



Telegramma da Cartagine. Per un'analisi integrata delle segnalazioni militari puniche

Claudio Vacanti

Unité de Recherche TrAme; Université de Picardie "Jules Verne" Amiens;
(UR UPJV 4284), Membre associé
mail: claudio.vacanti@gmail.com

1. I punti ciechi della *viewshed analysis*

Analizzare il campo visivo di vari siti servendosi degli applicativi disponibili in ambienti GIS ha aperto una nuova frontiera, che oggi non è più un semplice avamposto esplorativo, ma un territorio integrato nell'orizzonte delle pratiche analitiche. Paradossalmente, però, anche studi di riferimento in cui si discutono i principi della *viewshed analysis* in ambiente GIS, non forniscono valori specifici per l'ampiezza del campo visivo in condizioni normali¹. Anche saggi accurati propongono parametri di calibrazione generici². E modelli computazionali più avanzati, come quello applicato da Čučković allo studio dei castellieri dell'Istria, propongono soglie operative per l'intervisibilità tra siti che, pur fondati su osservazioni quantitative della distribuzione delle connessioni, non trovano supporto in una trattazione ottico-fisiologica esplicita³. In generale, nei modelli GIS il coefficiente di rifrazione atmosferica è impostato ad

Desidero ringraziare gli anonimi revisori della rivista che con i loro suggerimenti hanno migliorato questo lavoro. Giuseppe Nardiello mi ha dato un prezioso aiuto sull'intricata questione dei *Kestoi*. Giuseppe Lucido ha reso visibile ciò che per me era ancora oltre l'orizzonte. A entrambi va il mio sentito ringraziamento.

¹ Cfr. ad esempio Wheatley, Gillings (2002), 201-212, studio centrale per la *visibility analysis* archeologica, che analizza la visibilità come costruzione modellata (scala, risoluzione altimetrica, posizione dell'osservatore) e avverte contro l'uso oggettivo delle *viewshed*. Pur con solida impostazione teorica, non fornisce soglie numeriche né dati sull'ampiezza della visione "normale" utilizzabili come standard nei modelli GIS.

² Cfr. l'utilissimo studio di Mirto (2021) sull'assetto topografico dei siti militari del monte Erice (TP) e del territorio circostante, che ha analizzato il campo visivo mediante GIS, adottando come parametri un'altezza del punto di osservazione di 3 m e un raggio di 15 km, definito come ampiezza media in condizioni normali (Mirto 2021, 231 n. 81), benché tale media non risulti supportata da studi. Il riferimento citato, Wheatley, Gillings (2002), 210-212, non menziona i 15 km né nella pagina indicata né altrove nel volume.

³ Čučković (2015) sviluppa un modello di intervisibilità tra castellieri dell'Istria basato su un algoritmo che calcola la linea di vista su DEM, con altezza dell'osservatore fissata a 4 m. Analizza la rete a vari raggi (3-20 km), ritenendo 7,5 km soglia ottimale in base alla distribuzione empirica delle connessioni visibili, senza però fondarla su studi ottici o fisiologici: non discute i limiti visivi umani né considera curvatura terrestre o rifrazione atmosferica. L'unico riferimento operativo riguarda il suono dei tamburi, ipotizzato udibile oltre 5 km secondo

un valore, 0,13 adimensionale, per rappresentare condizioni standard di pressione e cielo limpido tra 40 e 100 metri di altitudine, benché esso, come vedremo meglio, possa variare anche sensibilmente a secondo delle condizioni atmosferiche locali⁴. In altri termini, rischiamo di conoscere cosa si vede da quale punto, senza sapere però da quale distanza.

Studi recenti hanno evidenziato come un approccio puramente matematico non sia sufficiente a determinare la reale portata della visibilità in ambito archeologico, richiedendo l'integrazione con modelli sperimentali e dati ambientali⁵. La mancanza di dati quantitativi sulla visibilità è ancor più frustrante quando si tratta di segnalazioni ottiche nel mondo antico, come risulta da una panoramica degli studi sul tema. Gli studi pionieristici di D. J. Woolliscroft sul *limes* britannico non ci forniscono ad esempio un quadro che possa essere usato in altri contesti: i suoi esperimenti sul Vallo di Adriano, che teorizzano segnali notturni da 25,74 km a 51 km di notte, mancano di riferimenti quantitativi diretti sui lumen emessi da falò e torce e fanno in realtà riferimento a modelli teorici di visibilità legati alla topografia⁶. Allo stesso modo, il lavoro di Parker sul *limes Arabicus*, che fa riferimento ad una visibilità di 10 km di segnali notturni e a risultati non 'soddisfacenti' ottenuti con fumo di giorno, non offre, in effetti, una base scientifica solida per sviluppi successivi⁷.

La mancanza di dati quantitativi sulla potenza luminosa delle torce rende solo parzialmente efficace anche un contributo altrimenti significativo come quello di P. Southern, che descrive l'uso di segnali luminosi lungo le frontiere romane per avvertire di minacce imminenti, senza tuttavia fornire alcuna stima sulla reale intensità del segnale⁸. Considerazioni analoghe

Finnegan (2012), 470 che cita Carrington (1949), 25 sul dato aneddotico di 3-7 miglia (4,8-11,2 km), privo però di verifica fisica o meteorologica. Anche Saunala, Leppänen (2023), per l'arcipelago di Turku, propone soglie operative (20,6 km per oggetti di 6 m) basate sulla risoluzione angolare e su modelli GIS a raggio fisso (20 km), usando però parametri standard (altezza 1,6 m; $k = 0,13$) non discussi né integrati con variabili ottico-atmosferiche; gli esperimenti sulla visibilità del fumo a 17 km non risultano documentati né replicabili.

