

residui ottenuti localmente vengono ad essere spesso di entità inaccettabile.

Inserire un nuovo rilievo geodetico in un altro preesistente presenta consistenti analogie con l'aggiornamento cartografico: è meglio conseguire congruenza ed omogeneità locale che precisione di posizionamento assoluta.

L'uso ormai ampiamente diffuso delle tecniche GPS per la determinazione dei punti necessari al rilievo del territorio, al suo monitoraggio ed all'aggiornamento: della documentazione cartografica analogica e numerica, pone come dominante il problema dell'integrazione fra le misure satellitari e i dati preesistenti, che costituiscono un immenso patrimonio informativo che non può e non deve essere trascurato.

Ciò ha determinato l'inserimento, tra i principali scopi del progetto IGM95, l'obiettivo di definire le relazioni tra il sistema geodetico nazionale Roma40 e quello proprio del rilievo GPS, cioè il WGS84, di cui la rete IGM95 è una realizzazione. È inoltre opportuno valutare le relazioni intercorrenti tra i suddetti sistemi geodetici e cartografici e l'UTM-ED50, il quale, pur non possedendo caratteristiche di precisione sufficienti per una corretta conduzione delle operazioni geodetiche e topografiche d'inquadramento geometrico, ha avuto ed ha tuttora rilevante influenza.

Dopo un'accurata analisi dei dati disponibili ed un approfondito esame comparativo delle differenti strategie operative perseguibili, è stata messa a punto una metodologia che ha portato alla definizione ottimizzata delle relazioni tra la rete classica e quella fondata sulle misure GPS. Il risultato consiste in un set di sette parametri locali per ogni punto della rete IGM95, da applicare alle nuove misure GPS condotte nell'ambito di circa 10 km dal vertice utilizzato; considerando la densità media della nuova rete (1 punto ogni 250 km² con interdistanza media di 15-20 km) ciò significa la totale ed omogenea copertura del territorio nazionale.

Tale metodologia rende dunque finalmente possibile un pieno sfruttamento del GPS per l'integrazione delle nuove informazioni di posizione rispetto a quelle esistenti e apre definitivamente la strada all'affermazione delle tecniche satellitari non solo presso enti e aziende di rilievo geotopocartografico, ma anche a livello di singoli professionisti orientati ad applicazioni tematiche e di dettaglio.

Il sistema di riferimento altimetrico

Il primo elemento necessario per la definizione della quota è la superficie di riferimento. Una volta stabilita questa, è individuata la direzione (ortogonale) lungo cui misurare le quote, mentre dalla realizzazione del sistema di riferimento discende la scala delle misure lungo quella direzione.

In funzione di come si scelgono questi elementi, si possono definire differenti sistemi di quota. Usare un piano come superficie di riferimento è ovviamente insufficiente, salvo che per applicazioni di estensione particolarmente limitata. Scelte migliori, più vicine alla reale forma della Terra, sono la superficie rotazione o una superfi-

cie equipotenziale che si adagia approssimativamente su un'idealizzata superficie degli oceani, dando così significato al termine "quota sul livello medio del mare". La prima delle scelte di cui sopra, è usata per definire le quote ellissoidiche; la seconda per le quote ortometriche.

Le due superfici di riferimento sono di natura completamente diversa. La prima risulta da una definizione geometrica e può essere matematicamente descritta in maniera semplice. Sfortunatamente, poiché una simile superficie non ha un significato fisico, nessuna strumentazione poteva direttamente rilevarla prima dell'avvento del GPS.

Per conservare il significato fisico della quota è necessario definirla rispetto ad una superficie fisicamente significativa: generalmente si considera a tale scopo una superficie equipotenziale che approssima globalmente la superficie media del mare. In prima approssimazione le superfici equipotenziali possono essere rappresentate da superfici teoriche di grandi masse d'acqua. Teoriche in questo caso significa che il movimento delle onde, le correnti oceaniche, le maree e altri fenomeni di cambiamento nel tempo non vengono presi in considerazione.

