

1.4 ORIENTAMENTO E GEOREFERENZIAZIONE

Ogni indagine richiede una opportuna verifica di campo sia come conferma dell'interpretazione tematica effettuata di un determinato territorio sulla base degli strumenti conoscitivi disponibili, sia come valutazione delle trasformazioni intervenute nel tempo. Tale verifica deve risultare, almeno in una fase iniziale, puntuale così da fornire di quello specifico sito le opportune coordinate geografiche a cui collegare una scheda di rilevamento e/o un repertorio cartografico. Il rilevamento di campagna dovrà essere programmato in modo non solo di fornire risposte agli interrogativi emersi durante la lettura e l'analisi della documentazione disponibile, ma anche per indagare sulle caratteristiche "nascoste" dell'ecosistema in esame; ad esempio: i tipi di suolo (livello: pedosfera) e le formazioni petrografiche e idrogeologiche (livello: litosfera), le essenze vegetali e le specie animali (livello biosfera), le tipologie degli insediamenti antropici (livello: antroposfera), la qualità delle acque superficiali e profonde (idrosfera), e così via. In tal senso potranno risultare di supporto documenti tematici realizzati da Enti diversi. Il rilievo di campo rappresenta un'attività indispensabile nel processo conoscitivo perché obbliga alla verifica di quanto è stato elaborato, al confronto tra l'oggetto rappresentato in forma grafica e nella realtà, ad eseguire rilievi mediante criteri omogenei di raccolta dei dati, ad osservare in maniera approfondita le eventuali differenze all'interno di un sottosistema ambientale (ad esempio: le diverse essenze arboree ed erbacee presenti in un bosco), ad effettuare prelievi ragionati per la creazione di collezioni (ad esempio: una pedoteca) o per eseguire determinazioni analitiche di laboratorio. Questo capitolo è pertanto dedicato agli strumenti che permettono l'orientamento, di eseguire misure e di georeferenziare gli "oggetti" sul territorio; la conoscenza di tali strumenti e delle relative metodologie d'uso oltre a facilitare la percorrenza degli itinerari prefissati, abitua a collocare con buona precisione gli "oggetti" rilevati (georeferenziazione)

contribuendo alla organizzazione di banche dati sempre aggiornabili nel tempo e in grado di interscambiare informazioni.

1.4.1 Orientamento con il cielo

L'*orientamento* è l'insieme delle tecniche che permettono di riconoscere la propria posizione all'interno di un terreno non noto, in genere individuando la direzione del Nord.

L'essere in grado in ogni momento di fare il punto della propria posizione non solo si rivela una precauzione nel caso in cui si dovesse rimanere isolati, ma rende sicuri ed autosufficienti, permettendo una presa di contatto meno superficiale dei luoghi frequentati.

Popolazioni che vivono a stretto contatto con l'ambiente sono in grado di orientarsi mediante l'osservazione degli elementi della natura, legati però essenzialmente alle condizioni geografiche e climatiche del luogo e quindi difficilmente assumibili come modelli universalmente validi. Il muschio non cresce sempre sulla parte dell'albero esposta a nord. In alcuni luoghi cresce sul tronco intero, in altri in nessuna parte. Non resta quindi che rivolgersi al sole, alle stelle e alla luna avendo cura di distinguere i problemi di orientamento a seconda della generica posizione in cui ci si trova: a nord del Tropico del Cancro, nella fascia intertropicale, a sud del Tropico del Capricorno.

Orientamento a nord del Tropico del Cancro

Il rilevamento della posizione all'alba e al tramonto.

È il metodo più sicuro e anche il più facile poiché non richiede alcun tipo di strumento. Vale per tutte le latitudini temperate, dal Tropico del Cancro sino a 54° nord. Oltre diviene grossolanamente impreciso per l'eccessiva riduzione dell'angolo formato dall'orbita apparente del sole con il piano dell'orizzonte.

La posizione del sole deve essere calcolata nel momento in cui si trova per circa la metà del suo diametro sopra l'orizzonte. Il sole sorge e tramonta esattamente a est e ad ovest solo due volte all'anno, nell'equinozio di primavera e nell'equinozio

di autunno. In autunno e in inverno invece il sole sorge e tramonta più a sud, in primavera e in estate più a nord. Per determinare con precisione i punti

cardinali bisogna quindi conoscere la posizione in gradi all'alba e al tramonto alle diverse latitudini e nelle varie stagioni dell'anno (tab. 1.4.1).

Posizione del Sole all'alba (in gradi)								Posizione del Sole al tramonto (in gradi)							
Data	Latitudine, Nord o Sud							Data	Latitudine, Nord o Sud						
	25°	34°	40°	44°	47°	50°	52°		25°	34°	40°	44°	47°	50°	52°
Gen. 1	116	118	121	123	125	127	129	Gen. 1	244	242	239	237	235	233	231
16	113	116	118	120	122	124	126	16	247	244	242	240	238	236	234
25	111	113	115	117	119	120	122	25	249	247	245	243	241	240	238
Feb. 2	109	111	112	114	115	117	118	Feb. 1	251	249	248	246	245	243	242
8	107	108	110	111	112	114	115	8	253	252	250	249	248	246	245
15	104	106	107	108	109	110	111	14	256	254	253	252	251	250	249
20	102	103	104	105	106	107	108	20	258	257	256	255	254	253	252
26	100	101	102	103	103	104	105	25	260	259	258	257	257	256	255
Mar. 3	98	98	99	100	100	101	101	Mar. 3	262	262	261	260	260	259	259
8	96	96	97	97	97	98	98	8	264	264	263	263	263	262	262
13	93	94	94	94	94	95	95	13	267	266	266	266	266	265	265
18	91	91	91	91	91	92	92	18	269	269	269	269	269	268	268
23	89	89	89	89	89	88	88	23	271	271	271	271	271	272	272
29	87	86	86	86	86	85	85	29	273	274	274	274	274	275	275
Apr. 3	84	84	83	83	83	82	82	Apr. 3	276	276	277	277	277	278	278
8	82	82	81	80	80	79	79	8	278	278	279	280	280	281	281
13	80	79	78	77	77	76	75	13	280	281	282	283	283	284	285
19	78	77	76	75	74	73	72	19	282	283	284	285	286	287	288
25	76	74	73	72	71	70	69	25	284	286	287	288	289	290	291
Mag. 1	73	72	70	69	68	66	65	Mag. 1	287	288	290	291	292	294	295
8	71	69	68	66	65	63	62	8	289	291	292	294	295	297	298
16	69	67	65	63	61	60	58	16	291	293	293	297	299	300	302
26	67	64	62	60	58	56	54	26	293	296	298	300	302	304	306
Giu. 10	64	62	59	57	55	53	51	Giu. 10	296	298	301	303	305	307	309
30	64	62	59	57	55	53	51	30	296	298	301	303	305	307	309
Lug. 1	64	62	59	57	55	53	51	Lug. 1	296	298	301	303	305	307	309
19	67	64	62	60	58	56	54	19	293	296	298	300	302	304	306
28	69	67	65	63	61	60	58	28	291	293	295	297	299	300	302
Ago. 5	71	69	68	66	65	63	62	Ago. 5	289	291	292	294	295	297	298
12	73	72	70	69	68	66	65	12	287	288	290	291	292	294	295
19	76	74	73	72	71	70	69	18	284	286	287	288	289	290	291
25	78	77	76	75	74	73	72	24	282	283	284	285	286	287	288
30	80	79	78	77	77	76	75	30	280	281	282	283	283	284	285
Set. 5	82	82	81	80	80	79	79	Set. 4	278	278	279	280	280	281	281
10	84	84	83	83	83	82	82	10	276	276	277	277	277	278	278
16	87	86	86	86	86	85	85	15	273	274	274	274	274	275	275
21	89	89	89	89	89	88	88	20	271	271	271	271	271	272	272
26	91	91	91	91	91	92	92	26	269	269	269	269	269	268	268
Ott. 1	93	94	94	94	94	95	95	Ott. 1	267	266	266	266	266	265	265
6	96	96	97	97	97	98	98	6	264	264	263	263	263	262	262
11	98	98	99	100	100	101	101	11	262	262	261	260	260	259	259
17	100	101	102	103	103	104	105	16	260	259	258	257	257	256	255
22	102	103	104	105	106	107	108	22	258	257	256	255	254	253	252
28	104	106	107	108	109	110	111	28	256	254	253	252	251	250	249
Nov. 3	107	108	110	111	112	114	115	Nov. 3	253	252	250	249	248	246	245
10	109	111	112	114	115	117	118	9	251	249	248	246	245	243	242
18	111	113	115	117	119	120	122	17	249	247	245	243	241	240	238
27	113	116	118	120	122	124	126	26	247	244	242	240	238	236	234
Dic. 11	116	118	121	123	125	127	129	Dic. 11	244	242	239	237	235	233	231
31	116	118	121	123	125	127	129	31	244	242	239	237	235	233	231

Tabella 1.4.1

Il rilevamento del sud dalla posizione del sole a mezzogiorno. Nel nostro emisfero il sole si trova a mezzogiorno a sud e quindi la sua ombra si proietta verso nord.

È sufficiente quindi possedere un orologio, il più esatto possibile perché a differenza dell'alba e del tramonto a mezzogiorno il sole cambia rapidamente di posizione. Se ci limitiamo ad osservare l'orologio abbiamo in realtà una direzione sud leggermente approssimata, sufficiente per un orientamento di massima. Se invece vogliamo una informazione più precisa il problema si complica. L'orbita del sole intorno alla Terra è un'ellissi e l'asse della Terra risulta inclinato di $23^{\circ} 33'$; il sole si trova a sud da 15 min prima a 14 min dopo rispetto al tempo medio locale di mezzogiorno, a seconda delle stagioni. Non basta. I nostri orologi sono regolati su un tempo standard e non sul tempo locale. Il mezzogiorno locale coincide con il mezzogiorno del nostro orologio solo se ci troviamo sul meridiano centrale del fuso orario che ci riguarda. Se siamo a est dello stesso il mezzogiorno locale è anticipato rispetto a quello del nostro orologio poiché il sole vi giunge prima. Se siamo a ovest il mezzogiorno è posticipato rispetto a quello del nostro orologio in quanto il sole deve ancora giungervi.

Ora sappiamo che la Terra è divisa in tanti fusi orari che differiscono l'un dall'altro di un'ora e

che coprono una zona di 150 km che si estende per $7^{\circ} 30'$ di longitudine a est e a ovest del meridiano centrale o standard. Per ogni grado di longitudine la differenza del tempo locale è di 4 min, per ogni quarto di grado di un minuto. Due sono le informazioni che occorrono per effettuare il calcolo. Conoscere il meridiano centrale o standard del fuso in cui ci troviamo e la nostra longitudine. Basta allora calcolare la differenza in gradi fra i due valori, moltiplicare ogni grado per 4, sottrarre o aggiungere il risultato al tempo indicato dall'analemma a seconda se ci troviamo a est o a ovest del meridiano standard.

L'*analemma* in astronomia indica una particolare curva geometrica a forma di otto che descrive la posizione del sole nei diversi giorni dell'anno, alla stessa ora e nella stessa località (tab. 1.4.2).

A causa dell'inclinazione dell'asse terrestre ($23,5^{\circ}$) e dell'ellitticità dell'orbita, l'altezza del Sole sull'orizzonte non è uguale giorno dopo giorno, e l'effetto combinato è quello della figura descritta. La coordinata verticale di ogni punto corrisponde alla declinazione del sole a quella data, mentre la coordinata orizzontale indica lo scostamento della posizione solare in anticipo o in ritardo rispetto al tempo medio (quello mostrato dagli orologi). L'inclinazione dell'asse della figura dipende dalla latitudine di osservazione.

Data	Mezzogiorno	Data	Mezzogiorno	Data	Mezzogiorno
Gen. 1-2	12:03	Mag. 27-30	11:57	26-28	11:51
3-4	12:04	1-5	11:57	29-30	11:50
5-6	12:05	6-24	11:56	Ott. 1-4	11:49
7-9	12:06	25-31	11:57	5-8	11:48
10-12	12:07	Giu. 1-2	11:57	9-10	11:47
13	12:08	3-9	11:58	11-15	11:46
14-16	12:09	10-12	11:59	16-22	11:45
17-20	12:10	13-18	12:00	23-25	11:44
21-22	12:11	19-23	12:01	26-31	11:43
23-28	12:12	24-26	12:02	Nov. 1-12	11:43
29-31	12:13	27-30	12:03	13-16	11:44
Feb. 1-6	12:13	Lug. 1-2	12:03	17-21	11:45
7-17	12:14	3-9	12:04	22-26	11:46
18-27	12:13	10-14	12:05	27	11:47
28-29	12:12	15-31	12:06	28-30	11:48
Mar. 1-5	12:12	Ago 1-7	12:06	Dic. 1	11:48
6-7	12:11	8-12	12:05	2-4	11:49
8-12	12:10	13-18	12:04	5	11:50
13-16	12:09	19-23	12:03	6-8	11:51
17-18	12:08	24-25	12:02	9-11	11:52
19-22	12:07	26-29	12:01	12	11:53
23-26	12:06	30-31	12:00	13-15	11:54
27-28	12:05	Set. 1-2	12:00	16-17	11:55
29-31	12:01	3-4	11:59	18	11:56
Apr. 1	12:04	5-8	11:58	19-21	11:57
2-5	12:03	9-11	11:57	22-23	11:58
6-7	12:02	12-13	11:56	24	11:59
8-12	12:01	14-16	11:55	25-27	12:00
13-17	12:00	17-20	11:54	28-29	12:01
18-19	11:59	21	11:53	30-31	12:02
20-26	11:58	22-25	11:52		

Tabella 1.4.2 L'analemma

Rilevamento del nord col metodo dell'ombra. Si tratta di misurare l'altezza del sole prima e dopo mezzogiorno servendosi dell'ombra proiettata sul terreno da un oggetto verticale. L'altezza del sole all'orizzonte prima di mezzogiorno è infatti virtualmente la medesima di quella allo stesso intervallo di tempo dopo mezzogiorno, in ogni luogo e in qualsiasi giorno dell'anno. Piantiamo nel terreno un oggetto verticale (una matita, una pala, un bastoncino da sci). Segniamo il punto in cui arriva l'ombra almeno mezz'ora prima di mezzogiorno e misuriamo la lunghezza. Quando dopo mezzogiorno l'ombra raggiunge la medesima lunghezza segniamo di nuovo il punto e lo congiungiamo con quello già preso. La direzione del nord coinciderà con la linea che va dalla base dell'oggetto verticale alla metà della linea che unisce le due tacche.

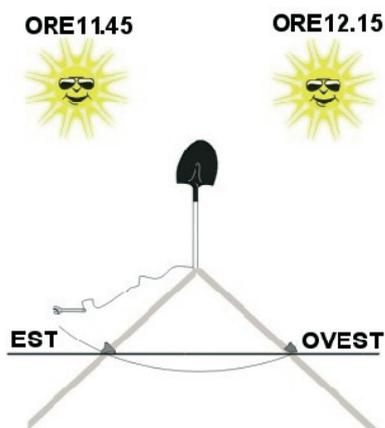


Figura 1.4.1 Rilevamento del nord con il metodo dell'ombra

L'individuazione del nord mediante il sole e l'orologio. Si tratta di un metodo assai pratico ma che comporta grossolani errori. Ha il vantaggio di poter essere usato in ogni momento della giornata. Si punta la lancetta delle ore in direzione del sole. La direzione del nord è data dalla linea che congiunge il centro dell'orologio con l'ora che è la metà di quella segnata dalla lancetta. Le ore si contano da 0 a 24. Se ci troviamo prima di mezzogiorno non ci sono problemi. Il sole è nella direzione delle ore 10. Dividiamo 10 per 2 e otteniamo 5. Il nord è nella direzione delle ore 5. Il sole è nella direzione delle 4 postmeridiane, quindi delle 16. Dividiamo 16 per 2 e otteniamo 8 e il nord si trova effettivamente nella direzione che corrisponde alle 8 dell'orologio.

Attenzione all'ora legale. Nel caso fosse in vigore, prima di effettuare il calcolo, bisogna sottrarre un'ora.

Nell'arco delle 12 ore della giornata il sole nel suo moto apparente sembra percorrere una semicirconferenza di 180° , mentre la lancetta dell'orologio effettua nello stesso tempo un giro completo di 360° . E' per questo motivo che dividiamo per due l'ora rivolta verso il sole. In realtà le cose vanno diversamente. Il sole infatti, a differenza delle lancette dell'orologio che ruotano su di un piano orizzontale, è alto nel cielo e la sua orbita è una ellissi. La sua velocità di 15° all'ora quindi risulta solo una velocità media. Essa varia a seconda delle ore della giornata e della latitudine. Il metodo dell'orologio funziona sempre meglio man mano ci si porta verso latitudini elevate e nei mesi invernali, quando il sole si trova basso sull'orizzonte. Le condizioni migliori si verificano oltre il Circolo Polare Artico, in Alaska, nel Canada settentrionale, in Groenlandia e in Scandinavia, con errori sotto i 3° d'inverno e 10° d'estate.



Figura 1.4.2 Individuazione del nord mediante il sole e l'orologio

L'orientamento con le stelle. Il miglior riferimento per l'orientamento notturno in assenza di nubi è la Stella Polare che indica il nord con una differenza massima di $1^\circ 14'$. La Stella Polare, l'ultima del timone del Piccolo Carro o Orsa Minore, una costellazione formata da sette stelle, non è molto luminosa ed è distinguibile con difficoltà ad occhio nudo. Per la sua ricerca ci si serve allora di due costellazioni molto più evidenti che durante la notte e nel corso dell'anno le ruotano attorno: il Grande Carro e Cassiopea. Anche il Grande Carro è formato da sette stelle.

La Stella Polare si trova prolungando con una linea ideale le due stelle posteriori del carro per una distanza di cinque volte superiore a quella esistente fra le due stelle di partenza.

Quando il Grande Carro non è visibile o si trova troppo basso all'orizzonte si ricorre a Cassiopea, una costellazione formata da cinque stelle a M che si trova nel cielo sul lato opposto. La stella centrale è nella direzione della Stella Polare.

Un'altra costellazione utile è quella di Orione, dalla caratteristica forma a clessidra, molto ben distinguibile nel cielo, soprattutto d'inverno. Il riferimento è dato dalle stelle che ne formano la cintura e che, trovandosi quasi all'equatore celeste, sorgono dappertutto all'est e tramontano all'ovest. In estate Orione diviene scarsamente utilizzabile perché sorge e tramonta quando è troppo chiaro.