⁴ Cfr. Mauro, Durastante (2022), 24 con n. 5. Nel nostro modello adotteremo perciò $k = 0,13$ come valore medio di riferimento, traducendolo nei calcoli in un raggio terrestre effettivo $R' = R/(1 - k)$; la variabilità reale delle condizioni atmosferiche non verrà attribuita a k , ma al coefficiente di estinzione β_{ext} , che sarà calibrato in seguito su dati sperimentali specifici per l'area di studio. Cfr. *infra* § 3.1.

⁵ Cerezo Andreo et al. (2016) analizzano la visibilità marittima nell'antichità confrontando modelli matematici, analisi GIS e test sperimentali, e mostrano come i calcoli geometrici, da soli, non siano sufficienti a stimare la portata effettiva della visibilità, che dipende anche da fattori atmosferici come la qualità dell'aria e la presenza di aerosol. Il nostro approccio terrà conto di queste variabili, integrando ai modelli teorici dati sperimentali sulla visibilità atmosferica e sull'estinzione ottica, al fine di ottenere una stima più aderente alle condizioni operative reali.

⁶ Woolliscroft (2001), 35, utilizza infatti, per sua stessa ammissione, un metodo indiretto: dall'esperimento condotto con una lampadina da 6 v, visibile a 3,22 km in una *slightly hazy night*, e calcolando la luce proveniente da una torcia di 15 cm avvolta da fasce di cotone come 64 volte più luminosa, applica la legge del quadrato inverso, e ritiene che questa sarebbe stata visibile 8 volte di più, ossia 25,74 km, che in una notte chiara potrebbe essere secondo lui raddoppiata con torce più grandi fino ad un massimo di 51 km. Lo studioso si limita poi a constatare che durante il giorno la fiamma o altri modi di segnalazione senza fiamme sarebbero stati meno visibili, mentre le fumate sarebbero state più precise benché nessun esperimento sia stata da lui condotto su di esse.

⁷ Parker (1986), 83-84 ha calcolato sperimentalmente la visibilità di una torcia a 10 km, senza dare ulteriori dettagli, e sostiene che se durante il giorno per il fumo i risultati non erano 'soddisfacenti', l'uso di specchi riusciva a segnalare fino a 5 km.

⁸ Southern (1990) evidenzia come tali segnali fossero limitati da problemi tecnici di trasmissione, legati alle condizioni atmosferiche e alla morfologia del terreno, che ne compromettevano l'efficacia; osserva come i Romani preferissero spesso messaggeri o segnali acustici, più affidabili a distanza. Discute la difficoltà di trasmettere messaggi complessi e la vulnerabilità dei segnali ottici, ma non fornisce dati sull'intensità luminosa. Come vedremo più avanti, alla nota 132, egli esamina anche la funzione dei segnali luminosi sulle frontiere romane, inclusi i cumuli di legno e covoni di paglia raffigurati sulla Colonna Traiana, la cui reale utilità resta incerta.

per il contributo di Y. Seidel, che descrive il modo in cui torce e fiamme fossero usate per trasmettere messaggi durante le guerre antiche senza fornire però dati quantitativi precisi, né sulla luminosità delle torce, né sulla visibilità a lunga distanza⁹. Allo stesso modo, uno studio come quello di O. Borowski et al., che esplora l'uso di segnali luminosi nel Regno di Giuda e descrive la comunicazione visiva tra siti fortificati tramite segnali di fuoco, non fornisce dati quantitativi sulla luminosità delle torce né informazioni sulla distanza effettiva di visibilità dei segnali pur analizzando il ruolo strategico di questa rete di segnalazione per la difesa territoriale e i limiti dovuti alla topografia¹⁰.

La medesima mancanza di dati riutilizzabili in altri contesti si nota in studi altrimenti molto precisi come quello di M. Zamora Merchán¹¹ e di B. Giardina¹², che offrono interessanti analisi sulla visibilità dei fari antichi, stimando distanze fino a 39-43 km per fari alti tra 20 e 40 metri, ma senza fornire dati diretti sulla potenza luminosa delle torce, rendendo le informazioni non applicabili per le segnalazioni ottiche. Lo stesso limite si riscontra in due diversi contributi di J. Christiansen sulle torri costiere utilizzate per la navigazione e la segnalazione, dove si mette in evidenza il loro ruolo strategico nella sicurezza marittima: nel primo, egli analizza le strutture di segnalazione marittima più generali, come fari, balise e torri a fuoco¹³, nel secondo si concentra sulla segnalazione nei porti, esaminando il posizionamento di torri e fanali per facilitare l'ingresso delle navi¹⁴. Tuttavia, nessuno dei due lavori fornisce dati quantitativi sulla grandezza o sull'intensità luminosa delle torce, rendendoli meno applicabili a un'analisi sulla visibilità dei segnali ottici a lunga distanza.

Un quadro per certi versi analogo, ma di segno diverso, si ritrova nello studio di W. Beers, che raccoglie fonti etnografiche e storiche sulle segnalazioni ottiche dei nativi nordamericani: i dati riportati, pur impressionanti per portata e velocità di trasmissione, rimangono tuttavia testimonianze qualitative, prive di parametri fisici riutilizzabili, e dunque di interesse soprat-

⁹ Seidel (2009) analizza l'uso della luce artificiale in ambito pubblico, domestico e militare, mostrando come le fonti luminose avessero funzioni sia pratiche sia simboliche. Lo studio presenta un dossier di fonti antiche e approfondisce la struttura e il ruolo dei segnali luminosi nelle guerre, senza però fornire misurazioni quantitative sulla luminosità.