L'importanza pratica di tali superfici è data dal fatto che una superficie di livello è intuitivamente interessante come riferimento per le quote, in quanto essa rappresenta uno stato di equilibrio per i fluidi. Così, differenze di potenziale, che generano il moto, sono messe in relazione alle differenze di quota. Purtroppo questa definizione implica gravi complicazioni matematiche e per mettere in relazione i sistemi di quota ellissoidico e geoidico occorre determinare la differenza fra le due superfici, cioè l'ondulazione geoidica o separazione geode-ellissoide (fig. 15).

L'adozione del geode come superficie di riferimento della Terra è una scelta obbligata; pur nella sua complessità essa offre prestazioni impareggiabili: è già materializzata con buona approssimazione dagli oceani in gran parte del pianeta ed essendo legata alla gravità rappresenta l'unico riferimento che permette di definire un concetto di quota significativo anche dal punto di vista fisico. Il geode è definito come la superficie equipotenziale del campo di gravità usata come riferimento delle altezze ortometriche, cioè il *datum* altimetrico.

Figura 15

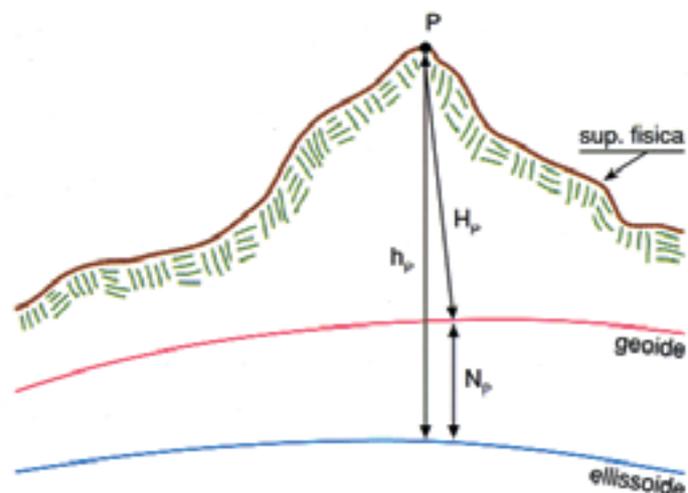




Figura 16 - Rete nazionale di livellazione geometrica di alta precisione.

La figura 15 mostra le relazioni di base fra quote ellissoidiche h ed ortometriche H .

In prima approssimazione, a meno di qualche millimetro: $h_p = H_p + N_p$
 h_p è osservabile con il GPS, mentre H è osservabile con livellazioni corrette in funzioni di osservazioni gravimetriche; l'ondulazione geoidica è la quantità che connette i due sistemi di altezze, ed è quindi essenziale quando si vogliono usare insieme diversi tipi di osservazioni.

Questa formula è un'approssimazione, soprattutto perché considera solo la differenza fra le superfici e trascura di tenere conto delle differenze di lunghezza delle normali e delle differenze di scala tra i differenti tipi di osservazioni. Per quote terrestri e per fini operativi, l'errore generato da questa approssimazione può essere sicuramente trascurato.

Per l'altimetria tradizionalmente topografi e cartografi hanno cercato di semplificare il problema della superficie di riferimento usando il livello medio del mare come definizione di quota zero, poiché la superficie del mare è disponibile un po' dovunque. Il l.m.m. è determinato con osservazioni mareografiche su un punto fondamentale per un periodo sufficientemente lungo in modo da depurare gli effetti di marea.

La definizione di un geoidale locale è un'operazione relativa ché, proprio per il modo in cui esso è definito, vi è un solo "grado di libertà" nella scelta: si definisce geoidale locale, per una certa area d'interesse, quella superficie equipotenziale del campo della gravità passante per un punto prestabilito dell'area stessa (normalmente un punto della linea di costa più vicina, posto all'altezza del livello medio del mare convenzionalmente definito).