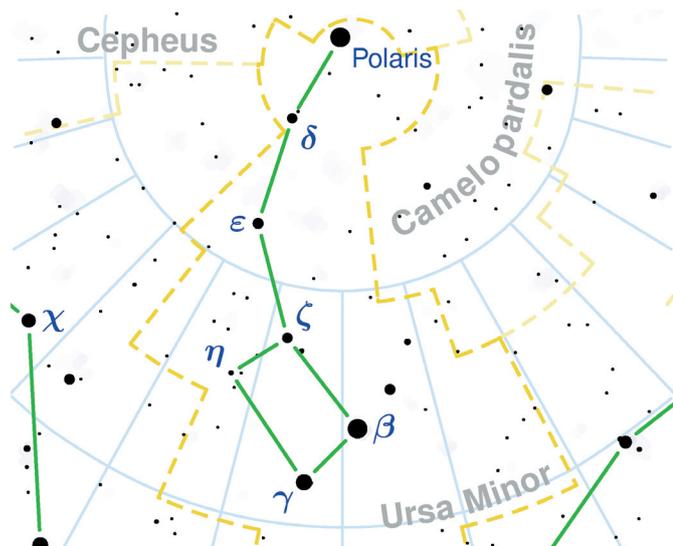


Figura 1.4.3 Schema della costellazione del Piccolo Carro

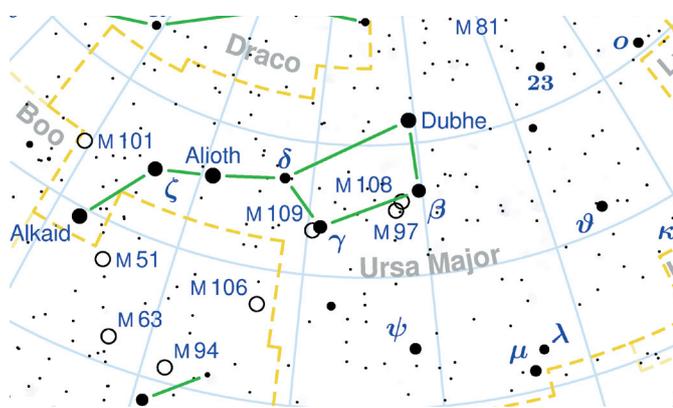


Figura 1.4.4 Schema della costellazione del Grande Carro

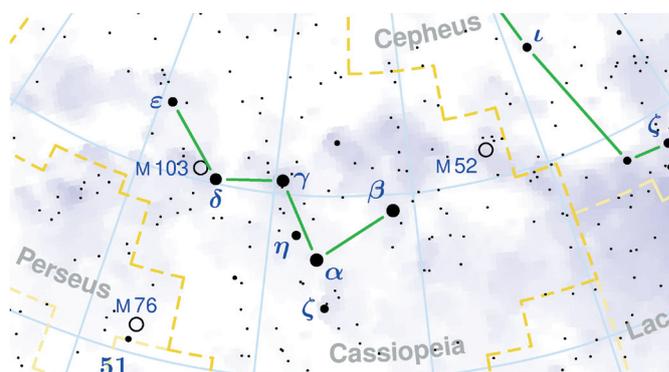


Figura 1.4.5 Schema della costellazione di Cassiopea

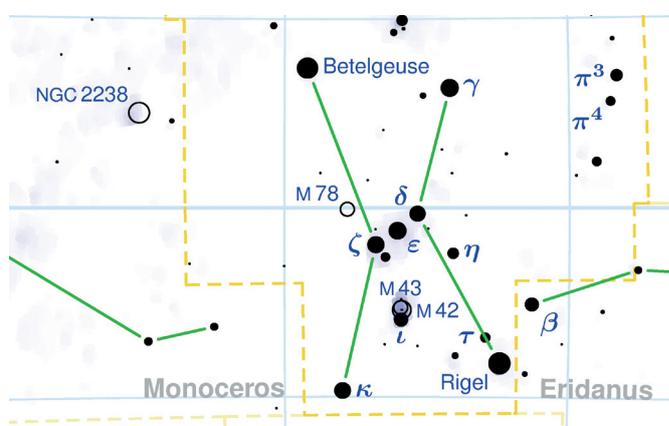


Figura 1.4.6 Schema della costellazione di Orione

L'orientamento con la luna. Anche la luna può fornire riferimenti che, se pure molto approssimativi in fatto di esattezza, sono comunque indicativi. Quando la luna è piena possiamo determinare il sud servendoci di un orologio e compiendo le stesse operazioni effettuate per individuare il nord con il sole. Si punta la lancetta delle ore in direzione della luna. Il sud è indicato dalla linea che congiunge il centro dell'orologio con l'ora che è la metà di quella segnata dalla lancetta delle ore. Bisogna ricordarsi che le 8 sono le 20, le 9 le 21 e così via. Si può usare il metodo dell'orologio anche con la luna al primo o all'ultimo quarto. Quando la luna è al primo quarto (gobba a ponente, approssimativamente a sud alle ore 18 e a ovest alle ore 24) il rilevamento indica la direzione ovest. Per avere quella del nord occorre sommare tre ore all'ora ottenuta dalla divisione. Quando la luna è all'ultimo quarto (gobba a levante, approssimativamente a est alle ore 24 e a sud alle ore 6) il consueto rilevamento ci fornisce la direzione dell'est. Per avere quella del nord occorre in questo caso sottrarre tre ore.

Orientamento nella fascia intertropicale

L'orientamento con il sole. Il rilevamento della posizione all'alba e al tramonto rimane il sistema più valido. Ai tropici del resto il rilevamento della posizione del sole, che naturalmente come nella zona temperata sorge più a sud durante l'inverno e più a nord durante l'estate, è facilitato da due fattori. Al momento della sua comparsa all'orizzonte il sole cambia posizione molto più lentamente. In secondo luogo si può affermare che il sole ai Tropici sorge dovunque nella stessa posizione e che il fattore latitudine è in pratica ininfluenza. Tutti gli altri metodi illustrati in precedenza sono invece di scarsa utilità.

L'orientamento con le stelle. Non c'è zona del cielo come quella tropicale più adatta per l'osservazione notturna. La Stella Polare sarà visibile a sud del fiume Niger sino ad una latitudine di 10° . Alta nel cielo troveremo sempre la costellazione di Orione, la cui cintura, che è circa all'equatore celeste, continuerà a segnare l'est al suo sorgere e l'ovest al suo tramontare. Ma già alla latitudine del deserto del Sahara compariranno altre costellazioni. Fra di esse la famosa Croce di sud che si può osservare, almeno per una parte delle notti, ancora prima di passare la linea dell'equatore. La Croce del Sud è formata da quattro stelle disposte a croce: l'altezza del braccio più lungo, cioè la distanza tra la stella di testa (la più luminosa) e la stella di piede della Croce è di circa 6° , corrispondenti a tre dita. La Croce non indica esattamente il sud. Il polo sud si trova spostato di circa 27° dal piede della Croce, il che equivale alla distanza di poco meno di tre spanne della mano. Bisognerà aspettare di superare l'equatore per vedere la Croce alta sull'orizzonte, ma solo alle latitudini del Tropico del Capricorno, nell'emisfero australe, potremo averla a lungo compagna dei nostri viaggi. In questo emisfero tutte le costellazioni appaiono per noi rovesciate, come pure le fasi della luna: il quarto di luna crescente sembra calante e quello calante sembra crescente. Il primo quarto sembra l'ultimo e l'ultimo il primo.

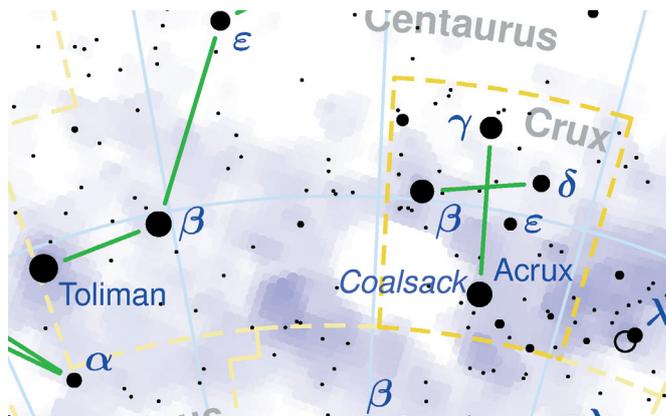


Figura 1.4.7 Schema della costellazione della Croce del sud

Orientamento a sud del Tropico del Capricorno

L'orientamento con il sole. Per quanto riguarda il rilevamento del sole all'alba e al tramonto per trovare l'est e l'ovest vale quanto detto per la zona a nord del Tropico del Cancro. L'osservazione del sole rimane il metodo più attendibile e anche a sud del Tropico del Capricorno si possono usare le tabelle riportate.

Anche il rilevamento della posizione del sole a mezzogiorno può essere utilizzato. I dati sono sempre gli stessi ma qui il sole a mezzogiorno indica il nord e non il sud. La stessa osservazione si applica al metodo della lunghezza dell'ombra: la linea che unisce la base dell'oggetto verticale che abbiamo infisso nel terreno con la metà della linea che congiunge le tacche corrispondenti alla posizione dell'ombra prima e dopo mezzogiorno indica in questo caso la direzione sud.

L'orientamento con le stelle. La costellazione della Croce del sud è il riferimento più visibile anche se non preciso del cielo notturno. Orione, seppur rovesciato, indica sempre al suo sorgere e al suo tramontare l'est e l'ovest.

1.4.2 Orientamento con la bussola e con la carta topografica

L'orientamento con la bussola. Cristoforo Colombo, durante le sue esplorazioni, si accorse che la direzione indicata dall'ago magnetico della bussola non coincideva esattamente con la direzione indicata dalla Stella Polare. Ora, era noto fino dal-

l'antichità ai naviganti che questa stella, rispetto a chi la osserva nell'emisfero boreale (cioè quello a Nord rispetto all'Equatore), è posta sulla verticale del Polo Nord geografico. Essa è l'ultima stella del timone del Piccolo Carro (o Orsa Minore), e la sua posizione, non facilissima da individuare, la si trova sul prolungamento della sponda posteriore del Gran Carro (o Orsa Maggiore), ben più visibile.

Dunque l'ago della bussola riconosceva un Polo Nord Magnetico che non coincideva col Polo Nord Geografico. La comprensione del fenomeno la si ebbe solo nel XVII secolo, quando si ipotizzò che la Terra fosse in realtà un immenso magnete (non dimentichiamo che il nucleo fuso della Terra è composto in gran quantità di ferro), le cui linee di flusso uscivano dal Polo Sud (magnetico) e rientravano al Polo Nord (magnetico); e l'ago della bussola si orienta sempre secondo queste linee di flusso che circondano la Terra, con direzione Nord. Questa proprietà era già stata scoperta dai cinesi nel 2500 a.C., che furono infatti i primi a costruire uno strumento composto essenzialmente da un ago magnetizzato disposto in modo da poter oscillare liberamente e orientarsi così sempre, per effetto del magnetismo terrestre, nella direzione nord-sud.

L'uso della bussola è per di più complicato dal variare del campo magnetico terrestre; esso infatti si concentra in due punti o poli che attraggono l'ago calamitato perché in un certo senso costituiscono le estremità di quel grosso magnete che possiamo immaginare posto all'interno della terra (il polo nord ed il polo sud magnetico); l'inclinazione di questo magnete però non coincide con quella dell'asse di rotazione terrestre e pertanto i poli magnetici non corrispondono ai poli geografici. I primi, anzi, non solo sono distanziati dai secondi, ma mutano annualmente la loro posizione. L'angolo formato dalla direzione del polo nord magnetico e da quella del polo nord geografico si chiama *declinazione magnetica*, un valore che può variare da 0° a 180° ed essere occidentale o orientale. La declinazione occidentale è negativa e si designa mediante il segno -, la declinazione orientale è positiva e si designa mediante il segno +.

Il polo nord magnetico si trova attualmente spostato

da quello geografico di circa 966 km ed è situato nel Canada settentrionale. Il polo sud magnetico si trova nella Terra Victoria in Antartide. I valori della declinazione magnetica e delle sue variazioni annue sono segnati sulle carte topografiche che riportano pure in tratteggio i settori caratterizzati da eventuali anomalie. Per ricavarli e aggiornarli basta un semplice calcolo.

Chiarito il concetto di declinazione è opportuno introdurre quello, più complesso, di inclinazione magnetica. Immaginiamo l'ago della bussola appeso ad un filo. Esso non solo ruoterebbe orizzontalmente, ma subirebbe pure una inclinazione in senso verticale: l'estremità nord dell'ago si inclinerebbe cioè verso l'alto nell'emisfero australe e verso il basso in quello boreale. Si manterrebbe perfettamente in piano in corrispondenza dell'equatore magnetico e si inclinerebbe di 90° al polo nord e al polo sud. Esistono quindi bussole bilanciate per latitudini a nord dell'equatore magnetico (grazie a un peso posto all'estremità dell'ago che punta verso sud), prive di bilanciamento per latitudini vicine all'equatore magnetico e bilanciate per latitudini a sud dell'equatore magnetico (grazie a un peso applicato all'estremità dell'ago che punta verso nord). In prossimità del polo nord e del sud magnetico (Alaska, Canada, Groenlandia settentrionale, Australia e Nuova Zelanda), le bussole richiedono una taratura supplementare.

Per orientare la bussola è sufficiente tenerla in mano e ruotare l'abitacolo fino a quando la punta dell'ago calamitato che indica il nord magnetico viene a coincidere con il nord della bussola, cioè in pratica a sovrapporsi alla freccia di orientamento posta sulla base dell'abitacolo stesso. In questo modo si determina la direzione del nord e di conseguenza quella di tutti gli altri punti cardinali.

Per trovare la direzione di marcia sul terreno si dovrà calcolare il valore dell'Azimut, cioè dell'angolo espresso in gradi e misurato in senso orario formato dalla direzione del nord e da quella dell'oggetto verso cui siamo diretti. L'Azimut di ritorno o anche Azimut reciproco si ottiene aggiungendo 180° all'Azimut di andata se questo è minore di 180° ; sottraendo 180° all'Azimut di andata se questo è maggiore di 180° .

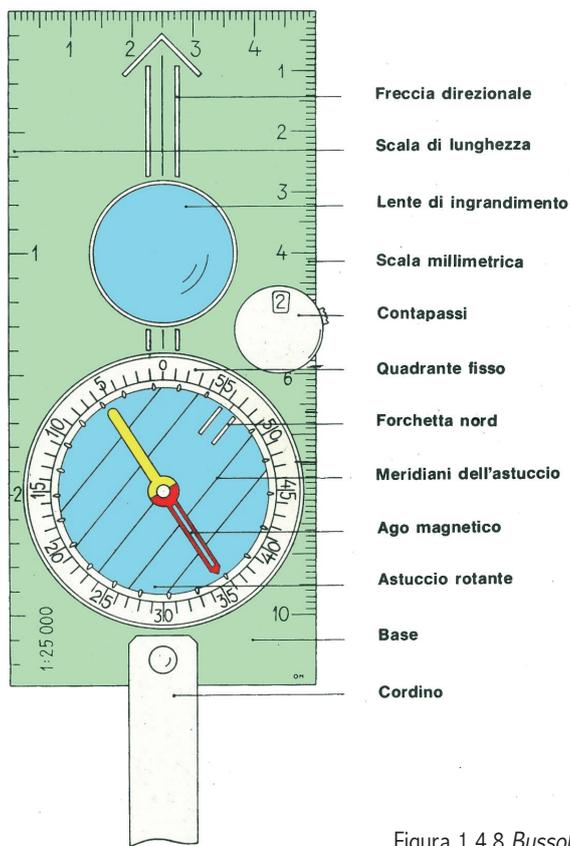


Figura 1.4.8 Bussola

La Rosa dei venti. Nella cassa della bussola vi è disegnato un cerchio graduato: è la Rosa dei Venti. Rosa? Venti? Cosa anno a che fare con la bussola? Un passo per volta: occorre sapere che la bussola è nata, come strumento per la navigazione, probabilmente in Cina, poi è stata introdotta in Europa nel XIII secolo; con l'aiuto della bussola è possibile sapere, quando si è in alto mare e senza terra in vista, quale direzione tenere per giungere a destinazione, tracciando la propria rotta secondo angoli calcolati rispetto al Nord. Nell'antichità si navigava a vela, con la forza del vento Era perciò molto importante sapere anche da quale direzione soffiava il vento, per andare lungo la rotta più opportuna. Ad ogni direzione da cui spira, si è dato un nome al vento, e ancora oggi le persone di mare usano il nome del vento per definire la direzione. Occorre anche sapere che per parecchi secoli si navigava quasi esclusivamente nel bacino del Mediterraneo, per cui i nomi dei venti hanno riferimenti a quest'area [tab. 1.4.3]. Per quanto riguarda i venti si ritiene sia tutto chiaro. Ma la Rosa? Forse, tutto sommato, i

Il vento spira da	Si chiama	Origine e significato del nome
Nord	Tramontana	così detto perchè viene "di là dai monti" (Trans-montanum, in latino), che per l'Italia sono rappresentati dalle Alpi - Vento freddo.
Nord - Est	Greco	per l'Italia non viene certo dalla Grecia, ma per il centro del Mediterraneo invece si.
Sud - Est	Scirocco	proviene da terre calde, ed il suo nome, che anticamente era "scilocco", deriva dall'arabo <i>scioluq</i> , che significa vento orientale – Vento caldo.
Sud	Ostro	più anticamente era "Austro", che significa meridione. L'emisfero australe è quello compreso fra l'Equatore e il Polo Sud. Quindi Ostro significa vento dal meridione.
Sud - Ovest	Libeccio	il nome è molto antico. Derivato dall'arabo "lebek", il quale a sua volta è derivato dal greco antico "libikòs", che significava "occidentale"; per la Grecia, il vento è veramente "libikòs", cioè libico, e precisamente proveniente dalla regione che ora si chiama Libia, nome esteso allora a gran parte del Nord-Africa.
Ovest	Ponente	così chiamato per il punto cardinale ove il sole "si pone" durante il tramonto.
Nord - Ovest	Maestro	così chiamato perchè "maestro della navigazione" nel Mediterraneo. Infatti con questo vento le navi riuscivano a percorrere i più lunghi tragitti, dalla Spagna alle coste dell'Egitto, sempre con andatura favorevole di vento.

Tabella 1.4.3 I nomi dei venti e loro significato

geografi e i navigatori medievali erano anche poeti: infatti hanno visto una rosa, con i diversi strati di petali, nel disegno delle direzioni dei venti.

L'orientamento con la sola carta topografica.

Ogni carta topografica è disegnata in modo che il lato superiore sia disposto verso nord. Senza la bussola è possibile orientare la carta solo quando sono visibili punti di riferimento naturali come il sole e significativi elementi del terreno.

Se conosciamo la posizione in cui ci troviamo (punto di stazione) è sufficiente riconoscere un oggetto topografico sul terreno (la cima di un monte, un campanile) e ruotare la carta in modo che la retta passante per il punto di stazione e l'oggetto coincida con l'allineamento sul terreno. Se invece non conosciamo con esattezza il punto di stazione dobbiamo riconoscere sulla carta e sul terreno due allineamenti (un tratto rettilineo di strada, di torrente) e ruotare la carta fino a quando i rispettivi allineamenti sulla carta e sul terreno risultino paralleli e nello stesso senso. La carta è allora orientata. Prolungando i due allineamenti sulla carta essi si intersecano nel punto di stazione.