¹⁰ Borowski et al. (1998) analizzano la comunicazione visiva nel Regno di Giuda tramite segnali di fuoco, studiando l'intervisibilità tra siti fortificati sulla base di dati topografici. Tra le fonti discusse vi è la Lachish Letter IV, un *ostrakon* in ebraico antico del VI sec. a.C. da Tell ed-Duweir, che riferisce l'impossibilità di vedere i segnali da Azekah, forse per ostacoli naturali. Gli autori ipotizzano che in alcuni casi i segnali avessero funzione simbolica più che comunicativa e menzionano test sperimentali mai effettuati.

¹¹ Zamora Merchán (2011-2012) analizza la visibilità dei fari romani, concentrandosi su Brigantium e sul possibile faro della Campa Torres, e calcola con strumenti GIS una visibilità fino a 39 km per un'altezza di 20 m e 43 km per 40 m, tenendo conto anche della topografia e dell'estinzione atmosferica, senza però fornire dati sulla potenza luminosa delle fonti.

¹² Giardina (2010) analizza la portata luminosa dei fari antichi, concentrandosi sul faro di Alessandria, la cui luce sarebbe stata visibile, secondo l'autore, fino a 48 km, con una visibilità effettiva stimata attorno ai 20 km. Esamina anche l'uso di specchi ustori per amplificare la luce e il ruolo delle torri-faro puniche, come quella di Nora in Sardegna, senza però fornire misurazioni dirette della potenza delle fiamme né dati quantitativi sui lumen emessi.

¹³ Christiansen (2014) analizza il ruolo delle torri di segnalazione nel controllo del traffico marittimo e nella sicurezza della navigazione, evidenziandone la distribuzione lungo le rotte principali e la continuità d'uso dalla tarda età del ferro all'epoca romana, senza però fornire misurazioni sulla luminosità o sull'intensità visiva delle fonti di luce utilizzate.

¹⁴ Christiansen (2021) esamina le tecnologie di segnalazione nei porti antichi, concentrandosi sul ruolo delle torri costiere e dei fanali nell'assistenza all'avvicinamento e all'ingresso delle navi. Lo studio ricostruisce i sistemi portuali attraverso fonti e dati archeologici, sottolineando la relazione tra l'ubicazione dei segnali e le rotte di accesso, ma senza fornire dati quantitativi sulla potenza o visibilità dei fanali in diverse condizioni atmosferiche.

tutto comparativo¹⁵. Tra gli studi a me noti, l'unico che fornisce dati misurabili è in effetti quello di I. Moullou e F. V. Topalis, che, come vedremo meglio, dà il valore in lumen di varie ricostruzioni sperimentali basate sulle fonti antiche, senza occuparsi tuttavia, perché esula dai suoi scopi, della modalità di segnalazioni ottiche¹⁶.

Manca dunque, almeno a nostro parere, uno studio complessivo sulle segnalazioni ottiche nel mondo antico che riunisca le informazioni fornite dalle fonti letterarie e le metta in relazione sia con le ricostruzioni archeologiche sia con le nostre conoscenze delle leggi della fisica¹⁷. Nato inizialmente dall'esigenza di verificare la visibilità di truppe e navi durante gli ultimi anni della Prima guerra punica per una monografia in preparazione, questo lavoro non pretende di colmare questo vuoto. Esso ha lo scopo specifico di fornire un quadro ricostruttivo operativo delle segnalazioni militari puniche che possa, allo stesso tempo, avviare una riflessione metodologica sul tema della visibilità e delle trasmissioni nel mondo antico. Oltre alla necessità di considerare un raggio di visibilità variabile in base all'altitudine di un sito e alle specifiche condizioni atmosferiche locali, infatti, il problema centrale di un sistema di segnalazione ottica è la concreta possibilità di stabilire un'intervisibilità utile allo scambio di segnali attestati dalle fonti. Questo implica non solo la mera connessione visiva tra due postazioni, ma la compatibilità reale tra la distanza, il tipo di segnale impiegato (luminoso o fumogeno) e le condizioni ambientali e operative del contesto.

In mancanza di parametri condivisi o di test sistematici, le ricostruzioni restano naturalmente ipotesi, più o meno plausibili: da qui la necessità di un approccio integrato, che metta in relazione l'evidenza delle fonti, la documentazione archeologica e le variabili fisiche, per valutare se, come e quando una segnalazione potesse risultare realmente efficace nel contesto operativo delle comunicazioni militari puniche. Cominceremo allora dalla testimonianza delle fonti storiografiche e archeologiche.

2. Fuoco e fumo nell'antichità: fonti scritte e archeologiche

Il sistema di segnalazione più semplice, di cui abbiamo varie testimonianze per il mondo antico sia nelle fonti scritte sia archeologicamente, era quello di fuochi e fumate. Tra le testimonianze delle fonti scritte¹⁸, alcune sono particolarmente rilevanti per l'ambito punico. Plinio ci informa delle *turres Hannibalis*, un sistema di torri semaforiche attribuito ad Annibale Barca nella Baetica¹⁹, che trova un riscontro in una testimonianza liviana relativa al 217 a.C. in cui viene descritto l'uso di torri di vedetta – *speculae* – in Spagna per segnalare l'avvistamento della flotta romana di Gneo Scipione ad Asdrubale, anticipando così il pericolo²⁰, e in una relativa al 204 a.C., quando in previsione dello sbarco di Scipione in Africa,

¹⁵ Beers (2014) documenta, tra gli altri casi, reti di segnalazione Yokuts in California capaci di trasmettere messaggi per circa 400 km in meno di quattro ore; segnalazioni di fumo visibili per oltre 200 km nel Nuovo Messico; e colonne alte circa 300 metri presso gli Yavapai, con comunicazioni spinte fino a 300 miglia in due ore.