È a partire da quel punto, assunto come riferimento fondamentale di quota zero, che si provvede, con i metodi propri della *livellazione geometrica*, ad attribuire una *quota geoidica* a ciascuno dei punti (detti *capisaldi*) delle linee di una rete che si estende su tutto il territorio.

Il sistema di riferimento altimetrico italiano è realizzato dalla rete di livellazione geometrica di alta precisione dell'I.G.M. (fig. 16).

Rimane così definito, come conseguenza immediata della procedura di quotazione, anche il geoidale locale, poiché la rete di capisaldi, altimetricamente determinati rispetto ad esso, contribuisce ad individuarlo, lungo i profili delle sue linee, rispetto alla topografia del terreno.

Per l'Italia continentale il punto di quota zero si trova a Genova, ed è stato determinato come media delle osservazioni che un *mareografo* ha registrato per 10 anni: dal 1937 al 1946 (data convenzionale di riferimento - 1 gennaio 1942). Data l'impossibilità di trasporto della quota, con metodi di alta precisione, lungo tratti di mare, le isole maggiori hanno ciascuna un proprio mareografo di riferimento: rispettivamente Catania e Cagliari. In particolare la quota zero a Catania è frutto della media di un anno di registrazioni effettuate nel 1965, mentre per Cagliari si fa riferimento ad una serie di osservazioni dal 1 giugno 1955 al 31 agosto 1957 (data convenzionale di riferimento - 1 luglio 1956). Molti altri mareografi operano lungo le coste italiane; i loro dati non costituiscono riferimenti, ma attraverso i collegamenti alla rete di livellazione, potrebbero permettere importanti indagini di carattere geofisico, se esistesse un minimo coordinamento delle attività di rilievo mareografico.

È più corretto allora definire il l.m.m. come la superficie convenzionale di quota zero per una certa area (*datum* altimetrico locale) e ricordare che esso è solo una buona approssimazione del geoidale, che è la vera superficie zero per la misura delle quote.

Ma poiché non possiamo vedere la superficie del geoidale, non possiamo direttamente misurare le quote al di sopra e al di sotto di quella superficie; ne possiamo indirettamente determinare la posizione attraverso misure puntuali di gravità ed una loro successiva modellizzazione.

Per scopi pratici accettiamo l'ipotesi che sulla costa geoidale e l.m.m. siano essenzialmente coincidenti e comunque, muovendoci verso l'interno, misuriamo dislivelli rispetto alla quota zero sulla costa, che in effetti vuol dire rispetto al l.m.m. Per tutte le ipotesi che si fanno, per la varietà di strumenti, metodologie e convenzioni che si usano nelle misure altimetriche, non c'è nessuna garanzia che metodi differenti producano risultati direttamente confrontabili; sebbene le carte dicono che le quote sono riferite al l.m.m., differenti sistemi di determinazione altimetrica possono fornire risultati non equivalenti.

Insomma il l.m.m. è uno standard solo nominale; sfortunatamente per cartografi e topografi, esso non è una superficie semplice: le anomalie di morfologia e densità della crosta terrestre producono lievi variazioni del campo della gravità, risultanti in variazioni del geoidale. Poiché anche la superficie del mare risente del campo di gravità, anche

il l.m.m. ha lievi colline e piccole valli, come la terra ferma, anche se molto più attenuate.

A secondo di dove ci troviamo il l.m.m. può essere più vicino o più lontano centro della Terra rispetto ad un altro punto: le quote non beneficiano di una definizione univoca del livello medio dei mari e tutt'oggi non esiste un sistema di riferimento altimetrico globale che consenta di unificare e legare tra loro le misure compiute in vari sistemi "verticali" (tab. 7).