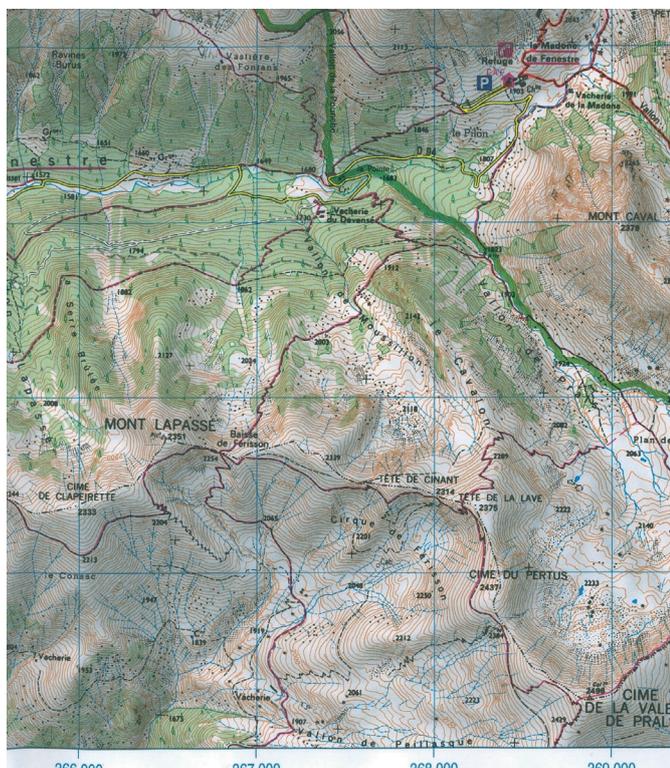


Figura 1.4.9 Esempio di carta topografica

L'Orienteering. L'orientamento (*orienteering* in inglese) è divenuta una disciplina sportiva, nata più di un secolo fa nei paesi scandinavi. L'orienteering, o *sport dei boschi*, consiste nell'effettuazione di un percorso predefinito caratterizzato da punti chiamati "lanterne" con l'aiuto esclusivo di una bussola e di una carta topografica a scala ridotta che contiene particolari del luogo da percorrere. Luogo di svolgimento sono i boschi ma possono essere utilizzati gli ambienti naturali in generale. La scelta del percorso e l'abilità di destreggiarsi all'interno di un bosco sono le peculiarità dell'orienteering.

Kastelruth - Castelrotto

Südtirol - Alto Adige

Masstab - Scala 1:10.000
 Aequidistanz - Equidistanza 5 m
 Stand - Realizzazione 1993

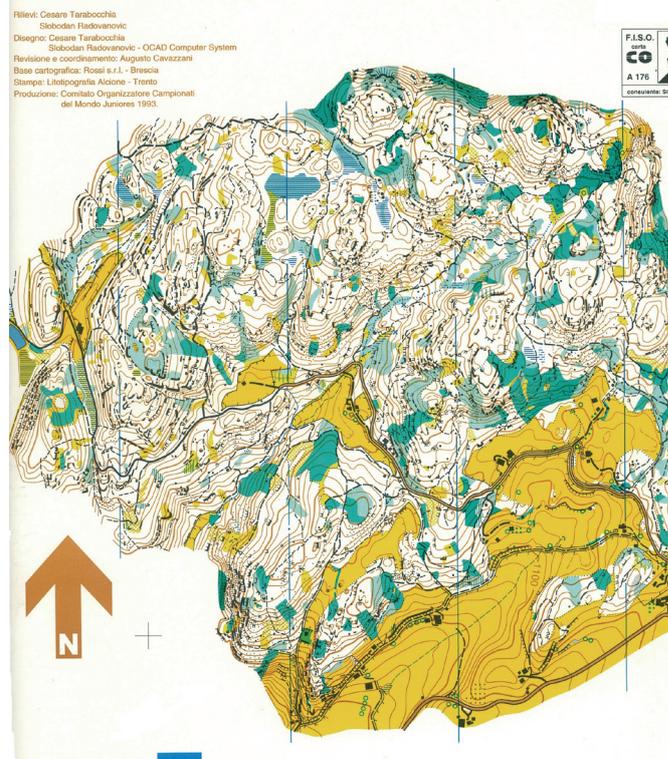


Figura 1.4.10 Esempio di cartaper l'orienteering

1.4.3 Georeferenziazione

Georeferenziare le informazioni territoriali, solitamente definite da attributi quantitativi e/o qualitativi intrinseci, significa collocarle spazialmente, ovvero definirle anche rispetto ad un sistema di riferimento unificato.

È allora intuitivo che uno dei più immediati strumenti di correlazione tra le informazioni è certamente costituito dalle coordinate, assegnate a ciascuna informazione per definirne la posizione e attraverso cui si possono determinare relazioni di vicinanza, influenza, conflitto, appartenenza e così via.

La cartografia è stata una delle prime manifestazioni di civiltà. Essa si è evoluta da forme primitive di disegno fino a carte accuratissime e raffinate, dapprima in formato analogico e oggi in forma digitale. Le caratteristiche fondamentali delle carte sono il contenuto, l'attualità e la precisione. Il contenuto dipende in larga misura dalla scala e l'attualità dalla data del rilevamento, mentre la precisione si relaziona alla cura con cui sono georeferenziati o georeferenzabili i particolari, intendendo per georeferenziazione quel complesso di attività che consentono di stabilire corrispondenze biunivoche tra informazioni territoriali in qualche modo rappresentate sulla carta e stima della relativa posizione spaziale, definita da una sequenza di coordinate in un assegnato sistema di riferimento.

Nel passato l'interesse verso i sistemi di riferimento in cui era inquadrata la cartografia e verso le coordinate presenti sulle carte era limitato agli scienziati e ai costruttori di carte, mentre l'utente era più che altro interessato al posizionamento relativo in un ambito locale. Le coordinate avevano in effetti scarso interesse e rappresentavano solo un mezzo per giungere all'impianto della cartografia, non un'informazione di valore autonomo da sfruttare da parte dell'utilizzatore. Accade oggi che tanti utenti di carte non conoscitori di coordinate divengano utenti di coordinate non conoscitori dei sistemi di riferimento. D'altra parte l'aumento vertiginoso delle informazioni che vengono raccolte e rese disponibili in svariate forme di banche dati, il ruolo dei moderni sistemi

di rilevamento (GPS), di rappresentazione e dei sistemi integrati di gestione delle informazioni territoriali (sistemi informativi geografici), evidenziano la necessità di una base geometrica omogenea e di un unico sistema di coordinate. Con la crescita delle applicazioni riferite ad osservazioni satellitari, il sistema di riferimento globale assume pertanto un'importanza crescente nei settori della navigazione terrestre, marittima ed aerea, così come 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.

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 spesso è difficile, e talvolta impossibile, istituire delle metodologie di trasformazione generalizzate.

Sistemi di riferimento: definizione, realizzazione e utilizzazione. 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.

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 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 piane o metriche. L'ellissoide è invece molto meno sfruttabile come superficie di riferimento per le coordinate altimetriche in quanto priva di significato fisico; al suo posto è utilizzato il geode, definito come superficie equipotenziale nel campo della gravità che meglio approssima il livello medio del mare. 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 [fig. 1.4.11].

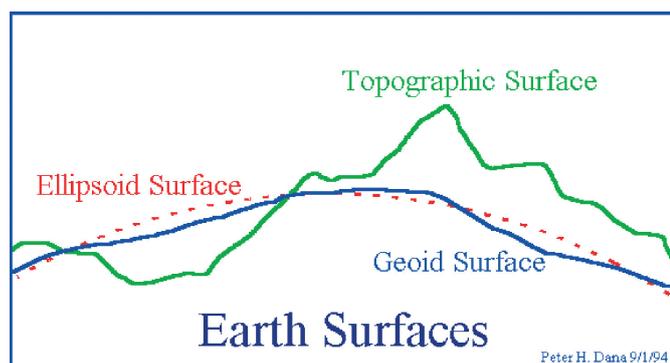


Figura 1.4.11 Superficie topografica, geodetica ed ellissoidica

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 che il problema della determinazione dei punti è stato tradizionalmente affrontato dalla geodesia classica scindendo nettamente la parte altimetrica da quella planimetrica, troviamo normalmente due superfici di riferimento definite in maniera diversa in ogni nazione: un geode e un ellissoide locali.

I sistemi di coordinate geodetiche locali, con ellipsoidi di riferimento scelti per approssimare la forma della Terra al meglio in una determinata regione erano e sono ancora utilizzati in molti paesi.

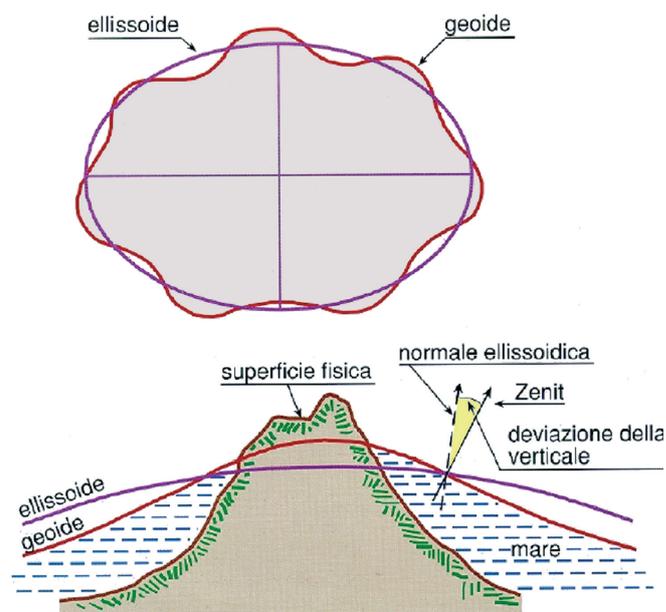


Figura 1.4.12

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. 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. In uno stesso datum si possono usare molti sistemi di coordinate. Un ellissoide biassiale di riferimento (generato dalla rotazione di un'ellisse attorno al suo asse minore) associato ad un sistema locale costituisce il sistema di riferimento geodetico planimetrico. 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 (gli scostamenti angolari sono comunque molto piccoli). L'ellissoide locale deve es-

sere posizionato e orientato rispetto alla Terra attraverso l'individuazione di un punto (punto di emanazione) normalmente baricentrico rispetto alla zona da cartografare. 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, geoida ed ellissoide. Scelto il punto di emanazione di quota geoidica nota (distanza del punto dalla superficie geoidica), si provvede a determinarne latitudine e longitudine astronomiche (coordinate del punto rife-

rite al geoida e comprendenti gli effetti delle anomalie gravimetriche locali). Si impone quindi che le coordinate ellissoidiche del punto d'emanazione coincidano con quelle astronomiche, in modo da assicurare in quel punto la coincidenza ellissoidica con la verticale geoidica. Ciò implica il parallelismo dei piani tangenti alle due superfici. I due rimanenti "gradi di libertà" dell'ellissoide rispetto al geoida (scorrimento lungo la normale-verticale e rotazione intorno ad essa) vengono infine fissati attribuendo al punto di emanazione quota ellissoidica (distanza

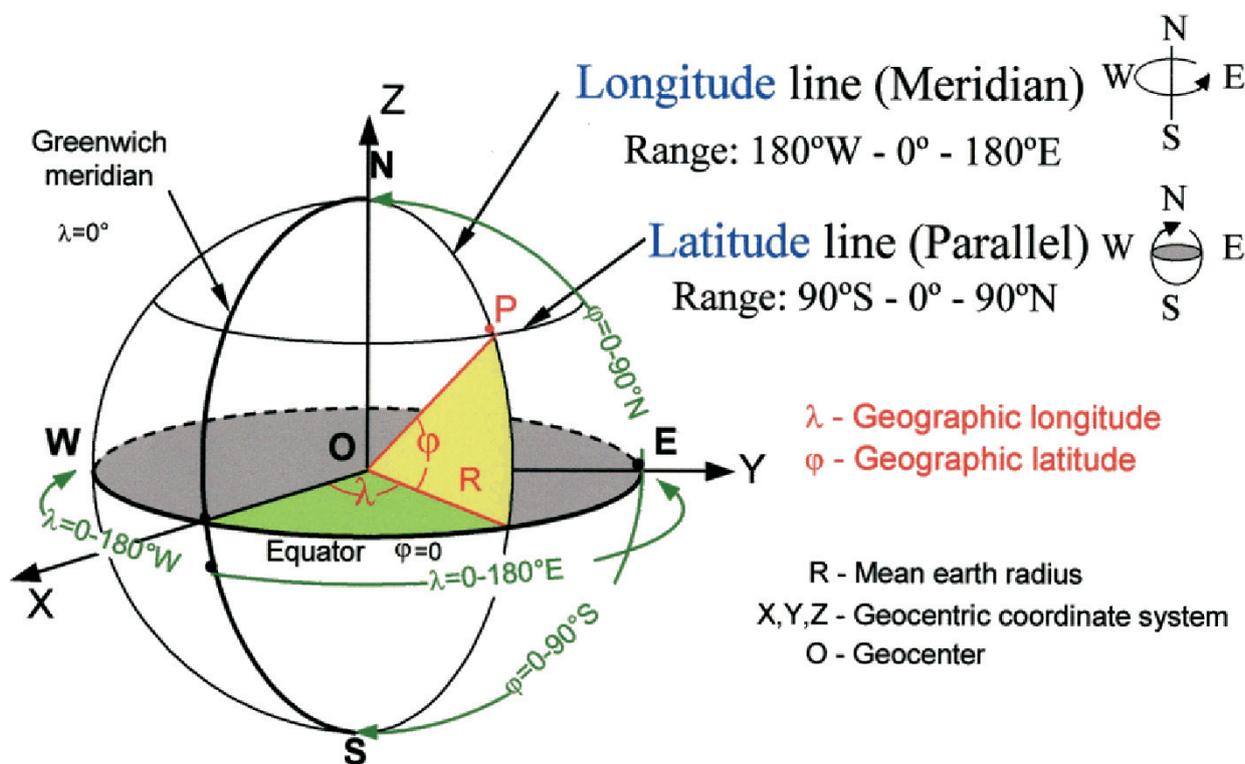


Figura 1.4.13 Latitudine e longitudine di un punto

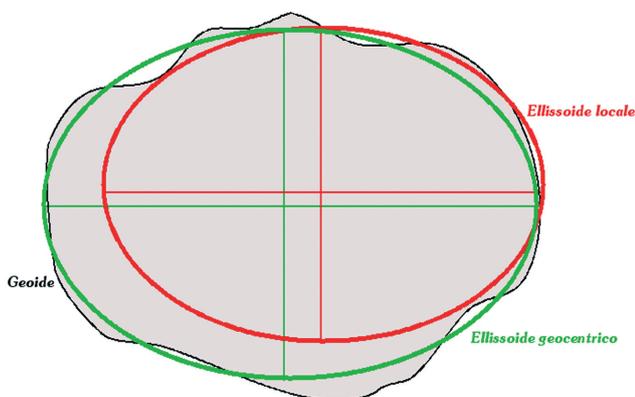


Figura 1.4.14 Ellissoidi locale e geocentrico

del punto dalla superficie dell'ellissoide di riferimento) coincidente con quella geoidica nota (realizzando così la condizione di effettiva tangenza delle due superfici nel punto) e orientando l'asse di rotazione dell'ellissoide nella direzione del Nord astronomico. Al termine di queste operazioni si dice che si è orientato l'ellissoide locale di riferimento sul punto di emanazione.

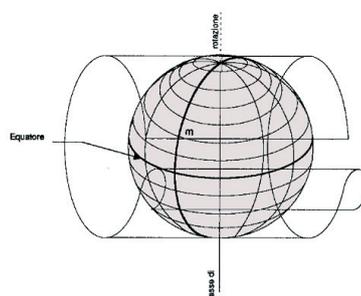
I sistemi geodetico-cartografici di interesse nazionale. Per utilizzare compiutamente un sistema geodetico-cartografico, è necessario precisare quali siano:

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

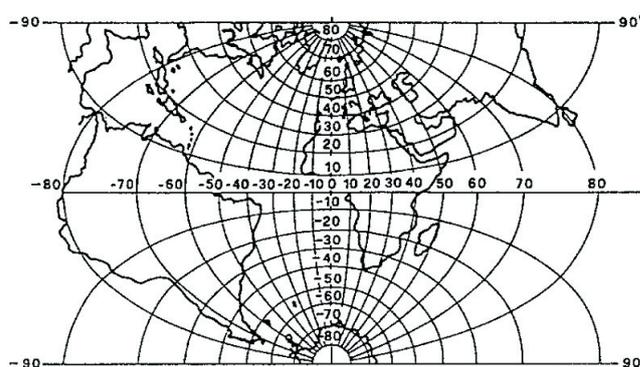
Un sistema di riferimento geodetico è realizzato attraverso l'istituzione di una rete compensata di punti che si estende sull'area di interesse.

Sistema di riferimento Roma40. Il sistema geodetico-cartografico nazionale (Roma40 - Gauss-Boaga) è il sistema in cui sono calcolate le coordinate dei vertici della rete trigonometrica fondamentale italiana. La denominazione corrente di coordinate Gauss-Boaga si riferisce esclusivamente alle coordinate piane (metriche o cartografiche). Nel sistema nazionale vengono inquadrati i lavori geodetici e topocartografici nazionali e regionali, oltre a numerosi rilievi locali e tecnici.

**Rappresentazione di Gauss
(o trasversa di Mercatore o UTM)**



Proiezione cilindrica trasversa tangente ad un meridiano. Rappresentazione di Gauss (UTM). (m = meridiano sull'ellissoide m' = meridiano sulla carta)



➔ Reticolato geografico rappresentazione di Gauss. La convessità dei meridiani è accentuata; limitando la proiezione a soli 6°, meridiani e paralleli sono pressoché rettilinei.

Figura 1.4.15 Rappresentazione di Gauss

Sistema di riferimento Roma 40

Definizione

■ 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

Conforme di Gauss

territorio nazionale praticamente compreso in due fusi, denominati rispettivamente Ovest ed Est, di ϕ° 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)

Tabella 1.4.3 Sistema di riferimento ROMA 40

Le formule di trasformazione per passare dal sistema ellissoidico ad un sistema piano N, E sono state ricavate da Gauss imponendo una serie di condizioni, tra le quali:

- il meridiano ellissoidico assunto come origine delle longitudini deve trasformarsi nell'asse delle ordinate N;
- l'equatore ellissoidico deve trasformarsi nell'asse delle ascisse E.

In riferimento a tali condizioni si hanno funzioni che applicate alle coordinate ellissoidiche generano una proiezione analoga a quella che si otterrebbe proiettando i punti dell'ellissoide, dal centro dell'ellissoide su un cilindro tangente all'ellissoide lungo il meridiano origine delle longitudini. Proiettare i punti dell'ellissoide su un cilindro equivale a proiettarli su un piano, in quanto il cilindro è una superficie che si può svolgere su un piano [fig. 1.4.16].