¹⁶ Moullou, Topalis (2017).

¹⁷ Per una ricostruzione di insieme, di taglio generale ma attenta alla lunga durata delle comunicazioni a distanza (segnali visivi, acustici, telegrafici), con cenni ai fani, alle torri costiere e alle catene di segnalazione, si veda Lo Cascio (2001), che tuttavia non affronta in termini fisico-quantitativi la portata di visibilità dei fuochi.

¹⁸ Il dossier più completo è quello di Woolliscroft (2001), 159-171, nel quale però non viene riportato né il testo originale né l'edizione da cui esso viene tratto, ma solo una traduzione inglese, il che purtroppo rende difficile l'individuazione di alcuni passi: un esempio è un passo attribuito al settimo libro dei *Kestoi* di Giulio Africano ma non accolto come tale nelle edizioni critiche, per il quale cfr. *infra*. Testimonianze sulle segnalazioni, anche archeologiche, in Seidel (2009), 165-193.

¹⁹ Plin. *HN* 2.181 e 35.169.

²⁰ Liv. 22.19.6-7.

i Cartaginesi, consapevoli della minaccia imminente, posizionarono postazioni di vedetta su ogni promontorio per monitorare l'eventuale sbarco romano²¹. Per quanto relativo ad una guerra condotta da Roma due generazioni dopo, credo sia rilevante riferire quanto sappiamo da Appiano relativamente all'assedio di Numanzia, quando Scipione Emiliano fece costruire sette fortificazioni con fossati e difese attorno alla città, che fungevano da basi operative per il controllo dell'assedio: il messaggio – una veste rossa issata su una lancia di giorno, fuochi di notte – veniva alzato dalla prima torre colpita e subito ripetuto dalle altre²².

Ancor più significativo, credo, è una testimonianza relativa ad un altro territorio dominato dai Cartaginesi, la Sicilia. Cicerone fa infatti cenno ad un sistema di allerta che prevedeva l'accensione di fuochi sulle torri di avvistamento o sulle alture per segnalare l'arrivo dei pirati, come egli stesso riferisce a proposito della distruzione della flotta romana presso Siracusa ad opera dei pirati sotto il governatorato di Verre – in quella circostanza, l'incendio delle navi divenne esso stesso il segnale visibile del pericolo già consumato e di quello ancora incombenente²³.

Oltre alle segnalazioni con fuochi semplici – per le quali è stato ipotizzato, in età imperiale, l'uso di torri lungo il *limes* danubiano, britannico e arabo di età imperiale²⁴ – un altro metodo di segnalazione di cui abbiamo notizia dalle fonti è quello del semaforo ottico a barre, un principio simile al celebre telegrafo inventato dai fratelli Chappe nel XVIII secolo in Francia. A parlarne nel mondo antico è però il solo Vegezio²⁵, e non abbiamo tracce di un suo uso nelle fonti, benché si sia tentato di farne una ricostruzione convincente per quanto sulla base di una sua supposta illustrazione nella colonna traiana²⁶.

Un principio simile è quello delle torce mobili descritto con dovizia da Polibio²⁷, che ne attribuisce l'invenzione a Cleosseno e Democleito e descrive una sua versione modificata. Il metodo originario prevedeva l'uso di due serie di torce per indicare la posizione di un messaggio predefinito all'interno di una tavola a doppia entrata: la prima serie segnalava la colonna, la seconda la riga. Polibio sostiene di aver perfezionato il sistema, sostituendo i messaggi fissi con le lettere dell'alfabeto: l'alfabeto viene diviso in cinque gruppi di cinque lettere, e chi trasmette solleva un certo numero di torce a sinistra per indicare il gruppo e un altro numero a destra per specificare la lettera dentro quel gruppo. Questo sistema, pur esigendo più segnali

²¹ Liv. 29.23. Sul tema cfr. Moret (2010), 9–10 e 12–15, che ritiene infondata l'identificazione di queste torri con installazioni militari cartaginesi, basata a suo avviso su una lettura errata dei due passi di Plinio. Secondo Moret, la cronologia sarebbe generalmente romana e le funzioni delle torri – economiche, architettoniche e difensive – troppo intrecciate per consentire un'attribuzione esclusiva. Lo studio non prende tuttavia in considerazione i due passi liviani.

²² App. *Hisp.* 15.90–92. Il perimetro di Numanzia era, secondo Appiano, di 24 stadi ($\approx$ 4,44 km), mentre il vallo romano lo circondava per oltre il doppio, circa 9,25 km. Se le sette fortificazioni erano distribuite lungo questo perimetro, la distanza media era di circa 1,32 km, compatibile con un loro impiego come nodi intermedi nella trasmissione del segnale. Il sistema di segnalazione ottica si basava però su torri minori, disposte ogni 30 metri lungo il vallo, che garantivano la trasmissione immediata degli allarmi, benché sia plausibile che anche le sette fortificazioni, distanti circa 1,3 km l'una dall'altra, fungessero da punti di rilancio, migliorando il coordinamento generale.

²³ Cic. *Verr.* 2.5.93. L'esistenza di un circuito di segnalazione punica per tutta la Sicilia occidentale è stata ipotizzata, sulla base di grandi fosse scavate nella roccia in alcuni luoghi 'chiave' che avrebbero potuto contenere combustibile per produrre fuochi e fumate: cfr. Pottino (1976), coi limiti però evidenziati da Medas (2000), 23, e su cui Vacanti (2012), 146–147.