Riferendosi alle misure GPS per la determinazione della quota è utile infine ricordare che in un generico punto la "quota" determinata direttamente dal GPS è l'altezza del ricevitore rispetto all'ellissoide di riferimento. Come evidenziato nella figura 15, per convertire questo dato (h) nell'altezza ortometrica convenzionale H (sul l.m.m.) occorre sottrarre alla quota ellissoidica l'ondulazione geoidica N rispetto all'ellissoide di riferimento. Una volta note le ondulazioni geoidiche con sufficiente precisione, il problema della trasformazione di quote ellissoidiche in quote ortometriche è essenzialmente risolto. L'approssimazione con cui sono note tali ondulazioni determina in pratica la precisione finale sulle quote geoidiche ottenute.

Un rilievo GPS isolato fornisce le quote ellissoidiche rispetto a un ellissoide "pseudogeocentrico", ovvero traslato di decine o centinaia di metri rispetto a quello geocentrico. Non è quindi corretto applicare a queste quote le ondulazioni geoidiche riferite all'ellissoide geocentrico.

Le ondulazioni geoidiche su scala mondiale, rispetto all'ellissoide WGS84, variano da +75 m a -104 m. Negli Stati Uniti il geode è sempre al di sotto dell'ellissoide, con variazioni da -5 a -53. In Italia il geode è sempre sopra l'ellissoide con variazioni da +37 m a +54 m. Il modello di ondulazione geoidica Italgeo95, sviluppato dal Politecnico di Milano, opportunamente rielaborato per adattarlo al sistema locale, fornisce, con un opportuno programma di interpolazione, le ondulazioni geoidiche che competono ai punti rilevati con GPS, con una precisione mai peggiore di alcuni decimetri, almeno sui punti dove è stato possibile effettuare confronti di verifica. Tradotto più correttamente in p.p.m. della distanza interessata la precisione mediamente conseguibile è di circa 10 p.p.m. Un uso corretto del modello suddetto, integrato opportunamente, ove necessario, da misure classiche, consentirà al topografo di avvicinarsi molto all'obiettivo di usare quotidianamente il GPS per i propri rilievi tridimensionali, anche se ancora, per le applicazioni di alta precisione, restano insostituibili le tecniche classiche di livellazione; in futuro l'approssimazione dei modelli del geode verrà migliorata, ma sarà sempre difficile tener conto di tutte le irregolarità locali del campo di gravità, cui invece si adatta sempre puntualmente con elevatissima precisione la livellazione geometrica che misura dislivelli fra coppie di superfici equipotenziali.

Generazioni di topografi in tutto il mondo hanno contribuito con la livellazione geometrica all'arduo compito di tradurre il concetto di quota in una quantità misurabile. Ciò ha condotto alla creazione di numerosi riferimenti altimetrici nazionali prima e sovranazionali poi, come la rete

europea UELN (*United European Levelling Net*), compensata nel 1973 e comprendente i Paesi dell'Europa occidentale, ed il progetto della rete EVS (*European Vertical System*) che comprenderà anche molti Paesi dell'Europa orientale. Tutto ciò evidenzia chiaramente una tendenza verso il concepimento e la realizzazione, presumibilmente in pochi anni, di un sistema altimetrico continentale.

Conclusione

Il rilevamento è lo sforzo incessante di misurare il mondo e di modellarlo senza mai arrivare a compimento. Poiché il mondo è costantemente perturbato, le nostre misure devono poterne seguire i movimenti. Nuovi sistemi di riferimento si renderanno necessari da qui a 10-20 anni. Il che ci sposta nel futuro verso sistemi di riferimento dinamici, in cui le coordinate dei punti "fissi" cambiano per i movimenti della crosta, per l'aumento di precisione delle misure, per il miglioramento di riferimento e via...

Nel campo cartografico o, ancor più in generale, nelle operazioni di georeferenziazione, un cambiamento di sistema di riferimento ha implicazioni pratiche non trascurabili e di difficile soluzione, in quanto cambiare sistema vuol dire variare un'enorme mole di dati esistenti.