Dopo la fine della II guerra mondiale, conseguentemente all'instaurarsi di un clima di cooperazione tendente ad unificare metodi e sistemi in ogni campo, fu sentita l'esigenza di uniformare le cartografie e quindi anche i sistemi di riferimento. In verità l'esigenza di unificazione nacque proprio durante la guerra e per motivi bellici legati all'operatività delle forze armate. Nel successivo dopoguerra la necessità si trasferì anche al campo civile. Molti Stati europei concordarono di procedere ad un calcolo di compensazione su una selezione delle rispettive reti geodetiche, onde riferire le coordinate dei punti ad un unico sistema. Fu scelta come superficie di riferimento l'ellissoide di Hayford ed il centro di emanazione fu stabilito a Posdam. Fu anche stabilito di contare le longitudini dal meridiano di Greenwich, ed il sistema di riferimento fu denominato "European datum 1950", in sigla ED50

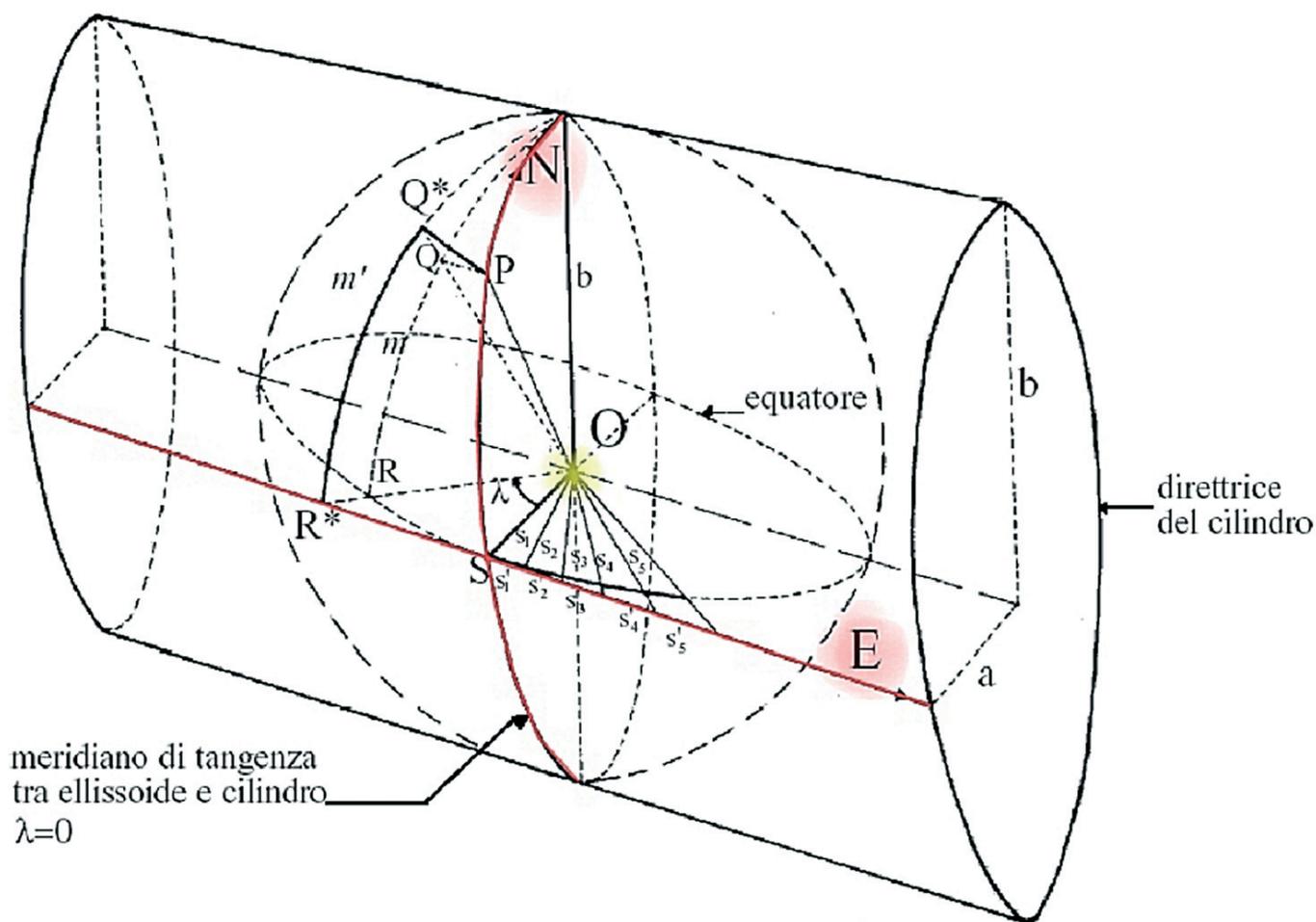


Figura 1.4.16

Sistema di riferimento ED50. Il reticolato geografico può essere sostituito da un reticolato cartografico, cioè un reticolato cartesiano, composto da rette ugualmente spaziate. È il reticolato N, E che conosciamo. Chiunque, con una modesta formazione culturale ed un semplice strumento, può velocemente e precisamente definire la posizione di un punto in termini di coordinate piane (metriche o cartografiche) così come, dati due punti, determinare direzione e distanza.

In Italia per il reticolato gaussiano relativo al sistema ED50 venne adottata la denominazione UTM, per distinguerlo da quello relativo al sistema nazionale (ROMA40), che viene denominato di Gauss-Boaga, pur essendo identica la rappresentazione. La denominazione corretta è però UTM-ED50. Anche qui la denominazione corrente di "coordinate UTM" si riferisce esclusivamente alle coordinate piane (metriche o cartografiche).

Sistema di riferimento ED50

Definizione

- Ellissoide: Internazionale (Hayford)
- $a = 6\,378\,388$
- $f = 1/297$
- Orientamento: medio europeo 1950 (European datum 1950)
- origine delle longitudini Greenwich

Realizzazione

Non ha una propria realizzazione, essendo nato per esclusivi scopi di omogeneizzazione cartografica per la cartografia a media e piccola scala, ma si basa su una rete di inquadramento consistente in una 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. La compensazione ED50 può essere usata per taluni scopi pratici, soprattutto di tipo cartografico, ma non per quelli geodetici, né operativi né tantomeno scientifici

Rappresentazione cartografica:

Di Mercatore Trasversa Universale (per gli americani «Universal Transverse Mercator») territorio nazionale praticamente compreso in due fusi di 6° di ampiezza, con meridiani centrali a 9° e 15° di longitudine est Greenwich (fusi 32 e 33 del sistema internazionale)
 fattore di contrazione $m_0 = 0.9996$
 falsa origine per le coordinate Est: 500 km
 falsa origine per le coordinate Nord: 0 nell'emisfero Nord; 10 000 km nell'emisfero Sud.

Nel sistema ED50 M. Mario ha coordinate:

- $\varphi = 41^\circ 55' 31.487''$
- $\lambda = 12^\circ 27' 10.93''$

Tabella 1.4.4 Sistema di riferimento ED 50

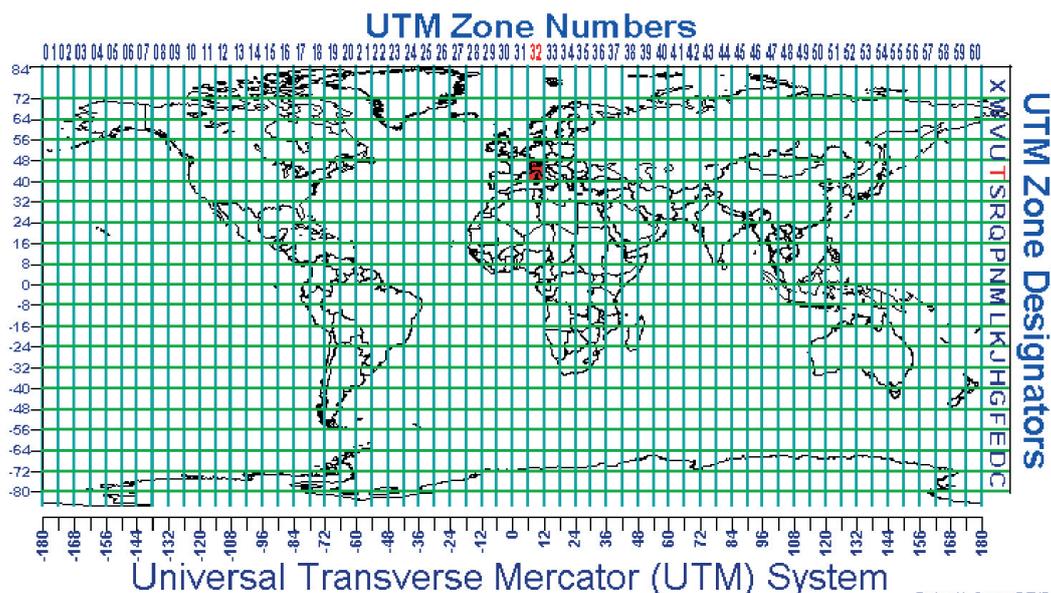


Figura 1.4.17 Il sistema UTM

Peter H. Dana 9/7/94

Uno stesso punto ha nel sistema UTM-ED50 coordinate differenti (di decine o centinaia di metri, a parte le false origini) da quelle nel sistema "Gauss-Boaga". Tale scostamento è dovuto principalmente al diverso datum geodetico, ma in parte anche ai differenti calcoli di compensazione che hanno dato origine ai valori delle coordinate. La rete fondamentale si presenta in sostanza "distorta" in maniera diversa nei due sistemi. Per quanto sopra, il passaggio dalle coordinate UTM-ED50 alle "Gauss-Boaga" o viceversa è eseguibile solo con formule di corrispondenza di tipo empirico, con parametri stimati ai minimi quadrati, valide in genere in zone di estensione limitata e solo per applicazioni cartografiche a media e piccola scala.

I sistemi di riferimento continentali e mondiali. I sistemi geodetici locali impiegati in geodesia e cartografia prima dell'avvento dei sistemi satellitari sono basati, come visto, su ellissoidi orientati in modo da approssimare bene localmente la superficie geoidica. Con l'aumentare della velocità degli scambi economici, commerciali, culturali, scientifici fra ogni parte del mondo, cresce l'esigenza di avere sistemi di riferimento sempre più estesi. L'avvento della geodesia satellitare ha reso poi indispensabile l'adozione di riferimenti unici e geocentrici, in accordo con il moto dei satelliti che seguono traiettorie riferite al centro di massa della Terra fisica. Alla fine degli anni '50 gli Stati Uniti, principalmente per esigenze di carattere militare, hanno sviluppato sistemi di riferimento mondiali studiati in modo da ottenere una buona approssimazione media in ogni parte del globo. Negli ultimi decenni molti dati di posizione di elevata precisione si sono accumulati e tutti questi fattori combinati hanno reso possibile definire e realizzare un nuovo sistema di riferimento di applicabilità mondiale e con origine coincidente con il centro di massa della Terra fisica. Tale sistema è denominato ECEF, acronimo di Earth-Centered, Earth-Fixed: è geocentrico poiché il

centro del sistema coincide con il centro di massa della Terra; solidale nel senso che il sistema è "fissato" alla Terra e quindi la segue nei suoi grandi moti (rotazione e rivoluzione). I primi sistemi ad avere queste caratteristiche, e quindi denominati mondiali, sono stati sviluppati dal Dipartimento della Difesa degli Stati Uniti.

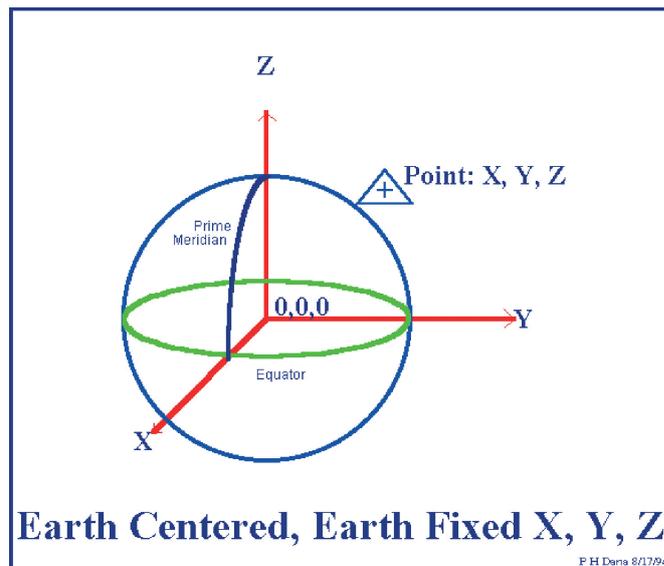


Figura 1.4.18 Il sistema ECEF

Poiché la rapida evoluzione tecnologica ha reso migliorabili, alla luce delle nuove scoperte, le definizioni e le realizzazioni, si è passati nel giro di pochi anni dal capostipite WGS60 al WGS66 ed al WGS72 che costituiscono modelli sempre più attendibili della realtà fisica terrestre, fino al WGS84. WGS84 è l'acronimo di "World Geodetic System 1984" e definisce il sistema come geodetico, mondiale, riferito al 1984. Esso costituisce un modello matematico della Terra da un punto di vista geometrico, geodetico e gravitazionale, costruito sulla base delle misure e delle conoscenze scientifiche e tecnologiche disponibili al 1984.

Sistema di riferimento WGS84. Con lo sviluppo di questo modello praticamente unico, risulta auspicabile ed opportuno che tutte le carte riportino un unico sistema.

Sistema di riferimento WGS 84

Definizione

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: WGS84

• $a = 6\,378\,137$

• $f = 1/298.257223563$

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 sistema 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.

Tabella 1.4.5 Sistema di riferimento WGS 84

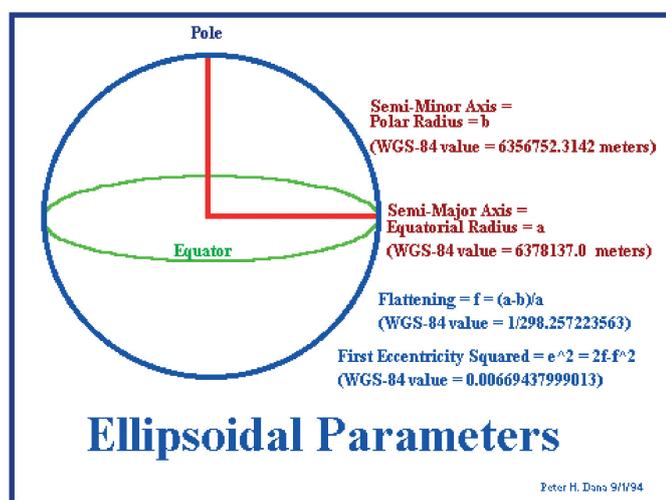


Figura 1.4.19 Parametri ellissoidali

Principali differenze tra datum regionali e datum globale. I datum della geodesia classica, che possono essere definiti locali o regionali, approssimano bene il geoide solo in un intorno del punto di emanazione, mentre il datum globale WGS84 approssima il geoide nel suo complesso ed è valido per tutto il mondo.

I datum locali o regionali, concepiti per le misure classiche, realizzano l'obiettivo di rendere bassa la deviazione dalla verticale in modo da poterla trascurare, permettendo così di trasferire gli angoli misurati dal terreno all'ellissoide, senza correzioni. Le ondulazioni geoidiche rispetto a un ellissoide di questo tipo, nell'area di utilizzo, sono modeste (qualche metro). Questi datum classici vengono utilizzati solo come datum orizzontali, cioè solo ai fini della planimetria. Per l'altimetria sono integrati da un datum verticale che consiste praticamente in una definizione di geoide.

Il datum globale è invece concepito come supporto alle misure satellitari: ad esso sono riferite le coordinate orbitali (effemeridi) dei satelliti che ruotano attorno alla Terra, per cui è indispensabile assumere una definizione unica per tutto il mondo. La deviazione dalla verticale varia da zona a zona e risulta modesta solo nelle zone in cui la "pendenza" del geoide (gradiente delle ondulazioni) non è molto accentuata. Le ondulazioni geoidiche rispetto all'ellissoide geocentrico possono raggiungere valori di svariate decine di metri, positive o negati-

ve. Il datum globale viene utilizzato come datum tri-dimensionale, permettendo di definire l'altimetria mediante le altezze ellissoidiche. Mediante un opportuno modello di geoidi (andamento delle ondulazioni geoidiche), le altezze ellissoidiche vengono poi ridotte a quote ortometriche, riconducendosi quindi a un datum verticale come quello classico. Le differenze di forma e dimensioni degli ellissoidi associati ai diversi datum, e la diversa posizione rispetto alla superficie fisica della Terra dovuta al diverso orientamento, fanno sì che le coordinate geografiche di uno stesso punto valutate in datum diversi siano sensibilmente differenti. Le differenze, tradotte in distanza, possono essere dell'ordine di alcune centinaia di metri: è quindi sempre indispensabile stabilire con precisione il datum in cui si opera, quando si assegnano o si utilizzano coordinate di punti.

Una volta definito il datum geodetico in cui si opera, la posizione di un punto può essere individuata, pur restando nello stesso datum, mediante diversi sistemi di coordinate (coordinate geografiche ellissoidiche, coordinate piane cartografiche ed altri), tra di loro praticamente equivalenti perché è possibile passare da uno all'altro con le opportune formule

di trasformazione. Le trasformazioni di datum, essendo i datum "materializzati" da reti geodetiche affette da errori, si basano invece necessariamente sull'utilizzo di parametri determinati statisticamente in base alla conoscenza delle coordinate in entrambi i datum per un certo numero di punti. Gli spostamenti da applicare a ciascun punto variano infatti con la posizione e non è dato di conoscere, se non empiricamente e in modo discreto, la legge di variazione. E' comunque possibile, per aree limitate e per cartografia a scala medio-piccola, calcolare una coppia di valori di correzione da apportare alle coordinate cartografiche senza introdurre errori significativi. La conversione in un sistema comune, cioè nel sistema WGS84, dei prodotti cartografici già realizzati è peraltro auspicabile. 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.

A proposito di GPS, i ricevitori più semplici costano oggi meno di un centinaio di euro e hanno l'ingombro di un moderno telefono cellulare. Per gli appassionati praticanti, escursionisti, alpinisti, ci-

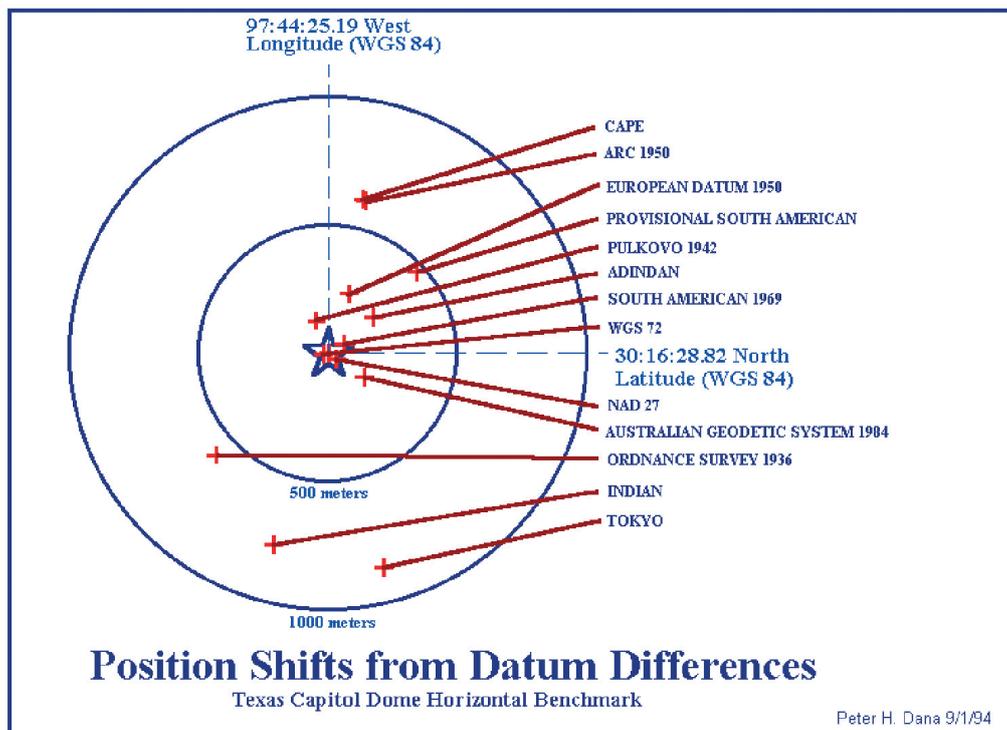


Figura 1.4.20 Shift di posizione tra datum differenti

clisti, componenti e accessori di qualità costano ciascuno quanto l'accesso al moderno sistema di navigazione del Dipartimento della Difesa americano da svariati miliardi di dollari. 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. E' quindi auspicabile l'applicazione da parte dei produttori di cartografia del 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. È semplicemente un altro aspetto dell'era dell'informazione.

