



Università della Terza Età "Cardinale Giovanni Colombo" – Milano

A.A. 2023 - 2024

Corso di Archeoastronomia

Docente : **Adriano Gaspani**

Lezione 20

**II S.R.T.M. (*Shuttle Radar
Topography Mapping*) in
Archeoastronomia**

Rilievo Archeoastronomico

Telerilevamento satellitare



GeoEye



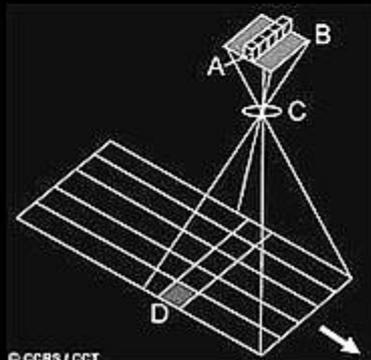
OrbView



QuickBird



Ikonos



© CCRS / CCT

Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO

Sorgenti di immagini satellitari

Google Earth

gratis....

Zoom Earth

PCN

Nasa World Wind

Bing Map

Earth Explorer

Yandex

ACME

NASA Satellite Pro

Allineamento Archeoastronomico

Un allineamento astronomico è una semiretta orientata che parte da un punto di stazione, passa per il punto di collimazione e interseca l'orizzonte locale in un punto dove, in taluni periodi dell'anno sorge o tramonta un particolare astro

target
astronomico

punto di
collimazione

punto di
stazione



Codifica dell'Informazione

\vec{u} = allineamento OM

\vec{v} = proiezione dell'allineamento OM sul piano orizzontale

Az = Azimut astronomico

h = altezza angolare dell'orizzonte naturale locale

e = easting

n = northing

z = elevation

Siccome $\|u\| = \|v\| := 1$ per definizione si ha:

$$n = \cos(h) \cdot \cos(Az)$$

$$e = \cos(h) \cdot \sin(Az)$$

$$z = \sin(h)$$

Il rilievo archeoastronomico
di un sito archeologico
viene sempre eseguito nel
sistema di coordinate altazimutali.

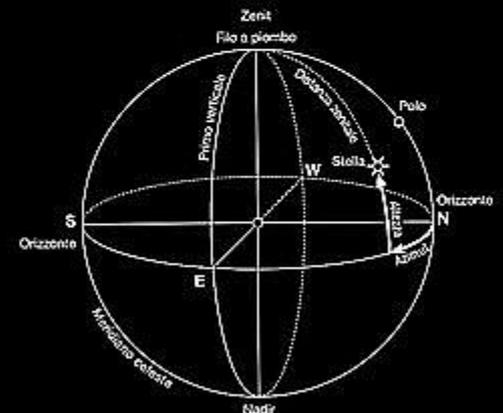
Si misurano:

Azimut (Az)

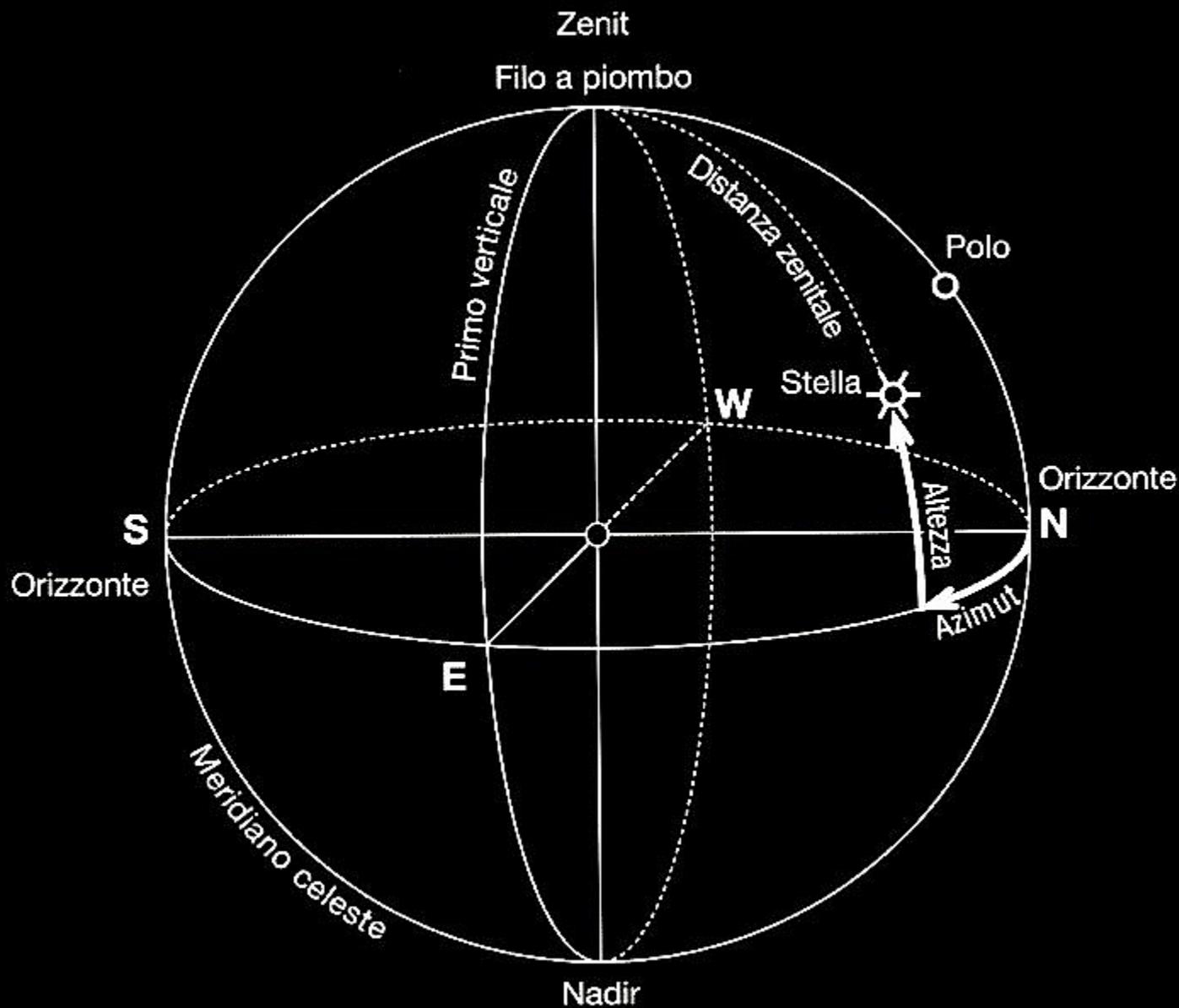
Altezze Angolari (ho)

per ogni singolo allineamento

Coordinate Altazimutali



Coordinate Altazimutali



**Dall'Azimut astronomico e dall'altezza
angolare apparente dell'orizzonte
naturale locale si calcola la Declinazione
corrispondente**

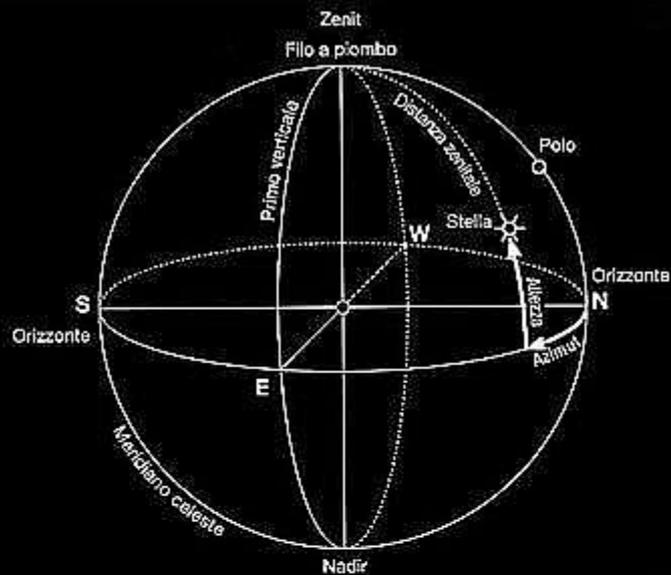
Relazione tra il Sistema di Coordinate Altazimutali e il Sistema di Coordinate Equatoriali

