Il Metodo Nautico

per il calcolo dell'azimut di un allineamento e della declinazione da esso sottesa

(ARCHEOASTRONOMIA LIGUSTICA)

http://www.archaeoastronomy.it

Mario Codebò

(info@archaeoastronomy.it)

Agostino Frosini

(agopax@libero.it)

DESCRIZIONE (di Mario Codebò)[1]

Vengono qui di seguito date, con esempi numerici, due fondamentali sequenze di formule che consentono di determinare l'azimut astronomico A di un allineamento e la declinazione δ sottesa, essendo noti:
1) le coordinate geografiche latitudine φ, longitudine λ, quota sul livello del mare "e"[2];
2) l'angolo α tra l'allineamento e l'astro (generalmente il Sole), misurato con il teodolite o con lo squadro sferico graduato, nell'istante della misurazione.

Le due sequenze sono valide per misurazioni prese col Sole, ma possono essere utilizzate anche con Luna, stelle e pianeti apportando alcune modifiche (che qui non vengono descritte).
I valori tabulari si desumono dalle Effemeridi in corso. Nell'esempio che segue sono state utilizzate quelle nautiche pubblicate dall'Istituto Idrografico della Marina Militare Italiana I.I.M., dette *Effemeridi Nautiche* (*EN*) o *Almanacco Nautico* (in inglese: *Nautical Almanac NA*). Perciò le sigle usate sono quelle proprie di tale almanacco[3].

Le procedure di calcolo sono desunte da Flora 1987 ed adattate alle necessità dell'archeoastronomia.

Le correzioni da apportare al barometro a mercurio sono descritte nella tavola XIII del volume *Tavole Nautiche* dell'I.I.M., mentre i valori della rifrazione atmosferica nella tavola XXII.

Le abbreviazioni, i simboli e le sigle usate sono le seguenti:
⊙ = Sole;
☾ = Luna;
★ = stella;
● = pianeta;
h, m, s = ore, minuti e secondi di tempo;
sen = seno;
cos = coseno;
tan = tangente;
* = moltiplicazione;
tm = tempo medio del luogo di osservazione, ovvero sua ora civile (la comune ora segnata dall'orologio);
Tm = tempo medio di Greenwich, ovvero sua ora civile (altrimenti detto UT e, con dizione scorretta, GMT[4]);

---

[1] Il presente articolo corregge, a tutti gli effetti, gli errori presenti in quello precedente (Codebò 1997).
[2] Si può indicare anche con "Q".
[3] Benché i valori numerici siano sostanzialmente gli stessi (a meno di arrotondamenti), le *Effemeridi Nautiche EN* di qualsiasi nazionalità differiscono dalle *Effemeridi Astronomiche EA* (in inglese *Astronomical Almanac AA*) per parecchi dettagli, i principali dei quali sono: nelle *EN* sono riportati i dati di Tv e δ per ogni ora di ogni giorno dell'anno di Sole, Luna e quattro pianeti visibili ad occhio nudo (Venere, Marte, Giove e Saturno), escludendo quindi i pianeti di difficile osservazione (Mercurio) e quelli invisibili ad occhio nudo (Urano, Nettuno, Plutone, corpi ultra–plutoniani, asteroidi, comete, ecc.); sono inoltre presenti apposite tavole che accelerano molto i calcoli. Nelle *Effemeridi Astronomiche EA*, invece, gli stessi dati sono riportati per la sola mezzanotte di ogni giorno dell'anno (quindi per tutti gli altri orari devono essere interpolati) e per tutti i corpi celesti visibili ed invisibili ad occhio nudo. In sintesi: le *EN* sono meno complete ma semplificano enormemente i calcoli, mentre le *EA* sono assai più complete ma altrettanto complesse. Per gli scopi dell'archeoastronomia – che si riferisce all'astronomia ad occhio nudo delle culture del passato, le *EN* si sono rivelate le migliori.
[4] E' scorretto definire il Tempo Universale di Greenwich UT come Greenwich Mean Time perché, per definizione, UT comincia alla mezzanotte mentre GMT al mezzogiorno. Quindi tra UT e GMT c'è una differenza di 12 ore. Caso mai, UT può correttamente definirsi Greenwich Civil Time GCT, ma in nessun caso GMT!

tv = tempo vero, ossia angolo orario del centro dell'astro contato a partire dal meridiano superiore dell'osservatore verso W. Il meridiano superiore è quel meridiano che comprende un polo dell'equatore e lo zenit dell'osservatore. Il meridiano inferiore è quello che contiene l'altro polo dell'equatore ed il nadir dell'osservatore;
Tv = il tempo vero al meridiano di Greenwich;
H = angolo orario, ossia tv, dell'astro;
A = azimut;
Am = azimut misurato con lo strumento (teodolite o squadro sferico graduato);
Aa = azimut dell'allineamento;
φ = latitudine;
λ = longitudine;
δ = declinazione;
ET = equazione del tempo, ossia differenza algebrica tra il tempo vero ed il simultaneo tempo medio (o viceversa, con relativo cambiamento di segno algebrico): ET_m = tv – tm (equazione del tempo medio) oppure: ET_v = tm – tv (equazione del tempo vero);
JD = giorno giuliano;
hv = altezza vera dell'astro;
ho = altezza misurata (altrimenti detta osservata) dell'astro;
R = rifrazione atmosferica;
Q = altezza sul livello del mare dell'occhio dell'osservatore, comprensiva di quota sul livello del mare e di altezza dal suolo dell'occhio dell'osservatore;
i = depressione dell'orizzonte; per calcolarla qui è usata la formula: i = 0,03 √Q;
Π: parallasse. Quella del Sole Π☉ vale, al 2000.0, mediamente 0°00'08,794148". Quella della Luna Π☾ vale mediamente 0°57'02,7" quando essa è all'orizzonte astronomico e (0°57'02,7"cos ho) quando invece è sopra di esso di una quantità "ho" (misurabile con il cerchio zenitale del teodolite, o con l'inclinometro o con il sestante). Quella delle stelle Π★ è evanescente. La parallasse di Sole, Luna e pianeti Π● può anche essere ricavata dalla tavola XXIV delle Tavole Nautiche. Nelle Effemeridi Nautiche quella lunare è data di ora in ora per ciascun giorno dell'anno;
Sd = semidiametro di un astro. Vale praticamente solo per Sole e Luna, che si presentano visivamente come dischi. Nelle Effemeridi Nautiche è dato giornalmente per la Luna e di tre giorni in tre giorni in ogni pagina per il Sole; in entrambi i casi è sempre riferito alle ore Tm 00h00m00s. Lo si può ricavare anche dalla tavola XXIII delle Tavole Nautiche. Il semidiametro solare vale mediamente 0°16'01"; quello Lunare mediamente 0°15'42,5" ed entrambi possono essere arrotondati al valore medio 0°16';
z = distanza zenitale. E' l'inverso dell'altezza; perciò vale z = 90° – h;
ε = obliquità (angolare) dell'eclittica;
Pmb = pressione atmosferica in millibars;
PmmHg = pressione atmosferica in millimetri di mercurio. Le relazioni che legano tra loro queste due ultime grandezze sono le seguenti: Pmb = PmmHg 3/4; PmmHg = Pmb 4/3;
Im = intervallo medio nelle EN;
Iv = intervallo vero nelle EN;
pp = parti proporzionali nelle EN;
d = differenza oraria della declinazione (con il suo segno) nelle EN.
Questi ultimi quattro segni sono adottati nelle Effemeridi Nautiche per le interpolazioni con le apposite tabelle annesse (nelle pagine colorate).

a) Si trasforma il tm in Tm sottraendo o aggiungendo al tm l'ora del fuso orario locale a seconda, rispettivamente, se questo è a E o a W di Greenwich:
Tm = tm ± ora del fuso orario locale (– se ad E di Greenwich; + se ad W).