²⁴ Cfr. Rossi et al. (2009), 197–199; Parker (1986); Woolliscroft (2001).

²⁵ Veg. *Mil.* 3.5.30 ne parla a proposito dei σημειόφοροι.

²⁶ Rossi et al. (2009), 193–197.

²⁷ Polyb. 10.45.6–47.4

e grande attenzione da parte degli operatori, permetteva di comporre liberamente qualsiasi messaggio alfabetico, superando il limite dei metodi basati su frasi prestabilite. A tale sistema, per altro, fa riferimento un passo, attribuito al settimo dei *Kestoi* di Giulio Africano ma oggi considerato spurio, che ne accordava l'uso ai Romani, senza specificare meglio da quale epoca²⁸. Il metodo prevedeva l'uso di tre fuochi disposti rispettivamente a sinistra, al centro e a destra, ciascuno dei quali corrispondeva a un gruppo di lettere dell'alfabeto: i segnali venivano dati alzando un certo numero di torce per indicare la lettera desiderata: uno, due o tre fuochi innalzati sul lato destro corrispondevano rispettivamente a rho, sigma e tau; allo stesso modo, il fuoco di sinistra serviva per le lettere alfa, beta e gamma, e così via²⁹.

Vi era però un'altra modalità di segnalazione che per il nostro caso, come vedremo, è assai più significativa. Essa permetteva la trasmissione di un numero di messaggi anche maggiore, per quanto predeterminati, attraverso però un solo segnale di fuoco. Si tratta di un sistema telegrafico ad acqua sincrono descritto da Filone³⁰, da Polibio, che cita Enea 'Tattico'³¹, e da Polieno³², il quale ne attribuisce l'uso, per le comunicazioni tra la Sicilia e Cartagine, proprio ai Cartaginesi, sia pure con una variante. Esso consisteva nel metter in comunicazione due recipienti identici con un'asta galleggiante graduata sui cui erano riportati messaggi predefiniti: dopo un segnale visivo iniziale (ad esempio una torcia sollevata), entrambi gli operatori aprivano le valvole, permettendo all'acqua di defluire. L'asta scendeva e, al raggiungimento del messaggio desiderato, il trasmettitore abbassava la torcia per indicare la chiusura della valvola al ricevente. La variante descritta da Polieno, e attribuita ai Cartaginesi, eliminava l'asta e riportava i messaggi direttamente incisi sulle pareti interne del recipiente. In entrambi i casi, il sistema funzionava solo se le due stazioni erano perfettamente sincronizzate e a vista³³. In tal modo potevano essere trasmessi un certo numero di messaggi precostituiti – forse anche 24 secondo Woolliscroft, che ipotizza, senza però testimonianze nelle fonti, che potessero essere trasmesse dunque anche singole lettere dell'alfabeto sia pure in modo assai lento³⁴.

Un altro sistema di cui abbiamo tracce archeologiche, ma nel pressoché totale silenzio delle fonti scritte, è quello dei piccioni viaggiatori, ipotizzato sulla base di alcuni reperti, tra

²⁸ Il passo si trova nell'edizione di Thévenot (1693) e di Meursius (1746), nel capitolo περὶ πυρσῶν οὗ, dunque il 77, ma non è stato accolto né nell'edizione di Vieillefond (1970) né in quella di Wallraff et al. (2012). Gli editori di quest'ultima osservano infatti che i frammenti del settimo libro dei *Kestoi*, compreso questo relativo ai segnali, sono pervenuti per il tramite di raccolte militari bizantine, come la *Sylloge Tacticorum* (X secolo), l'*Apparatus Bellicus*, e i *Taktika* di Niceforo Uranos (XI secolo): cfr. Wallraff et al. (2012), XLVIII–XLIX. Seidel (2009), 179, a proposito di questo passo, rinvia a Forbes (1958), 176, ma quest'ultimo non offre il testo, solo una parafrasi moderna. Per il contesto della tradizione del settimo *Kestos* all'interno delle raccolte bizantine di tecnica militare, e la dipendenza del materiale tramandato da fonti più antiche, cfr. Mecella (2009), 114–115. Sul possibile legame fra il sistema di segnalazione attribuito da Africano e la divisione dell'alfabeto runico del fupark in tre gruppi (ættir), è da vedere Dahm (2011), 3–5, che però non discute dell'effettiva attribuzione ad Africano e si limita a citare il testo riportato nell'appendice di Woolliscroft (2001), 168, che, a sua volta, riporta solo una traduzione inglese del testo attribuita a J. P. Wild.

²⁹ Cfr. Thévenot (1693), 315, col. 1, r. 40–49 – col. 2, r. 1–23 e von Meurs (1746), col. 978 B–979 C. Cfr. Woolliscroft (2001), 168. Per un tentativo recente di stimare sperimentalmente la velocità di trasmissione del sistema descritto da Polibio si veda ora Kulikova (2024).

³⁰ Philo Mechanicus *Parasceuastica et poliorcetica* p. 90 ed. Thévenot (= B, 55–57 Whitehead).

³¹ Polyb. 10.44.1–45.2. Lo storico di Megalopoli dedica un intero *excursus* (Polyb. 10.43–47) ai segnali.

³² Polyæn. *Strat.* 6.16.2.

³³ Cfr. le differenti ricostruzioni in Woolliscroft (2001), 31–35; Rossi (2009), 202–204.