Riferendosi alle misure GPS per la determinazione della quota è utile ricordare che in un generico punto la "quota" determinata è l'altezza del ricevitore rispetto all'ellissoide di riferimento. Per convertire questo dato nell'altezza ortometrica convenzionale (sul livello medio del mare), occorre sottrarre alla quota ellissoidica l'ondulazione geoidica 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. Le ondulazioni geoidiche su scala mondiale, rispetto

all'ellissoide WGS84, variano da +75 m a -104 m. 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, fornisce, con un opportuno programma di interpolazione, le ondulazioni geoidiche che competono ai punti rilevati con GPS con una precisione nell'ordine di alcuni decimetri.

1.4.4 Orientamento satellitare (GPS)

Il GPS (abbreviazione di NAVSTAR GPS, a sua volta acronimo di NAVigation System with Time And Ranging **G**lobal **P**ositioning **S**ystem - Sistema di posizionamento globale mediante misure di tempo e distanza rispetto a satelliti) è un moderno ed efficiente sistema di navigazione. Esso è stato finanziato dal governo degli Stati Uniti ed è controllato dallo US Department of Defense (DoD).

Consente per mezzo di un ricevitore, un software dedicato e una costellazione di 26 satelliti di determinare la posizione al suolo e l'altimetria di un punto con una precisione variabile (da un cm, o meno, ad alcuni m) in funzione del tipo di ricevitore GPS in uso e della tecnica di utilizzo applicata (fig. 1.4.22). Dopo la seconda guerra mondiale il DoD si è reso conto che la definizione della posizione di un punto in modo accurato e assoluto era un problema

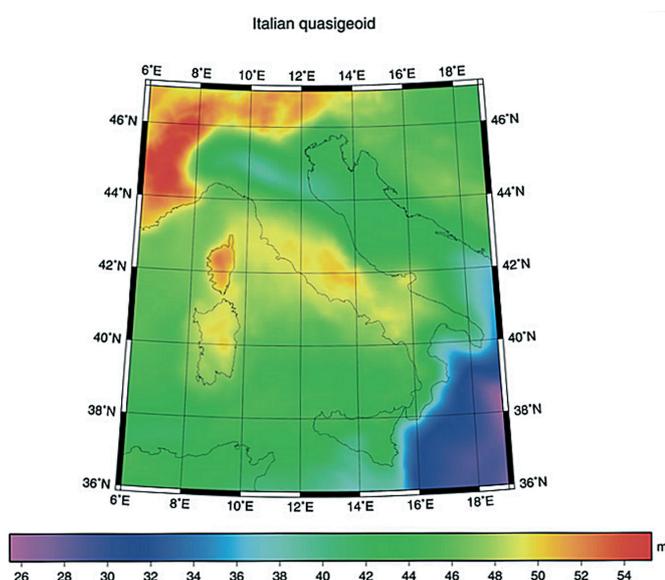


Figura 1.4.21 Modello *Italgeo95*

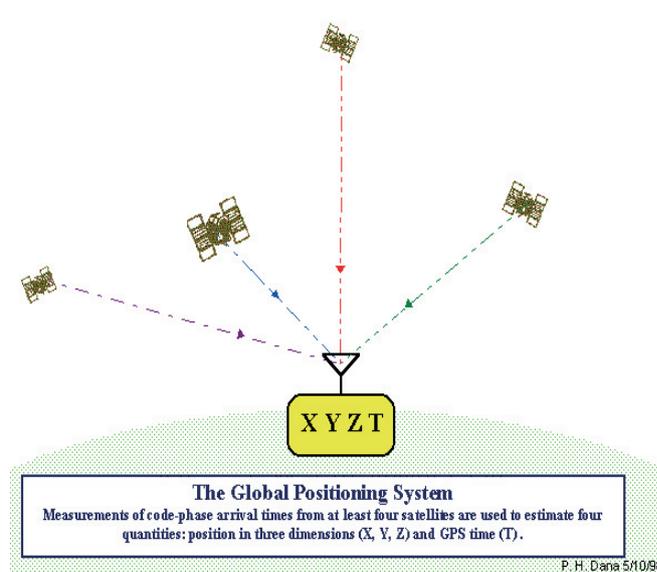


Figura 1.4.22 Il sistema GPS

non rimandabile e nel corso dei successivi 25 anni sono stati avviati e condotti vari progetti ed esperimenti denominati Transit, Timation, Loran, Decca, ecc. Tutti consentivano di determinare la posizione di un punto sulla superficie terrestre, ma con ancora dei limiti in quanto ad accuratezza e funzionalità. All'inizio degli anni '70 fu proposto un nuovo progetto, il sistema GPS che permetteva di soddisfare tutte le esigenze espresse in passato, ovvero determinare con precisione la propria posizione, in qualsiasi punto della superficie terrestre, in qualsiasi momento e con qualsiasi condizione meteorologica.

Si tratta di una grossa iniziativa, dal momento che il governo USA ha investito svariati bilioni di dollari per la realizzazione ed il mantenimento del sistema. Sono comunque soldi ben spesi, dal momento che funziona assai bene. Per il fatto che è essenzialmente un sistema di difesa, esso è poi stato concepito per essere difficile da disturbare o danneggiare, così che ci si può aspettare che sia veramente affidabile.

Il GPS in breve tempo assumerà la diffusione del telefono. Le nuove tecnologie dei circuiti integrati rendono il ricevitore GPS sempre più piccolo e a buon mercato. È già avvenuta la presentazione di ricevitori GPS integrati in normali orologi da polso. Ciò significa che ognuno di noi avrà la possibilità di sapere esattamente dove si trova, in qualsiasi momento.

I segmenti del sistema. La configurazione complessiva del sistema GPS comprende tre distinti segmenti:

- Il segmento SPAZIALE, formato dalla costellazione satellitare GPS orbitante attorno alla terra
- Il segmento di CONTROLLO, costituito da 1 stazione master e quattro stazioni GPS permanenti posizionate lungo l'Equatore
- Il segmento UTENTE, rappresentato da chiunque sia dotato di un ricevitore GPS

Il **segmento spaziale** è costituito da una costellazione di 26 satelliti (di cui 2 di riserva) che operano su orbite poste ad una distanza media dalla Terra di circa 20.200 km. La maggior parte dei satelliti sono stati lanciati per mezzo di razzi a perdere

Delta II. Era stato previsto che fosse lo Shuttle a portare in orbita i satelliti, ma il programma non è andato a buon fine, anche per la perdita del Challenger.

I satelliti sono raggruppati in un "blocco I" ed un "blocco II". Il blocco I era costituito dalle prime macchine R e D. Sono più piccoli di quelli del blocco II, mantenendo a bordo lo stesso carico spionistico militare, inoltre non sono dotati della proprietà di disponibilità selettiva (vedi oltre).

La costellazione dei satelliti è completa circa dal 1993.

Il **segmento spaziale** è progettato in modo che siano visibili da qualsiasi punto della superficie terrestre e in qualsiasi momento almeno 4 satelliti al di sopra di un angolo di elevazione rispetto all'orizzonte di 15°. La costellazione attuale permette però di lavorare con 5 o più satelliti per quasi tutta la giornata.

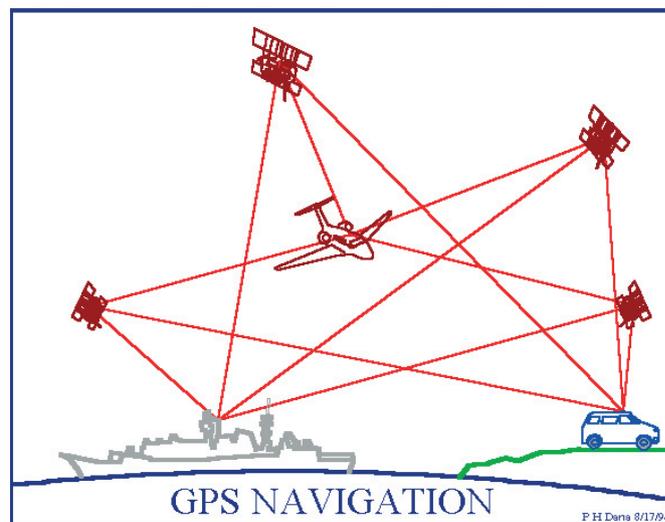


Figura 1.4.23 Navigazione GPS

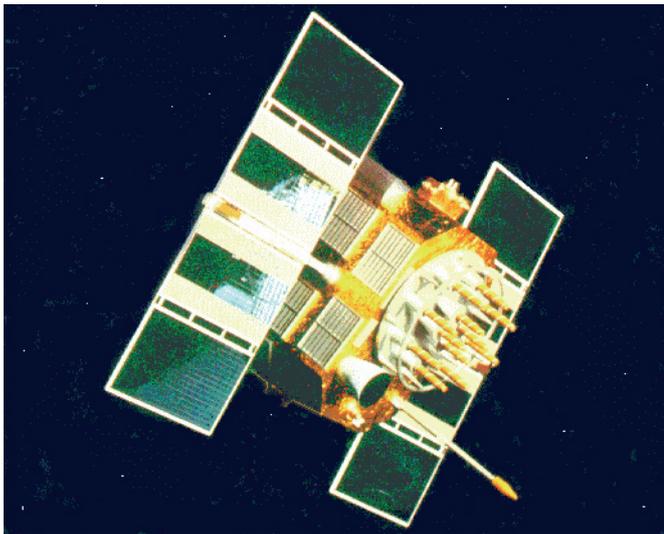
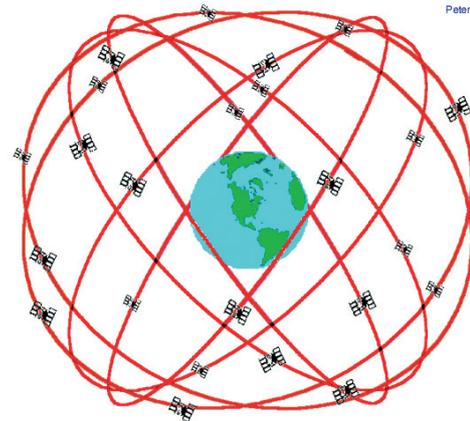


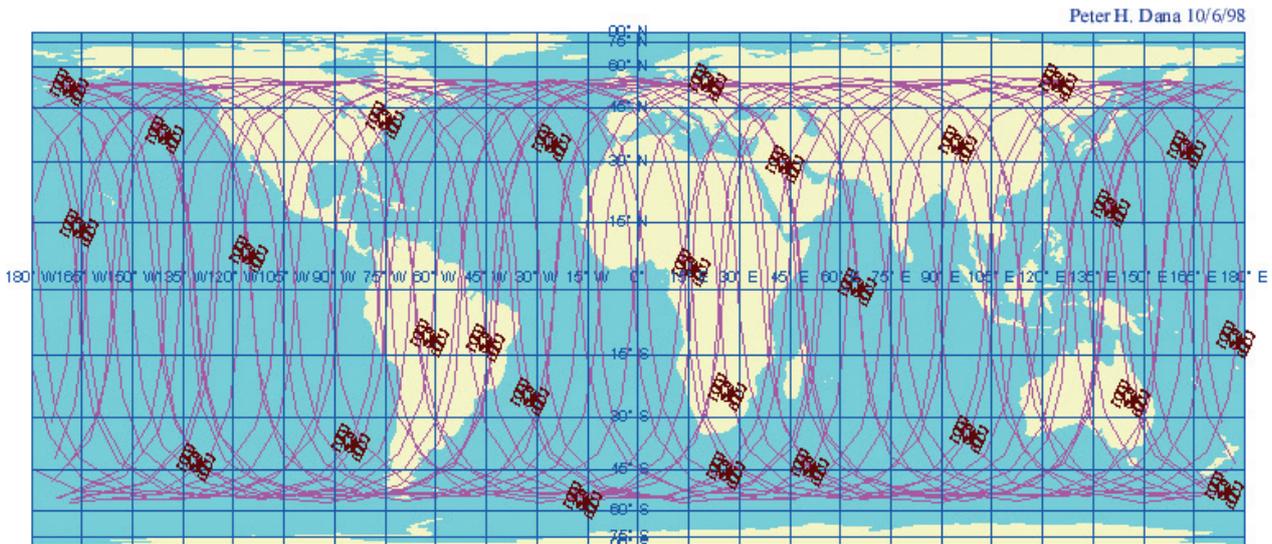
Figura 1.4.24 Un satellite della costellazione GPS



Peter H. Dana 9/22/98

GPS Nominal Constellation
24 Satellites in 6 Orbital Planes
4 Satellites in each Plane
20,200 km Altitudes, 55 Degree Inclination

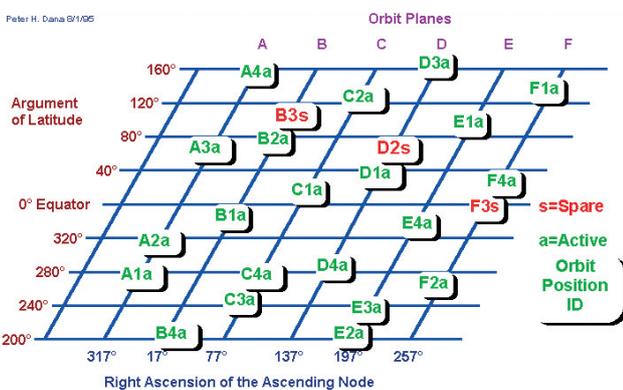
Figura 1.4.25 La costellazione dei satelliti GPS



Peter H. Dana 10/6/98

Global Positioning System Satellites and Orbits
for 27 Operational Satellites on September 29, 1998
Satellite Positions at 00:00:00 9/29/98 with 24 hours (2 orbits) of Ground Tracks to 00:00:00 9/30/98

Figura 1.4.26 Orbite dei satelliti GPS



Peter H. Dana 9/1/98

Simplified Representation of Nominal GPS Constellation

Figura 1.4.27 Schema della costellazione GPS

Il secondo Squadrone di controllo satellitare dell'Aeronautica Militare degli Stati Uniti, con sede alla Schriever Air Force Base (già Falcon AFB) in Colorado è delegato all'operatività del sistema GPS. Tecnici ed apparecchiature costituiscono il segmento di controllo del sistema. Esso è costituito da una stazione master e da 4 stazioni di monitoraggio distribuite approssimativamente lungo l'Equatore.

Il **segmento di controllo** traccia i satelliti GPS, ne aggiorna la posizione orbitale e provvede alla calibrazione e sincronizzazione degli orologi dei satelliti. Un'altra importante funzione riguarda la determinazione dell'orbita di ciascun satellite e la previsione del relativo percorso per le seguenti 24 ore. Tale informazione relativa alla costellazione viene trasmessa a ciascun satellite che successivamente la ritrasmette al segmento utente, consentendo quindi al ricevitore GPS di individuare la posizione di ciascun satellite. I segnali dei satelliti sono rilevati

sull'isola di Ascension, a Diego Garcia, alle Hawaii e a Kwajalein. Le misurazioni vengono poi trasmesse alla Stazione Master di Colorado Springs dove i dati vengono elaborati per rilevare eventuali errori in ciascun satellite. I dati sono quindi ritrasmessi alle quattro stazioni di monitoraggio e trasmessi ai satelliti.

Non vi sbagliate, il sistema GPS necessita di un elevato livello di manutenzione. Se il segmento di controllo interrompesse questa costante manutenzione, si afferma che il sistema "degenerereb-

Peter H. Dana 5/27/95



Global Positioning System (GPS) Master Control and Monitor Station Network

Figura 1.4.28 Il segmento di controllo GPS

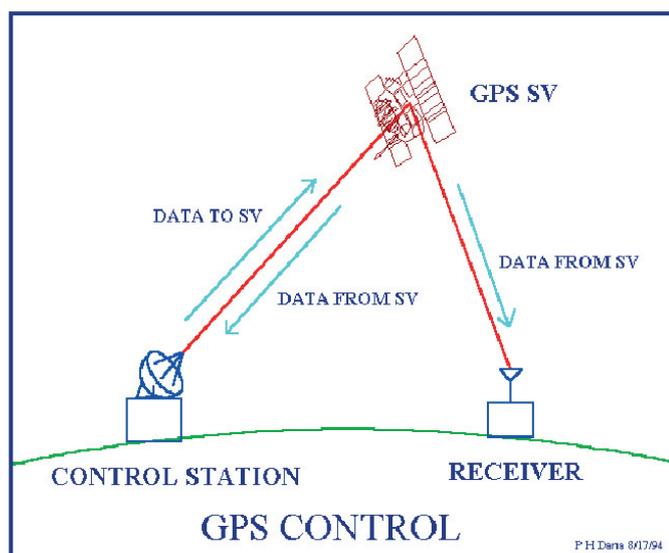


Figura 1.4.29 Flusso dei dati per il controllo GPS

be elegantemente" verso la completa inservibilità nell'arco di due settimane.

Il **segmento utente** è rappresentato da chiunque disponga di un ricevitore GPS. Le applicazioni tipiche nell'ambito del segmento utente riguardano la navigazione terrestre per gli escursionisti, la localizzazione di veicoli, l'attività di rilevazione topografica, la navigazione marina ed aeronautica, il controllo di dispositivi ecc.

Il funzionamento del sistema. Esistono vari metodi diversi tra loro per determinare una posizione mediante il sistema GPS. La scelta del metodo dipende dalle esigenze di accuratezza dell'utente e dal tipo di ricevitore GPS disponibile. In linea di

massima tali tecniche possono essere suddivise in tre categorie principali:

- Navigazione semplice. Si avvale di un singolo ricevitore indipendente ed è utilizzata da escursionisti, navi in alto mare e per usi militari. L'accuratezza della posizione è di circa 20 m;
- GPS differenziale. Meglio noto come DGPS, questo sistema consente un'accuratezza di 0.5-5 m. È utilizzato per la navigazione marina costiera, l'acquisizione di dati GIS, rilevamenti in campo agricolo, ecc;
- GPS a fase differenziale. Consente un'accuratezza di 0.5-2 cm. È utilizzata per varie attività di rilevamento, per il controllo di dispositivi, ecc.

Navigazione semplice. Si tratta della tecnica più semplice utilizzata dai ricevitori GPS per fornire istantaneamente la posizione, la quota e/o l'ora precisa ad un utente. I ricevitori utilizzati per questo tipo di operazione sono tipicamente unità portatili di piccole dimensioni e basso costo. La triangolazione con i satelliti è la base del sistema (fig. 1.4.30).