b) Trasformato il tm in Tm, si trascurano momentaneamente i minuti ed i secondi (che in questa circostanza prendono il nome di Im_1) e per il solo valore delle ore si cerca nella colonna T delle EN il corrispondente valore espresso in gradi sessagesimali: questo è il Tv della sola ora. Nelle pagine colorate delle EN si cerca quello corrispondente ai minuti di Im e nella colonna secondi, in corrispondenza ai secondi di Im, si trova, nella colonna intestata "Sole e pianeti" (se si stanno utilizzando questi nella misurazione. Se invece si sta utilizzando la Luna si cerca nella colonna intestata "Luna". Se si sta utilizzando il tempo siderale, si cerca nella colonna intestata con il simbolo ♈. Qui di seguito si considererà e si utilizzerà sempre e soltanto il Sole) un valore, detto intervallo vero Iv, in gradi, primi e decimi di primo sessagesimali (si rammenti che per trasformare un decimo di primo in secondi basta moltiplicarlo per 6). Il Tv corrispondente alle sole ore di Tm si somma all'Iv e si trova il Tv complessivo di ore, minuti e secondi. In definitiva, con questa operazione solo apparentemente complessa, si è effettuata in maniera semplice un'interpolazione.

c) Al Tv di ore, minuti e secondi si somma la longitudine λ del sito con il suo segno: in astronomia nautica la longitudine si considera positiva ad E e negativa ad W[5]. Si ottiene così il tv:
$tv = Tv \pm \lambda$.
Nell'effettuare questi calcoli conviene innanzitutto trasformare tutti i valori orari o sessagesimali nei corrispettivi valori decimali. Per far ciò si dividono i secondi (sia di tempo che di grado) per 60 e si ottengono parti decimali di primo; poi si dividono i primi e le parti decimali già ottenute per 60 e si ottengono parti decimali di ore o di gradi. Le calcolatrici eseguono questa trasformazione oppure hanno un apposito tasto.

Es. 1: convertire 20°12'47" in parti decimali:
47"/60 = 0,78(3)[6]
12,78(3)'/60 = 0,2130(5)
risultato: 20,2130(5)°

Es. 2: convertire in parti decimali l'orario 4h56m37s (4 ore, 56 minuti, 37 secondi):
37/60 = 0,61(6)
56,61(6)/60 = 0,9436(1)
risultato: ore 4,9436(1)

Per trasformare i valori decimali in sessagesimali od orari si procede come sopra, ma moltiplicando per 60.
Es. 3: convertire 20,2130(5)° in gradi sessagesimali:
0,2130(5)° * 60 = 12,78(3)'
0,78(3)' * 60 = 46,(9)"
risultato: 20°12'47"

Es. 4: convertire l'orario 4,9436(1) ore in ore, minuti e secondi:
0,9436(1) * 60 = 56,61(6) minuti
0,61(6) * 60 = 36,(9) secondi

[5] Nel metodo JD, invece, la longitudine è positiva ad Ovest e negativa ad Est (Codebò 2010).
[6] Un decimale scritto tra parentesi indica che esso è periodico. Un altro modo per scrivere un decimale è scriverlo sormontato da un tratto –. Un numero decimale periodico – che è sempre un numero razionale decimale, cioè esprimibile con una frazione – può essere semplice o misto. E' semplice quando subito dopo la virgola segue il decimale periodico; è misto quando, dopo la virgola e prima del decimale periodico, ci sono una o più cifre decimali (dette antiperiodo) che non si ripetono all'infinito. Quindi un numero decimale periodico è costituito dalle seguenti parti: la parte intera (prima della virgola), l'eventuale antiperiodo (parte decimale che non si ripete) ed il periodo (parte decimale che si ripete all'infinito). La parte periodica può essere costituita da una o più cifre.

risultato: 4h56m37s.

Inoltre se le coordinate sono date in valori differenti (in genere la longitudine in valori orari e la latitudine in valori sessagesimali) occorre necessariamente trasformarle in un'unica unità di misura, oraria o sessagesimale, e poi decimale. Di solito conviene di più trasformare le coordinate orarie in sessagesimali. Per far ciò basta moltiplicare il valore orario decimale per 15. All'opposto, per trasformare i valori sessagesimali decimali in orari basta dividerli per 15.

Es. 5: trasformare l'orario 4h56m37s in gradi sessagesimali:
4h56m37s = 4,9436(1); 0,9436(1) * 15 = 4,1541666667° = 74°09'15"

Es. 6: trasformare 74°09'15" in ore, minuti e secondi:
74°09'15" = 74,1541666667 / 15 = 4,9436(1) = 4h56m37s.
Si rammenti che le calcolatrici scientifiche trasformano automaticamente i valori orari e sessagesimali in decimali, perché internamente eseguono i calcoli sempre con tale formato.

d) Si calcola ora la declinazione δ. Nelle EN di fronte al valore T (cioè a Tv) nella colonna intestata Dec. si trova il valore della declinazione oraria δ, che può essere S o N. Il solo valore dei minuti, arrotondato dei secondi per difetto, costituisce l'Im dei minuti arrotondati per difetto. In fondo alla colonna, a pie' di pagina, si trova la sigla "d" seguita da un valore numerico molto basso preceduto dal segno algebrico ±; per il Sole esso oscilla tra d +1.0 e d –1.0. Nella pagina colorata corrispondente al valore di Im arrotondato per difetto, nelle colonne "v/d" si cerca il valore numerico di "d": di fronte ad esso, nella colonna "pp" (parti proporzionali) si trova un valore in primi e decimi di primo sessagesimali. Il valore "pp" si somma algebricamente con il segno di "d" a δ dell'unità oraria. Si considera ora il solo valore dei minuti arrotondato per eccesso dell'importo dei secondi (ossia un minuto in più del valore di Im) o Im arrotondato per eccesso. Nella pagina colorata del suo valore si cerca nella colonna "v/d" il corrispondente valore di "pp"; se esso è uguale a quello trovato per Im arrotondato per difetto lo si trascura; se è diverso si fa la media tra i due valori (o, meglio, s'interpola) ed il risultato si somma a δ dell'unità oraria con il segno di "d". Si ottiene così la declinazione δ dell'astro in quel preciso momento di Tm, completo di ore, minuti e secondi. Anche in questo caso, come già per il Tv di cui al punto b), si è eseguita in modo semplice un'interpolazione[7].

e) Ora si calcola l'altezza "h" dell'astro con la formula[8]:
sen h = sen δ * sen φ + cos δ * cos φ * cos tv.

f) Si calcola l'azimut A dell'astro:
cos A = (sen δ – sen φ * sen h) / (cos φ cos h).

---

[7] Da una funzione trigonometrica (seno, coseno, tangente, secante, cosecante e cotangente) si risale al corrispondente in gradi, primi e secondi sessagesimali o tramite le tavole delle funzioni trigonometriche e dei logaritmi (seguendone le istruzioni annesse), o con le calcolatrici scientifiche tramite la funzione arcoseno, arco, coseno ed arcotangente (spesso indicate impropriamente con la sigla: sen^{-1}, cos^{-1} e tan^{-1} (che, a stretto rigore, sono in realtà il simbolo del reciproco, ossia la cosecante, la secante e la cotangente), mentre per calcolare cosecante, secante e cotangente di un valore X° occorre digitare rispettivamente: sen^{-1} (1/X°), cos^{-1} (1/X°), tan^{-1} (1/X°).

[8] Più avanti si vedrò che Agostino Frosini ha scritto questa formula un po' diversamente, ma il risultato è lo stesso. Infatti la formula calcola il seno dell'altezza *sen h* da cui poi bisogna comunque ricavare l'arcoseno *arse*. Inoltre Frosini inverte i fattori delle due moltiplicazioni; ciò è perfettamente lecito perché la moltiplicazione – come l'addizione – gode della proprietà commutativa: 2*3 o 3*2 dà sempre come risultato 6! Quindi scrivere
sen h = sen δ * sen φ + cos δ * cos φ * cos tv
oppure
h = senφ * sen δ + cos φ * cos δ * cos tv
é la stessa cosa ed il risultato è lo stesso.