³⁴ Polieno elenca 9 messaggi, ma è piuttosto generico; dalla descrizione fatta da Polibio, Woolliscroft (2001), 34–35 calcola 22 messaggi che a suo parere potrebbero essere portati a 24 e dunque usare tutte le lettere dell'alfabeto, anche se con molto lentezza: secondo i suoi calcoli, ci vogliono minuti per la parola 'help'.

cui piccole torri e strutture interpretate come colombaie in contesti militari³⁵ – l'unico riferimento in Frontino, in cui si parla di un piccione usato a scopo di comunicazione da Irzio durante l'assedio di Mutina nel 43 a.C.³⁶

La mancanza di testimonianze specifiche per l'uso di quest'ultimo da parte cartaginese, ci spinge a prendere in considerazione per la nostra ricostruzione solo i sistemi di segnalazione ottica con fuochi/fumate. In effetti, le fonti scritte sono generalmente più ricche di informazioni riguardo ai segnali di fuoco, utilizzati prevalentemente di notte. La testimonianza di Filone sul telegrafo ad acqua si riferisce esplicitamente a fuochi (πυρσεῖαι) inviati durante la notte³⁷, come quella di Polibio che menziona fuochi (πυρσοί), benché senza precisare esplicitamente l'orario notturno³⁸.

Possediamo comunque testimonianze esplicite sull'uso del fumo, soprattutto in ambito romano. Esse suggeriscono implicitamente che i segnali di fumo fossero operativi anche a distanze superiori a 1 km. Curzio Rufo, ad esempio, attesta un sistema di segnalazione impiegato da Alessandro Magno durante la campagna asiatica, quando il suono della tuba non era sufficiente a causa del frastuono del campo: per ovviare al problema, fu innalzata un'asta ben visibile, con segnali distinti: fumo di giorno e fuoco di notte³⁹. Appiano riferisce l'uso del fumo da parte di Silla per coordinare un attacco durante la guerra civile⁴⁰ e Cesare menziona segnali di fumo tra le sue fortificazioni per segnalare attacchi nemici⁴¹. Frontino riporta l'abitudine degli Arabi che interrompevano deliberatamente i segnali di fumo per ingannare il nemico in avvicinamento, facendo presumere una visibilità efficace a distanze rilevanti⁴². Analogamente, Vegezio raccomanda esplicitamente segnali di fumo per comunicazioni rapide tra sezioni dell'esercito⁴³ e Maurizio nello *Strategikon* fa riferimento a segnali di fumo da posizioni elevate per preannunciare l'arrivo di truppe nemiche⁴⁴.

Fra i diversi dispositivi ottici ricordati dalla tradizione tecnica, l'unico a essere descritto con una certa precisione strutturale all'interno di un contesto esplicitamente cartaginese è tuttavia il telegrafo ad acqua, attestato, come visto, da Filone, Polibio e Polieno. A corroborare la notizia, come vedremo meglio, concorrono due indizi: da un lato, un cippo votivo trovato a Cartagine, che qualcuno ha interpretato come possibile basamento di una torre

³⁵ Cfr. Rossi et al. (2009), 191-192, secondo i quali tali strutture, in particolare quelle rinvenute lungo i confini fortificati, sarebbero state destinate a mantenere e allevare piccioni addestrati per il trasporto di messaggi, cosa che avrebbe permesso comunicazioni rapide tra i diversi avamposti, specialmente in caso di emergenze, garantendo un sistema informativo indipendente rispetto ai segnali ottici e agli inviati a cavallo.

³⁶ Front. *Str.* 3.13.8.

³⁷ Philo Mechanicus *Parasceuastica et poliorcetica* p. 90 ed. Thévenot (= B, 55-57 Whitehead).

³⁸ Polyb. 10.43-47.

³⁹ Curt. 5.2.7.7 spiega come, poiché il segnale acustico era spesso coperto dal rumore dell'accampamento, Alessandro fece installare un'asta in posizione elevata, sulla quale veniva esposto un segnale visivo (*fumus interdiu e ignis noctu*), garantendo così la comunicazione con tutto l'esercito.

⁴⁰ App. *B Civ* 1.6.51 narra che Silla, dopo aver ordinato ai suoi uomini di occupare una delle fortezze sulle pendici della città di Boviano, attende nella pianura il segnale di fumo che annuncia l'avvenuta conquista. Sebbene il testo non specifichi la distanza esatta, il fatto che il segnale fosse atteso dalla pianura suggerisce una visibilità significativa, probabilmente superiore a 1 km.

⁴¹ Caes. *BCiv.* 3.65: anche qui, benché manchi una quantificazione precisa delle distanze, il contesto militare e la disposizione tattica delle fortificazioni suggeriscono la necessità di una visibilità superiore a 1 km.

⁴² Cfr. Front. *Str.* 2.5.16, la cui descrizione implica che la visibilità dei segnali di fumo fosse tale da permettere ai nemici di notarli a distanza considerevole.

⁴³ Veg. *Mil.* 3.5.25 indica esplicitamente la necessità operativa di segnali visibili a distanze considerevoli per consentire interventi tempestivi tra reparti dispersi sul campo di battaglia.

⁴⁴ Maur. *Strategikon* 7.2.10: pur senza distanze esplicite, sembra suggerire che la finalità militare dei segnali implica la visibilità ben oltre poche centinaia di metri.

semaforica⁴⁵; dall'altro, l'episodio tramandato da Polibio relativo all'assedio di Agrigento del 262 a.C., in cui Annone e Annibale di Giscone risultano protagonisti di uno scambio di istruzioni complesse a distanza⁴⁶.

Per determinare il quadro operativo e la reale efficacia di una rete di comunicazione ottica nei teatri di guerra punici sia in ambito terrestre sia in ambito navale, occorre allora un'analisi rigorosa delle condizioni di visibilità: attraverso modelli fisici calibrati verranno allora definite le soglie di percezione per differenti tipologie di segnale: fuochi durante la notte, colonne di fumo durante il giorno, emissioni luminose complesse con torce.