Il primo è il sistema Altazimutale le cui coordinate sono l'Azimut astronomico Az , misurato partendo dalla direzione del Nord astronomico e ruotando positivamente in senso orario verso il punto cardinale Est e l'Altezza angolare h rispetto al cerchio dell'orizzonte astronomico locale, il quale corrisponde esattamente alle condizioni di osservazione di un individuo posto ad una latitudine pari a φ che osserva un determinato astro. Il secondo sistema è quello Equatoriale le cui coordinate sono l'Ascensione Retta AR contata positivamente dal punto γ (il punto dove si trova il Sole all'Equinozio di primavera) e la declinazione δ contata tra -90° e $+90^\circ$ lungo il meridiano astronomico partendo dal cerchio dell'equatore celeste, proiezione dell'equatore terrestre sulla Sfera Celeste. Le formule di passaggio tra i due sistemi sono quelle di Eulero e sono le seguenti:

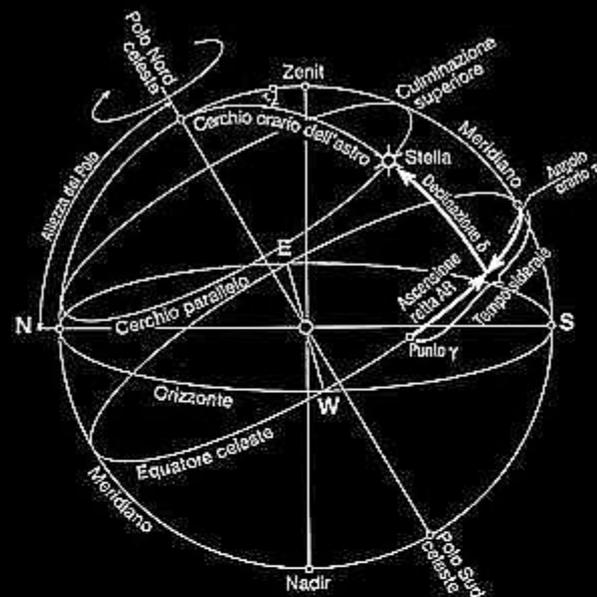
$$\begin{aligned} \sin(h) &= \sin(\delta) \sin(\varphi) + \cos(\delta) \cos(\varphi) \cos(H) \\ \cos(Az) &= [\sin(\delta) - \sin(\varphi) \sin(h)] / [\cos(\varphi) \cos(h)] \end{aligned}$$

in cui H è l'angolo orario dell'astro.

Coordinate Altazimutali



Coordinate Equatoriali



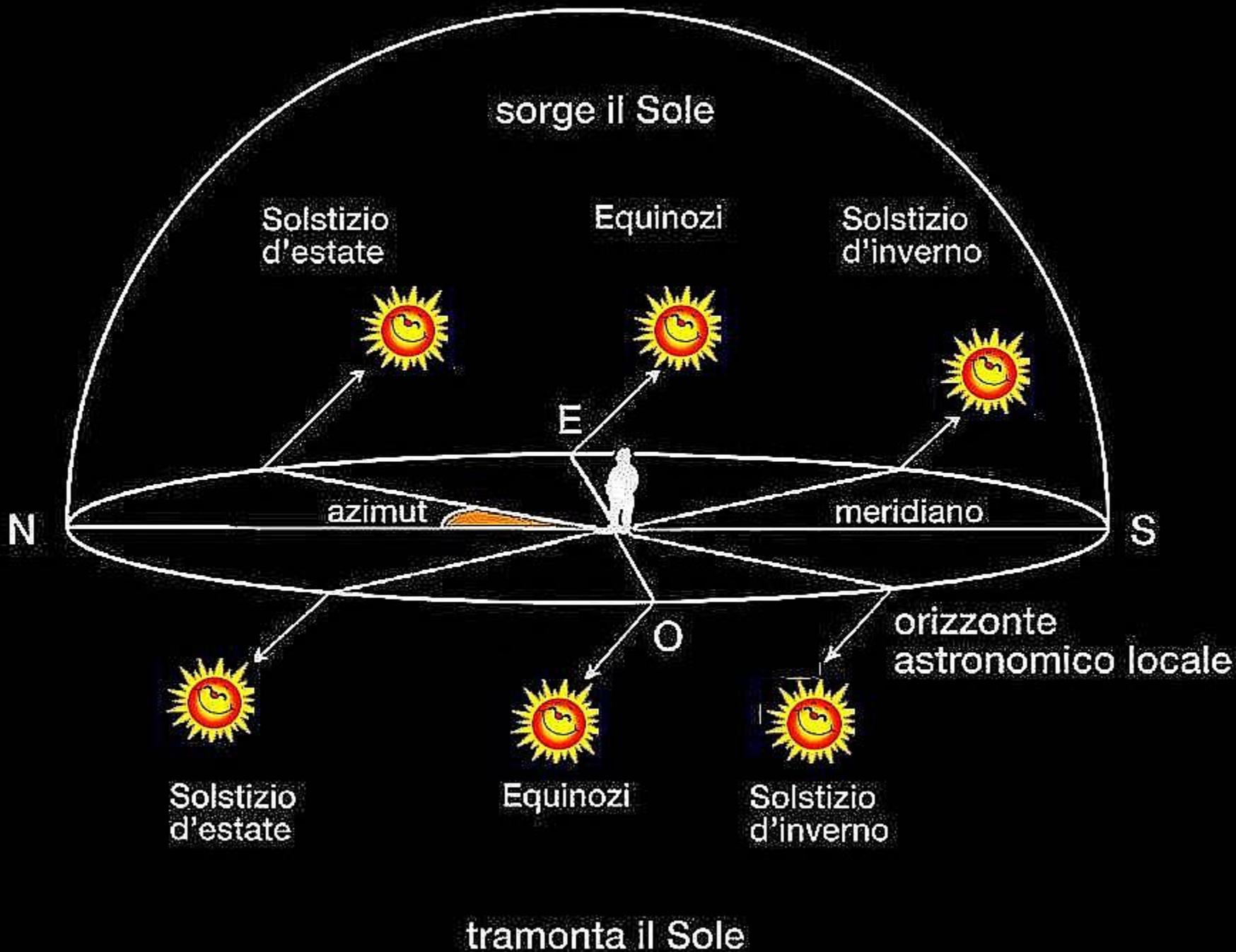
Misure



Calcoli



Risultati



Principali satelliti in orbita

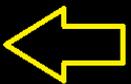
I principali satelliti messi in orbita da diverse nazioni insieme alle date in cui il primo (e alcune volte l'unico) venne lanciato:

- **Osservazione della terra**: Landsat (1-6) (1973); Seasat (1978); HCMM (1978); SPOT (Francia) (1-3) (1986); RESURS (Russia) (1985); IRS (1A-1D) (India) (1986); ERS (1-2) (1991); JERS (1-2) (Giappone) (1992); Radarsat (Canada) (1995); ADEOS (Giappone) (1996), Envisat (2003), RADARSAT (2006), TERRASAR (2007), COSMO-Sky.Med (2007-10), ALOS (2007)