Si ricava A con le tavole delle funzioni trigonometriche o con la funzione arcocoseno. Se il tv (di cui al punto c) è <180° allora A è quello trovato con la formula sopra indicata; se invece il tv è >180° allora
As = 360° – A.

g) Si calcola l'azimut Aa dell'allineamento aggiungendo o sottraendo all'azimut A l'angolo α misurato con il teodolite o con lo squadro sferico: Aa = A – α. E precisamente: si aggiunge l'angolo α se l'astro deve ancora passare sull'allineamento misurato e invece lo si sottrae se è già passato su di esso.

h) A questo punto si deve calcolare l'altezza vera "hv" dell'astro rispetto alla "ho" misurata con il cerchio zenitale del teodolite o con l'inclinometro. Infatti l'altezza vera "hv" differisce da quella misurata per un considerevole numero di parametri: la rifrazione, la depressione dell'orizzonte, il semidiametro[9], la parallasse.

h1) La rifrazione R è il fattore più importante e costituisce uno dei capitoli più complessi dell'astronomia sferica poiché essa dipende dalle condizioni fisiche – temperatura, pressione, umidità, ecc. – di <u>tutti</u> gli strati d'aria che il raggio di luce attraversa dalla stratosfera fino al suolo, trasformandosi da raggio incidente in raggio rifratto. Quest'ultimo pone l'immagine visiva dell'astro ad un'altezza sempre maggiore di quanto esso si trovi fisicamente nella realtà (per es. all'alba l'immagine del Sole sull'orizzonte astronomico è già visibile alcuni minuti prima del suo effettivo sorgere ed al tramonto è ancora visibile per alcuni minuti dopo che è effettivamente tramontato). La rifrazione è nulla allo zenit e massima all'orizzonte astronomico: diminuisce, quindi, con l'aumentare dell'altezza "h" sull'orizzonte astronomico o – che è lo stesso – con il diminuire della distanza zenitale "z"[10]. Per altezze di astri >15° (ossia per distanze zenitali z < 85°) sono disponibili numerose formule, ma per altezze inferiori a 15° (ossia distanze zenitali z > 85°) solo la formula di Bennet (Meeus 2005, pp. 105 – 108)[11] dà risultati attendibili[12], oppure occorre utilizzare apposite tabelle, costruite sulla base di osservazioni empiriche. Esse sono generalmente allegate alle principali effemeridi (Conaissance de Temps, American Nautical Almanac, ecc.), ma non a quelle dell'I.I.M. che le pubblica invece nelle sue Tavole Nautiche alla tavola n. XXII, nella quale al valore della rifrazione media occorre apportare le due correzioni per la temperatura prima e per la pressione barometrica poi, entrambe misurate nel luogo di osservazione. Per un'esauriente discussione del problema della rifrazione atmosferica si veda in AA.VV. 1976 – 1987, vol. III parte I, pp. 514 – 516; Flora 1987, pp. 285 – 315; Lenzi 1967, pp. 24 – 26; Meeus 2005, pp. 105 – 108; Smart 1977, pp. 58 – 73; Zagar 1984, pp. 205 – 226.

h2) La depressione dell'orizzonte "i" è data dalla formula
$i = 0{,}03 * \sqrt{Q}$
dove "Q" è l'altezza in metri sul livello del mare dell'occhio dell'osservatore, comprensiva cioè della quota in metri del luogo sul livello del mare e dell'altezza in metri dell'occhio dell'osservatore dal suolo. Per approfondimenti sulla teoria della depressione dell'orizzonte si veda Flora 1987, pp. 285 – 315.

---

[9] Detto anche: raggio angolare.

[10] La relazione che lega "h" e "z" tra loro è la seguente:
$z = 90° – (\pm h)$
dove l'altezza è considerata positiva se l'astro è sopra l'orizzonte e negativa se è sotto di esso.

[11] Essa è la seguente: $R'_2 = 1/\tan \{ho + [7{,}31 / (ho + 4{,}4)]\}$; $R'_3 = -0{,}06 * \text{sen}(14{,}7 * R°_1 + 13)$; $R'_1 = R'_2 + R'_3$; $R' = R'_1 * \{(P / 1010) * [283 / (273 + T)]\}$, dove P = pressione atmosferica in millibars e T = temperatura in gradi Celsius.

[12] Errore massimo: 0,9". La formula dà R = -0°00'0,08" per ho = 90° invece del corretto valore R = 0°00'00". Per correggerla basta aggiungere 0,0013515 a 1/tan {ho + [7,31 / (ho + 4,4)]}.

Si badi bene che la formula per il calcolo di “ho” non si riferisce più all’astro che abbiamo testé misurato con il teodolite ed il cronometro astronomico, ma all’astro incognito verso il quale reputiamo che il monumento archeologico sia orientato. Se supponiamo che esso sia diretto verso una stella e comunque per una prima approssimazione, questi tre parametri “ho”, “i” ed “R” sono sufficienti.

Se il calcolo eseguito ci fa supporre trattarsi di un pianeta visibile ad occhio nudo occorre aggiungere anche la parallasse Π● secondo la tavola XXIV delle Tavole Nautiche. Se, infine, abbiamo ragione di credere trattarsi del Sole o della Luna occorre introdurre nella formula anche i valori di parallasse Π☉ e Π☾ e semidiametro Sd☉ ed Sd☾: questi due astri, infatti, non appaiono puntiformi come le stelle e i pianeti, ma presentano entrambi l’immagine di un disco che ha un’ampiezza di circa mezzo grado. La parallasse va aggiunta nella formula. Quella del Sole è molto piccola, essendo il suo valore 0°00’08,794148” ed è pressoché costante, data la sua grande distanza dalla Terra. Quella della Luna è maggiore, ma soprattutto varia di ora in ora a seconda dell’altezza del satellite sull’orizzonte astronomico ed è data di ora in ora per ogni giorno dell’anno dall’apposita colonna PAR delle EN. In alternativa si può usare il valore medio Π☾ = 0°57’02,7” (parallasse orizzontale media), ma introducendo così un errore. Se invece il satellite ha una qualche altezza ho≠0°00’00” il valore della sua parallasse è dato, in prima approssimazione, dalla formula: Π☾ * cos ho.
Attenzione! Le EN danno la parallasse Lunare di ora in ora per ogni giorno dell’anno, ma questi valori servono solo nel caso che la Luna sia l’astro di cui abbiamo misurato con il teodolite l’angolo α dall’allineamento delle paline e non quando essa è l’astro ignoto verso il quale supponiamo che l’allineamento sia puntato: infatti in quest’ultimo caso noi ignoriamo completamente la data e l’ora in cui essa si allineava con il monumento; perciò la migliore parallasse lunare da introdurre nella formula di trasformazione da “hv” in “ho” è quella calcolata con l’espressione Π☾ = 0°57’02,7” * cos ho anziché quella delle EN. Per un’esauriente disamina della parallasse si veda in AA.VV. 1976-1987, pp. 516-517, 528-529; Flora 1987, pp. 285 – 315; Lenzi 1967, p. 23; Smart 1977, pp. 195 – 295; Zagar 1984, pp. 187 – 204.

h3) Il semidiametro “Sd” o raggio angolare è la metà della misura apparente del disco visibile del Sole e della Luna. Esso varia in funzione diretta della distanza della Terra dai due astri, perciò quello del Sole varia in un ciclo di 365 giorni, mentre quello della Luna in un mese sinodico. La tavola XXIII delle Tavole Nautiche consente di calcolarlo in funzione dell’altezza apparente o istrumentale (equivalente alla nostra ho) misurata con il sestante, alla quale vanno apportate le correzioni d’indice e istrumentale. Le EN riportano direttamente giorno per giorno i valori del semidiametro lunare e solare; ma, come detto per la parallasse e per la medesima ragione, conviene inserire nella formula dell’altezza vera il semidiametro medio. Questo è per il Sole mediamente 0°16’01” e per la Luna mediamente 0°15’42,5” (Zagar 1984, p. 251), che possono cumulativamente essere arrotondati a 0°16’ ciascuno. Il semidiametro va sottratto se si considerano la levata od il tramonto del lembo superiore del disco apparente del Sole e della Luna e va invece sommato se si considerano la levata od il tramonto del lembo inferiore. Per approfondimenti circa il semidiametro ed in generale per la trasformazione dell’altezza misurata od istrumentale in altezza vera si veda Flora 1987 capp. XI-XII-XIII.
In definitiva le formule archeoastronomiche per trasformare l’altezza misurata “ho” in altezza vera “hv” con sufficiente precisione sono le seguenti:

h4) valida per le stelle ed in prima approssimazione:
hv = ho – (0,03 * √Q) – R

h5) valida per i pianeti:
hv = ho – (0,03 * √Q) – R + (Π● * cos ho)

h6) valida per Sole e Luna:
hv = ho – (0,03 * $\sqrt{Q}$) – R ± Sd + (Π☉ o Π☾ * cos ho).

