

**F. FLORA, F. ANDREOLI, S. BOLLANTI,
P. DI LAZZARO, G.P. GALLERANO,
L. MEZI, D. MURRA**

Divisione Fisica della Fusione
Centro Ricerche Frascati

M. DE FRANCESCHINI, G. VENEZIANO

Osservatorio Astronomico di Genova
Via S. Gazzo, 16154 - Genova

LA BUSSOLA SOLARE ENEA IN ARCHEOASTRONOMIA

Rilievi di orientamento nella Grotta di Tiberio a Sperlonga

RT/2021/1/ENEA



AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

F. FLORA, F. ANDREOLI, S. BOLLANTI,
P. DI LAZZARO, G.P. GALLERANO,
L. MEZI, D. MURRA
Divisione Fisica della Fusione
Centro Ricerche Frascati

M. DE FRANCESCHINI, G. VENEZIANO
Osservatorio Astronomico di Genova
Via S. Gazzo, 16154 - Genova

LA BUSSOLA SOLARE ENEA IN ARCHEOASTRONOMIA

Rilievi di orientamento nella Grotta di Tiberio a Sperlonga

RT/2021/1/ENEA



AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

I rapporti tecnici sono scaricabili in formato pdf dal sito web ENEA alla pagina www.enea.it

I contenuti tecnico-scientifici dei rapporti tecnici dell'ENEA rispecchiano l'opinione degli autori e non necessariamente quella dell'Agenzia

The technical and scientific contents of these reports express the opinion of the authors but not necessarily the opinion of ENEA.

LA BUSSOLA SOLARE ENEA IN ARCHEOASTRONOMIA

Rilievi di orientamento nella Grotta di Tiberio a Sperlonga

F. Flora, F. Andreoli, S. Bollanti, M. De Franceschini, P. Di Lazzaro, G.P. Gallerano, L. Mezi, D. Murra, G. Veneziano

Riassunto

La bussola solare elettronica brevettata da ENEA è uno strumento compatto, automatico, accurato (risoluzione migliore di un primo d'arco, pari a 0,016 gradi) e veloce (fornisce l'orientamento in pochi secondi). La bussola ENEA è stata già usata con successo per rilevamenti di orientamento in Antartide (in collaborazione con INGV), per il controllo della movimentazione e dell'orientamento dell'asse di rotazione degli specchi delle centrali solari a concentrazione (in collaborazione con D.D. s.r.l.), e per la progettazione di meridiane.

In questo rapporto presentiamo l'uso della bussola ENEA nelle misure di orientamento di alcune strutture della Grotta di Tiberio adiacente alla Villa appartenuta nel I secolo d.C. all'imperatore romano Tiberio, presso l'area annessa al Museo Archeologico Nazionale di Sperlonga, in provincia di Latina. Le misure di orientamento sono finalizzate a verificare se tali strutture presentino una direzione privilegiata rispetto a particolari eventi astronomici, collegati al moto apparente del Sole.

Parole chiave: Bussola solare; Archeoastronomia; Orientamento.

Abstract

The Electronic solar compass, patented by ENEA, is compact, automatic, accurate (the orientation/azimuth is determined with a resolution better than 0.016°), and fast (it provides the orientation in few seconds). The ENEA compass has been successfully used for orientation measurements in Antarctica (in collaboration with INGV), for handling the movement and checking the rotation axis orientation of the mirrors in the concentrated solar power plants (in collaboration with D.D. srl.), and for the design of sundials.

In this report, we exploit the ENEA solar compass in archaeoastronomy, specifically in orientation measurements of some structures at the Grotta di Tiberio, a cave adjacent to the Villa of the emperor Tiberius (1st century AD) located in the archaeological site nearby the National Archaeological Museum of Sperlonga, in the province of Latina. The measures are aimed at verifying whether these structures provide references to particular astronomical events, connected to the apparent motion of the Sun.

Keywords: Solar compass; Archeoastronomy.

INDICE

Introduzione	7
1. Le postazioni di misura nel sito archeologico	8
2. Risultati dei rilievi con la bussola solare	10
2.1 Misure con la bussola solare	10
2.2 Misure in assenza di Sole	12
2.3 Presentazione in pianta delle misure	13
3. Calcolo dell'azimut del tramonto per solstizi ed equinozi	14
4. Allineamenti delle due nicchie ed ipotesi sui possibili traguardi del Sole	18
4.1 Allineamenti al solstizio estivo	18
4.2 Allineamenti al solstizio invernale	18
5. Commenti conclusivi	21
Ringraziamenti	22
Referenze citate nel testo	23

La bussola solare ENEA in archeoastronomia: rilievi di orientamento nella Grotta di Tiberio a Sperlonga

Introduzione

L'osservazione dei fenomeni celesti ha rivestito una notevole importanza nello sviluppo delle civiltà. Ad esempio, lo studio dell'alternanza delle stagioni ha permesso all'uomo di programmare i lavori agricoli, dando alle comunità la possibilità di svilupparsi. Analogamente, lo studio della posizione degli astri ha guidato gli spostamenti dell'uomo, permettendo di allargare i propri orizzonti.

Anche per questi motivi i corpi celesti sono stati divinizzati e celebrati erigendo edifici e monumenti che tenessero conto delle loro posizioni nel cielo in particolari date dell'anno (vedi ad esempio <https://it.wikipedia.org/wiki/Archeoastronomia>).

Oggigiorno l'archeoastronomia si occupa di riconoscere, nelle antiche strutture, l'intenzione originaria di realizzare allineamenti in funzione di uno specifico astro in particolari giorni nel corso dell'anno solare.

In questo Rapporto presentiamo lo studio dell'orientamento delle congiungenti di alcune coppie di punti significativi nella Grotta di Tiberio a Sperlonga (LT), adiacente alla villa appartenuta nel I secolo d.C. all'imperatore romano Tiberio. Tale studio è finalizzato a verificare la volontà del progettista/costruttore di realizzare elementi che potessero dare un riferimento in occasione di particolari eventi astronomici dell'anno, ad esempio il tramonto nei giorni dei solstizi estivi e invernali.

Allo scopo di verificare questa ipotesi, sono stati effettuati rilevamenti [1] che hanno portato alla redazione della mappa mostrata nella fig. 1.