3.1. Modelli fisici I: limiti e soglie della visibilità geometrica

Utilizzabile di giorno e di notte, un sistema di segnalazione con fuoco o fumate sarebbe stato potenzialmente visibile anche a grandi distanze. Woolliscroft cita l'esperimento del *U.S. Coast and Geodetic Survey* che, a fine '800, in notti chiare e ponendo i fuochi nelle cime di alte montagne, aveva misurato una visibilità di 160-200 miglia⁴⁷. Al di là di record per il Guinness dei primati, ciò che contava, in un contesto militare operativo, era però la rapidità e affidabilità del sistema. I valori numerici che seguiranno sono quindi da ritenere stime prudenziali, ricavate da modelli teorici semplificati: servono a individuare ordini di grandezza compatibili con la realtà, non soglie fisse di funzionamento⁴⁸. Cominceremo con ciò che la scienza ci dice sulla visibilità in base all'altezza di osservatore e osservato e alle condizioni meteorologiche caratteristiche della zona. Altezze e distanze saranno espresse in metri (m). I risultati finali verranno convertiti in chilometri (km) per facilitarne la lettura, ove necessario.

La visibilità teorica è influenzata non solo dalla curvatura terrestre, ma anche dal coefficiente di rifrazione atmosferica, che tiene conto della deviazione dei raggi luminosi nell'atmosfera causata dalla variazione della densità dell'aria. Esso corregge la curvatura terrestre apparente, facendo apparire il raggio terrestre maggiore del valore reale. Hunter ha evidenziato come il coefficiente di rifrazione atmosferica, spesso considerato costante, in realtà vari significativamente con l'altitudine e le condizioni atmosferiche⁴⁹. Questa variabilità rende necessario adattare il coefficiente alle specifiche condizioni locali, anziché utilizzare un valore medio fisso. Tuttavia, nei modelli geodetici si assume spesso un valore medio per k , sebbene non esista un consenso univoco sul suo valore numerico esatto⁵⁰. Nel presente studio adotteremo quindi $k = 0,13$ come valore medio operativo, traducendolo nel raggio terrestre apparente

⁴⁵ Demerliac, Meirat (1983) e su cui *infra*.

⁴⁶ Polyb. 1.19.5-7.

⁴⁷ Woolliscroft (2001), 22.

⁴⁸ Studi classici sull'avvistamento di incendi boschivi, come Byram, Jemison (1948), propongono ad esempio di abbattere del 30 % la distanza teorica di visibilità. Il correttivo nasce però per fiamme alte 3-5 m osservate di giorno, con coefficienti di estinzione almeno dieci volte maggiori ($\beta_{\text{ext}} \approx 0,002-0,004 \text{ m}^{-1}$) rispetto a quelli – molto più bassi – impiegati qui ($\beta_{\text{ext}} \approx 1,3 * 10^{-4} \text{ m}^{-1}$) e per sorgenti luminose ben più intense. Applicarlo alle torce da 10-25 cd e al regime notturno di questo studio introdurrebbe un abbattimento arbitrario e fuori contesto; pertanto il “-30 %” non verrà adottato nelle nostre stime operative. Al contrario, per i pennacchi di fumo i modelli fisici (soglia angolare, contrasto, T_p) tendono a sottostimare la portata a causa della trasparenza ottica, mentre i dati sperimentali mostrano visibilità anche maggiore: cfr. Lewandowski et al. (2019) e *infra*.

⁴⁹ Hunter (1913), 65-79.

⁵⁰ Studi sulla rifrazione atmosferica mostrano come k vari con l'altitudine, ed è massimo negli strati più bassi dell'atmosfera mentre si riduce progressivamente con la quota: cfr. Garfinkel (1967); Vaníček, Krakiwsky (1986), 151-160. In presenza di inversioni termiche o gradienti orizzontali, tuttavia, il coefficiente può aumentare localmente anche del 10-15%, determinando un'estensione significativa della portata visiva reale.

$R' = R/(1 - k)$, mentre la variabilità delle condizioni atmosferiche verrà trattata attraverso il coefficiente di estinzione β_{ext} .

Una formulazione approssimata di tale relazione è data da:

$$d = \sqrt{2 * R' * h_1} + \sqrt{2 * R' * h_2}, \text{ con } R' = R / (1 - k)$$

dove d è la distanza massima teorica di visibilità tra due punti (in m); R è il raggio terrestre medio (6.371.000 m); h_1 è l'altezza dell'osservatore rispetto al livello del mare (m); h_2 è l'altezza dell'oggetto osservato rispetto al livello del mare (m); k è il coefficiente di rifrazione atmosferica (variabile, come abbiamo visto); R' è il raggio terrestre apparente, corretto per la rifrazione atmosferica⁵¹.

La formula approssimata per la visibilità geometrica, che tiene conto della curvatura terrestre e della rifrazione atmosferica, e permette di calcolare la visibilità di un oggetto in base all'altezza dello stesso e dell'osservatore, non tiene però conto della visibilità atmosferica in funzione dell'estinzione ottica degli aerosol, che invece è stata calcolata da Koschmieder⁵², tramite un'equazione che stima la visibilità atmosferica in funzione del contrasto soglia e del coefficiente di estinzione ottica:

$$d = \ln(C_o / C_{\text{min}}) / \beta_{\text{ext}}$$

dove d è la distanza massima di visibilità (in m), ossia la distanza oltre la quale un oggetto non è più distinguibile dallo sfondo; C_o è il contrasto iniziale (tipicamente $\approx 0,8$), e C_{min} è il contrasto soglia minimo percepibile dall'osservatore (tipicamente pari a $0,02$). Il rapporto C_o/C_{min} è dunque generalmente assunto pari a 40 , e quindi $\ln(40) \approx 3,6889$. β_{ext} è il coefficiente di estinzione atmosferica (in m^{-1}), che misura l'effetto delle particelle sospese nell'aria, come gli aerosol o le polveri. Più alto è questo coefficiente, minore sarà la visibilità⁵³.