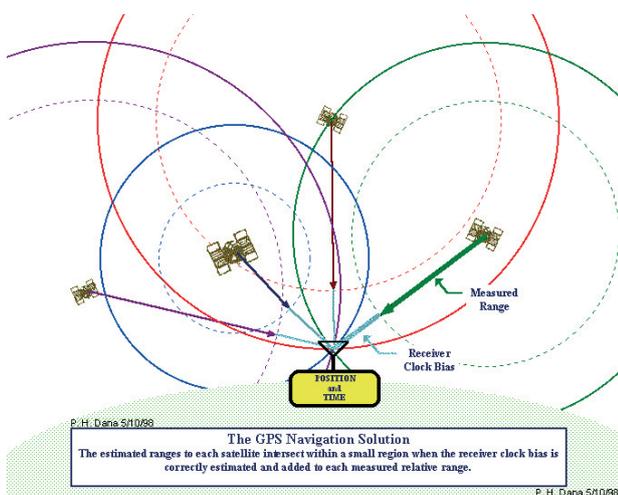


Figura 1.4.30 Modalità di navigazione semplice

- Per eseguire la triangolazione il GPS misura le distanze calcolando il tempo impiegato da un segnale inviato dal satellite per raggiungere il ricevitore
- Per eseguire tale misurazione il GPS necessita di orologi molto precisi
- Una volta conosciuta la distanza dai satelliti bisognerà conoscere la loro esatta posizione nello spazio
- Si dovranno infine ottimizzare le misure considerando il ritardo indotto al segnale radio dalla ionosfera e dalla troposfera.

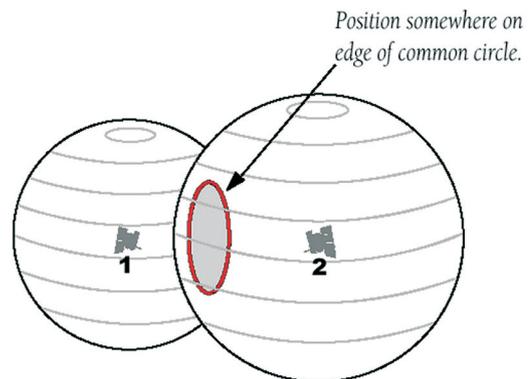


Figura 1.4.31 Seconda misurazione GPS

Tralasciamo per ora come viene misurata la distanza e la posizione dei satelliti nello spazio. Affrontiamo il problema di come effettuare una triangolazione:

- una prima misura individua la nostra posizione sulla superficie di una sfera avente il centro sul satellite A ed il raggio poniamo di 11000 miglia;
- una seconda misura, da un altro satellite B, poniamo distante 12000 miglia, individua l'intersezione di due sfere e cioè una circonferenza. Essa è l'unico luogo dell'universo dove possiamo trovarci a 11000 miglia dal primo satellite e 12000 miglia dal secondo (fig. 1.4.32);
- una terza misura aggiunge al modello una ulteriore sfera. Se allo stesso tempo ci troviamo distanti poniamo 13000 miglia dal satellite C ci sono solo due punti dello spazio in grado di verificare tale condizione. Essi si trovano dove la sfera 13.000 interseca la circonferenza intersezione delle sfere 11.000 e 12.000 (fig. 1.4.33).

Come decidere quale dei due punti corrisponde alla nostra reale posizione? Bene, possiamo eseguire una quarta misura da un ulteriore satellite

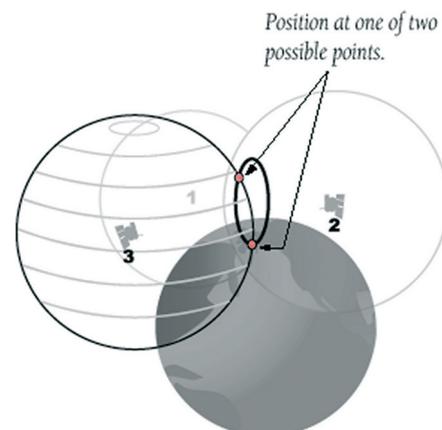


Figura 1.4.32 Terza misurazione GPS

per essere matematicamente certi della esatta posizione. Oppure possiamo considerare il fatto che uno dei due punti è palesemente inesatto in quanto non si trova vicino alla Terra o si muove a velocità impossibili (la costellazione di satelliti nel tempo si modifica ma tende a ruotare intorno al punto che rappresenta la soluzione più probabile). Il computer del ricevitore GPS è dotato della capacità di distinguere il punto corretto da quello errato. In pratica tre misure risultano quindi sufficienti ma, per motivi tecnici che discuteremo, se ne dovranno comunque eseguire quattro.

Come misurare le distanze dal satellite? I satelliti del sistema GPS si muovono secondo particolari traiettorie alla velocità di circa 5 miglia (8 Km) al secondo, complicando un poco i concetti, ma non teniamone conto per ora. Come facciamo dunque a misurare le distanze?

Il satellite GPS trasmette un segnale radio ed il vostro ricevitore ascolta. Il GPS misura il tempo impiegato dal segnale per raggiungere il ricevitore basandosi su una valutazione del tempo esclusivamente unidirezionale. Vediamo un po' i satelliti orbitano a 12.500 miglia (20.200 Km) di altezza, la luce e le onde radio viaggiano a 186.000 miglia (300.000 Km) al secondo ... pertanto il segnale impiega circa 1/15 di secondo per arrivare a noi.

Il calcolo matematico è abbastanza semplice. Tutto quel che dobbiamo sapere è quando "esattamente" il segnale è partito dal satellite. E lo dobbiamo sapere davvero "esattamente". Un solo millesimo di secondo di differenza potrebbe penalizzare la rilevazione con un errore nell'ordine delle 180 miglia (290 Km).

Ovviamente è necessario poter disporre di orologi molto, molto precisi.

Che ora è, esattamente? Ogni satellite della serie Block II imbarca quattro orologi atomici che sfruttano le oscillazioni degli atomi di cesio e rubidio per mantenere la massima precisione. Di che livello di accuratezza stiamo parlando? Bene, gli orologi di bordo hanno una stabilità media pari a una parte su 10¹², ovvero perdono un secondo ogni 10¹² secondi, ovvero ogni 317.000 anni circa!! Tutti i satelliti del sistema sono sincronizzati fra loro.

OK, se abbiamo orologi così precisi sui satelliti, dobbiamo disporre di orologi altrettanto precisi sui rice-

vitori, sincronizzarli tutti fra loro e ... il gioco è fatto! Ovviamente, ma se il vostro ricevitore GPS in offerta speciale dovesse montare un orologio al cesio verrebbe a costare circa 200.000 dollari (150.000 euro) ed avrebbe le dimensioni di un computer da tavolo. La soluzione al problema è stata quella di realizzare orologi per i ricevitori che assicurino l'accuratezza necessaria limitatamente a brevi periodi. Dovranno pertanto essere corretti molto di frequente.

Come si corregge l'orologio del ricevitore. Ricordate cosa abbiamo detto a proposito delle tre sfere intrecciate? Ipotizziamo per un attimo che gli orologi dei satelliti e del ricevitore siano esattamente sincronizzati. Il ricevitore rileva il tempo di ricezione del segnale, calcola la distanza dai tre satelliti e interseca le tre sfere un po' di buon senso ed ecco la nostra posizione. Ma il ricevitore non può sapere se il suo orologio è perfettamente sincronizzato con il satellite. Ricordate che un miserabile milionesimo di secondo si traduce in un errore di mille piedi (300 metri). Pertanto, volendo essere sicuri, il ricevitore ascolta anche un quarto satellite.

Se l'intersezione della quarta sfera non corrisponde a quella delle altre tre, il ricevitore percepisce che c'è un errore. Non è geometricamente possibile che le quattro sfere si intersechino nello stesso punto se l'orologio non è più che preciso. Quando questo non accade il ricevitore dubita che l'orologio sia sincronizzato.

Il ricevitore esegue quindi una piccola e semplice routine per correggere l'orologio, finché tutte e quattro le linee di posizione si intersecano nello stesso punto. Questo è quanto avviene ad ogni inizializzazione del ricevitore.

Una volta che si è rilevata la posizione nelle tre dimensioni (o quattro se si considera il tempo), si può valutare lo scarto Doppler del segnale da ciascuno dei satelliti rilevati ed ottenere anche un vettore tridimensionale di velocità. In pratica, a causa della distribuzione geometrica dei satelliti, la velocità verticale (variometrica) non è molto accurata, mentre risulta abbastanza accurato il calcolo della velocità rispetto al suolo.

L'interpretazione del codice. Questo per quanto riguarda la sincronizzazione degli orologi. Abbastanza intelligente, eh? Abbiamo affermato che per misurare la distanza il ricevitore deve sapere "esattamente" quando il segnale ha lasciato il satellite. La

perfetta sincronizzazione degli orologi non è quindi più sufficiente.

Il ricevitore determina il rilevamento utilizzando qualcosa che viene definito "codice pseudo-casuale" (PRN pseudo-random noise code). Pensate al codice come se guardaste i denti di una sega da falegname, alcuni dei quali mancanti in punti casuali fig3. Ogni satellite trasmette un codice casuale diverso che si ripete 1000 volte al secondo. Il ricevitore dispone di un generatore di codici predisposto a produrre gli stessi in 32 differenti variazioni.

Quando il ricevitore capta il segnale di un satellite confronta i codici come le serie di denti mancanti su due seghe identiche. Riconoscendo il preciso momento in cui il codice viene lanciato dal satellite il ricevitore non fa altro che generare a sua volta il medesimo codice con perfetta sincronia. Il codice proveniente dal satellite risulterà quindi sfasato rispetto a quello generato dal ricevitore, proporzionalmente al tempo impiegato ad arrivare a terra. Il ricevitore misura questo tempo ed infine lo converte in distanza. La procedura viene ripetuta per quattro satelliti. Il resto è pura matematica.

Poco fa abbiamo spiegato perché sono necessari quattro satelliti, con il quarto utilizzato per sincronizzare gli orologi e gli altri tre per le linee di posizione. In realtà se chi utilizza il ricevitore conosce l'altitudine alla quale si trova (ad esempio una imbarcazione sul mare), può inserire il dato nel ricevitore, definendo così la prima linea di posizione. Solo altri due rilevamenti satellitari saranno quindi sufficienti a determinare la posizione. Il terzo satellite verrà dunque utilizzato esclusivamente per la sincronizzazione dell'orologio.

Ehi, riesci a sentirmi? C'è un'altra importante ragione che rende necessario il codice casuale ed è legata ad alcune limitazioni progettuali del GPS. Per essere affidabili i satelliti del GPS devono essere relativamente piccoli e leggeri; quelli della serie Block II pesano tra 900 e 2000 kg. Ciò comporta un basso consumo energetico, ma anche una bassa potenza di emissione del segnale, nell'ordine dei 40 watt (variabile tra 20 e 50 watt).

Pensate un po'; c'è un trasmettitore da 40 Watt che galleggia lassù a circa 12000 miglia e deve coprire con un segnale rilevabile una vasta parte della superficie terrestre. Un grosso problema! A confronto un tipico satellite per comunicazioni è molto più potente ed irradia un segnale molto direzionale, per la ricezione del quale è necessaria una parabola. Per ovvie ragioni di ingombro e praticità le imbarcazioni, gli aerei, le automobili ... i ciclisti e i camminatori ... non possono montare parabole. Piuttosto che indirizzare un segnale potente il satellite GPS irradia un segnale relativamente debole su una vasta area. Il segnale ha una potenza talmente bassa che viene nascosto dal rumore di fondo dei raggi cosmici, dell'accensione dei motori a scoppio, delle luci al neon, dal ronzio dei computer ecc.. Ecco dove interviene il codice casuale. Il ricevitore inizia a generare il suo codice e a ricercare una corrispondenza nel rumore di fondo. Una volta che ha sufficienti corrispondenze per riconoscere l'emissione di un satellite, porta fuori il segnale dalla sporcizia e "si aggancia" (figg. 1.4.33). Quando tre satelliti sono agganciati, la navigazione può avere inizio.

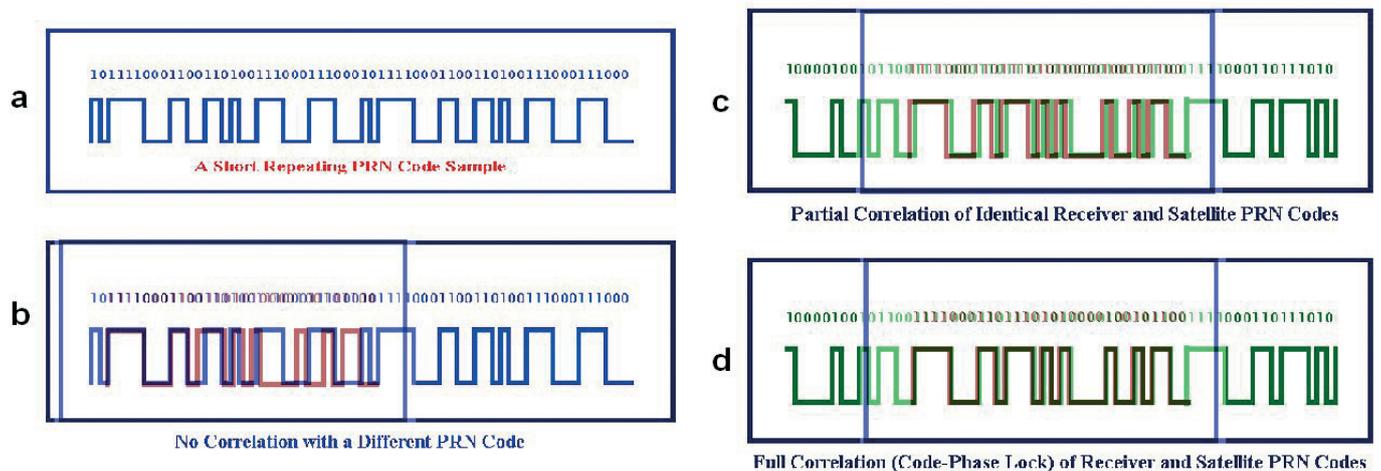


Figura 1.4.33 Correlazioni tra codici PRN di ricevitore e satellite GPS

Ecco perché un ricevitore può funzionare con antenne molto piccole e relativamente poco direzionali. I ricevitori palmari montano antenne lunghe solo pochi centimetri o delle dimensioni di un sigaro. Un altro fatto: l'utilizzo di un codice pseudo-casuale e di una potenza molto bassa rende il segnale GPS assai difficile da disturbare. Tale caratteristica risulta molto attraente a fini militari (fig. 1.4.35).

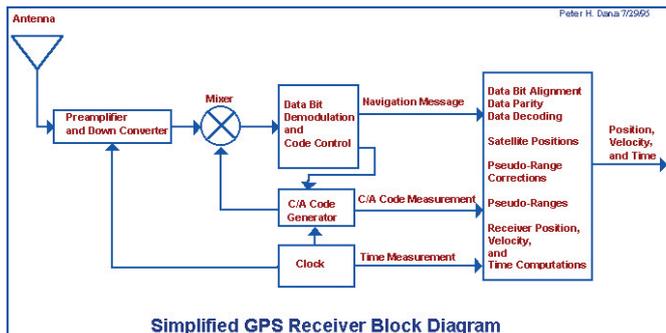


Figura 1.4.34 Schema di un ricevitore GPS

Perturbazioni orbitali. La maggior parte delle informazioni caricate su di un satellite è relativa a dati della routine di navigazione, comprese informazioni sul calendario e le effemeridi. Probabilmente i dati più importanti sono le effemeridi che compensano le normali perturbazioni dell'orbita satellitare. Mentre gira attorno alla terra ogni satellite è soggetto a numerose influenze maggiori, per le quali la sua orbita non risulta esattamente circolare.

L'influenza principale è data dalla maggior massa equatoriale della terra, ma anche il vento solare ed altri fattori possono entrare in gioco. Le perturbazioni orbitali del sistema GPS sono definite da 16 costanti, che vengono caricate ed aggiornate almeno una volta al giorno (od anche più spesso) assieme alle correzioni dell'orologio. Il satellite ritrasmette questi dati ed il vostro ricevitore le traduce come effemeridi. Le effemeridi (dati relativi all'orbita) informano il ricevitore sull'esatta posizione del satellite nello spazio così che, quando viene calcolata la distanza, il ricevitore conosce perfettamente la localizzazione di origine del segnale.

Ogni satellite trasmette le proprie effemeridi. Inoltre ogni satellite trasmette ciò che si definisce un "almanacco". In termini più generali delle effemeridi, l'almanacco comunica al ricevitore la posizione di tutti i satelliti della costellazione GPS. Il vostro ricevitore archivia l'almanacco nella sua memoria, dove viene costantemente aggiornato facendo sì che il ricevitore sappia sempre dove e quando ricercare i diversi satelliti nel momento di individuare la vostra posizione. Se il ricevitore rimane spento per diversi mesi l'almanacco continua in genere a rimanere utilizzabile finché venga trovato un satellite dal quale possa essere scaricato un almanacco aggiornato (tab. 1.4.7).

Ephemeris Data Set Used in Pseudo-Range Navigation Example (GPS Time = 150000 seconds)

Ephemeris Data Parameter	Value	Value	Value	Value
SV	15	27	31	7
Issue of Data Ephemeris	196	200	125	125
Cosine Correction to Inclination	-9.313225746E-08	1.136213541E-07	2.793967724E-08	-1.285225153E-07
Sine Correction to Inclination	-3.725290298E-09	-1.061707735E-07	9.126961231E-08	-1.322478056E-07
Cosine Correction to Radius	146.09375	148.84375	306.28125	322
Sine Correction to Radius	-69.9375	79.09375	-130.71875	-128.5
Cosine Correction to Latitude	-3.630295396E-06	4.122033715E-06	-6.921589375E-06	-6.720423698E-06
Sine Correction to Latitude	1.228414476E-05	1.15185976E-05	3.74391675E-06	2.983957529E-06
Mean Motion Difference	4.023024718E-09	4.513045129E-09	4.656622538E-09	4.650550857E-09
Eccentricity	0.006778693292	0.01127019501	0.005836840719	0.006999379606
Rate of Inclination Angle	1.817932867E-10	-5.928818388E-11	-5.418082828E-10	-4.207318109E-10
Orbital Inclination	0.9721164968	0.9459886628	0.9633626261	0.963950905
Mean Anomaly at Reference Time	-0.8856059028	0.1225249	-0.6775731485	3.019737078
Argument of Perigee	1.738558535	2.601538834	0.6715504011	-2.568758665
Rate of Right Ascension	-7.783538501E-09	-8.143553497E-09	-8.411421798E-09	-8.25355808E-09
Longitude of Ascending Node	-2.8654714	0.2200327977	2.320031302	2.317137898
Square Root of Semi-Major Axis	5153.618444	5153.653282	5153.789852	5153.644896
Reference Time Ephemeris	151200	151200	136800	151200

Tabella 1.4.6 Conversione di coordinate cartesiane ECEF in coordinate geodetiche

Bit per bit, segnale su segnale. L'elevatissima regolarità di oscillazione degli atomi di cesio e rubidio è alla base della precisione del sistema e produce la frequenza fondamentale L-band di 10,23 MHz, dalla quale sono derivati per moltiplicazione i segnali portanti:

$$154 \times L > L1 = 1575,42 \text{ MHz}$$

$$120 \times L > L2 = 1227,60 \text{ MHz}$$

I due segnali sono modulati in fase dai codici che caratterizzano ciascun satellite: essi sono due sequenze pseudocasuali diverse che consentono di identificare il satellite, più un messaggio di informazioni.

Queste sequenze sono rappresentate in figura 1.4.36, dove:

- C/A-code (Coarse/Acquisition) ($f = L/10 = 1,023 \text{ MHz}$) disponibile per usi civili ed utilizzato per l'SPS (Standard Positioning Service) è modulato esclusivamente sul segnale L1.
- P-code (Precise o Protected) ($f = L = 10,23 \text{ MHz}$) disponibile unicamente per usi militari o autorizzati ed utilizzato per il PPS (Precise Positioning System) è modulato su entrambi i segnali L1 e L2.
- NAVigation Message sequenza di 1500 bit trasmessa alla frequenza di 50 bit/sec, contenente informazioni necessarie al ricevitore.