Nel caso attuale di introduzione del sistema WGS84 e delle sue realizzazioni, la soluzione più semplice, e sicuramente la più economica, consiste nel lasciare tutti i prodotti nel sistema geodetico-cartografico nativo; il computer può all'occorrenza, convertire in quel sistema le coordinate fornite dal GPS, purché siano disponibili come lo sono, i relativi parametri di trasformazione. Per rendere poi confrontabili le altezze ellissoidiche osservate con il GPS con le quote ortometriche, la disponibilità di un grigliato affidabile delle ondulazioni geoidiche rispetto all'ellissoide WGS84 di un semplice programma di interpolazione può agevolmente risolvere anche questo problema. L'aspetto da verificare è se questa sia una soluzione effettivamente soddisfacente, cioè efficace ed efficiente. Non è sicuramente una soluzione efficace per l'uso in tempo reale delle informazioni di posizione provenienti dal GPS, come nel campo della navigazione terrestre, marittima ed aerea, cioè in un contesto dinamico di georeferenziazione di unità mobili. Negli altri campi di applicazione, a noi più congeniali, è una soluzione accettabile, ma non soddisfacente: infatti costringe l'utente a perdere una delle più importanti qualità del GPS, cioè la sua precisione. Nel passaggio dal sistema di riferimento globale a quello locale svanisce almeno per un ordine di grandezza la precisione intrinseca del posizionamento satellitare. L'alternativa, per un periodo comunque transitorio, è la conversione preventiva di tutti i nostri prodotti in un sistema

Tabella 7 - Differenze altimetriche tra alcuni mareografi europei di riferimento e quello italiano

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

comune, cioè nel sistema WGS84. Sebbene si sia portati a pensare che tale alternativa rappresenti la migliore soluzione, è utile esaminarne vantaggi e svantaggi. In primo luogo, essendo il WGS84 il più realistico modello disponibile della figura della Terra, la possibilità di un diretto posizionamento delle informazioni tramite GPS rende tutti i prodotti di maggiore valore perché direttamente utilizzabili in tutte le fasi del rilevamento sia statico che dinamico. Una tale impostazione consente la continuità della rappresentazione, negata in presenza di differenti sistemi locali, ad esempio nei lavori aventi carattere sovranazionale; minimizza gli errori dell'utente finale che si trova a lavorare con un unico comune sistema di riferimento e non è costretto a trasformare i suoi dati rilevati nel sistema o nei sistemi locali.

Il maggiore svantaggio è sicuramente il costo della conversione, che sarebbe distribuito tra gli utenti nel primo caso e accentrato presso i produttori nel secondo caso. Il primo non sarebbe certo minore, ma solo meno palese ed oltretutto carico di rischi di disomogeneità e di discontinuità spaziale e temporale.

La conversione dei prodotti esistenti da un sistema ad un altro non è una novità: nel passato sono state applicate da differenti enti due strategie fondamentalmente differenti, concepite ambedue per i prodotti analogici, ma facilmente adattabili ai prodotti digitali.

Un metodo, applicato in Italia per introdurre sulla cartografia il sistema ED50, è consistito nel modificare fisicamente il taglio degli elementi cartografici impostandolo su valori interi di coordinate geografiche nel nuovo sistema. Un secondo metodo consiste nel riassegnare ai vertici degli elementi cartografici i valori che loro competono nel nuovo sistema, accettando valori non interi, ma conservando la porzione di territorio rappresentata in ogni elemento e limitando i cambiamenti ad alcune informazioni alfanumeriche associate all'elemento cartografico, analogico e digitale.

Una scelta drastica per l'uno e per l'altro metodo risulta difficile per le implicazioni operative, che in ogni caso presentano aspetti negativi. È opportuno adottare il secondo metodo per tutta la cartografia esistente e per gli eventuali aggiornamenti, consentendo così il recupero del patrimonio cartografico disponibile, (analogico e digitale) e l'utilizzazione diretta nel sistema globale WGS84.