Esse vanno eseguite esattamente nella sequenza indicata, a differenza di quanto descritto erroneamente in precedenza (Codebò 1997).
Esistono altre due formule per la correzione delle altezze misurate: quella geodetica e quella nautica (Codebò 2010). Sono più precise perché trasformano la parallasse orizzontale equatoriale in parallasse locale in altezza, correggendo "ho" anche in funzione della latitudine dell'osservatore, ma sono anche più complicate. A causa di ciò si sbagliano facilmente calcolandole con le tavole trigonometriche e con la calcolatrice, cioè "a mano". Devono quindi essere riservate all'esecuzione di un programma scritto e testato, come il programma *metodo nautico* scritto da Agostino Frosini in linguaggio Java Script nel quale l'operatore ha la possibilità di scegliere tra la formula semplificata, quella geodetica e quella nautica. Queste ultime due differiscono l'una dall'altra nel risultato per soli decimali di secondi sessagesimali: sono quindi interscambiabili. La formula semplificata differisce invece dalle altre due per i secondi sessagesimali, ma la sua semplicità – e quindi la minore probabilità di sbagliarla – ne fanno la formula d'elezione nei calcoli "a mano".

i) Infine si calcola la declinazione "δ" dell'astro sconosciuto:
sen δ = sen φ * sen hv + cos φ * cos hv * cos A
se si conta l'azimut da N;
sen δ = sen φ * sen hv – cos φ * cos hv * cos A
se si conta l'azimut da S;
sen δ = sen φ * cos z + cos φ * cos z * cos A
se si utilizza la distanza zenitale "z" contando l'azimut A da N;
sen δ = sen φ * cos z – cos φ * cos z * cos A
se si utilizza la distanza zenitale "z" contando l'azimut A da S;

e con le tavole trigonometriche o con la funzione arcoseno si ricava δ.
Dal valore numerico della declinazione e dal suo segno algebrico si deduce di quale astro si tratta. Qui di seguito sono dati i valori (pressoché uguali sia per l'alba che per il tramonto) che furono maggiormente oggetto di indagine nell'antichità:

a) Sole al J2000.0
21/03 (equinozio di primavera): δ 0°
21/06 (solstizio d'estate): δ +23°26'21,448"
23/09 (equinozio d'autunno): δ 0°
21/12 (solstizio d'inverno): δ –23°26'21,448".

Nell'emisfero boreale il segno algebrico sarà, ovviamente, + per la declinazione settentrionale (ossia estiva) e – per quella meridionale (ossia invernale). L'inverso in quello australe.
Per la Luna occorre sommare a ±23°26'21,448" il valore dell'obliquità dell'orbita lunare, pari mediamente a ±5°09' con il suo segno algebrico, ottenendo +28°35'21,45" al lunistizio massimo, –28°35'21,45" al lunistizio minimo, +18°17'21,45" al lunistizio intermedio maggiore e –18°17'21,45" al lunistizio intermedio minore, secondo un ciclo che si ripete ogni 6798 giorni.
Per quanto riguarda le stelle, la loro declinazione è propria per ciascuna e varia lentamente nel tempo per effetto della precessione degli equinozi e del moto proprio di ogni stella (Codebò 2011; 2012).

Per quanto invece riguarda i pianeti visibili ad occhio nudo – i soli che interessano l'archeoastronomia – il loro moto è ciclico e tende a diventare caotico col passare dei millenni. Essi comunque giacciono sull'eclittica. La teoria planetaria è troppo complessa per essere descritta qui. I lettori interessati possono leggerla in Meeus 1988 e 1990, capp. 22 – 25; 2005, capp. 30 – 33 e appendice III e in vari capitoli[13] dei cinque volumi *Mathematical Astronomy Morsels* di Jean Meeus. In ogni caso, i calcoli più precisi circa il moto e le posizioni dei pianeti sono oggi facilmente ottenibili col software gratuito Solex 11.0 del dott. Aldo Vitagliano che utilizza l'integrazione numerica, probabilmente più precisa, nei lunghi periodi di tempo tipici dell'archeoastronomia, della teoria VSOP87[14] di Bretagnon e Francou (Meeus 2005, pp. 217 – 221).

Le declinazioni odierne del Sole e della Luna si possono trasformare in quelle all'epoca della costruzione del monumento con la formula di Laskar, che è sufficientemente precisa fino a 10000 anni dal 2000 d. C.[15]:
U = T / 100
$\delta_{antica} = \delta\odot hh, mm, ss + \delta☾ – 1°18'00{,}93" * (U) – 0°00'01{,}55" * (U)^2 + 0°33'19{,}25" * (U)^3 – 0°00'51{,}38" + (U)^4 – 0°04'09{,}67" * (U)^5 – 0°00'39{,}05" * (U)^6 + 0°00'07{,}12" * (U)^7 + 0°00'27{,}87" * (U)^8 + 0°00'05{,}79" * (U)^9 + 0°00'02{,}45" * (U)^{10}$

ESEMPI NUMERICI (di Mario Codebò)[16]

Esempio I)
L'esempio numerico che segue è relativo al dolmen di Borgio Verezzi (SV) sul M. Caprazoppa (Codebò 1997a, pp. 735 – 751).
Nelle misurazioni sul terreno dell'epoca, nell'impossibilità di misurare l'azimut dell'asse medio perché non identificabile a causa dello stato di conservazione del megalite, fu necessario misurare l'angolo α tra entrambi i lati esterni della costruzione ed il Sole. Ciò fu reso possibile in una sola battuta (ossia con una sola misurazione angolare) grazie ad una procedura (il cui algoritmo sintetico è riportato in Codebò 1997a, p. 737) appositamente elaborata da Mario Monaco, segretario dell'Associazione Astrofili Savonesi, che collaborò alla campagna di rilevamento.

I dati iniziali furono:
giorno dell'osservazione: 26/12/1994
ora civile locale tm: 12h53m35s
φ: 44°10'23"N
λ: 8°18'52"E
e: m. 302,5 s.l.m.
angolo α_1: 57°09'40"
angolo α_2: 48°45'39"

01) Tm (12h53m35s – 01h00m00s) = 11h53m35s

[13] Principalmente sotto i nomi dei singoli pianeti.
[14] E successive integrazioni.
[15] Le differenze sono comunque modeste, perché l'obliquità dell'eclittica, responsabile di queste variazioni di declinazione e di azimut, varia di circa 0,47" all'anno.
[16] In questo esempio numerico sono stati corretti gli errori presenti in Codebò 1997.

02)[17]

Tm 11h00m00s del 26/12/1994:	Tv⊙ 344°52,7’+
Im 00h53m35s	Iv⊙ 013°23,8’+
ν –0,2	pp⊙ –000°00,2’=
Tv⊙ 11h53m35s del 26/12/1994	358°16’18”

03)

Tv⊙	358°16’18” +
φ	008°18’52”E =
tv⊙	366°35’10” –
riduzione al I quadrante	360°00’00”
tv⊙	006°35’10”

04)[18]

δ⊙ 26/12/1994 Tm 11h00m00s	S –23°21,8”+
Im 00h53m00s d +0,1	pp 00°00,1’=
δ⊙ 26/12/1994 Tm 11h53m	–23°21’42”

δ⊙ 26/12/1994 Tm 11h00m00s	S –23°21,8’+
Im 00h54m00s d +0,1	pp 00°00,1’=
δ⊙ 26/12/1994 Tm 11h54m	–23°21’42”

quindi[19]:
δ⊙ 26/12/1996 Tm 11h53m35s = –23°21’42”

05) sen h⊙ = sen –23°21’42” * sen 44°10’22” + cos –23°21’42” * cos 44°10’22” * cos 6°35’10”
h⊙ = 22°11’47,04”

06) cos A⊙ = (sen –23°21’42” – sen 44°10’22” * sen 22°11’47,04”) / (cos 44°10’22” * cos 22°11’47,04”)

07) poiché “tv” < 180°, allora:
A⊙ = 360° – 173°28’12,5” = 186°31’47,5”

08) $A_{allineamento1}$ = 186°31’47,5” – 57°09’40” = 129°22’07,5”

09)[20] hv★ = 0° – [0,03 * √(302,5 + 1,65)] – 0°36’29” = –1°07’52,51”

[17] Le Effemeridi Nautiche danno i gradi, i primi ed i decimali di primi. In questo esempio i dati sono riportati esattamente come in esse.
[18] Il Sole ha declinazione positiva dall’equinozio di primavera a quello di autunno e declinazione negativa da quello di autunno a quello di primavera. La sua declinazione positiva massima JD 2000.0 +23°26’21,448” è raggiunta al solstizio estivo e quella minima JD 2000.0 -23°26’21,448” al solstizio invernale.
[19] In questo caso, le parti proporzionali pp per d +0,1 nelle pagine colorate sono uguali sia per 53m che per 54m. Se fossero state diverse, sarebbe stato necessario calcolare i due valori per 53m e per 54m e poi interpolarli in proporzione ai secondi di Tm. All’atto pratico, quando i due valori sono uguali, come in questo caso, si esegue il solo calcolo per difetto (qui si sono eseguiti entrambi i calcoli per puro scopo didattico).
[20] Si prova prima convertendo l’altezza misurata “ho” in altezza vera “hv★” di una stella, cioè senza apportare correzioni per semidiametro e per parallasse.