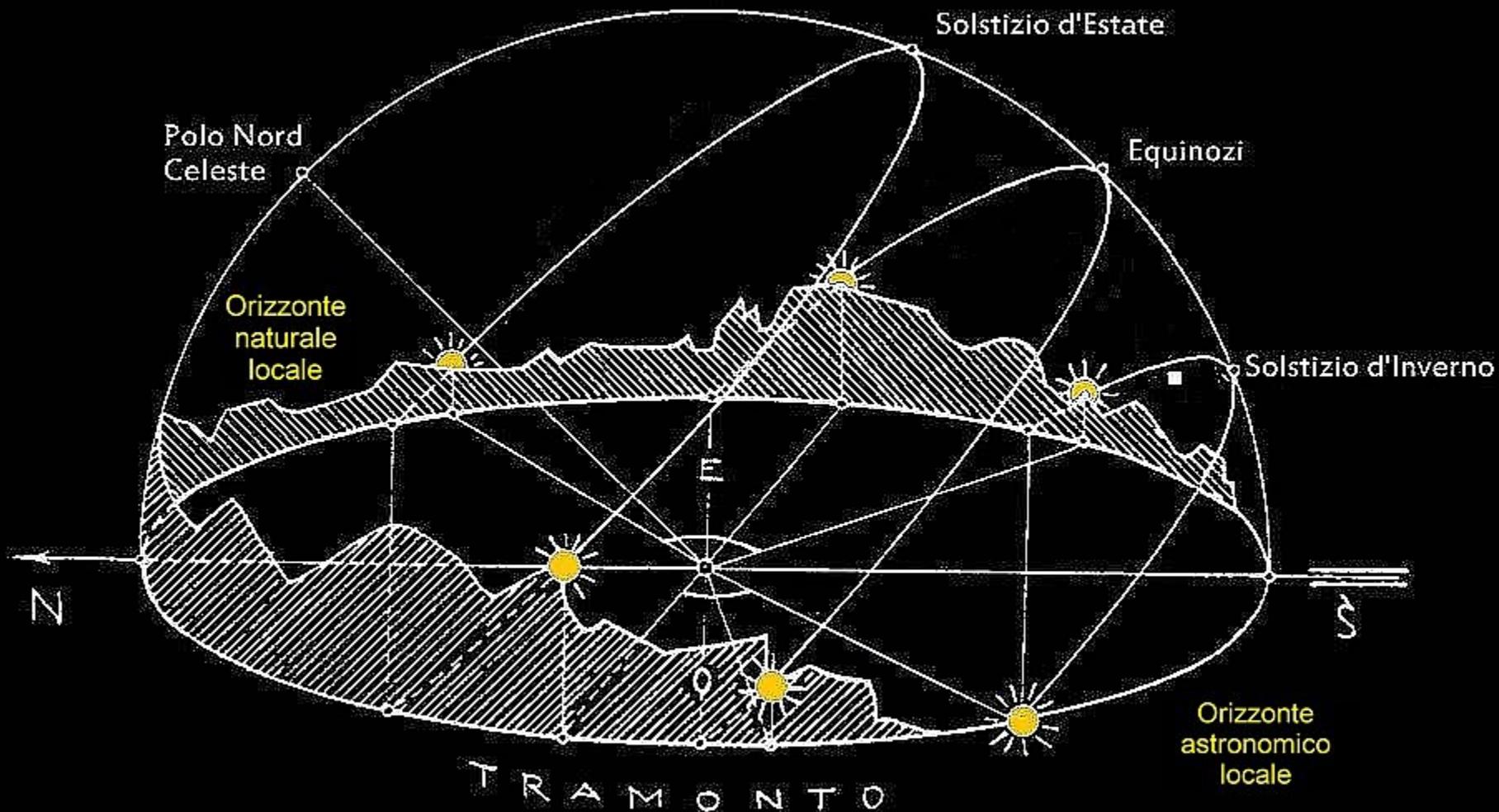
(Nota: SIR-A (1981), SIR-B (1984), SIR-C (1994), SRTM (2000) con sistemi radar a bordo dello Space Shuttle).

- **Osservazione Meteo**: TIROS (1-9) (1960); Nimbus (1-7) (1964); ESSA (1-9) (1966); ATS (g) (1-3) (1966); DMSP serie I (1966); la serie Russa Kosmos (1968) e Meteor (1969); serie ITOS (1970); SMS (g) (1975); serie GOES (g) (1975); NOAA (1-5) (1976); serie DMSP 2 (1976); serie GMS (Giappone) 9 (1977); serie Meteosat (g) (Europa) (1978); serie TIROS-N (1978); Bhaskara (India) (1979); NOAA (6-14) (1982); Insat (1983); ERBS (1984); MOS (Giappone) (1987); UARS (1991); TRMM (U.S./Giappone) (1997). (Nota: g = geostazionario)

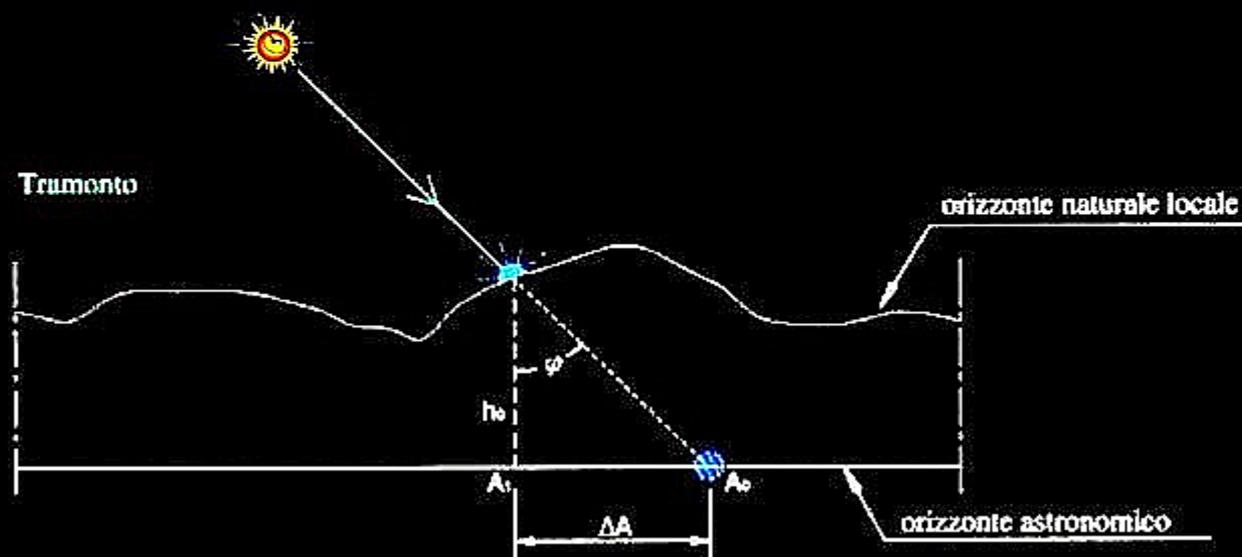
- **Oceanografia**: Seasat (1978); Nimbus 7 (1978) incluso il CZCS (Coastal Zone Color Scanner) che misura la concentrazione di clorofilla in acque marine; Topex-Poseidon (1992); SeaWiFS (1997)



**L'analisi archeoastronomica di un
sito archeologico non può
prescindere dalla conoscenza
dettagliata del profilo dell'orizzonte
naturale locale lungo le direzioni
degli allineamenti**



Traiettorie apparenti del Sole in una località alpina



Lo spostamento in azimut dovuto all'altezza dell'orizzonte naturale locale
Alla levata l'azimut aumenta: $A_0 < A_1$; Al tramonto l'azimut diminuisce: $A_0 > A_1$.

