Siena), o la Calabria (origine Monte Bruto), ma sviluppi assai limitati, addirittura comprendenti un solo comune, per cui oltre alla ventina di sviluppi estesi, si hanno molte centinaia di piccoli sviluppi locali.

Definizione
<ul style="list-style-type: none"> ■ Ellissoide Bessel (1841): • $a = 6\,377\,397.155$ • $f = 1/299.1528128$ ■ Orientamento: Genova IIM (definizione astronomica 1902) • $\varphi = 44^\circ 25' 08.235''$ • $\lambda = 0^\circ$ • azimut su Monte del Telegrafo $\alpha = 117^\circ 31' 08.91''$
Realizzazione
Rete fondamentale di primo ordine dimensionata su otto basi
Rappresentazione cartografica
Proiezione policentrica naturale (o di Flamsteed modificata) riferita al centro di ciascuno degli elementi cartografici alla scala 1: 100.000.

Definizione
<ul style="list-style-type: none"> ■ Ellissoide Bessel (1841): • $a = 6\,377\,397.155$ • $f = 1/299.1528128$ ■ Orientamento: Genova IIM (definizione astronomica 1902) • $\varphi = 44^\circ 25' 08.235''$ • $\lambda = 0^\circ$ • 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), raffinata 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 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)

Anche per il sistema catastale è opportuno fornire alcune precisazioni, utili ai fini dello studio della trasformazione nel sistema nazionale. In realtà tale sistema, coincidente ufficialmente con quello adottato dall'I.G.M. nella prima compensazione definitiva della propria rete (1908-1919), non è stato utilizzato per l'intero territorio nazionale. I lavori catastali si sono infatti svolti in molti casi prima del completamento dei lavori di triangolazione dell'I.G.M., ed hanno quindi spesso fatto riferimento a sistemi geodetici di definizione precedente (in particolare a definizioni adottate dallo stesso I.G.M. in epoche anteriori al calcolo finale: ellissoide di Bessel orientato a Castanea delle Furie per molte provincie a sud di Roma, e orientato a M. Mario per alcune zone dell'Italia centrale) e talvolta provvisoria. Sempre a causa del "ritardo" delle operazioni I.G.M. rispetto alle esigenze catastali sono stati frequentemente assunti, per i vertici di 1°, 2° e 3° ordine, valori provvisori delle coordinate forniti volta per volta dallo stesso I.G.M., spesso diversi (in certi casi sensibilmente) dai definitivi. La rete catastale non è quindi del tutto congruente con quella nazionale, ovvero angoli e lati della rete non sono esattamente gli stessi, anche prescindendo dal diverso sistema geodetico di riferimento.

Molti vertici di 4° ordine I.G.M. fanno parte della rete catastale come vertici di rete, sottorete o dettaglio. Le relative coordinate derivano però da misure eseguite autonomamente dal Catasto, e sono quindi in genere diverse da quelle calcola-

Tabella 1 - Sistema di riferimento italiano ante 1940

Tabella 2 - Sistema di riferimento catastale

Tabella 3 - Sistema di riferimento Roma40

Definizione
<ul style="list-style-type: none"> ■ Ellissoide Internazionale (Hayford): • $a = 6\ 378\ 388$ • $f = 1/297$ ■ Orientamento: Roma M. Mario (definizione astronomica 1940) • $\varphi = 41^\circ 55' 25.51''$ • $\lambda = 0^\circ (12^\circ 27' 08.400'' \text{ est da Greenwich})$ • 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
<p>Conforme di Gauss</p> <p>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</p> <p>fattore di contrazione $m_0 = 0.9996$</p> <p>falsa origine per le coordinate Est:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1500 km (fuso Ovest) • 2520 km (fuso Est)

te dall'I.G.M.; in certi casi è diversa anche la materializzazione.

Il 30 novembre del 1940, durante la riunione di Torino, la Commissione Geodetica Italiana (C.G.I.), accogliendo le raccomandazioni espresse dalla Associazione Internazionale di Geodesia nel convegno di Madrid del 1924, decise di cambiare sistema di riferimento. Come ellissoide fu scelto quello di Hayford (detto anche internazionale), ritenuto più vicino alla realtà fisica terrestre, e per l'orientamento fu realizzata un'apposita stazione astronomica sul vertice di 1° ordine di M. Mario.