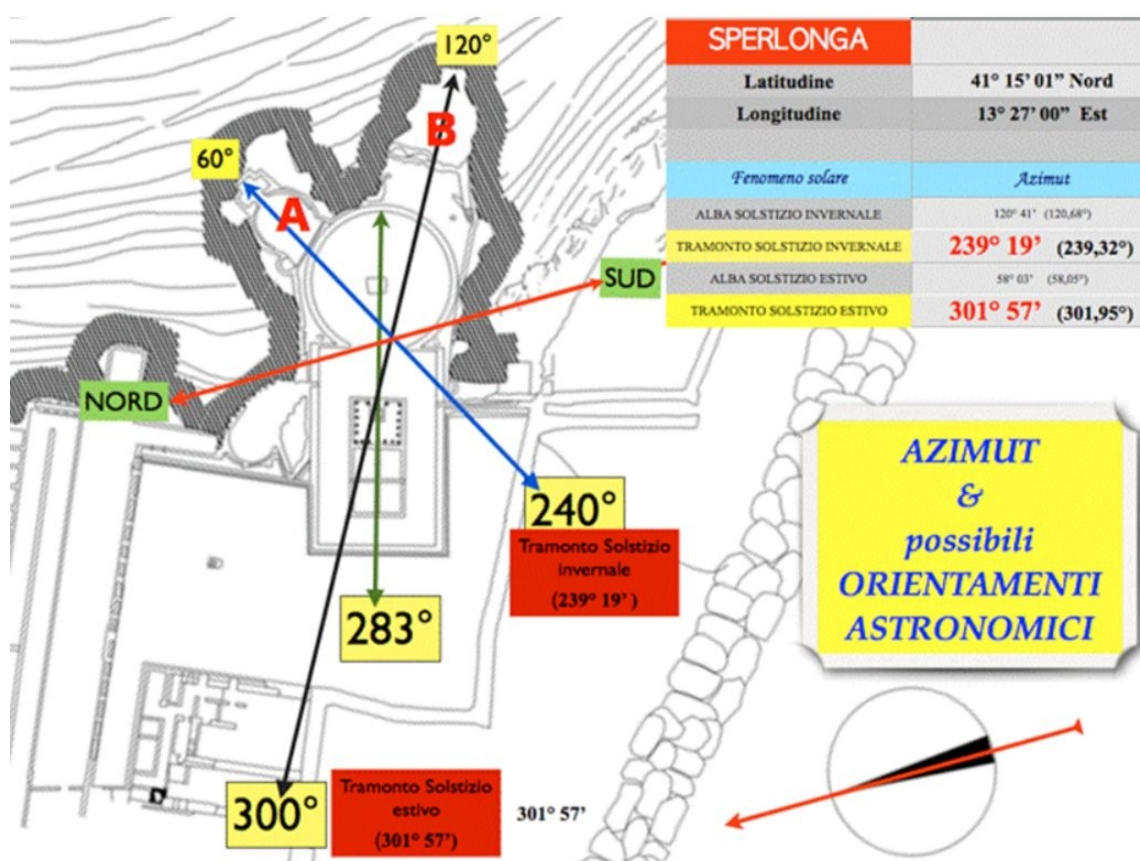


Figura 1. La piantina del sito archeologico e i possibili allineamenti astronomici individuati in [1] prima delle misure con la bussola solare ENEA.

I rilevamenti di azimut riportati nella fig. 1 sono stati ottenuti usando una bussola magnetica, che è soggetta ad errori di qualche grado. Per migliorare la precisione e accuratezza dei rilievi, abbiamo ripetuto le misure di orientamento utilizzando la bussola solare progettata e realizzata dall'ENEA [2, 3, 4, 5, 6, 7] in grado di raggiungere, quando utilizzata in combinazione con un teodolite, un'accuratezza migliore di 1 primo d'arco (0,016°), quindi almeno 100 volte più precisa delle bussole magnetiche.

1. Le postazioni di misura nel sito archeologico.

Il 10 dicembre 2019 abbiamo eseguito misure di orientamento delle congiungenti di varie coppie di punti nell'area archeologica della Grotta di Tiberio a Sperlonga tramite la bussola solare ENEA. La bussola è stata installata sopra un teodolite Tecnix dotato di cannocchiale con puntamento laser e goniometro digitale (accuratezza di circa 10 secondi d'arco). Per brevità, da ora in poi, la bussola solare ENEA è intesa sempre in questa configurazione.

Riportiamo nella fig. 2 la foto di Google Maps e le postazioni in cui si sono eseguiti i rilievi con la bussola solare, cui va aggiunta la postazione 5b.

A titolo di esempio, la fig. 3 mostra la foto di due postazioni interne alla grotta (n. 5a e n. 5b).



Figura 2. Foto del sito archeologico, tratta da Google Maps, e numerazione delle postazioni in cui si sono eseguiti rilievi con la bussola solare. Le linee tratteggiate mostrano le direzioni delle quali è stato misurato l'azimut. Le postazioni n.5a e n.7 sono interne alla grotta e qui riportate in pianta.

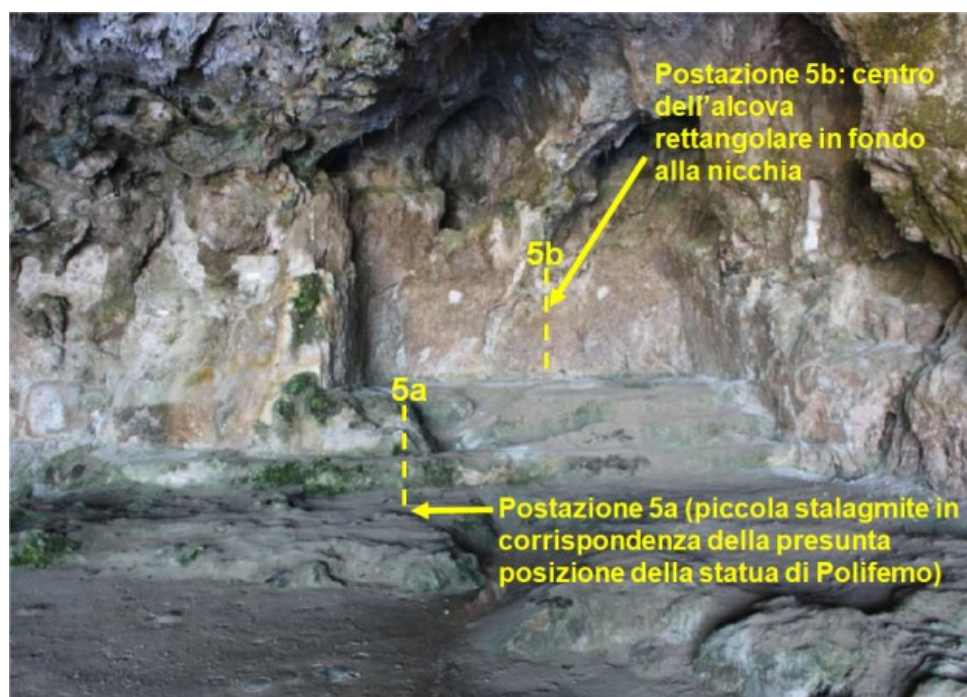


Figura 3. Postazioni n. 5a e 5b nella nicchia B interna alla grotta, vedi le figure 1 e 2. Tratta da [1].

Le postazioni sui muretti di confine (n. 1 e n. 3, n. 3a e n. 6 nella fig. 2) sono state scelte in modo da essere equidistanti dal bordo dei rispettivi muretti, affinché la retta congiungente due postazioni dello stesso muretto fosse parallela alla direzione del muretto stesso.

2. Risultati dei rilievi con la bussola solare

I rilievi sono iniziati alle ore 12:00. La giornata era parzialmente nuvolosa ed è stato possibile eseguire le misure di orientamento con la bussola solare solamente quando essa era collocata sulla postazione n. 1 (alle ore 12) e sulla postazione n. 3 (alle ore 13), in presenza di Sole completamente scoperto. L'orientamento dalle altre postazioni è stato ricavato attraverso delle triangolazioni con l'utilizzo del solo teodolite.