L'analisi archeoastronomica eseguita sulle immagini satellitari richiede la sintesi del profilo dell'orizzonte naturale locale intorno al sito archeologico, poichè generalmente non è disponibile il profilo misurato nel sito

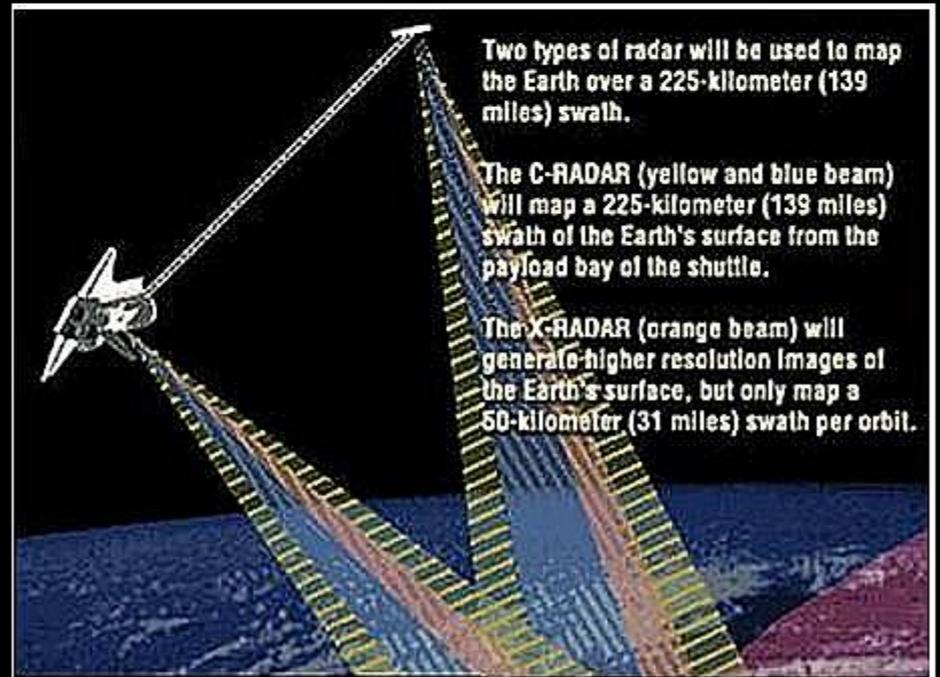
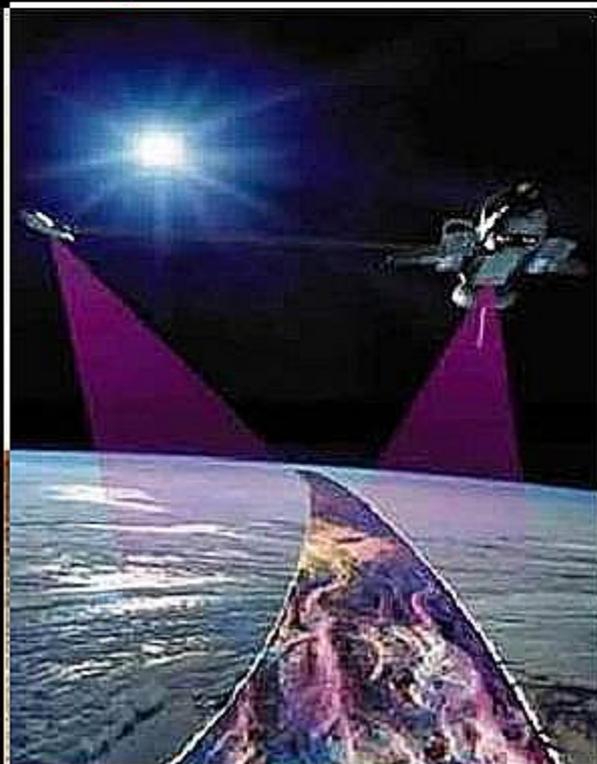
DEM (Digital Elevation Model)

La sintesi del profilo dell'orizzonte naturale locale può essere eseguita se si dispongono dati DEM (Digital Elevation Model) del territorio in cui il sito archeologico è inserito.

Una griglia di punti di coordinate geografiche e quota altimetrica (WGS84) note

SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)

Nel Febbraio 2000 lo Space Shuttle Endeavour ottenne in 11 giorni la mappatura radar completa in alta risoluzione della superficie terrestre ad intervalli di 90 metri per ogni punto del pianeta



SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)

Bande Radar

Lo Shuttle operò in 2 bande Radar

La banda C produsse la mappatura radar ad una campionatura di 90 metri.

La banda X produsse una campionatura più fitta (30 metri) di alcune celle della banda C

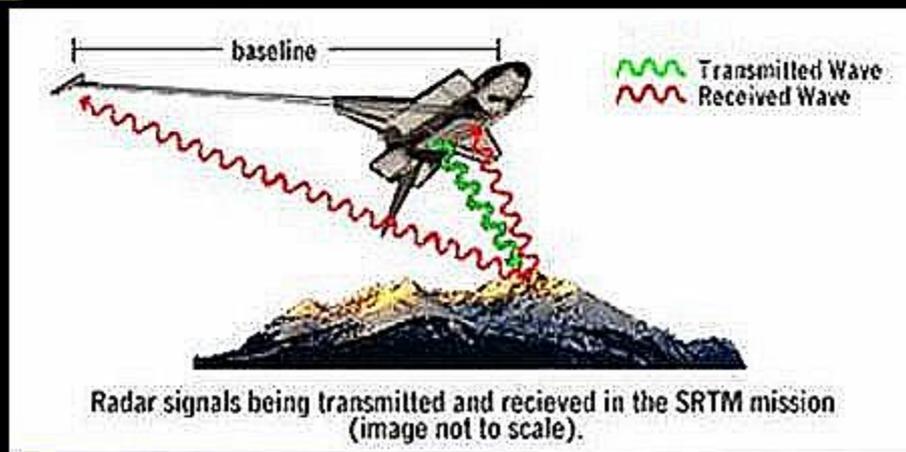
i dati DEM a 90 metri sono scaricabili gratuitamente da internet

In Europa e in Asia la dimensione delle immagini SRTM disponibile gratuitamente è 1°x 1°

Google Earth utilizza SRTM30 e SRTM90 per il paesaggio inclinato

U.S.G.S. - Earth Explorer

permette l'utilizzo di tutti i dati SRTM disponibili



L'analisi archeoastronomica
richiede la sintesi dell'orizzonte
naturale locale visibile dal sito
archeologico studiato

cosa utilizzare?



Peakfinder



Horizon

U.S.G.S. - Earth Explorer

Ricostruzione del paleopaesaggio
mediante tecniche SRTM
(D.E.M. - Digital Elevation Model)

The screenshot displays the Earth Explorer web application interface. At the top, a browser window shows the URL <https://earthexplorer.usgs.gov>. The main content area is divided into a left sidebar and a central map view.

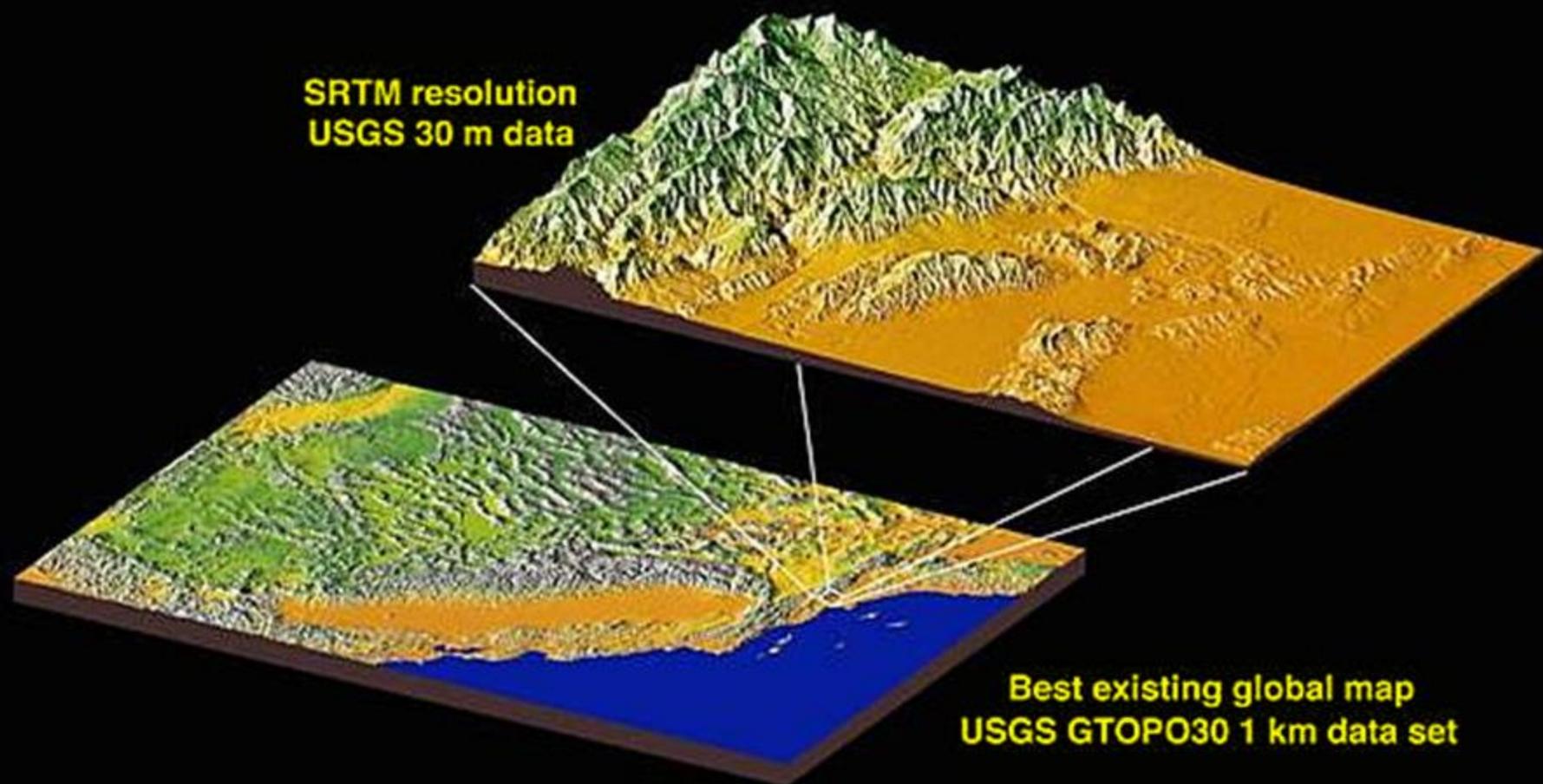
Left Sidebar (Data Set Search):