10) sen $\delta_{allineamento1\ hv★}$ = sen 44°10'22" * sen –1°07'52,51" + cos 44°10'22" * cos –1°07'52,51" * cos 129°22'07,5"
$\delta_{allineamento1\ hv★}$ = –27°56'41,46"

11) poiché $\delta_{allineamento1\ hv★}$ ha un valore compreso tra la minima declinazione solare –23°26'21,448" J2000.0[21], quale si verifica al solstizio d'inverno, e la minima declinazione lunare –28°35'21,45" ± 0°09', quale si verifica ogni 6798 giorni al lunistizio minimo[22], si può supporre che l'asse di questo monumento sia orientato sul sorgere della Luna. Occorre quindi ripetere il calcolo di "hv" e di "δ" per i valori lunari corretti di semidiametro e parallasse orizzontale medi:
hv☾ = 0° – [0,03 * √(302,5 + 1,65)][23] – 0°36'29" + 0°16"[24] + (0°57'02,7" * cos 0°)
hv☾ = 0°05'10,19"[25]

12) sen $\delta_{allineamento1\ hv☾}$ = sen 44°10'22" * sen 0°05'10,19" + cos 44°10'22" * cos 0°05'10,19" * cos 129°22'07,5"
$\delta_{allineamento1\ hv☾}$ = –26°59'40,08"

Dunque l'azimut 129°22'07,5", calcolato a partire da un angolo misurato col Sole in data 26/12/1994, ora civile locale tm 12h53m35s, con altezza misurata di orizzonte 0°00'00", corrispondente all'orizzonte marino, sottende una declinazione δ_1 = –26°59'40,08", molto prossima alla declinazione lunare al lunistizio minimo –28°35'21,45" ± 0°09'.

Esempio II)
L'identico calcolo dell'azimut del secondo angolo α_2: 48°45'39" dà come risultato finale una declinazione sottesa δ_2 = –32°00'26,2", quindi la declinazione media sottesa dal dolmen è δ_μ = –29°30'03,14" σ ± 2,5°. I lettori provino ad eseguire il calcolo da soli.

Esempio III)
Il giorno 24/06/2013, in località φ 43°56'21"N e λ 7°57'05,1"E, alle ore tm 14h59m27s, con lo squadro sferico graduato e la livelletta Abney, sono stati misurati un angolo col Sole α $148{,}90^g$ = 134°00'36" ed un'altezza ho = 21°20'. Calcolare la declinazione sottesa.

tm 14h00m00s = Tm 12h00m00s	= Tv⊙	359°23,3' +
Im 00h59m27s	= Iv⊙	014°51,8' +
ν –0,1	= pp⊙	–000°00,1' =
Tv⊙	=	374°15'00" –
riduzione al I quadrante	=	360°00'00" =
Tv⊙	=	014°15'00,0" +

[21] Il termine di riferimento è la declinazione solare al J2000.0. In precedenza si usava quella B1950.0 ed in futuro si userà quella J2050.0. In ogni caso, la declinazione del Sole in un secolo varia molto poco e volendola ottenere esatta per il 1994, anno della misurazione, basta calcolarla con la formula di Laskar.
[22] Si ricorda che per calcolare la variazione nel tempo della declinazione lunare è sufficiente, in prima approssimazione, calcolare la variazione della somma algebrica δ⊙ ± (inclinazione 5°09' ± 0°09') con la formula di Laskar. Tuttavia la complessità del moto lunare non consente questo calcolo così semplice per lunghe distanze di tempo.
[23] M. 1,65 è l'altezza dell'occhio dell'osservatore rispetto al suolo, il quale a sua volta ha una quota di m. 302,5 sul livello del mare.
[24] Aggiungiamo il semidiametro perché scegliamo di considerare l'altezza dell'intero disco, quindi del suo lembo inferiore. Avremmo sottratto il semidiametro se avessimo voluto considerare l'apparizione del primo bagliore solare, cioè del suo lembo superiore.
[25] N.B.: in questa occasione, per un complesso di motivi, non si è corretta la rifrazione per la temperatura e la pressione barometrica. Conviene, invece, farlo sempre.

λ = 007°57'05,1" =

---

tv$\odot$ = 022°12'05,1"

$\delta\odot$ UT 12h00m00s = +23°23,9' +
Im 00h59m00s d 0,0 = pp 00°00,0' =

$\delta\odot$ UT 12h00m00s = 23°23,9'

Poiché però $\delta\odot$ UT 13h00m00s = 23°23,8' occorre interpolare:
$\delta\odot$ UT 13h00m00s = +23°23,8' +
Im 00h59m00s d 0,0 = pp 00°00,0' =

$\delta\odot$ UT 13h00m00s = 23°23,8'
$\delta\odot$ 23°23,9' – $\delta\odot$ 23°23,8' = 0°00,1'

Si trasformano le unità di tempo in gradi sessagesimali moltiplicandole per 15:
UT 13h00m00s – UT 12h00m00s = 1h = 15°
1h00m00s – 0h59m27s = 0h00m33s * 15 = 0°08'15"
E si riducono tutti i valori alla medesima unità: i secondi sessagesimali:
15° = 3600"
0°00,1' = 0°00'06"

Ora si effettua una proporzione:
3600" : 0°00'06" = 0°08'15" : X"
X" = (0°00''6" * 0°08'15") / 3600" = 0°00'00,06"
Si sottrae X" da $\delta\odot$ UT 13h00m00s:
23°23,8' – 0°00'00,06" = 23°23'47,94"
Quindi $\delta\odot$ UT 12h59m27s = 23°23'47,94"

Naturalmente, essendo la differenza tra UT 12h59m27s e UT 13h00m00s di soli 33s, si poteva assumere per $\delta\odot$ UT 12h59m27s lo stesso valore di $\delta\odot$ UT 13h00m00s senza apprezzabile errore. Diverso sarebbe stato il caso in cui la differenza di orario fosse stata per esempio di mezz'ora = 7°30': in caso di medie e forti differenze di tempo l'interpolazione diventa obbligatoria.