La misura dell'orientamento di una direzione, definito come azimut rispetto al Nord in senso orario, è stata eseguita con la bussola solare tramite la seguente procedura:

- il teodolite veniva collocato sopra un foglio di carta recante il numero della postazione e la croce di riferimento, in modo che la verticale passante per il suo centro cadesse esattamente al centro della croce stessa. Il teodolite è munito di un sistema ottico tramite il quale è possibile centrare il suo asse verticale entro pochi millimetri.
- il teodolite veniva messo in bolla. L'accuratezza dell'orizzontalità, entro un primo d'arco, è garantita da una livella toroidale.
- si accendeva l'elettronica della bussola e si attendeva che il GPS avesse catturato le coordinate UTM.
- la testa del teodolite veniva girata fino a rivolgere la bussola approssimativamente verso il Sole.
- bloccato il movimento del teodolite, si acquisiva la direzione del Sole rispetto al piano verticale della bussola (cioè il piano verticale che contiene la fenditura di ingresso della bussola). Questo valore, insieme al calcolo dell'azimut del Sole eseguito dal software della bussola [6], forniva l'azimut del suddetto piano verticale della bussola, indicato sul display della console.
- una volta noto l'azimut del piano verticale della bussola, si azzerava il goniometro del teodolite e lo si ruotava di un angolo pari a quello appena misurato, in modo da portare il piano verticale della bussola in direzione Nord.
- si azzerava nuovamente il goniometro del teodolite.
- da questo momento, il goniometro del teodolite forniva l'azimut della direzione puntata dal cannocchiale rispetto al Nord geografico, con un'accuratezza di circa un primo d'arco.

2.1 Misure con la bussola solare

La tabella 1 mostra le misure di orientamento eseguite con la bussola nelle postazioni n. 1 e n. 3a, misure riferite direttamente al Sud e al Nord, con angoli da 0° a 360° in senso orario: la direzione Est, ad esempio, misura 90° Nord ovvero 270° Sud.

Direzione (da postazione a postazione)	Azimut rispetto al Nord	Azimut rispetto al Sud
1 → 2	291°:11':28"	111°:11':28"
1 → 3	202°:57':30"	22° 57' 30"
1 → 4	103°:46':33"	283° 46' 33"
1 → 5a	115°:26':49"	295° 26' 49"
1 → 5b	115°:54':47"	295° 54' 47"
3a → 1	22° 57' 30"	202° 57' 30"
3a → 6	113°:09':10"	293°: 09': 10"
3a → 7	80°:58':11"	260°: 58': 11"

Tabella 1. Azimut misurati tramite bussola solare dalle postazioni n.1 e n. 3a verso le altre postazioni.

Dalla postazione n. 1 è stato anche rilevato l'orientamento di alcune strutture facilmente riconoscibili, in direzione di Sperlonga e del Circeo, utile a verificare la correttezza del funzionamento della bussola.

La fig. 4 mostra alcuni elementi geografici della città di Sperlonga, visti dalla postazione n. 1, di cui è stato misurato l'orientamento e l'elevazione angolare θ_H rispetto al punto di osservazione, fotografati attraverso il cannocchiale del teodolite. I valori di azimuth ed elevazione riferiti alla fig. 4 sono riportati nella tabella 2.

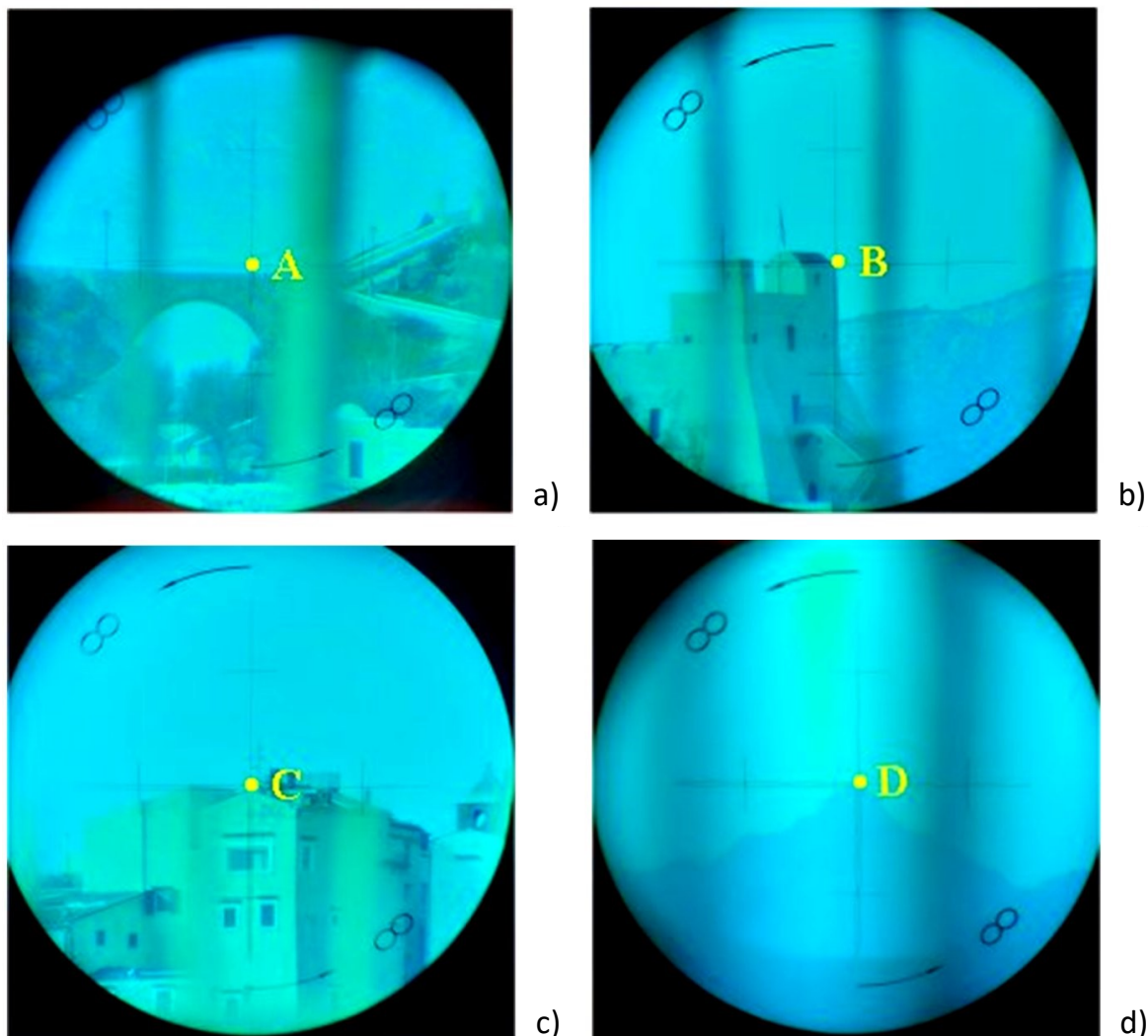


Figura 4. Rilevamenti con il teodolite dalla postazione n.1 a) verso il ponte di Sperlonga nella direzione postazione n.1 - postazione n.2; b) verso lo spigolo Nord della torre Truglia di Sperlonga; c) verso il vertice del tetto di una casa di Sperlonga; d) verso la vetta del Monte Circeo.