- Use Data Set Prefilter ([View Help](#))
- Data Set Search:
- Aerial Imagery**
- AVHRR
- CEOS Legacy
- Commercial Satellites
- Declassified Data
- Digital Elevation**
- ASTER GLOBAL DEM
- CoNEO TBDEM
- EDNA
- GMTED2010
- TOPO30
- TOPO30 HYDRO 1K
- IFSAR Alaska
- LIDAR
- SRTM**
- SRTM 1 Arc-Second Global
- SRTM Non-Void Filled
- SRTM Void Filled
- SRTM Water Body Data
- Digital Line Graphs
- Digital Maps
- FO 1

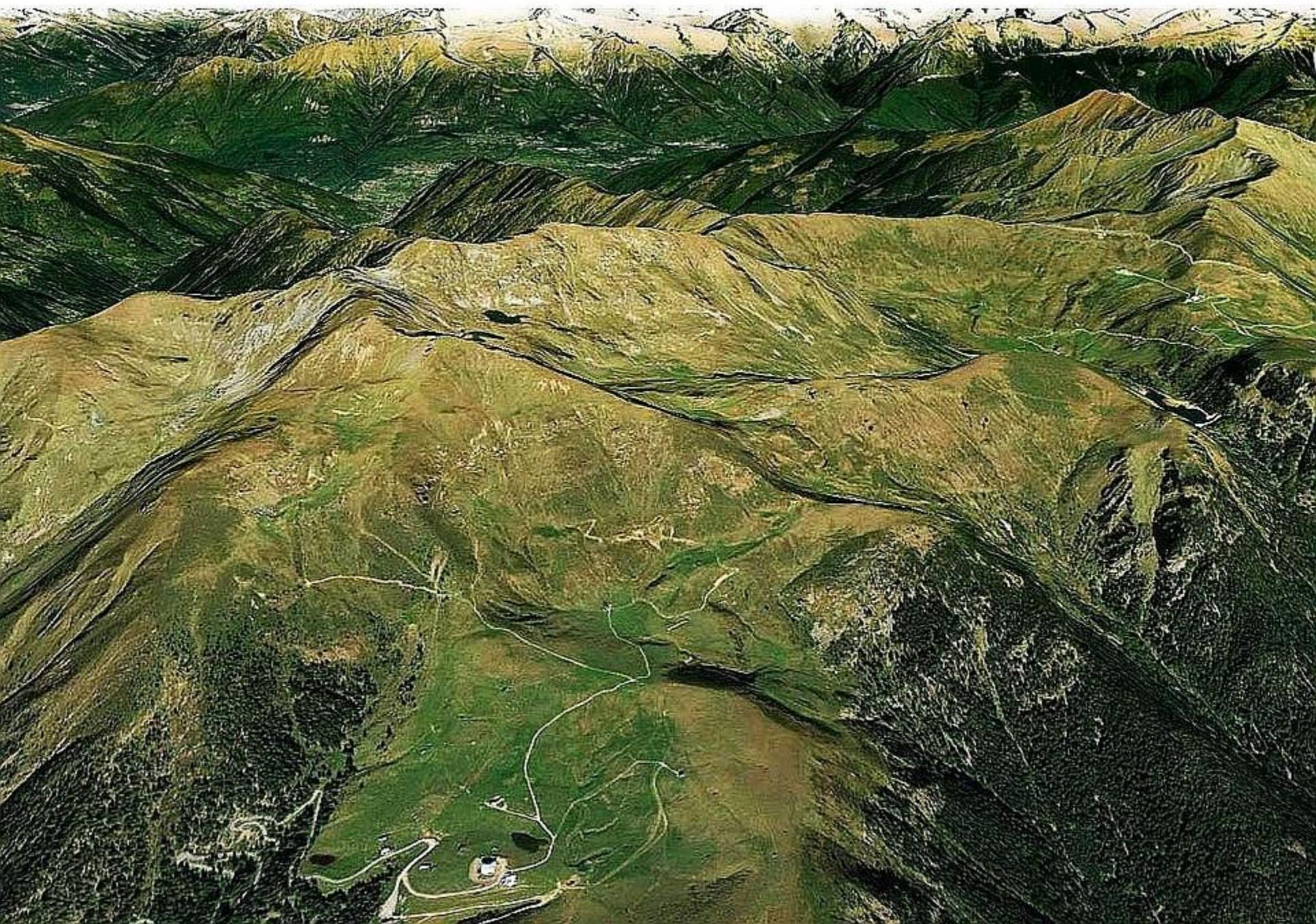
Map View:

- Location: Zogno - Pratinuovi
- Coordinates: 45° 47' 27" N, 009° 37' 44" E to 009° 37' 49" E
- Map data ©2017 Google Immagini ©2017, DigitalGlobe
- Scale: 10 m