Ricordate le caratteristiche di trasmissione di un satellite per comunicazioni, con un segnale direzionale

ad alta potenza? Questo segnale permette un flusso di dati relativamente denso che, se ci pensate, è proprio quanto serve ad un satellite multi-canale per comunicazioni. Valanghe di telefonate, caratteri fax, pixel video e via dicendo rotolano continuamente giù dallo spazio. Il flusso dei dati del GPS è giusto l'opposto: diffusione di poche informazioni tramite un segnale non direzionale a copertura molto ampia.

Il flusso dei dati GPS scorre giù da ogni satellite in pacchetti di 1500 bit, ciascuno composto da 5 sezioni da 300 bit. Ogni sezione è trasmessa in 6 secondi e contiene 10 parole di 30 bit. Le sezioni 4 e 5 vengono commutate 25 volte l'una, ossia per ottenere un messaggio completo è necessaria la trasmissione di 25 pacchetti di dati. Un pacchetto intero da 1500 bit necessita di 30 secondi per essere inviato. Fate i calcoli e vedrete che il flusso di dati del GPS è assolutamente lento, pari a 50 baud. Se il vostro computer avesse scaricato questa dispensa a 50 baud, ci avrebbe impiegato circa 8 ore. Avreste potuto leggerla tutta c-a-r-a-t-t-e-r-e per c-a-r-a-t-t-e-r-e.

Le sezioni dei dati contengono informazioni diverse. La sezione 1 contiene dati per la correzione dell'errore dovuto all'offset degli orologi atomici di bordo. Le sezioni 2 e 3 contengono dati delle effemeridi, ovvero delle funzioni matematiche che descrivono le orbite dei satelliti, consentendo al ricevitore di conoscere in anticipo quanti e quali satelliti sono visibili a una certa ora in un determinato luogo. La sezione 4 contiene dati tra cui i parametri per la correzione dell'errore dovuto ai ritardi ionosferici e le informazioni temporali UTC (Universal Time Coordinated). La sezione 5 contiene l'almanacco che rappresenta una versione semplificata delle effemeridi, valida solo per poche ore, ma che consente tra l'altro di individuare i codici PRN di ciascun satellite senza dover procedere per tentativi. Le sezioni 4 e 5 contengono una quantità di dati piuttosto cospicua ed è per questo che vengono subcommutate.

Se così non fosse e gli almanacchi fossero trasmessi continuamente, finché completi, un rice-

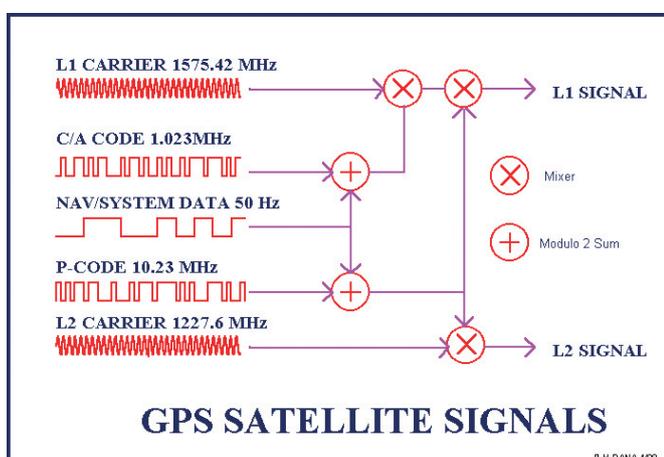


Figura 1.4.35 Struttura del segnale GPS

vitore GPS impiegherebbe circa 12 minuti ad inicializzarsi ogni volta che lo accendete. E nell'attesa non sarebbe possibile navigare [tab. 1.4.7].

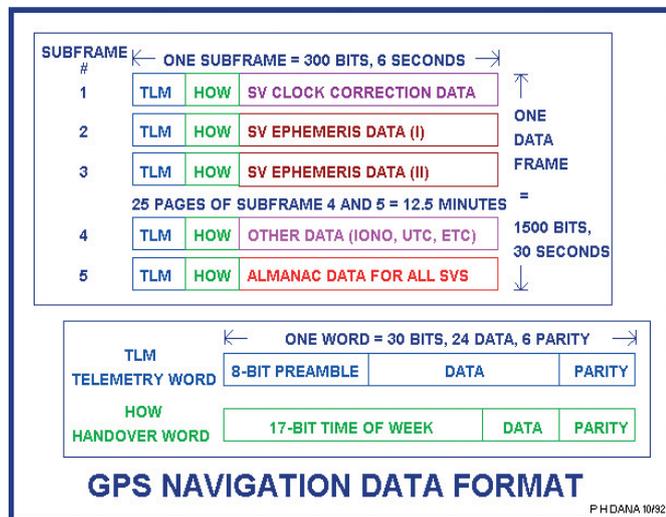


Tabella 1.4.7 Formato dei dati di navigazione

Quanto è accurato allora? Veniamo alla questione dell'accuratezza. Si sentono in giro voci d'ogni tipo: secondo alcuni il sistema sarebbe capace di localizzare "il culo di un moscerino", mentre per altri avrebbe uno scarto di circa 100 metri, prendere o lasciare.

Qual è la verità? Bene ... dipende.

Volendo credere ai numeri il servizio rilevamento di precisione (PPS), riservato alle forze armate e agli utilizzatori autorizzati, ha un'accuratezza orizzontale nell'ordine dei 22 m, un'accuratezza verticale dell'ordine di 27.7 m ed una accuratezza temporale di 100 nanosecondi, con ricevitori a frequenza singola. Il servizio di rilevamento standard (SPS), riservato ad usi civili, è stato caratterizzato sino al maggio 2000 dalla cosiddetta "disponibilità selettiva" SA, una degradazione intenzionale dell'accuratezza imposta dal Dipartimento della Difesa USA che portava la precisione del sistema a 100 m in orizzontale, 156 m in verticale e a 360 nanosecondi in temporale.

Per inciso, la disponibilità selettiva consisteva in una perturbazione della precisione dell'orologio e forse in una contaminazione dei dati delle effemeridi dei satelliti.

Oggi la disponibilità selettiva non è attivata e l'errore in orizzontale varia da 18 a 60 m. (fig. 1.4.37 a,b). Un certo numero di fattori concorrono a costituire questo errore, in particolare:



SA Transition -- 2 May 2000

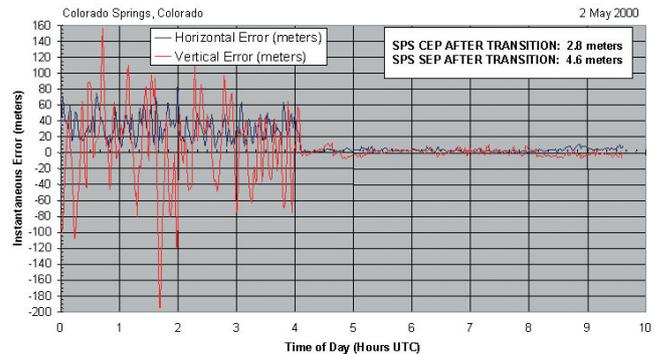


Figura 1.4.36 Transizione della SA (selective availability)

- ritardi di origine ionosferica ed atmosferica. Il segnale GPS attraversando l'atmosfera può subire un rallentamento con un effetto simile alla luce che si rifrange attraverso un blocco di vetro, ciò che può introdurre un elemento di errore nel calcolo della posizione a Terra. La ionosfera non causa un ritardo costante del segnale, ma esistono vari fattori che contribuiscono ad influenzarne l'effetto;
- elevazione del satellite. I segnali dei satelliti con bassa elevazione percorrono distanze maggiori attraverso l'atmosfera;
- la densità della ionosfera subisce l'influenza del sole. Diminuisce durante la notte ed aumenta durante il giorno causando un rallentamento del segnale. L'entità dell'incremento varia a seconda dei cicli solari (attività delle macchie). Anche i brillamenti solari casuali influiscono sull'attività della ionosfera.

Gli effetti negativi sono controllabili mediante due metodi. Il primo metodo richiede il calcolo di un valore medio della riduzione della velocità della luce causato dalla ionosfera e non fornisce una soluzione ottimale per la riduzione degli errori. Il secondo metodo richiede l'uso di ricevitori a doppia frequenza (misurano le frequenze L1 ed L2 del segnale GPS). Un segnale radio viene infatti rallentato in misura inversamente proporzionale alla propria frequenza e confrontando i tempi di arrivo dei due segnali a diversa frequenza è possibile avere una stima molto accurata del ritardo;

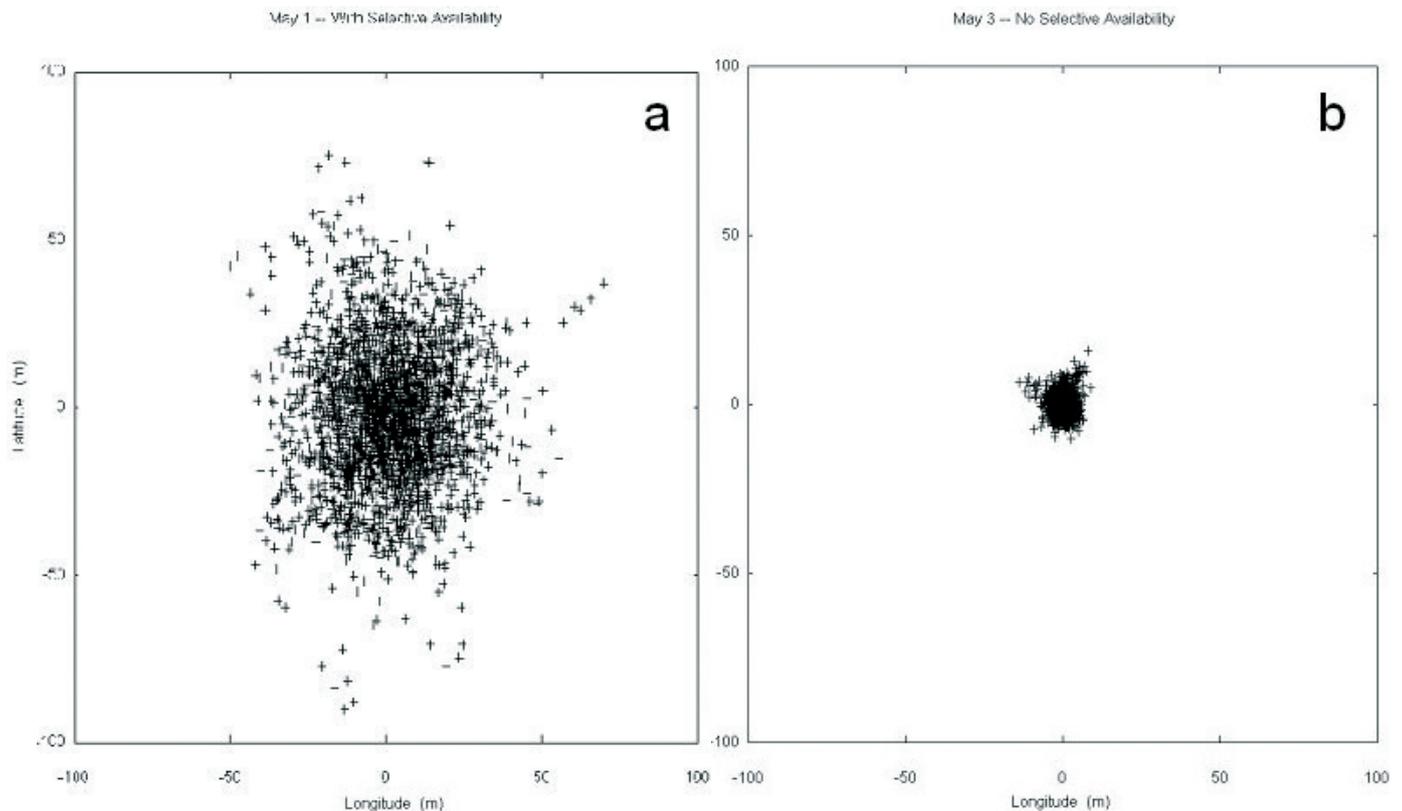


Figura 1.4.37 Le immagini comparano l'accuratezza del GPS con e senza SA (selective availability). Il rilevamento in continuo (00.00 - 23.59 UTC) fa riferimento ad un punto nella località di Erlanger, Kentucky. Il giorno 2 maggio 2000 la SA è stata azzerata.

- vapore acqueo. Il vapore acqueo contenuto nell'atmosfera (soprattutto nella troposfera) influisce sul percorso del segnale e può dare luogo alla degradazione della posizione calcolata, riducibile mediante l'utilizzo di modelli atmosferici;
- errori degli orologi dei satelliti e del ricevitore. Gli orologi sono soggetti ad errori, seppur di minima entità, che influiscono sull'accuratezza della posizione;
- errori dovuti al Multipath. Il Multipath si verifica quando l'antenna del ricevitore è posizionata vicino ad un'ampia superficie riflettente, quale per esempio un lago o un edificio. Il segnale GPS colpisce l'oggetto e viene riflesso sull'antenna, dando luogo ad una falsa misurazione. Gli effetti del Multipath possono essere ridotti utilizzando speciali antenne che impediscono la ricezione dei segnali che provengono dal basso. Il multipath influisce solamente sulle misure di precisione. I semplici ricevitori portatili non utilizzano tecniche di filtro per i segnali riflessi.

Diluizione della precisione. La diluizione della precisione DOP è il parametro di valutazione della disposizione dei satelliti nel cielo.

Il parametro DOP può amplificare l'effetto degli errori di rilevamento dei satelliti. I diversi tipi di Diluizione della Precisione prendono il nome dalle coordinate (o combinazione delle coordinate) considerate.

VDOP - Diluizione verticale della precisione.

HDOP - Diluizione orizzontale della precisione.

PDOP - Diluizione della precisione della posizione in senso tridimensionale.

GDOP - Diluizione della precisione geometrica. Indice della degradazione della posizione in senso tridimensionale e del tempo.

Il dato DOP più utile è il GDOP, trattandosi di una combinazione di tutti i fattori. Se infatti passiamo da una situazione ideale a quella reale dobbiamo rappresentare le orbite dei satelliti non come un

cerchio descritto da una linea, ma da una fascia di dimensioni pari alla somma dei diversi errori sulle misure. Ciò significa che la nostra posizione non sarà più individuata da un punto, ma da un piccolo rettangolo. Se i due satelliti si trovano in posizioni ravvicinate il rettangolo si allunga e l'incertezza della nostra posizione aumenta. Alcuni ricevitori sono in grado di considerare situazioni simili e, attraverso una opportuna scelta dei satelliti visibili, possono minimizzare il GDOP (fig. 1.4.38).

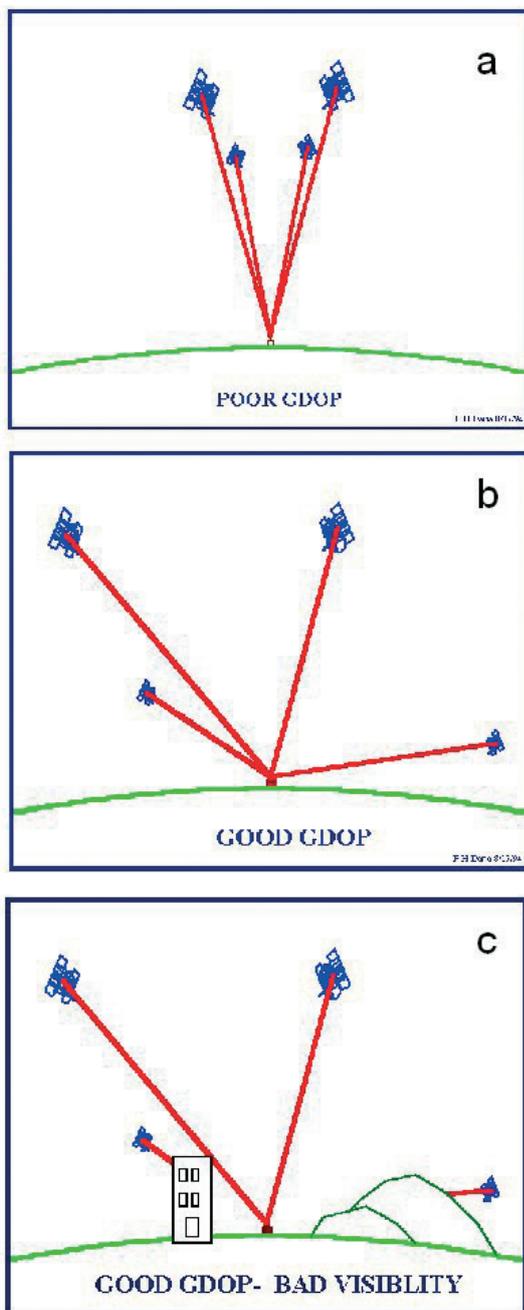


Figura 1.4.38 *Differenti situazioni di GDOP*

Il miglior modo per ridurre al minimo gli effetti del GDOP consiste nell'osservare il maggior numero possibile di satelliti. I segnali emessi dai satelliti a bassa elevazione sono comunque i più soggetti all'influenza di gran parte delle fonti di errore.

Considerate poi il GDOP, aggiungete la variabilità statistica e la capacità di ripetere più volte un rilevamento affidabile e vedrete che l'errore, mediamente, sale a circa 30 m. (tab. 1.4.8).

GPS ERROR SOURCES

ERROR SOURCE	TYPICAL RANGE ERROR	
SV CLOCK	0.6 M	
SV EPHEMERIS	0.6 M	
SELECTIVE AVAILABILITY	30 M	OFF
TROPOSPHERE	1 M	
IONOSPHERE	10 M	
RECEIVER NOISE	1.2 M	
MULTIPATH	0.5 M	

Tabella 1.4.8 *Fonti di errori di misurazione*

Perché i ricevitori militari sono più precisi? Abbiamo fatto cenno ad un ricevitore a frequenza singola ma, come in precedenza descritto, le apparecchiature militari ricevono generalmente entrambe le frequenze L1 ed L2 e confrontano i risultati ottenuti riducendo significativamente l'errore ionosferico. Inoltre le distanze satelliti/ricevitore possono essere calcolate in modo molto più accurato mediante il codice P, in quanto tale codice ha una frequenza 10 volte maggiore a quella del codice C/A.

Considerando i dati esposti come è possibile migliorare la precisione del posizionamento? E' possibile grazie a diverse tecniche. La principale è la media aritmetica su un certo numero di misure effettuate in un certo intervallo di tempo (fig. 1.4.39 e 1.4.40).

Come si è visto nessuno degli errori descritti risulta particolarmente grave. Tuttavia esiste una strategia in grado di rimuovere automaticamente la maggior parte di tali errori: il cosiddetto GPS differenziale (DGPS).