Il monte Circeo (foto della fig. 4d) mostra in realtà due vette distanti circa 4' tra loro e con il teodolite è stata puntata la direzione mediana. Per avere una conferma della correttezza delle misure, è possibile confrontare il valore di azimuth misurato per la direzione 1 → D riportato nella tabella 2 con quello teorico estratto dalle mappe di Google Maps. La punta di destra, alta 489 metri, ha coordinate $41^{\circ}:14':17''$ di longitudine e $13^{\circ}:02':45''$ di latitudine. Utilizzando il modello ad ellissoide della Terra, si ottiene che la direzione della cima di destra, vista dalla posizione del teodolite ($41^{\circ}:15':01.52''$ N, $13^{\circ}:26':58.17''$ E) ha un azimuth teorico di $267^{\circ}:49'$ in ottimo accordo con quanto rilevato tramite la bussola solare: $267^{\circ}:47' + 2'$, dove i 2' rappresentano il

decentramento della cima di destra rispetto alla direzione mediana tra le due cime puntata con il teodolite.

Direzione	Azimut rispetto al Nord	Azimut rispetto al Sud	Elevazione angolare θ_H
1 → A	291°:11':28"	111° 11' 28"	0° 32' 37"
1 → B	289°:31':34"	109° 31' 34"	1° 12' 23"
1 → C	296°:35':00"	116° 35' 00"	2° 49' 45"
1 → D	267°:46':44"	87° 46' 44"	0° 47' 15"

Tabella 2 Azimut misurati tramite bussola solare dalla postazione n.1 verso Sperlonga e il Circeo nei quattro punti specificati nella fig. 4.

Per completezza, dalla postazione n. 1 abbiamo misurato anche l'elevazione del livello del mare, che risulta ovviamente negativa, essendo la postazione qualche metro sopra il livello del mare: $\theta_{H_{\text{mare}}} = -0^\circ 03' 06''$.

2.2 Misure in assenza di Sole

Grazie alle misure dirette riportate nella tabella 1, abbiamo ricavato, tramite triangolazioni, le direzioni congiungenti tutte le altre postazioni. In particolare, poiché era importante conoscere alcune direzioni di vista di un osservatore posto all'interno della Grotta di Tiberio, sono state selezionate postazioni specifiche:

- la n. 6, da cui si può traguardare il centro della nicchia A (vedi la fig. 1 e la fig. 2);
- la n. 7, posta davanti al centro dell'entrata di un piccolo locale ricoperto di mosaici posto in fondo alla nicchia A;
- la n. 5a, sopra una piccola stalagmite, dove si presume fosse il centro della statua del gruppo di Polifemo;
- la n. 5b, al centro dell'alcova rettangolare in fondo alla nicchia B;
- la n. 8, al centro di una struttura circolare, posta sul lato occidentale dell'ingresso della grotta, dove presumibilmente era collocata una statua o un sedile;
- la n. 9, al bordo estremo della roccia che, da precedenti misure, era considerato in direzione del solstizio invernale se traguardato dalla nicchia A.

Nella Tabella 3 riportiamo i valori delle direzioni di vista tra alcune di queste postazioni, ottenuti tramite triangolazione.

Direzione (da postazione a postazione)	Azimut rispetto al Nord	Azimut rispetto al Sud
6 → 7	59° 50' 03"	239° 50' 03"
6 → 8	63° 55' 33"	243° 55' 33"
7 → 8	237° 53' 27"	57° 53' 27"
7 → 9	240° 27' 26"	60° 27' 26"

Tabella 3 Azimut misurati tramite il goniometro del teodolite, ottenuti triangolando i dati riportati nella tabella 1.

Come ultimo rilievo della giornata abbiamo posto il teodolite sulla posizione 5a e lo abbiamo orientato verso la postazione n. 1: questa direzione, misurata in modo diretto (usando la bussola solare) e riportata nella tabella 1, funge ora da riferimento.

Da questa direzione abbiamo ruotato il cannocchiale verso lo spigolo destro della torre Truglia (fig. 4b) e verso il culmine di una grande casa (fig. 4c), e ne abbiamo rilevato il valore di azimut e di elevazione θH :

Azimut direzione 5a $\rightarrow$ B = $289^{\circ}:58':29''$ dal Nord ($109^{\circ} 58' 29''$ dal Sud)

Azimut direzione 5a $\rightarrow$ C = $296^{\circ}:34':33''$ dal Nord ($116^{\circ} 34' 33''$ dal Sud) $\theta H = 2^{\circ} 33' 45''$

Elevazione del mare: $\theta H_{\text{mare}} = -0^{\circ}:4':15''$.

L'insieme dei rilievi effettuati nell'area della Grotta di Tiberio permette di graficare le varie postazioni e le loro congiungenti su un piano cartesiano sovrapposto alla mappa nella fig. 2. Ogni posizione e direzione viene così ad essere geo-referenzata.

2.3 Presentazione in pianta delle misure

Nella fig. 5 riportiamo i valori delle direzioni che congiungono le varie postazioni, sovrapposte all'immagine della fig. 2. Tra alcune di esse è stata anche misurata la distanza e ciò permette di rappresentare le postazioni su un grafico cartesiano. La fig. 6 mostra tale grafico sovrapposto all'immagine del sito presa dall'alto. Il piano cartesiano ha origine sulla postazione n. 1, è orientato con l'asse x verso Sud e l'asse y verso Est.



Figura 5. Valori di azimut rispetto al Nord delle direzioni che congiungono le varie postazioni. I valori relativi alle direzioni puntate dalle postazioni n. 1 e n. 3a (in verde) sono ottenuti tramite l'uso della bussola solare ed hanno una accuratezza di 1'. Gli altri (in giallo) hanno accuratezza di 2'. Le coppie di postazioni sui muri (1-3 e 3a-6) giacciono su rette parallele ai rispettivi muretti.



Figura 6. Ricostruzione su piano cartesiano della posizione delle varie postazioni con indicazione delle loro coordinate e distanze relative. È segnalato lo scostamento di $0,5^\circ$ dal parallelismo tra la direzione $3a \rightarrow 6$ ed il muretto adiacente.

Come evidenziato nella fig. 6, sovrapponendo la foto di Google Maps al piano cartesiano, l'orientamento del muretto a Sud non coincide con la direzione $3a \rightarrow 6$ (come dovrebbe essere), scostandosi di circa $0,5^\circ$. Poiché l'orientamento $3a \rightarrow 6$ riportato sul piano cartesiano proviene da una misura assoluta fatta con la bussola solare, esso ha un'accuratezza di circa 1 primo d'arco e non può avere un errore di mezzo grado. Questo significa che nelle immagini di Google Maps le proporzioni larghezza/altezza non sono rispettate in modo rigoroso e conseguentemente nemmeno gli orientamenti dedotti dalle foto sono precisi.

Affinché gli orientamenti della mappa coincidano con quelli del piano cartesiano, occorre comprimerla del 4% circa in senso verticale. A quel punto possiamo sovrapporre anche la pianta della grotta estratta dalla fig. 1. Il risultato è riportato nella fig. 7.