Ricostruzione del rilievo usando SRTM30



Piani del Monte Avaro - Modello digitale 3D



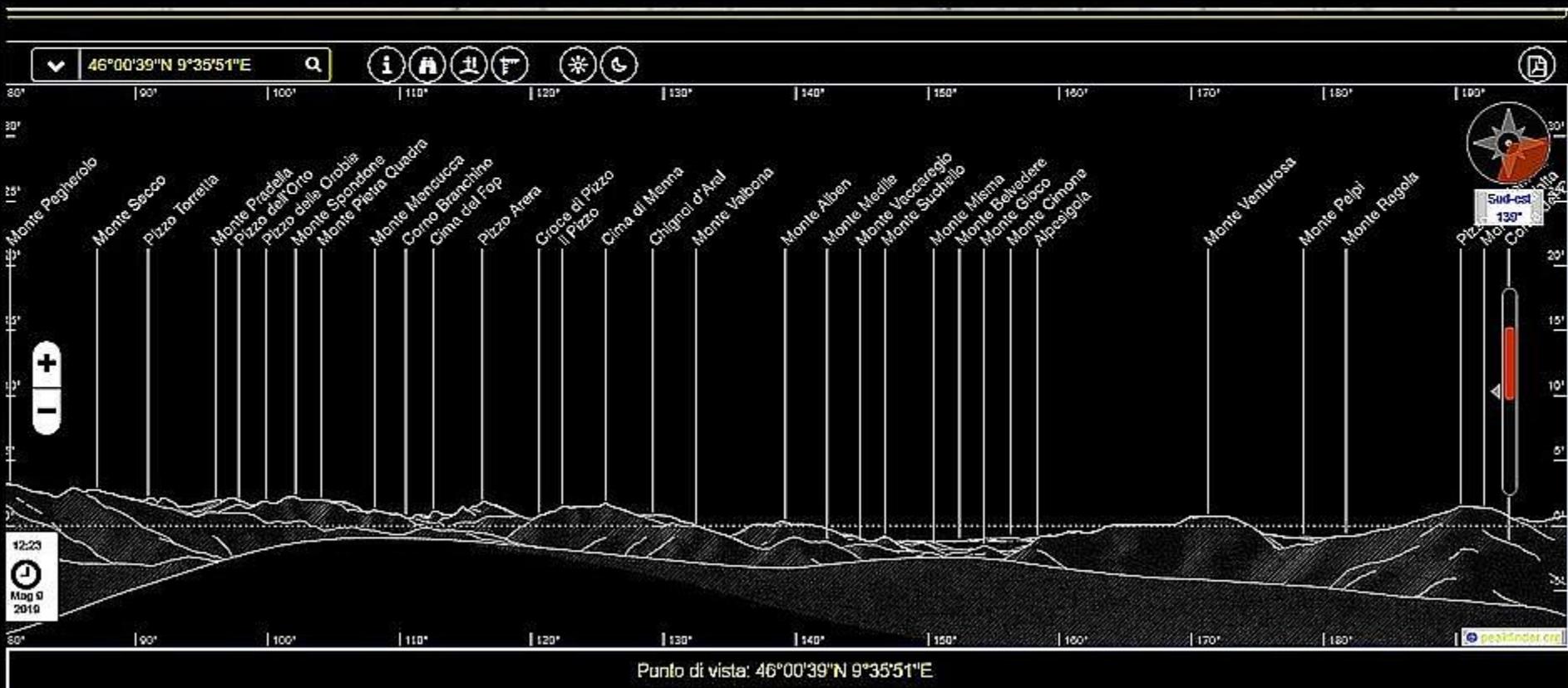
Barec dei Piani del Monte Avaro



Google earth

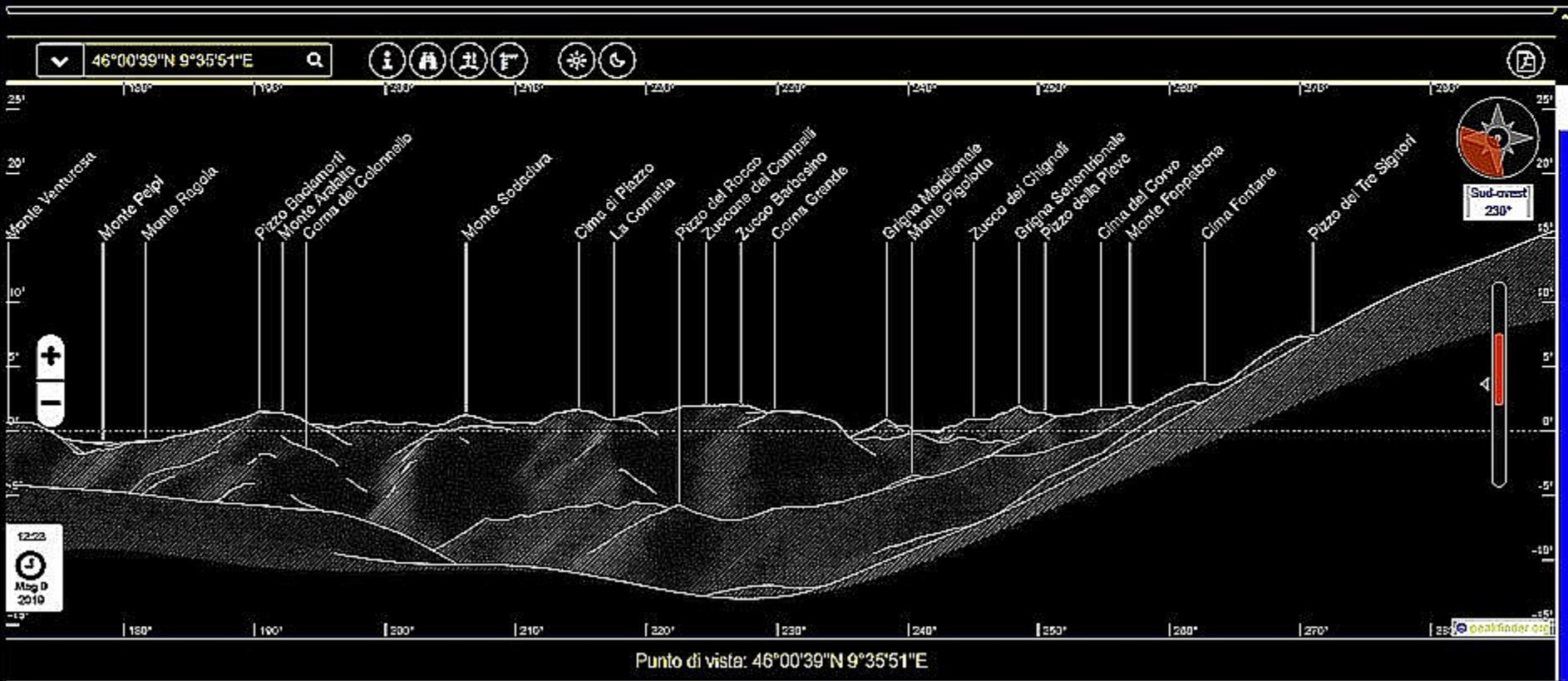
Il "Barec" dei Piani dell'Avaro

Profilo della Skyline



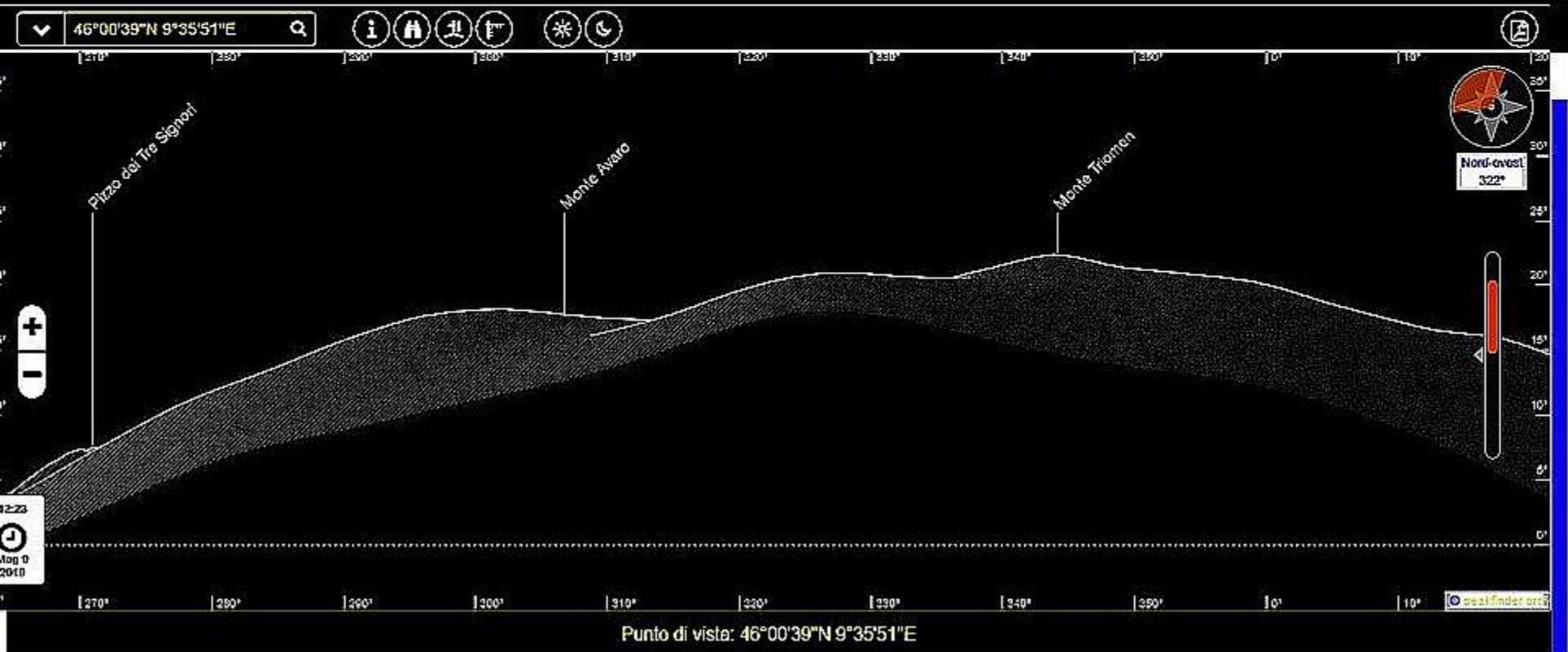
Il "Barec" dei Piani dell'Avaro

Profilo della Skyline



Il "Barec" dei Piani dell'Avaro

Profilo della Skyline



Barec dei piani del Monte Avaro

Linee Astronomiche

Righello

Linea Percorso

Misura la distanza tra due punti sul suolo

Lunghezza mappa:	20,64	Metri
Lunghezza terreno:	21,21	
Direzione:	134,54	gradi

Navigazione con il mouse

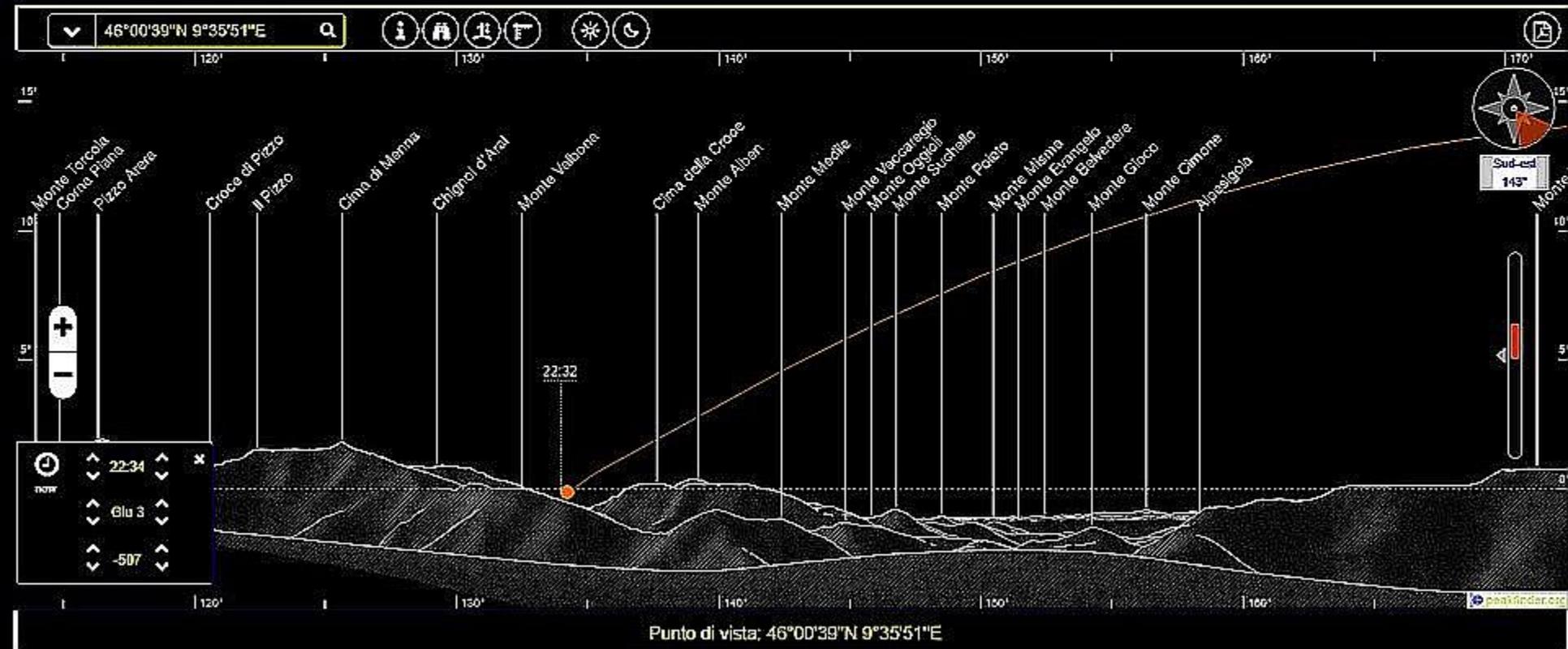
Sorge la
Luna a
 $\delta = (-\varepsilon - i)$

Sorge la Luna al Lunistizio estremo Inferiore

Google earth

Il "Barec" dei Piani dell'Avaro

508 a.C.



Sorgere della Luna al Lunistizio estremo inferiore

Barec dei Piani del Monte Avaro

Righello

Linea Percorso

Misura la distanza tra due punti sul suolo

Lunghezza mappa: 22,34 Metri

Lunghezza terreno: 22,56

Direzione: 222,55 gradi

Navigazione con il mouse Salva Cancella

**Tramonta
la Luna a
 $\delta = (-\varepsilon - i)$**

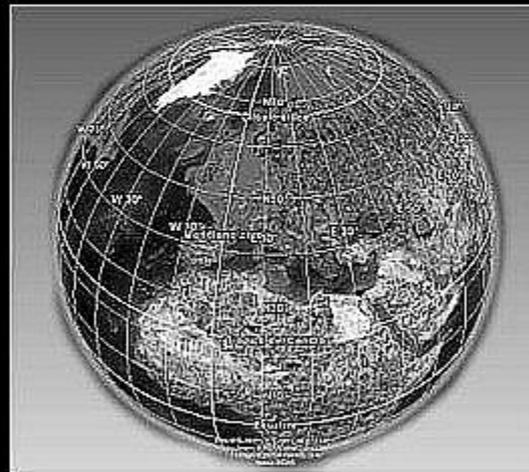
Tramonto della Luna al Lunistizio estremo inferiore

Per
Approfondire...

Adriano Gaspani

Archeoastronomia Satellitare

Tecniche moderne per il rilievo e lo
studio dei siti archeologici di rilevanza
astronomica.



Collana Manualistica

Indice

Introduzione.....	pag. 9
L'Archeoastronomia.....	pag. 12