Per quanto riguarda il primo metodo, esso risulta criticabile per l'applicazione che ne è stata fatta in epoca di cartografia analogica, in quanto ha comportato un onerosissimo lavoro di mosaicatura e disegno per il passaggio dalla tradizionale serie 1:25.000, articolata in tavolette (pari a 1/16 dei fogli 1:100.000) alla serie articolata in sezioni (pari a 1/4 dei fogli 1:50.000). Per la cartografia a più grande scala 1:10.000 e 1:5.000, esso ha comportato l'importazione, in serie cartografiche di maggior precisione metrica, di un sistema geodetico di minor precisione (ED 50) rispetto a quello disponibile (Roma40), anche se l'influenza è limitata al taglio degli elementi cartografici.

Oggi il problema, nell'ambito della cartografia numerica e alla luce delle caratteristiche delle metodologie satellitari, si pone diversamente:

infatti, mentre allora l'adozione di un sistema sovranazionale pagò lo scotto di una sorta di "generalizzazione" e quindi di un degrado della geometria relativa, oggi la globalizzazione del sistema può agire in direzione opposta, grazie al ribaltamento dei rapporti di affidabilità tra sistema locale e sistema globale. Il sistema europeo ED50 era più esteso ma meno preciso dei sistemi nazionali, in quanto derivante da uno sfoltimento delle misure classiche che li realizzavano; il sistema globale WGS84 è più esteso e più preciso dei sistemi nazionali perché derivante da nuove e differenti misure e nuove metodologie di calcolo.

Per questo è auspicabile che, in un'ottica strategica che guardi almeno ai prossimi decenni e miri a costruire un prodotto fruibile anche in presenza di future esigenze, s'istituisca un nuovo sistema cartografico: al di là di un breve, limitato periodo transitorio di coesistenza con i vecchi sistemi, esso dovrà sostituirsi totalmente a questi come unico e moderno sistema di riferimento.

Ritornando alla cartografia esistente, per rendere possibile e agevole riportare coordinate GPS su di essa, la soluzione risiede in un nuovo reticolato cartografico UTM-WGS84. È dunque necessario, sufficiente ed urgente calcolare le coordinate geografiche e piane dei vertici degli elementi cartografici, rispettivamente nel sistema WGS84 e nella rappresentazione UTM-WGS84, e riportare sulle carte il reticolato corrispondente.

Senza tale reticolato, le coordinate rilevate da un ricevitore GPS non possono essere direttamente utilizzate. Le coordinate sono in fondo un indirizzo spaziale: senza di esse siamo persi, ma siamo in crisi anche se le abbiamo e non le possiamo direttamente utilizzare. I ricevitori GPS più semplici costano qualche centinaio di migliaia di lire. Per i cacciatori o gli escursionisti, sacchi a pelo di buona qualità, tende e zaini costano ciascuno più dell'accesso al moderno sistema di navigazione del Dipartimento della Difesa americano da svariati miliardi di dollari! Tuttavia, l'assenza di un sistema standard di coordinate piane limita notevolmente l'uso delle informazioni di posizione fornite da questi ricevitori. Nel futuro prevedibile, il GPS fornirà un'accuratezza metrica entro un limite di costo di poche centinaia di migliaia di lire. Questa è la precisione di una carta topografica in scala, 1:5.000. Le unità GPS a basso costo incrementeranno l'uso di carte di tutti i tipi, analogiche e digitali, mentre le carte direttamente utilizzabili in UTM-WGS84 incrementeranno l'uso del GPS. È quindi importante stimolare i produttori di cartografia ad applicare il reticolato UTM-WGS84 come uno standard. Non tanto tempo fa, un biglietto da visita con un indirizzo Internet era una novità. Oggi è una pratica d'affari consueta. Nell'era dell'informazione le coordinate UTM-WGS84 dovrebbero diventare un indirizzo geospaziale comunemente accettato a completamento degli indirizzi convenzionali. Esso arricchisce di un aspetto bidimensionale ciò che era precedentemente un sistema monodimensionale, accelerando il processo di localizzazione. È semplicemente un altro aspetto dell'era dell'informazione.