3. Calcolo dell'azimut del tramonto per solstizi ed equinozi.

La App per Android *Sunpass* sviluppata in ENEA e in procinto di essere resa disponibile su Playstore [7], consente di ottenere la direzione di alba e tramonto per qualsiasi luogo in qualunque data e per qualsivoglia angolo θ_H di elevazione dell'orizzonte.

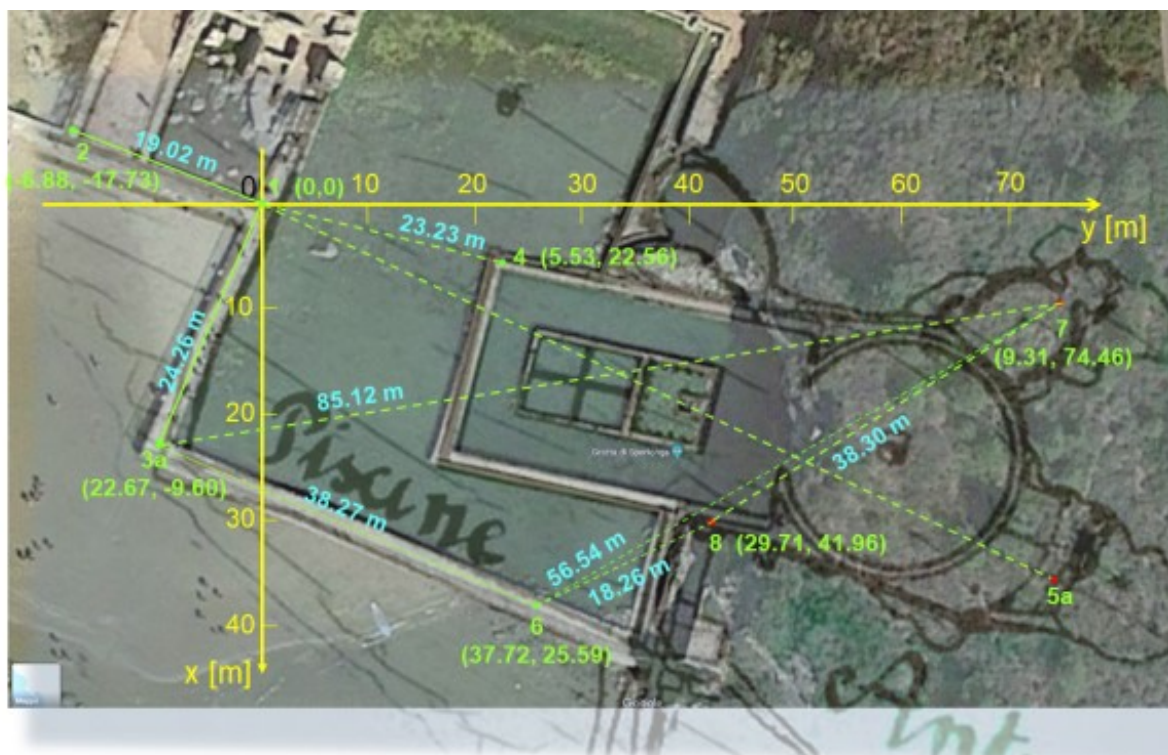


Figura 7. La stessa fig. 6, dopo aver compresso verticalmente del 4% l'immagine estratta da Google Maps, in modo che l'orientamento del muretto a sud coincida con la direzione 3a → 6, sovrapposta alla pianta della grotta estratta dalla fig. 1.

Per capire se gli orientamenti di grotta e nicchie sono legati alla direzione del tramonto nel giorno di solstizi o equinozi, eseguiamo il calcolo dell'azimut del Sole al tramonto (l'alba non è visibile dalla grotta) di solstizi o equinozi ai tempi di Tiberio, ad esempio nell'anno 1 d.C.

Durante gli ultimi 2000 anni, l'inclinazione dell'asse terrestre è diminuita di circa 15', come mostrato nella fig. 8. Una variazione piccola, ma non trascurabile.

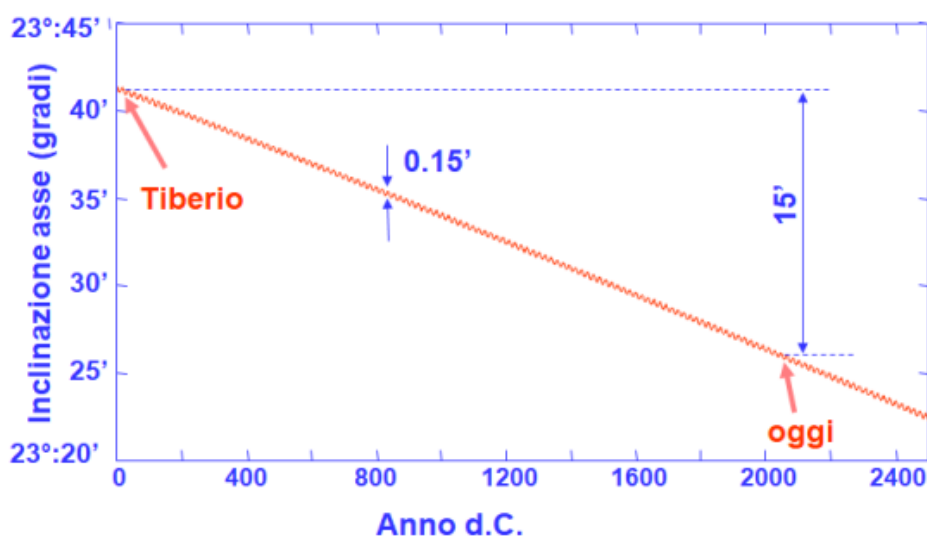


Figura 8. Inclinazione dell'asse terrestre (in gradi) durante gli ultimi 2000 anni.

La funzione “Effemeridi” di Sunpass tiene conto di questo effetto e consente di calcolare l'ora e la direzione del tramonto per tre diverse definizioni di quest'ultimo: Sole tangente all'orizzonte, metà del disco solare visibile all'orizzonte, e ultimo raggio di Sole. Qui consideriamo “tramonto” il

momento in cui il Sole è tangente l'orizzonte, in cui la parte inferiore del disco solare tocca l'orizzonte. Siamo infatti interessati al momento del tramonto in cui l'intero disco solare illumina gli oggetti e può creare effetti luminosi ben visibili nella grotta. Nella tabella 4 riportiamo i risultati di *Sunpass* per l'azimut del Sole al tramonto al variare dell'elevazione angolare dell'orizzonte (quindi del mare o della collina di Sperlonga) nelle date dei solstizi e degli equinozi, assumendo che l'inclinazione dell'asse terrestre sia la stessa dei primi anni dopo Cristo.

θH	Solstizio invernale Decl.= -23° 41' 18"	Equinozi Decl.=0°	Solstizio estivo Decl.=23° 41' 18"
4.0°	233° 15'	266° 24'	298° 14'
3.5°	233° 51'	266° 52'	298° 44'
3.0°	234° 26'	267° 20'	299° 14'
2.5°	235° 02'	267° 48'	299° 45'
2.0°	235° 37'	268° 16'	300° 17'
1.5°	236° 12'	268° 45'	300° 50'
1.0°	236° 48'	269° 14'	301° 23'
0.5°	237° 24'	269° 44'	301° 58'
0.0°	238° 01'	270° 15'	302° 35'
-4' 15" (livello mare)	238° 06'	270° 19'	302° 40'

Tabella 4 Valori di azimut del Sole al tramonto, rispetto alla direzione del Nord geografico, in funzione dell'altezza θH dell'orizzonte, calcolati dalla App *Sunpass* alle coordinate geografiche della Grotta di Tiberio di Sperlonga (Latitudine = 41°:15':1". Longitudine = 13°:22':0"), nell'anno 1 d.C., usando la definizione di tramonto come Sole tangente l'orizzonte.