La metodologia.....	pag. 18
Parte I - Tecniche tradizionali.....	pag. 22
La Topografia.....	pag. 22
Il campo topografico.....	pag. 23
Storia della topografia.....	pag. 25
Alcuni strumenti topografici.....	pag. 26
Coniometri.....	pag. 26
La Stazione totale.....	pag. 27
Gli orientamenti delle griglie di scavo negli scavi archeologici.....	pag. 28
Azimut e Altezza.....	pag. 31
Le misure di Azimut e di Altezza angolare Apparente.....	pag. 35
Il rilievo del profilo dell'orizzonte naturale locale.....	pag. 40
Gli strumenti di misura dell'Archeoastronomia.....	pag. 42
I Longimetri.....	pag. 42
Il Teodolite ottico-meccanico reletatore (T.O.M.R.).....	pag. 43
Condizioni di esattezza del Teodolite.....	pag. 47
Tipi di teodolite.....	pag. 49
La Collimazione.....	pag. 51
Letture al cerchio orizzontale e misure di angoli azimutali.....	pag. 52
La regola di Bessel.....	pag. 52
Misura di un angolo azimutale fra due direzioni.....	pag. 53
Reiterazioni.....	pag. 53
Misura degli angoli azimutali per giro di orizzonte.....	pag. 54
Metodo a strali.....	pag. 54
Metodo per angoli semplici.....	pag. 54
Metodo delle combinazioni binarie.....	pag. 55
Metodo delle direzioni isolate.....	pag. 55
Letture al cerchio verticale.....	pag. 55
Angolo zenitale.....	pag. 56
Misurazione delle distanze con il metodo Stadimetrico.....	pag. 57
La rilevazione degli allineamenti astronomici.....	pag. 60
Parte II - Tecniche satellitari GPS.....	pag. 63
I sistemi di riferimento geodetici.....	pag. 68
Il Rigonfiamento equatoriale.....	pag. 70
Il Geoido.....	pag. 75