Ora si calcola l'altezza del Sole h$\odot$ nell'istante della misurazione:
sen h$\odot$ = sen 23°23'47,94" * sen 43°56'21,2" + cos 23°23'47,94" * cos 43°56'21,2" * cos 22°12'05,1"
h$\odot$ = 62°33'00,98"

Ora si calcola l'azimut del Sole nell'istante della misurazione:
cos $A\odot_1$ = (sen 23°23'47,94" – sen 43°56'21,2" * sen 62°33'00,98") / (cos 43°56'21,2" * cos 62°33'00,98")
$A\odot_1$ = 131°12'31,19"
Poiché tv < 180°, allora A$\odot$ = 360° – $A\odot_1$:
A$\odot$ = 360° – 131°12'31,19" = 228°47'28,81"
Al valore di A$\odot$ si aggiunge algebricamente il valore di α per ottenere l'azimut esatto dell'allineamento. In questo caso, poiché il Sole era già transitato sull'allineamento, α va sottratto:
Aa = 228°47'28,81" – 134°00'36" = 94°46'52,81"

Ora si calcola l'altezza vera hv★

hv★ = 21°20' – 0,03 * √(436 + 1,65) – 0°02'28" = 20°39'52,63"

e la relativa declinazione sottesa:

sen $\delta_{\text{allineamento hv}_\bigstar}$ = (sen 43°56'21,2" * sen 20°39'52,63" + cos 43°56'21,2" * cos 20°39'52,63" * cos 94°46'52,81")

$\delta_{\text{allineamento hv}_\bigstar}$ = 10°52'39,97"

Poiché questo valore è uno di quelli assunti dal Sole nel corso dell'anno ed è invece inferiore a quelli minimi assunti dalla Luna (±18°18'), si ripete il calcolo con hv☉:

hv☉ = 21°20' – 0,03 * √(436 + 1,65) – 0°02'28" + 0°15,7' + (0°00'08,794148" * cos 21°20') = 20°55'42,82"

sen $\delta_{\text{allineamento hv}_\odot}$ = sen 43°56'21,2" * sen 20°55'42,82" + cos 43°56'21,2" * cos 20°55'42,82" * cos 94°46'52,81"

$\delta_{\text{allineamento hv}_\odot}$ = 11°03'28,44" (declinazione assunta dal Sole alle date 18/04 e 24/08/ 2013).

ALGORITMO SINTETICO (di Mario Codebò)

1) calcolo dell'angolo orario locale del Sole o tv

tm – fuso orario locale E o + fuso orario locale W = Tm

Tm h: Tv☉ h +
Im mm e ss: Iv☉ +
±ν: ±pp☉ =

TV☉ hh, mm, ss

Tv☉ hh, mm, ss +
+ λ E; – λ W =

---

tv☉

2) calcolo della declinazione del Sole

δ☉hh +
Im mm inferiori ±d =

δ☉hh, mm inferiori

δ☉hh +
Im mm superiori ±d =

δ☉hh, mm superiori

δ☉hh, mm, ss = interpolazione tra δ☉hh mm inferiori e δ☉hh mm superiori

3) calcolo dell'altezza geometrica dell'astro

sen h☉ = sen δ☉ sen φ + cos δ☉ cos φ cos tv

4) calcolo dell'azimut del Sole (contato da Nord)

cos A☉ = (sen δ☉ – sen φ sen h☉) / (cos φ cos h☉)

se tv > 180°, allora $A\odot_1$ = A☉

se tv < 180°, allora $A\odot_1 = 360° - A\odot$

5) calcolo dell'allineamento del monumento
$Aa = A\odot_1 \pm Am$

6) riduzione di h_o in h_v
$hv\odot$ e $☾ = ho - 0{,}03\sqrt{Q} - R \pm Sd + (\Pi \cos ho)$
$hv\bullet = ho - 0{,}03\sqrt{Q} - R + (\Pi\bullet * \cos ho)$
$hv\bigstar = ho - 0{,}03\sqrt{Q} - R$

7) calcolo della declinazione sottesa al momento della misurazione (da N)
$\text{sen}\,\delta = \text{sen}\,\varphi\ \text{sen}\,hv + \cos\varphi \cos hv \cos Aa$

8) eventuale riduzione della declinazione all'epoca della costruzione del monumento (formula di Laskar)
$\{[(JD - 2451545{,}0) / 36525] / 100\} = U$

$\delta\odot$hh, mm, ss + δ☾ – 1°18'00,93" * (U) – 0°00'01,55" * $(U)^2$ + 0°33'19,25" * $(U)^3$ – 0°00'51,38" + $(U)^4$ – 0°04'09,67" * $(U)^5$ – 0°00'39,05" * $(U)^6$ + 0°00'07,12" * $(U)^7$ + 0°00'27,87" * $(U)^8$ + 0°00'05,79" * $(U)^9$ + 0°00'02,45" * $(U)^{10}$

PRESENTAZIONE DEL SOFTWARE DI CALCOLO IL METODO NAUTICO

(di Agostino Frosini)

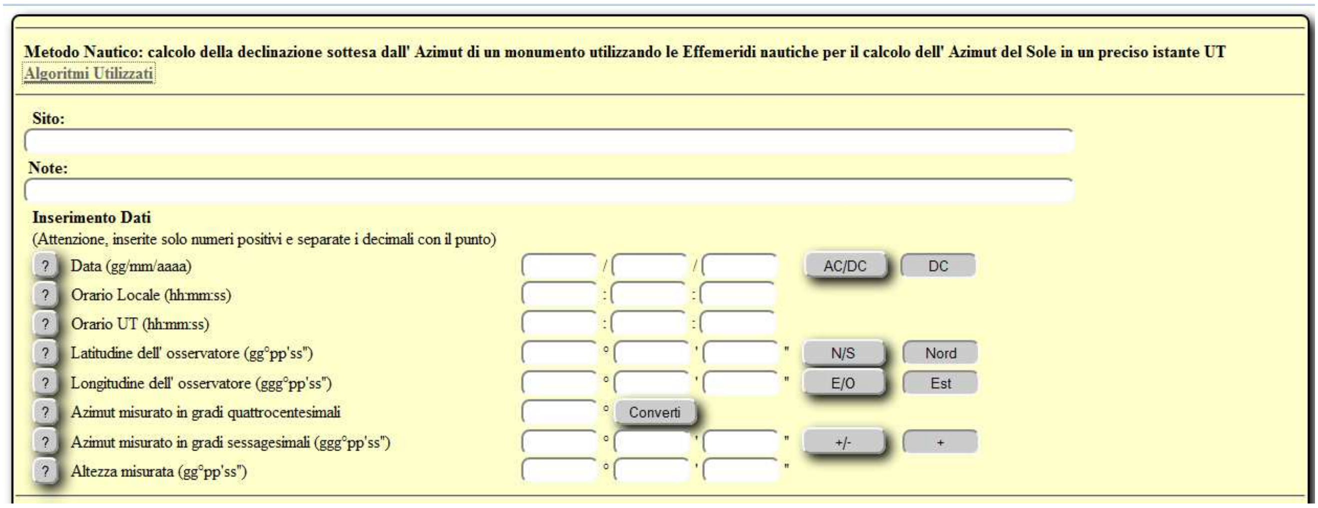
Questo programma calcola la declinazione sottesa dall'azimut di un monumento utilizzando le Effemeridi Nautiche dell'I.I.M. per il calcolo dell'azimut del Sole in un preciso istante UT. Il Software, assieme ad altri è oggi pubblicato sul sito:
http://www.archaeoastronomy.it/nostre_ricerche.htm

Potrete utilizzarlo online oppure scaricarlo gratuitamente ed eseguirlo sul vostro PC.
L'elaborato è stato scritto in linguaggio Javascript perché compatibile con tutti i browser web che supportano questo tipo di tecnologia. Essendo un codice eseguibile il vostro browser potrebbe bloccarlo chiedendovi se consentirne l'esecuzione.
Il Software è stato testato con i seguenti Browser Web: Internet Explorer, Google Chrome, Opera, Safari, e Mozilla con ottimi risultati (c'è qualche piccola differenza grafica). Sorprendentemente il sistema funziona anche con gli smartphone di ultima generazione in quanto i browser web caricati dai sistemi operativi moderni tipo Android, Apple e Windows Mobile, pur essendo sviluppati con funzioni minime, posseggono il linguaggio Javascript.

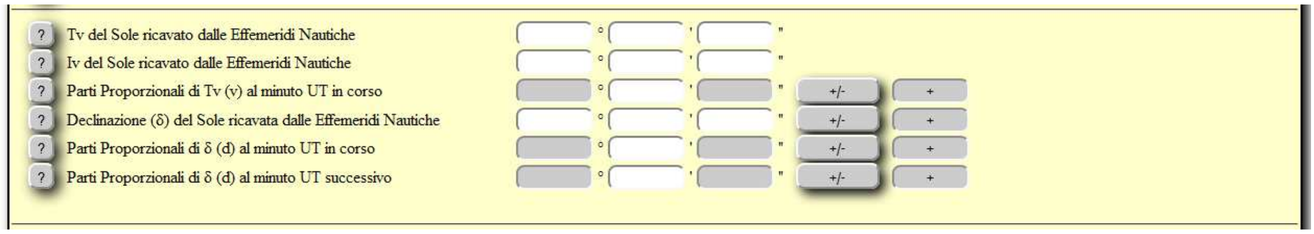
La pagina contiene zone destinate all'immissione dei dati e zone per la visualizzazione dei risultati; quest'ultime sono disabilitate quindi non sono soggette all'inserimento accidentale dei dati. Nel sottotitolo avete un link agli algoritmi utilizzati: qui troverete tutte le formule del programma, potrete visualizzare il tipo di sequenza di calcolo che è stata sviluppata e quali algoritmi sono presenti all'interno del sistema.