L'ultima riga della tabella si riferisce al momento in cui il Sole arriva a toccare il mare visto da una quota di circa 4.9 m, dalla quale l'orizzonte sul mare appare con un'elevazione negativa di circa -4':15", come misurato dalla postazione 5a.

I risultati dei calcoli effettuati dalla funzione "Effemeridi" di *Sunpass* sono stati verificati tramite confronto con altre previsioni teoriche e con dati sperimentali. In particolare, presso l'Osservatorio di Genova è stata eseguita una verifica dei valori di azimut al tramonto previsti da *Sunpass* con quelli previsti da un software commerciale di astronomia (Starry Night PRO PLUS della Imaginova LTD): l'accordo è entro 2 primi d'arco. Tali risultati sono stati verificati sperimentalmente (vedi [6] e misure di tramonto sulle isole Tremiti da Rodi Garganico, non ancora pubblicate). L'accordo tra previsione di *Sunpass* e valori sperimentali dell'azimut del Sole (calcolati in base alle coordinate geografiche di alcuni punti di riferimento rilevate da Google Maps) è entro alcuni primi d'arco.

Recentemente, la funzione "Effemeridi" di *Sunpass* è stata confrontata con le previsioni di elevazione ed azimut del Sole (per la data del 9 ottobre 2019) fornite dal software di calcolo delle effemeridi del programma principale della bussola solare verificato sperimentalmente in varie occasioni, in diverse date dell'anno e in diversi anni: l'accordo sui valori di azimut è entro 1'.

Da questi confronti sperimentali e teorici possiamo ritenere che le previsioni di azimut riportate nella Tabella 4 siano affidabili entro 2 primi d'arco.

Dopo aver costruito una scala goniometrica basata sui valori di azimut delle postazioni n. 8 e n. 6 viste dalla postazione n. 7, possiamo riportare su di essa le posizioni del Sole al tramonto del

solstizio invernale dell'anno 1 d.C. utilizzando i dati della tabella 4 all'interno delle foto effettuate dalla postazione n. 7. Otteniamo così una visione grafica della simulazione del tramonto, riportata in fig. 9. Lo stesso facciamo per il panorama di Sperlonga visto dall'interno della grotta, simulando il tramonto al solstizio estivo dello stesso anno. Il risultato è riportato nella fig. 10.



Figura 9. Simulazione del tramonto del 21 Dicembre dell'anno 1 d.C. visto dalla postazione n. 7: ultime sette posizioni del Sole, ad intervalli di 0.5° in elevazione, fino all'elevazione $\theta H=0^\circ$. La scala goniometrica è basata sui valori di azimuth delle postazioni n. 8 e n. 6 viste dalla postazione n. 7. Le posizioni del Sole sono tratte dalla tabella 4.

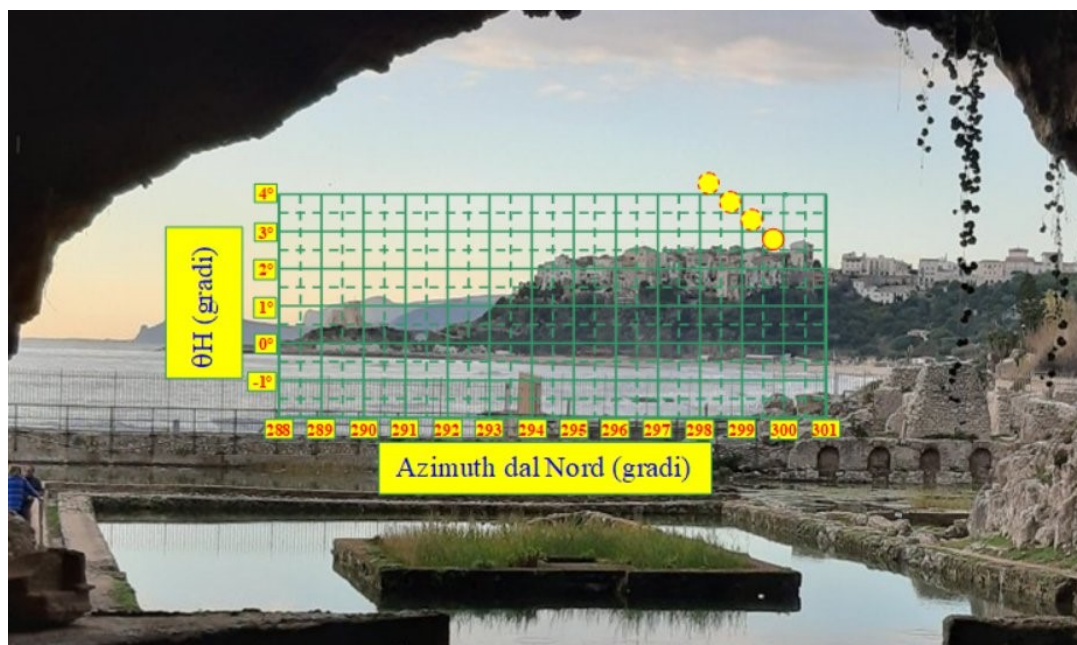


Figura 10. Simulazione del tramonto del 22 Giugno 1 d.C. visto dalla postazione 5a. Sono riportate le ultime quattro posizioni del Sole (ad intervalli di 0.5° in elevazione) prima che esso tramonti sul paese di Sperlonga, ad una elevazione $\theta H = 2.5^\circ$. Le posizioni del Sole sono tratte dalla tabella 4.

4. Allineamenti delle due nicchie ed ipotesi sui possibili traguardi del Sole.

4.1 Allineamenti al solstizio estivo

La simulazione riassunta nella fig. 10 conferma che la nicchia B era orientata nella direzione del tramonto al solstizio estivo dell'anno 1 d.C. Il tramonto sembra allineato nella direzione del centro della vasca circolare (vedi la fig. 10) dove si trovava il gruppo scultoreo di Scilla mostrato nella fig. 11a. È possibile ipotizzare la presenza di elementi di traguardo del Sole nel gruppo scultoreo, che potessero verificare il momento del solstizio. Ad esempio, la punta del timone preso da Scilla (fig. 11a) avrebbe potuto fungere da gnomone, che al tramonto del solstizio estivo proiettava un'ombra su un punto del gruppo marmoreo di Polifemo (fig. 11b) posizionato nella nicchia B.

Al momento, non esistono riferimenti precisi per la direzione della perpendicolare alla parete di fondo della nicchia B e consideriamo valido l'orientamento approssimativo indicato nella fig. 1, ovvero un azimuth della nicchia pari a circa $300^\circ \pm 5^\circ$ rispetto al Nord, dove i 5° di incertezza sono dovuti all'irregolarità delle pareti della stessa nicchia.



a)



b)

Figura 11. Ricostruzione dei gruppi scultorei di Scilla (a) e di Polifemo (b) esposte al Museo Archeologico Nazionale di Sperlonga attiguo all'Area Archeologica della Grotta di Tiberio. Il gruppo di Polifemo si trovava nella grotta B, postazione n. 5a-5b, vedi le figure 1, 3, 5 e 10.