L'Ellissoide.....	pag. 77
Ellissoide di riferimento.....	pag. 82
Proprietà dell'ellissoide.....	pag. 82
Ellisse definita dalla sezione trasversa.....	pag. 84
Ellissoide triassiale.....	pag. 85
Coordinate geografiche ellittiche.....	pag. 85
Ellissoidi usati per la definizione dei punti sulla Terra.....	pag. 89
Ellissoidi di riferimento per altri corpi celesti.....	pag. 92
La Sfera Locale.....	pag. 93
Il sistema di riferimento nazionale italiano.....	pag. 94
Il sistema di riferimento europeo.....	pag. 95
Il sistema di riferimento globale terrestre.....	pag. 96
Il sistema di riferimento geografico WGS84.....	pag. 96
Il Sistema Convenzionale Terrestre WGS84.....	pag. 98
Deviazione della verticale.....	pag. 100
Corrispondenza del sistema WCS84 con la Sfera Celeste.....	pag. 103
L'Ellissoide WGS84.....	pag. 105
Il modello EGM96 per il Geoido.....	pag. 107
Le coordinate UTM.....	pag. 110
La quadratura del sistema UTM.....	pag. 114
La misura degli azimut astronomici nel reticolato UTM.....	pag. 116
La trasformazione delle coordinate WGS84 nel sistema UTM e viceversa.....	pag. 117
Le formule di trasformazione.....	pag. 119
Le formule di Molodenskij.....	pag. 119
Le formule di Gauss.....	pag. 123
Il sistema GPS.....	pag. 125
La tecnologia del GPS.....	pag. 131
La "Selective Availability" (SA).....	pag. 142
Il "Point Positioning" con misure di codice.....	pag. 143
La misura delle quote altimetriche.....	pag. 146
Il sistema GLONASS.....	pag. 149
Le applicazioni nel campo dell'Archeoastronomia.....	pag. 151
Procedure operative per l'esecuzione di operazioni geo-topografiche GPS ad uso archeoastronomico.....	pag. 156
Programmazione del rilevamento.....	pag. 163
La scelta dei punti di stazione.....	pag. 163
La configurazione della costellazione dei satelliti.....	pag. 165
Perdita di segnale a causa delle ostruzioni.....	pag. 172
Trasporto del punto di stazione.....	pag. 178
Determinazione di una base GPS mediante due ricevitori simultanei.....	pag. 180
Stato di "salute" dei satelliti.....	pag. 181
Tempi di acquisizione.....	pag. 182
Esecuzione del rilevamento.....	pag. 184

Messa in stazione del ricevitore.....	pag. 184
Posizione del centro di fase dell'antenna.....	pag. 186
Inizio e termine della sessione di misura.....	pag. 189
Condizioni meteorologiche.....	pag. 191
Fine della sessione di misura.....	pag. 192
Accuratezza ottenibile con il protocollo C/A.....	pag. 193
L'errore di posizionamento.....	pag. 193
La posizione media e i limiti di confidenza per la posizione vera.....	pag. 203
Miglioramento dell'accuratezza di rappresentazione del posizionamento planimetrico di un ricevitore satellitare GPS.....	pag. 207
Metodo "non pesato".....	pag. 208
Metodo "pesato".....	pag. 209
L'ellisse d'errore.....	pag. 212
Incertezza sull'azimut geodetico di una base GPS.....	pag. 213
La rilevazione degli allineamenti presenti in un sito archeologico.....	pag. 216
La rilevazione diretta delle orientazioni.....	pag. 216
L'orientazione delle griglie di scavo.....	pag. 219
Il GPS in combinazione con altri strumenti di rilevazione.....	pag. 222
Procedure pratiche di rilevamento GPS dei siti archeoastronomici	
Rilevamento degli allineamenti utilizzando una singola base GPS.....	pag. 224
Rilevamento utilizzando simultaneamente più basi GPS.....	pag. 228
Rilevamento "ex line".....	pag. 230
Rilevamento degli allineamenti utilizzando una singola base GPS e la bussola topografica.....	pag. 235
Parte III - Tecniche di telerilevamento per lo studio archeoastronomico dei siti archeologici.....	pag. 244
Telerilevamento e Satelliti.....	pag. 244
Un po' di storia.....	pag. 245
Utilizzo delle immagini satellitari.....	pag. 249
Tipologie di telerilevamento.....	pag. 251
Risoluzioni e dati.....	pag. 252
I satelliti ottici.....	pag. 255
Principali vantaggi delle immagini satellitari.....	pag. 256
Risoluzione e precisione.....	pag. 257
Elaborazione dei dati.....	pag. 259
Vantaggi della ripresa satellitare.....	pag. 260
Svantaggi della ripresa satellitare.....	pag. 262
Campi di applicazione.....	pag. 263
L'informazione contenuta nelle immagini riprese da satellite.....	pag. 263
La correzione degli errori.....	pag. 271
Elaborazione delle misure, interpretazione e classificazione.....	pag. 275
Le piattaforme.....	pag. 278
Alcuni satelliti a confronto.....	pag. 279
Valutazione delle potenzialità delle immagini	

da satellite ad alta risoluzione per le applicazioni archeoastronomiche	pag. 282
---	----------

La misura degli azimut astronomici di orientazione	pag. 287
---	----------

Misura dell'azimut astronomico utilizzando le coordinate geografiche di due punti rilevati sulle immagini	pag. 291
---	----------

Sorgenti di errore nella misura degli azimut geodetici di orientazione sulle immagini satellitari	pag. 293
L'errore dell'operatore	pag. 296

Errore di "snuff"	pag. 301
--------------------------------	----------

Trattamento delle immagini prima dell'utilizzo per il rilievo degli azimut astronomici di orientazione	pag. 306
---	----------

La georeferenziazione	pag. 309
L'errore di georeferenziazione	pag. 314
Il ricampionamento (Resampling)	pag. 315
L'effetto della topografia: Tortorettificazione Parametrica	pag. 319
La valutazione statistica dell'errore nella Georeferenziazione	pag. 321
La definizione del Sistema di Riferimento Cartografico (CRS)	pag. 323

Google Earth	pag. 325
Le immagini di Google Earth	pag. 327
Errori di Google Earth	pag. 328
Google Earth Plus	pag. 329
Google Earth Pro	pag. 330

Bing Maps	pag. 330
------------------------	----------

Altri software	pag. 331
-----------------------------	----------

La Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM)	pag. 332
La ricostruzione del profilo dell'orizzonte naturale locale con Google Earth	pag. 333
La misura degli azimut astronomici mediante la funzione "righello" di Google Earth	pag. 335
Lo zoom dell'immagine	pag. 340
Approccio sperimentale	pag. 343

Affidabilità degli allineamenti astronomici misurati sulle immagini satellitari	pag. 351
--	----------

Test di verifica di un'ipotesi statistica	pag. 352
L'ambito deterministico	pag. 353
L'ambito statistico	pag. 354
L'ambito archeoastronomico	pag. 358
La distribuzione Normale	pag. 359
Criterio statistico di Schaefer per un singolo allineamento	pag. 366
Livello di incertezza critico per accettare o meno un allineamento	pag. 369

Caso generale	pag. 371
Caso di N allineamenti indipendenti	pag. 374

La probabilità di orientazione casuale nel caso degli allineamenti misurati sulle immagini satellitari	pag. 376
---	----------

La valutazione dei risultati dell'analisi Archeoastronomica	pag. 380
Il criterio Archeologico	pag. 380
Il criterio etnografico	pag. 381

Misura dell'azimut astronomico di orientazione delle chiese medioevali sulle immagini satellitari	pag. 382
--	----------

Un interessante esempio: le chiese di Randazzo	pag. 386
---	----------

Conclusioni	pag. 393
--------------------------	----------

Bibliografia	pag. 394
---------------------------	----------