Prima di inserire i valori nei campi, almeno per le prime volte, è utile cliccare sui pulsanti "?" questi aprono una finestra che spiega in che modo vanno inseriti i valori.
E' importante che inseriate nei campi solo numeri positivi e separiate i decimali con il punto; per i dati negativi avete a disposizione i pulsanti per il cambio del segno.

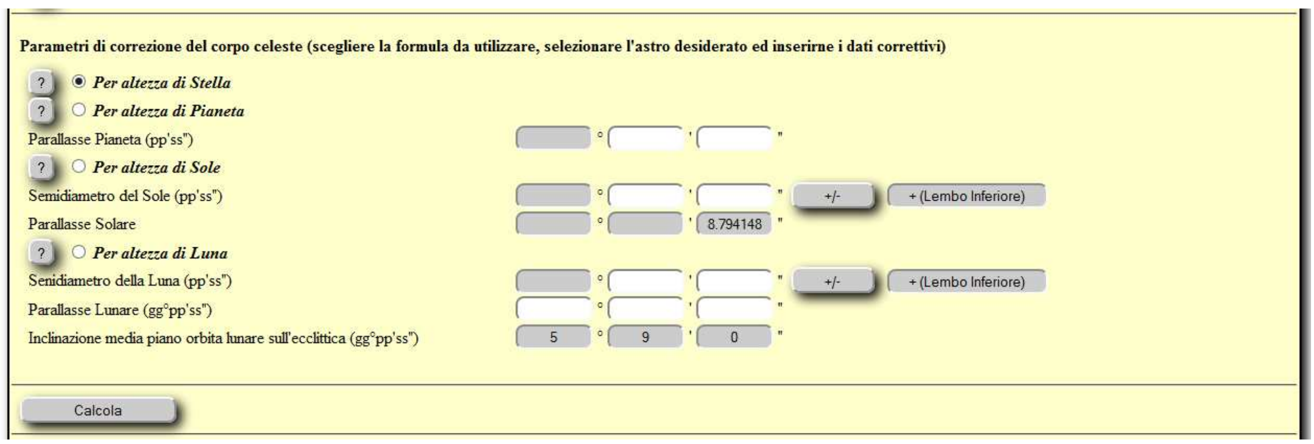
Nella prima parte della schermata, dopo aver compilato i campi “Sito” e “Note” secondo le vostre esigenze, dovrete inserire i dati relativi all’orario di osservazione, alla posizione geografica del sito e all’azimut misurato; a questo proposito è presente un piccolo programma interno per convertire i gradi quattrocentesimali, utilizzati dagli strumenti topografici più comuni, in gradi sessagesimali necessari per il calcolo (Pulsante “Converti”). I pulsanti con i punti interrogativi spiegano nel dettaglio i valori da inserire.



La seconda parte di inserimento è relativa ai dati necessari, in funzione dell’orario UT di osservazione, reperibili nelle Effemeridi Nautiche dell’I.I.M.. I pulsanti con i punti interrogativi spiegano nel dettaglio i valori da estrarre dal libro delle Effemeridi.



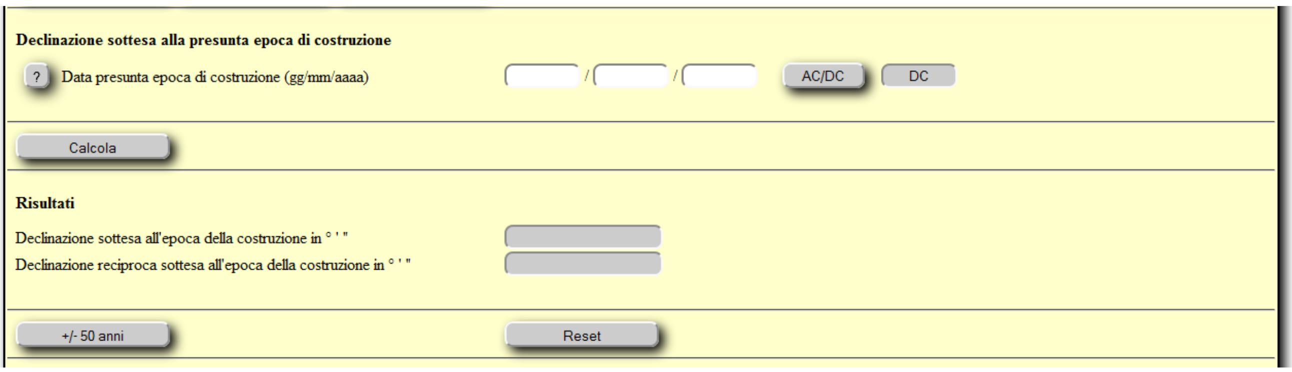
La terza e quarta parte degli inserimenti è dedicata alla scelta delle formule da utilizzare per il calcolo dell’altezza vera dell’astro, ai parametri di correzione per la quota e rifrazione media[26] ed infine alla scelta del corpo celeste.



[26] Si ricorda che la rifrazione media può essere calcolata con la formula di Bennet o desunta dalla Tavola XXII delle *Tavole Nautiche* dell’I.I.M..

Una volta inseriti tutti i dati cliccate sul pulsante “Calcola” per ottenere i risultati: azimut del Sole, azimut dell’allineamento, declinazione sottesa dall’allineamento e declinazione sottesa dall’allineamento opposto ovvero (reciproco). In questo programma avete la possibilità, dopo aver premuto il pulsante “Calcola”, di utilizzare anche i pulsanti sottostanti di cui fornisco ora una breve descrizione:
“Tabella Risultati” : questo pulsante visualizza una pagina web contenente tutti i risultati degli algoritmi che il programma esegue al suo interno; il link “Stampa” funziona solamente se il Vostro PC è collegato ad una stampante ed il link “Esporta in Excell” funziona solo se utilizzate il browser Internet Explorer, in quanto il comando di esportazione non è riconosciuto dagli altri browser; ad ogni modo potete comunque selezionare tutta la pagina e copiarla in un qualunque elaboratore di testi tipo Word.
“Lista Risultati”: questo pulsante visualizza una pagina web contenente tutti i risultati degli algoritmi che il programma esegue al suo interno ma questa volta, a differenza di “Tabella Risultati”, la formattazione della tabella è molto più spartana della precedente (in formato testo) e consente quindi il copia/incolla dei dati anche su un comune Notepad di Windows.
“Esporta”: questo pulsante funziona solo se il programma è stato scaricato e decompresso sul vostro Hard Disk e solo se si utilizza il browser Internet Explorer, il pulsante creerà il file “dati_calcolo_nautico.txt” nell’Hard Disk C:\.

Dopo aver visualizzato i risultati delle declinazioni sottese dall’allineamento e riferite alla data di osservazione, avete a disposizione un ulteriore programma che calcola le declinazioni sottese dall’allineamento riferite ad un’epoca di nota o stimata costruzione del monumento: inserite la data e cliccate sul pulsante “Calcola”.
In seguito sarà possibile anche visualizzare le variazioni di declinazioni di 50 in 50 anni precedenti all’epoca inserita cliccando sul pulsante “+/– 50 anni”.
Il pulsante “Reset” azzera tutti i campi, risultati compresi.