GARMIN 12XL (50 daily averages)

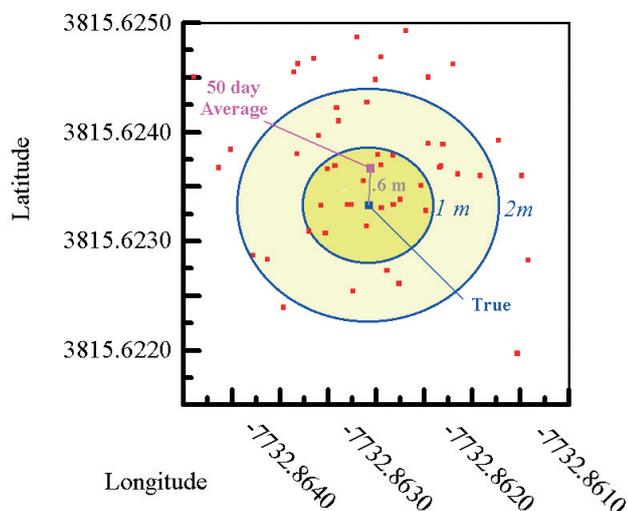


Figura 1.4.39 Media di più misurazioni GPS

2D ERROR FROM AVERAGING
Garmin II+

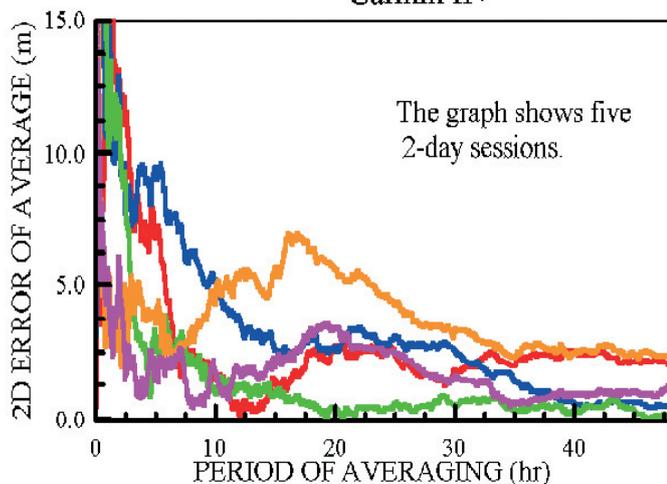


Figura 1.4.40 Andamento dell'errore nella media di misurazioni GPS

Il GPS differenziale. Gran parte degli errori che influiscono sulla misurazione della posizione dei satelliti è completamente eliminabile, o significativamente ridotta, utilizzando le tecniche di misurazione differenziale.

Il GPS differenziale si basa sull'idea di far lavorare insieme due o più ricevitori. Uno funge da riferimento per gli altri. Il ricevitore di riferimento risiede in una posizione conosciuta con precisione. Quando riceve le informazioni di posizionamento dai satelliti le confronta con la posizione reale. In tal modo è in grado di

valutare la differenza esistente fra i valori calcolati e i valori misurati. Tale differenza è nota come "correzione". Il ricevitore rover calcola direttamente la distanza dai satelliti e applica quindi le correzioni trasmesse dal ricevitore di riferimento ottenendo in questo modo le coordinate corrette della propria posizione (riducendo al minimo l'influenza degli errori di origine atmosferica e ionosferica), con precisione sino a 2-3 m. Poiché l'accuratezza degrada con la distanza dalla stazione di riferimento si consiglia di mantenersi entro le 300 miglia (500 km) dalla stessa (fig. 1.4.41).

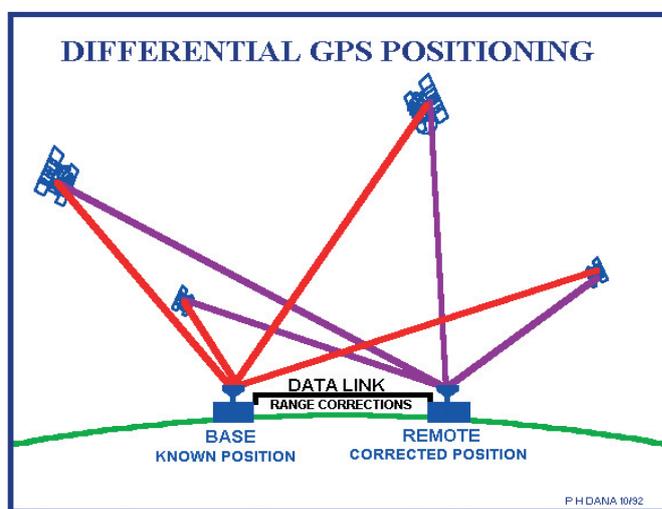


Figura 1.4.41 GPS differenziale

Per portare la precisione sotto i 2 m occorre raccogliere circa 180 punti per ogni stazione e successivamente mediarli dopo la correzione differenziale (tab. 1.4.9) (fig. 1.4.42).

Approfondimenti: dal punto alla posizione. In maniera più o meno precisa a seconda del tipo di applicazione, il sistema GPS fornisce all'utente dotato di apposito ricevitore le coordinate del punto in cui questo si trova in un determinato istante. Questo punto è definito dall'intersezione di tre sfere corrispondenti ai tre rilevamenti di distanza necessari per scopi di posizionamento. I tre satelliti GPS utilizzati in un determinato istante dal ricevitore dell'utente permettono allora di determinare le coordinate del punto in cui si trova l'utente all'interno di uno spazio cartesiano, definito cioè da tre assi coordinati. In questo spazio la Terra si trova al centro, dato dalla intersezione degli assi e perciò

GPS ACCURACIES, COSTS, AND SIGNALS

GPS APPROACH	ACCURACY ESTIMATE	RECEIVER COST ESTIMATE	GPS SIGNALS				
			L1 C/A CODE	L1 P-CODE	L1 CARRIER	L2 P-CODE	L2 Y-CODE
SPS NAVIGATION	100 M	\$1,000	X				
SPS DIFFERENTIAL >30KM	10 M	\$5,000	X				
SPS DIFFERENTIAL <30KM	1 M	\$5,000	X				
PPS NAVIGATION	10 M	\$10,000	X	X		X	
ANTI-SPOOFING NAVIGATION	10 M	\$20,000?	X	X	X	X	X
L1 CARRIER PHASE SURVEY	0.1 M	\$10,000	X		X		
L1 L2 CARRIER PHASE SURVEY	0.01 M	\$15,000	X	X	X	X	

Peter H. Dana 8/28/94

Tabella 1.4.9 Segnali GPS, costi ed accuratezza del sistema

chiamato sistema Earth Centered; inoltre, poiché gli assi cartesiani si è deciso che ruotino con la rotazione della Terra, il sistema si dice anche Earth Fixed. Quindi il punto fornito dal GPS si dice definito nel sistema cartesiano ECEF (fig.1.4.43). Tale sistema risulta particolarmente utile poiché nello stesso sistema sono espresse le coordinate del punto in cui si trovano i satelliti GPS. Da queste e

dalla distanza misurata dal ricevitore dell'utente è allora facile ricavare la posizione dell'utente nello stesso sistema.

Se la Terra fosse una sfera perfetta, trasformare una coordinata ECEF in una coordinata geografica espressa in termini di latitudine, longitudine e altitudine sarebbe un banale calcolo trigonometrico.

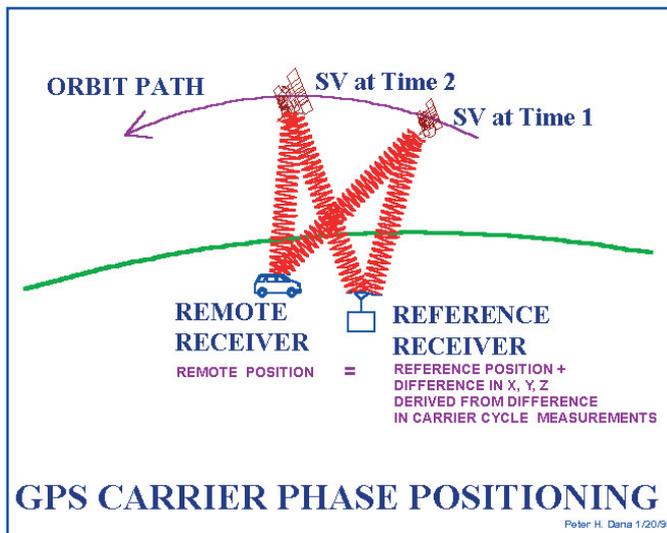


Figura 1.4.42 GPS a fase differenziale

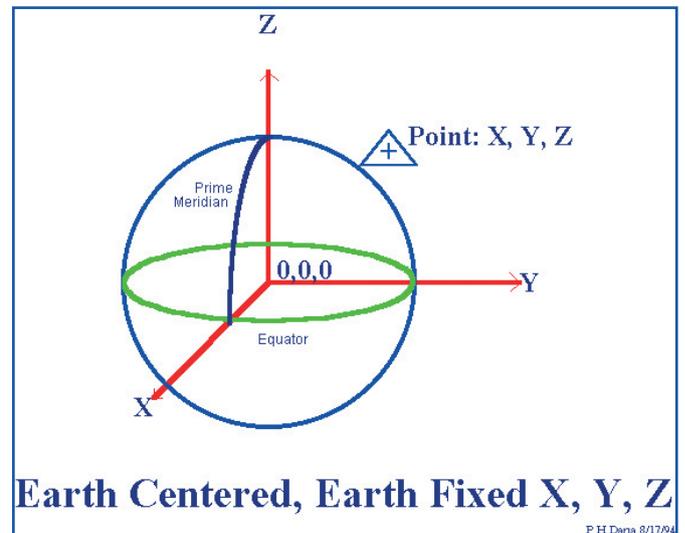


Figura 1.4.43 Il sistema cartesiano ECEF

La situazione ovviamente è ben lungi dall'essere tale e la Terra presenta una forma che in prima approssimazione può dirsi sferica, ma che è meglio approssimabile con altre forme. In generale un riferimento per la superficie terrestre si può calcolare in base al geode, una forma non geometrica che corrisponde al livello medio del mare desunto dal valore della forza di gravità in diverse zone del globo. La figura geometrica che meglio approssima il geode è quella dell'ellissoide, la quale si ottiene pensando la Terra come una sfera un poco schiacciata ai poli.

Per poter fornire coordinate utili in tutte le zone del globo terrestre il ricevitore GPS dell'utente ricorre alla definizione di ellissoide dato nelle convenzioni WGS84 (World Geodetic Survey del 1984) e basata sul geode omonimo (fig. 1.4.44 e 1.4.45).

Tale definizione specifica la dimensione dell'asse maggiore e di quello minore dell'ellisse che ruotata produce l'ellissoide che approssima la superficie terrestre. Questi assi trovano coincidenza con i riferimenti degli assi cartesiani ECEF

e l'ellissoide definisce ad altitudine 0 il livello medio della superficie del mare. Esistono diversi tipi di ellissoidi; il WGS84 è tra i più riconosciuti in ambito internazionale. Tutti i ricevitori GPS forniscono allora, come opzione di base, coordinate ellissoidiche basate sul sistema WGS84, effettuando una trasformazione trigonometrica tra coordinate ECEF e coordinate WGS84.

Che le coordinate espresse in WGS84 dal ricevitore GPS corrispondano effettivamente a quelle riportate sulla carta geografica dell'utente è un altro discorso. Pur essendo le coordinate espresse in WGS84 sempre espresse in latitudine, longitudine ed altitudine, esse forniscono solo approssimativamente la posizione reale dell'utente se per reale intendiamo un riferimento cartografico (fig. 1.4.46 e 1.4.47).

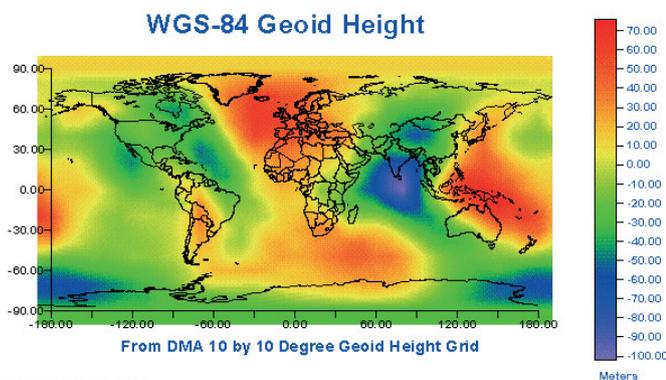


Figura 1.4.44 Ondulazioni geoidiche ed ellissoide WGS 84

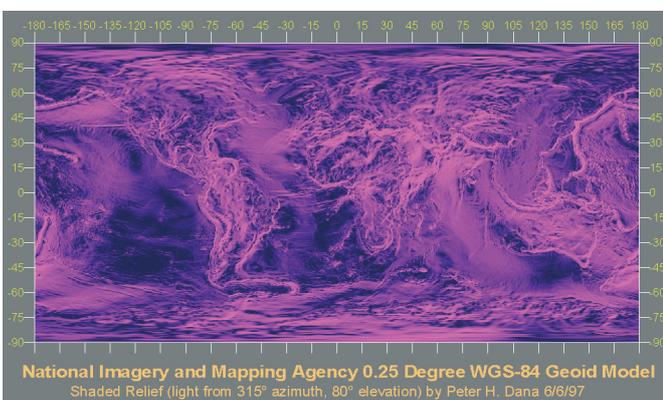


Figura 1.4.45 Modello di superficie geoidica (NIMA)

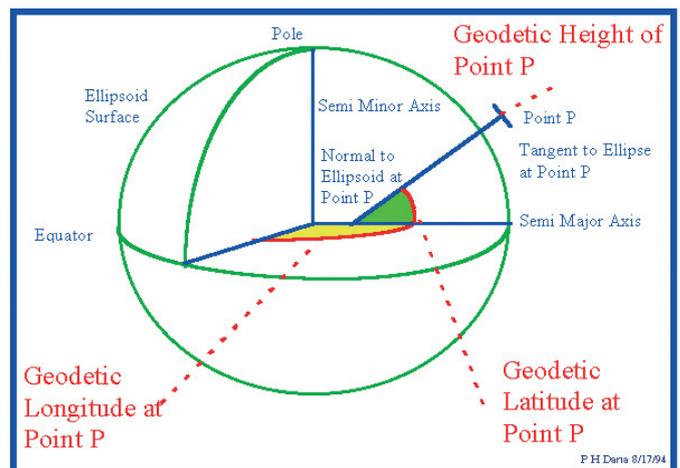


Figura 1.4.46 Longitudine, latitudine ed altezza geodetica di un punto

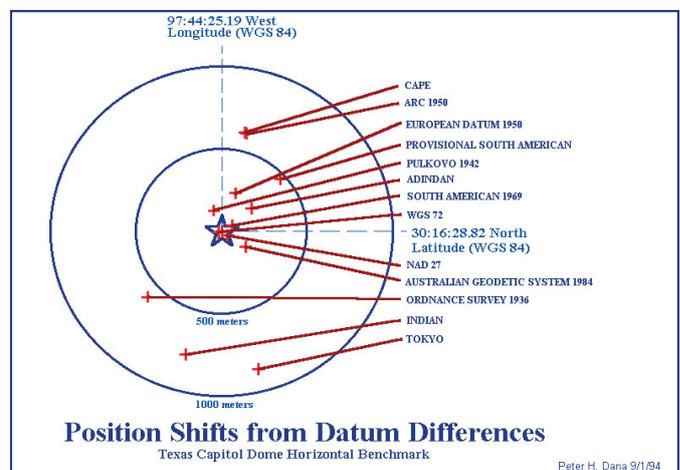


Figura 1.4.47 Shift di posizione tra datum differenti

L'approssimazione è di solito sufficiente per molte applicazioni, ma in quelle dove l'errore tra coordinate cartografiche e quelle GPS è determinante, occorre allora provvedere a raffinare il dato di posizione prima di pensare di migliorare la precisione del ricevitore.

Oltre al WGS84 esistono molti altri ellissoidi che le singole nazioni decidono di adottare per meglio rappresentare la superficie della Terra in corrispondenza del proprio territorio (tab. 1.4.10).

Il riportare la superficie curva della Terra su un foglio vuol dire incorrere in altri errori dipendenti dalla scelta di opportuni riferimenti sui quali basare le "proiezioni cartografiche".

Un sistema internazionale definisce per esempio le coordinate UTM (Universal Transverse Mercatore) basate su definizioni di ellissoide (Internazionale orientato a Potsdam) e proiezione (Gauss) valide per l'intera Europa. In Italia la cartografia ufficiale ricorre alle coordinate Gauss-Boaga che definiscono un determinato ellissoide (Internazionale orientato a Roma-Monte Mario) ed un criterio di proiezioni (Gauss) che meglio approssima la curvatura della Terra per la nostra penisola.

La potenza di calcolo dei ricevitori GPS, per quanto minuscoli questi siano, permette di offrire all'utente la possibilità di selezionare un riferimento nazionale, o datum, sul quale basare una trasformazione di coordinate da quelle di base WGS84 (tab. 1.4.11); in tal modo l'utente potrà ottenere coordinate che possono essere riportate sulla cartografia in suo possesso.

I Russi hanno anch'essi sviluppato un loro sistema, Glonass (Global Navigation Satellite System) con caratteristiche tecnologiche e di servizi simili al GPS americano. Anche in questo caso vi sono due frequenze RF con codici diversi per usi militari e civili, una costellazione di 24 satelliti a 19.000 Km di altezza. L'uso è esclusivamente limitato ad applicazioni militari e al controllo del traffico aereo per i paesi del CIS (Commonwealth of Independent States).

Selected Reference Ellipsoids

Ellipse	Semi-Major Axis (meters)	1/Flattening
Airy 1830	6377563.396	299.3249646
Bessel 1841	6377397.155	299.1528128
Clarke 1866	6378206.4	294.9786982
Clarke 1880	6378249.145	293.465
Everest 1830	6377276.345	300.8017
Fischer 1960 (Mercury)	6378166.0	298.3
Fischer 1968	6378150.0	298.3
G R S 1967	6378160.0	298.247167427
G R S 1975	6378140.0	298.257
G R S 1980	6378137.0	298.257222101
Hough 1956	6378270.0	297.0
International	6378388.0	297.0
Krassovsky 1940	6378245.0	298.3
South American 1969	6378160.0	298.25
WGS 60	6378165.0	298.3
WGS 66	6378145.0	298.25
WGS 72	6378135.0	298.26
WGS 84	6378137.0	298.257223563

Peter H. Dana 9/1/94

Tabella 1.4.10 Parametri ellissoidali

Coordinate Conversion: Cartesian (ECEF X, Y, Z) and Geodetic (Latitude, Longitude, and Height)

Direct Solution for Latitude, Longitude, and Height from X, Y, Z

This conversion is not exact and provides centimeter accuracy for heights < 1,000 km (See Bowring, B. 1976. Transformation from spatial to geographical coordinates. Survey Review, XXIII: pg. 323-327)

$$\phi = \text{atan}\left(\frac{Z + e^2 b \sin^2 \theta}{p - e^2 a \cos^2 \theta}\right)$$

$$\lambda = \text{atan2}(Y, X)$$

$$h = \frac{p}{\cos(\phi)} - N(\phi)$$

where:

ϕ, λ, h = geodetic latitude, longitude, and height above ellipsoid

X, Y, Z = Earth Centered Earth Fixed Cartesian coordinates

and:

$$p = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad \theta = \text{atan}\left(\frac{Z}{pb}\right) \quad e^2 = \frac{a^2 - b^2}{b^2}$$

$$N(\phi) = a / \sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi} = \text{radius of curvature in prime vertical}$$

a = semi-major earth axis (ellipsoid equatorial radius)

b = semi-minor earth axis (ellipsoid polar radius)

$$f = \frac{a - b}{a} = \text{flattening}$$

$$e^2 = 2f - f^2 = \text{eccentricity squared}$$

Tabella 1.4.11 Superfici topografica, geoidica ed ellissoidica