4.2 Allineamenti al solstizio invernale

Nella simulazione della fig. 9 notiamo che ai tempi di Tiberio al 21 dicembre il Sole arrivava a toccare il mare con un azimuth quasi coincidente (entro un errore di appena 0.2°) con quello della nicchia esterna (postazione n. 8) vista dal centro del cancello (postazione n. 7), cioè $237^\circ 53'$ rispetto al Nord. La probabilità che questo allineamento sia voluto è estremamente elevata.

È quindi ipotizzabile che la nicchia esterna (postazione n. 8) contenesse una struttura adatta a fungere da traguardo (mirino o gnomone) per il solstizio invernale se osservata dalla nicchia A (postazione n. 7). In questa sede avanziamo l'ipotesi che la nicchia esterna contenesse la statua di 'Andromeda incatenata' ritrovata in mare in prossimità della Grotta di Tiberio [8], vedi la fig. 12.

Secondo la mitologia, Andromeda era stata incatenata su uno scoglio per essere offerta in sacrificio ad un mostro marino.



Figura 12. *Statua di Andromeda incatenata.*

La nostra ipotesi è confortata dalle seguenti considerazioni:

- a) L'altezza della statua è di 170 cm [9], per cui, vista dall'ingresso del cubicolo della nicchia A (postazione n. 7), la testa apparirebbe nella direzione ed all'altezza del Sole al tramonto del solstizio invernale, adatta a svolgere bene la funzione di "mirino" o "gnomone" per la verifica del solstizio.
- b) La forma rotonda della base della statua (vedi la fig. 12) è compatibile con la forma della nicchia, sebbene, al momento, non possiamo affermare che siano compatibili anche le dimensioni del piedistallo con quelle della base della nicchia.
- c) La statua è stata realizzata per "essere vista dal basso" [9] ed è "lavorata per essere esposta nella roccia" [10]. Effettivamente, la postazione n. 8 si trova appena sopra al sentiero di accesso alla grotta per cui gli ospiti l'avrebbero vista molto da vicino e "dal basso". La nicchia inoltre è circondata dalla roccia fino ad una altezza di circa 1 metro e mezzo (vedi la fig. 9). Se fosse stata collocata sugli scogli davanti al mare gli ospiti di Tiberio l'avrebbero vista dal retro e dall'alto ed essa non sarebbe stata "esposta nella roccia".
- d) Fino ad oggi, nessun archeologo ha potuto stabilire a cosa servisse la nicchia della postazione n. 8, né indicare cosa fosse contenuto in tale nicchia, né dove si trovasse la statua di Andromeda,

malgrado sia stata rinvenuta nello specchio di mare prospiciente la grotta prima di tutte le altre sculture [9]. Per dare un'idea visiva della posizione della nicchia riportiamo nella fig. 13 una ricostruzione della disposizione dei diversi gruppi scultorei a cura di J.C. Golvin.

- e) Dalla nicchia della postazione n° 8, la statua di Andromeda sarebbe stata ammirata, assieme alle altre sculture della grotta, dagli ospiti di Tiberio durante i banchetti organizzati nel triclinio, vedi la fig.13. L'accostamento di Andromeda con le sculture relative alla vicenda di Ulisse non era nuovo per Tiberio: nella Villa Augusta di Boscotrecase, sulle pendici del Vesuvio, la villa imperiale che Tiberio e sua moglie Giulia Maggiore (figlia di Augusto) avevano ereditato da Agrippa (l'ex marito di Giulia) nel 10 a.C., sono stati ritrovati due affreschi in ottimo stato di conservazione nella "Stanza Mitologica" che ritraggono rispettivamente Andromeda con Perseo sulla parete Est e Polifemo sulla parte Ovest [11, 12, 13]. Sembra che i due affreschi siano stati dipinti pochi anni dopo la morte di Agrippa [13], quindi proprio nel periodo in cui Tiberio e Giulia frequentavano la Villa. Un ulteriore nesso tra Andromeda (che nella mitologia greca è figlia del re etiope Cefeo e di sua moglie Cassiopea) ed i personaggi dell'Odissea è costituito dal fatto che Omero è il primo autore a parlare dell'Etiopia proprio nel Proemio dell'Odissea [14].



Figura 13. Ricostruzione della disposizione dei gruppi scultorei ritrovati in prossimità della Grotta di Tiberio a cura di Jean Claude Golvin. La freccia rossa indica la nicchia esterna (postazione 8).
 Tratta dal sito: <https://www.romanoimpero.com/2018/05/la-villa-di-tiberio-sperlonga-lazio.html>

- f) Esiste un possibile nesso tra Andromeda ed il tramonto. Infatti, nel V secolo a.C. lo storico Erodoto scrive [14]: *“Dove il sud declina verso il Sole che tramonta si trova il paese chiamato Etiopia, l'ultima terra abitata in quella direzione”*. La direzione del tramonto punta quindi, per Andromeda, alle sue origini. In particolare, tra tutti i tramonti, il tramonto del solstizio invernale è quello che più differisce dalla direzione Ovest per spostarsi verso Sud (di circa 30°) e quindi ben si sposa con la dicitura *“Dove il sud declina verso il Sole che tramonta”*, cioè verso Ovest. Il tramonto in riva al mare rappresenta inoltre il momento ed il luogo in cui sua madre, Cassiopea, commise il peccato di vanità che causò la condanna a morte di Andromeda [15].

g) Un ulteriore nesso tra Andromeda e il solstizio invernale è suggerito da Plinio il Vecchio, nel suo *Naturalis Historia* [16] laddove, riguardo i mostri marini (ai quali, ricordiamo, Andromeda doveva essere sacrificata) è scritto:

*(5) "Ma nel mare si vedono mostri soprattutto verso i solstizi
Allora li irrompono turbini,
Allora piogge,
Allora tempeste scese dai gioghi dei monti
Sconvolgono in profondità i mari
E strappano dall'abisso le belve
Spinte con le onde in così tanta moltitudine..."*

Nella prima strofa Plinio parla di "solstizi" al plurale, ma poi turbini, piogge e tempeste suggeriscono che il riferimento è esclusivamente al solstizio d'inverno, collegato ai mari agitati che scatenano i mostri marini.

La consistenza dell'ipotesi che la nicchia esterna nella postazione n. 8 (vedi la fig. 13) contenesse la statua di 'Andromeda incatenata' e le relative verifiche e simulazioni di controllo saranno oggetto di ulteriori studi.