Gli algoritmi utilizzati dal programma sono i seguenti:

Calcolo del tempo vero del Sole
Con i dati inseriti presi dalle Effemeridi *Tv*, *Iv* e parti proporzionali (*v*) il programma calcola il tempo vero locale *tv* del Sole
Tv = Tv + Iv ± (ν)
tv = Tv ± longitudine
Se tv > 180° si sottrae da 360°

Calcolo della declinazione del Sole
Con i dati inseriti presi dalle Effemeridi di *δ* e *pp* il programma calcola la declinazione solare *δ⊙ vera*.
Le parti proporzionali (*d*) sono interpolate tra il minuto di UT in corso e quello successivo a seconda dei secondi di UT inseriti; allo scopo viene utilizzata la seguente formula:
Δpp = pp minuto UT successivo – pp minuto UT in corso
pp interpolate = Δpp * secondi di UT / 60 + pp minuti UT in corso
le parti proporzionali vengono poi trasformate in gradi decimali:
pp(°dec) = pp interpolate / 60
δ vera = δ ± pp (°dec)

Calcolo dell'altezza e dell'azimut del Sole
Altezza del Sole
h = arcsen (sen φ * sen δ + cos φ * cos δ * cos tv)
Azimut del Sole
cos A = (sen δ – sen φ * sen h) / (cos φ * cos h)

Calcolo azimut dell'allineamento del monumento
Aa = A + (± azimut misurato)

Calcolo della correzione delle altezze vere di stella, pianeta, Sole e Luna
(ho = altezza osservata; Q = quota media sul livello del mare + altezza dal suolo dell'occhio dell'osservatore[27]; R = rifrazione atmosferica media; P = parallasse[28]; Sd = semidiametro del Sole o della Luna; φ = latitudine dell'osservatore)

Formule semplificate[29]:
Altezza vera di stella
hv = ho – 0,03 * (√Q) – R
Altezza vera di pianeta
hv = ho – 0,03 * (√Q) – R + (P * cos ho)
Altezza vera di Sole o Luna
hv = ho – 0,03 * (√Q) – R ± Sd + (P * cos ho)

Formule Nautiche
Altezza vera di stella
hv = ho – 0,03 * (√Q) – R
Altezza vera di pianeta

---

27 "*Q*" nel programma in Javascript "Metodo Nautico" corrisponde ad "*e*" usato da Codebò in questo articolo.
28 "*P*" nel programma in Javascript "Metodo Nautico" corrisponde ad "*Π*" usato da Codebò in questo articolo.
29 Nota di M. Codebò: le formule semplificate si limitano a trasformare la parallasse equatoriale media orizzontale in parallasse equatoriale media in altezza; questa semplice formula è adatta al calcolo manuale (cioè eseguito passo passo con la calcolatrice o con le tavole dei logaritmi). Le formule nautiche e geodetiche trasformano la parallasse equatoriale media orizzontale in parallasse media locale in altezza: cioè tengono conto anche della latitudine dell'osservatore; queste formule sono più precise ma più complesse. Si noti che mentre le formule di "*hv*" nautiche e geodetiche differiscono tra loro solo nei decimali del risultato, esse differiscono dalle formule di "*hv*" semplificate nei secondi e relativi decimali, a testimonianza della loro maggiore precisione rispetto a queste ultime. Tuttavia, a causa della loro complessità, provocano con estrema facilità errori nel calcolo a mano e sono quindi adatte al solo calcolo programmato.

hv = $ho - 0{,}03 * (\sqrt{Q}) - R + \text{arcsen}\,\{\text{sen}\,[P - P * (1 \div 298{,}257) * (\text{sen}\,\varphi)^2] * \cos\,(ho - 0{,}03 * (\sqrt{Q}) - R)\}$

Altezza vera di Sole o Luna

hv = $ho - 0{,}03 * (\sqrt{Q}) - R \pm Sd \times [1 + \text{sen}\,(ho - 0{,}03 * (\sqrt{Q}) - R) * \text{sen}\,P] + \text{arcsen}\,\{\text{sen}\,[P - P * (1 / 298{,}257) * (\text{sen}\,\varphi)^2] * \cos\,(ho - 0{,}03 * (\sqrt{Q}) * R)\}$

Formule Geodetiche

Altezza vera di stella

hv = $ho - 0{,}03 * (\sqrt{Q}) - R$

Altezza vera di pianeta

hv = $ho - 0{,}03 * (\sqrt{Q}) - R + \text{arcsen}\,\{[0{,}9983271 + 0{,}0016764 * \cos\,(2 * \varphi) - 0{,}0000035 * \cos\,(4 * \varphi)] * \text{sen}\,P * \cos\,(ho - 0{,}03 * (\sqrt{Q}) - R)\}$

Altezza vera di Sole o Luna

hv = $ho - 0{,}03 * (\sqrt{Q}) - R \pm Sd - \{1 + \text{sen}\,[ho - 0{,}03 * (\sqrt{Q}) - R] * \text{sen}\,P\} + \text{arcsen}\,\{[0{,}9983271 + 0{,}0016764 * \cos\,(2 * \varphi) - 0{,}0000035 * \cos\,(4 * \varphi)] * \text{sen}\,P * \cos\,(ho - 0{,}03 * (\sqrt{Q}) - R)\}$

<u>Calcolo della declinazione sottesa dall’allineamento misurato all'epoca attuale</u>

δa = $\text{arcsen}\,(\text{sen}\,\varphi * \text{sen}\,hv + \cos\varphi * \cos hv * \cos Aa)$

<u>Calcolo della declinazione sottesa dall’allineamento misurato all’epoca di presunta costruzione del monumento</u>

Per questo calcolo il programma calcola il numero di secoli giuliani intercorsi tra l’epoca di presunta costruzione del monumento e l’epoca standard J2000 pari a JD2451545,0 ottenendo quindi il parametro di calcolo T1 con la seguente formula:

T1 = (JD Epoca – 2451545,0) / 36525

Dopodiché il programma calcola la declinazione sottesa dall’allineamento del monumento risultante all’epoca di presunta costruzione dello stesso tenendo in considerazione l’obliquità dell’eclittica ottenuta con la formula di Laskar:

δa1 = $\delta a - 1°18'00{,}93'' * (U) - 0°00'01{,}55'' * (U)^2 + 0°33'19{,}25'' * (U)^3 - 0°00'51{,}38'' + (U)^4 - 0°04'09{,}67'' * (U)^5 - 0°00'39{,}05'' * (U)^6 + 0°00'07{,}12'' * (U)^7 + 0°00'27{,}87'' * (U)^8 + 0°00'05{,}79'' * (U)^9 + 0°00'02{,}45'' * (U)^{10}$

(dove U = T1/100).

Per qualsiasi dubbio, domande, segnalazioni di errori ortografici e/o di calcolo non esitate a contattarmi ago.pax@libero.it. Il Programma è volutamente messo a disposizione gratuitamente per poter essere testato dal maggior numero possibile di persone.

BIBLIOGRAFIA

AA.VV. (1976-1987). *Enciclopedia delle matematiche elementari e complementi*, Hoepli, Milano.

Codebò Mario (1997). *Problemi generali del rilevamento archeoastronomico*, Atti I Seminario A.L.S.S.A., Genova.

Codebò Mario (1997a). *Prime indagini archeoastronomiche in Liguria*, memorie S.A.It. 68, n. 3.

Codebò Mario (2010). *L'algoritmo giuliano del Sole*, Atti XII Seminario A.L.S.S.A., Genova.

Codebò Mario (2011). *Il calcolo FK4 B1950.0 della precessione delle stelle*, Atti XIII Seminario A.L.S.S.A., Genova.

Codebò Mario (2012). *Il calcolo FK4 B1900.0 della precessione delle stelle*, Atti XIV Seminario A.L.S.S.A., Genova.

Flora Ferdinando (1987). *Astronomia nautica*, Hoepli, Milano.

Lenzi Ernesto. (1967). *Determinazioni astronomiche speditive*, I.G.M., Firenze.

Meeus Jean (1988). *Astronomical formulae for calculators*, Willmann-Bell Inc., Richmond, Virginia, U.S.A..

Meeus Jean (1990). *Astronomia con il computer*, Hoepli, Milano.

Meeus Jean (1998). *Astronomical algorithms*, Willmann-Bell Inc., Richmond, Virginia, U.S.A..

Meeus Jean (2005) *Astronomical algorithms*, 2nd edition, Willmann-Bell Inc., Richmond, Virginia, U.S.A.

Smart William Marshall. (1977). *Textbook on Spherical Astronomy*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K..

Tavole Nautiche. I.I.M., Genova, 1961.

Zagar Francesco (1984). *Astronomia sferica e teorica*, Zanichelli, Bologna.