Per inquadrare la rete nel nuovo *datum* non fu effettuata una nuova compensazione, ma semplicemente un "trasporto" dei vertici della rete geodetica fondamentale (1° ordine) i quali mantennero, nel nuovo sistema, tutte le loro inesattezze e disomogeneità. In seguito sono state eseguite, con moderni metodi di calcolo, ricompensazioni parziali di alcuni blocchi, ma sempre con il dimensionamento e l'orientamento derivanti dal calcolo 1908-1919 e quindi senza miglioramenti significativi.

Questo sistema, che costituisce ancora oggi il riferimento ufficiale nazionale, è denominato Roma40, con richiamo alla data della determinazione astronomica.

Nel dopoguerra venne inoltre adottata, anche su proposta del Prof. Boaga, la rappresentazione conforme di Gauss; e ciò non solo per la cartografia, ma anche, e prima, per lo sviluppo dei calcoli geodetici, che, semplificati, possono essere condotti sul piano conforme, con gli evidenti vantaggi dell'uso della trigonometria piana in luogo di quella sferica.

Il sistema geodetico-cartografico nazionale (Roma40 - Gauss-Boaga) è il sistema in cui sono calcolate le coordinate dei vertici della rete trigonometrica fondamentale italiana, a disposizione dell'utenza nei cataloghi I.G.M. La denominazione corrente di coordinate Gauss-Boaga si riferisce esclusivamente alle coordinate piane (o cartografiche).

Nel sistema nazionale vengono inquadrati i lavori geodetici e topocartografici nazionali e regionali, oltre a numerosi rilievi locali e tecnici.

A proposito della rete vanno fatte alcune precisazioni, utili soprattutto ai fini del confronto dei dati I.G.M. con quelli dei sistemi locali catastali: il calcolo del 1908-1919 è stato eseguito nel sistema geodetico di riferimento adottato all'epoca (ellissoide di Bessel orientato a Genova, definizione 1902), e solo nel 1940 è stato adottato l'ellissoide internazionale orientato a M. Mario, ricalcolando le coordinate di tutti i vertici nel nuovo riferimento; la longitudine è contata dal meridiano di Roma (M. Mario).

In effetti per realizzazione del sistema nazionale va inteso il risultato del trasferimento sull'ellissoide internazionale orientato a M. Mario (definizione 1940) dei dati ottenuti con le compensazioni definite nel 1908 e nel 1919, calcolate sull'ellissoide di Bessel orientato a Genova.

A seguito delle campagne di triangolazione susseguitesesi nel tempo numerosi blocchi della rete sono stati rideterminati in base a nuove misure ed a nuovi calcoli di compensazione, modificando le "distorsioni" locali nella rete; le coordinate attualmente in catalogo sono quindi, per effetto di queste "ricompensazioni", diverse quelle del 1940, e a volte è variata anche la materializzazione dei punti.

Anche se il Catasto italiano ha ufficialmente adottato il sistema nazionale "Roma40 - Gauss-Boaga" da vari anni, in pratica solo in alcune zone si è passati effettivamente a tale sistema. Per una vasta parte del territorio nazionale la cartografia catastale ed i relativi atti di aggiornamento sono ancora riferiti al sistema catastale adottato in sede di formazione della cartografia (dal 1866 in poi), caratterizzato, come si è detto, dall'uso della rappresentazione cartografica "Cassini Soldner" per zone limitate aventi ciascuna una diversa origine.

Lo stesso Prof. Boaga, come Direttore Generale del Catasto, intravide negli anni '50, la possibilità di realizzare l'unificazione dei sistemi catastali con la trasformazione delle coordinate Cassini-Soldner in coordinate gaussiane. È un'operazione ancora incompiuta.

Apparentemente il problema è quanto mai semplice: note le formule di corrispondenza delle due rappresentazioni, nonché le coordinate geografiche del centro di sviluppo, con pochi semplici passaggi attraverso le coordinate geografiche si perviene alla soluzione. Ma la semplicità è solo apparente, sia per la casistica varia che si può incontrare sia per la necessità generale di trasformare le coordinate geografiche che si ottengono dalle Cassini, relative all'ellissoide di Bessel, in coordinate sull'ellissoide internazionale. Poteva essere un grande progetto degli anni '70, supportato dall'avvento dei calcolatori elettronici, ma non si è fatto nulla di organico e definitivo.

La conseguenza più grave di questo mancato impegno è stata la non utilizzabilità, in molti casi, dei trigonometrici catastali nella formazione delle carte tecniche. Sarebbe stato possibile e conveniente ricavare almeno l'inquadrimento geometrico della nuova carta dalla mappa del Nuovo Catasto Terreni. Ma quella possibilità e quella convenienza furono ignorati con conseguente dispendio di fatica e di denaro. Infatti fin dai primi progetti di carta tecnica a grande scala