5. Commenti conclusivi

In questo Rapporto abbiamo presentato le misure di orientamento di alcune strutture nella Grotta adiacente alla villa appartenuta nel I secolo d.C. all'imperatore romano Tiberio, effettuate tramite la bussola solare ENEA. I risultati possono essere riassunti nei punti seguenti:

- I. Le misure di orientamento di elevata precisione ed accuratezza eseguite con la bussola solare ENEA confermano le ipotesi di allineamento delle nicchie A e B (fig. 1) in direzione dei solstizi già proposte in [1].
- II. Le simulazioni del tramonto ai solstizi ai tempi di Tiberio, eseguite con diversi programmi di calcolo astronomico (vedi le figure 9 e 10, e la tabella 4) sono in ottimo accordo tra loro e pertanto possono considerarsi affidabili.
- III. L'allineamento dell'asse della nicchia A (coincidente con la retta che congiunge il centro del cancello al centro della nicchia esterna n° 8, vedi la fig. 5) pari a $237^{\circ}53'$ risulta preciso entro 0.2° rispetto alla direzione del tramonto al solstizio invernale nell'anno 1 d.C. ($238^{\circ}06'$). Ciò suggerisce che la nicchia A poteva contenere un traguardo (ovvero un mirino) per ottenere un effetto ottico al solstizio invernale se osservato dalla soglia di accesso al cubicolo della nicchia A. Abbiamo anticipato l'ipotesi che la nicchia contenesse la statua di Andromeda (fig. 12) oggi esposta nel Museo Archeologico Nazionale di Sperlonga. L'attendibilità di questa ipotesi deve essere valutata da ulteriori indagini e verifiche.
- IV. L'allineamento dell'asse della nicchia B è meno preciso degli altri allineamenti a causa della mancanza di una coppia di punti di riferimento e all'irregolarità delle pareti della stessa nicchia, ma è indicativamente (entro circa 5° di errore) orientato verso la direzione $299^{\circ}45'$ del tramonto sopra Sperlonga (ad una elevazione di 2.5°) nel giorno del solstizio estivo, come evidenziato in [1]. Gli autori si propongono di rilevare con il teodolite l'orientamento della parete di fondo della nicchia B al fine di poter definire con maggiore accuratezza l'orientamento della nicchia stessa e di rilevare la pianta della Grotta di Tiberio (usando un laser-scanner o laser stereo 3D) con una precisione migliore di quella oggi disponibile.

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano il Polo Museale del Lazio ed il Museo Archeologico Nazionale di Sperlonga, nelle persone della dott.ssa Edith Gabrielli e dott.ssa Cristiana Ruggini, per aver concesso il permesso all'esecuzione delle misure nell'Area Archeologica di Sperlonga descritte in questo Rapporto.

Referenze citate nel testo

- [1] M. De Franceschini, G. Veneziano: “*Archeoastronomia nella Villa di Tiberio a Sperlonga (Latina)*”, Atti del XXI Seminario di Archeoastronomia (ALSSA), Genova, 30-31 Marzo 2019.
- [2] S. Bollanti, D. De Meis, P. Di Lazzaro, A. Fastelli, F. Flora, G.P. Gallerano, L. Mezi, D. Murra, A. Torre, D. Vicca: “*Calcolo analitico della posizione del Sole per l’allineamento di impianti solari ed altre applicazioni*”, RT/2012/24/ENEA, ISSN/0393-3016.
http://opac22.bologna.enea.it/RT/2012/2012_24_ENEA.pdf
- [3] S. Bollanti, D. De Meis, P. Di Lazzaro, F. Flora, G.P. Gallerano, L. Mezi, D. Murra, A. Torre, D. Vicca: “*Electro-optical sun compass with a very high degree of accuracy*”, Optics Letters, vol. 40, pp. 3619-3622 (2015).
- [4] S. Bollanti, D. De Meis, P. Di Lazzaro, F. Flora, G.P. Gallerano, L. Mezi, D. Murra, A. Torre, D. Vicca: “*Performance of an electro-optical solar compass in partially obscured Sun conditions*”, Applied Optics, vol. 55, pp. 3126-3130 (2016).
- [5] F. Flora, S. Bollanti, D. De Meis, P. Di Lazzaro, G.P. Gallerano, L. Mezi, D. Murra, A. Torre, D. Vicca: “*Dalle Meridiane alla bussola solare*”, Memorie del XXI Seminario Nazionale di Gnomonica, pp. 83-89 (2017).
- [6] F. Flora, F. Andreoli, S. Bollanti, D. De Meis, P. Di Lazzaro, G.P. Gallerano, L. Mezi, D. Murra, L. Murra, D. Vicca, G. Vicoli: “*Bussola solare di alta precisione: un utile strumento per l’archeoastronomia*”, XXI Convegno Regionale Ligure di Archeoastronomia (ALSSA), Genova, 30-31 Marzo 2019, pp. 34-53.
- [7] S. Bollanti, F. Andreoli, L. Cafarella, D. De Meis, P. Di Lazzaro, D. Di Mauro, F. Flora, G.P. Gallerano, L. Mezi, D. Murra, L. Murra, D. Vicca, A. Zirizzotti: “*Accurate and low-cost ENEA solar compass for precision metrology of true azimuth: instrumental and smart versions*” Proc. SPIE vol. 11352 p. 1135216 (2020). <https://doi.org/10.1117/12.2555747>
- [8] F. Slavazzi: “*La Villa Imperiale di Sperlonga ed il Mare*”, Newsletter di Archeologia CISA, Vol. 6, pp. 99-109 (2015). Disponibile alla pagina:
https://air.unimi.it/retrieve/handle/2434/426492/663325/007_Slavazzi.pdf
- [9] B. Maschietto: “*Sperlonga riscopre il mito di Andromeda grazie all'intuizione dell' archeologa Marisa De' Spagnolis*”, articolo su Fondi Notizie del 15 Maggio 2019.
<http://www.fondinotizie.net/notizie/comunicati-stampa/6984/sperlonga-riscopre-il-mito-di-andromeda-grazie-allintuizione-dell-archeologa-marisa-de-spagnolis>).
- [10] B. Andreae: “*Sperlonga*”, enciclopedia dell’Arte Antica, Treccani, vol. VII, p. 439 e S 1970, p. 751 (1997). https://www.treccani.it/enciclopedia/sperlonga_%28Enciclopedia-dell%27-Arte-Antica%29/
- [11] R. Ling: “*Roman Painting*” (Cambridge University Press, 1991), pag. 114.

[12] H. Valladares: “*Painting, Poetry, and the Invention of Tenderness in the Early Roman Empire*” (Cambridge University Press, 2020) pag. 105 e seguenti.

[13] Imperium Romanum: *Villa Augusta (Boscotrecase - Campania)*.

<https://www.romanoimpero.com/2017/04/villa-augusta-boscotrecase-campania.html>

[14] Scritti di Erodoto relativi all’Etiopia in [https://it.wikipedia.org/wiki/Etiopia_\(mitologia_greca\)](https://it.wikipedia.org/wiki/Etiopia_(mitologia_greca))

[15] Storie del Cielo: Cassiopea. Disponibile alla pagina:

<https://www.storiedelcielo.it/index.php/22-13-costellazionicircumpolari/62-02-cassiopea-mito>

[16] Plinio Il Vecchio, “*Naturalis Historia*,” Libro 07, paragrafi 191-203. Disponibile alla pagina:

<https://www.perungiorno.it/plinio-il-vecchio-naturalis-historia-libro-09-paragrafi-01-28.html>

ENEA
Servizio Promozione e Comunicazione
www.enea.it

Stampa: Laboratorio Tecnografico ENEA - C.R. Frascati
febbraio 2021