Un altro parametro importante da considerare per determinare la visibilità di un oggetto a distanza è θ_{min} , che rappresenta l'angolo minimo di risoluzione dell'occhio umano, ovvero l'angolo sotto il quale l'occhio riesce a distinguere due oggetti separati⁵⁴. Questo valore è tipicamente di circa 1 arcminuto ($0,00029$ radianti) e determina la distanza massima alla quale un oggetto è visibile attraverso la relazione:

⁵¹ La distanza d risultante da questa formula è espressa in metri (m). In alternativa, se si preferisce lavorare direttamente in chilometri (km), si può usare la formula empirica semplificata $d \approx 3,57 * (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})$, con h_1 e h_2 in metri. La formula è valida solo in assenza di rifrazione atmosferica, cioè per $k = 0$, e rappresenta quindi un caso limite. In condizioni atmosferiche realistiche ($k \approx 0,13$), il coefficiente corretto è $3,83$, corrispondente a $R' = R / (1 - k) \approx 7.323.000$ m. Per $h > 1.000$ m, l'errore introdotto dalla formula approssimata può superare l'1%, con una sottostima crescente della distanza geometrica effettiva rispetto al modello con R' .

⁵² Cfr. Koschmieder (1925), la cui legge stabilisce la relazione tra la distanza di visibilità e il coefficiente di estinzione ottica: $d = \ln(C_o / C_{\text{min}}) / \beta_{\text{ext}}$, dove d è la distanza massima di visibilità (in metri), β_{ext} è il coefficiente di estinzione ottica, C_o il contrasto iniziale dell'oggetto e C_{min} il contrasto minimo percepibile dall'osservatore. Su di essa cfr. Middleton 1952: 61-64.

⁵³ Cfr. Mauro, Durastante (2022), 28-29. Nella formula originale di Koschmieder, la visibilità atmosferica si calcola utilizzando il rapporto tra il contrasto iniziale (C_o , generalmente pari a circa $0,8$) e il contrasto minimo percepibile (C_{min} , generalmente fissato a $0,02$). Il rapporto C_o/C_{min} è dunque tipicamente assunto pari a 40 , per cui $\ln(C_o/C_{\text{min}}) \approx 3,6889$. V_{con} rappresenta il contrasto soglia dell'osservatore, cioè la sensibilità dell'occhio umano a percepire variazioni di contrasto tra l'oggetto osservato e lo sfondo. Tale valore di contrasto soglia può comunque variare fra $0,01$ e $0,2$, in base a diverse condizioni. Va precisato che il coefficiente β_{ext} è riferito alla lunghezza d'onda visibile standard $\lambda = 550$ nm. Poiché le fiamme emettono in gran parte nell'infrarosso e il fumo assorbe soprattutto nel blu, β_{ext} varia con la lunghezza d'onda (λ), e l'uso di un valore standard può sovrastimare la visibilità reale.

⁵⁴ Secondo il criterio di Rayleigh, questo angolo è dato da $\theta_{\text{min}} = 1,22 * (\lambda / D)$, dove: λ è la lunghezza d'onda della luce; D il diametro della pupilla: cfr. Hecht (2002), 470-472.

$$d = L / \theta$$

dove L è la dimensione maggiore dell'oggetto (larghezza o altezza, in m) e d è la distanza alla quale l'oggetto è ancora percepibile dall'osservatore (in m).

Maggiore è la distanza tra l'osservatore e l'oggetto, più grande deve essere l'oggetto per essere visibile. Nel calcolo della visibilità, si deve considerare il valore maggiore tra altezza e larghezza dell'oggetto, poiché la dimensione che definisce la visibilità è quella che determina l'angolo percepito. In altre parole, la visibilità di un oggetto dipende dalla sua dimensione (larghezza o altezza) e dall'angolo minimo che l'occhio umano può percepire. Più piccolo è θ , maggiore sarà la distanza a cui l'oggetto può essere visto⁵⁵.

In un recente studio, Mauro e Durastante hanno analizzato la visibilità del Monte Etna e la riduzione dovuta agli aerosol atmosferici. Secondo il modello geometrico della visibilità, il vulcano dovrebbe essere visibile fino a 206 km in condizioni ideali, ma i dati sperimentali mostrano che la visibilità è spesso inferiore a causa di fattori atmosferici⁵⁶. Nei mesi primaverili ed estivi, gli aerosol marittimi e terrestri possono ridurre la visibilità anche sotto i 30 km, e il vento di Scirocco, trasportando polveri desertiche dall'Africa, può abbassarla ulteriormente fino a circa 15-20 km⁵⁷. L'uso dei dati AOT (Aerosol Optical Thickness) di AERONET⁵⁸ ha permesso di correggere queste sovrastime⁵⁹ e consente di calcolare β_{ext} più accuratamente, attraverso la relazione:

$$\tau(\lambda) = \int_0^h \beta_{\text{ext}}(\lambda, z) dz$$

dove $\tau(\lambda)$ rappresenta lo spessore ottico degli aerosol per una lunghezza d'onda λ , mentre l'integrazione viene effettuata lungo l'altezza atmosferica h ⁶⁰. Per calcolare la visibilità reale combinando il limite geometrico e l'estinzione atmosferica dovuta agli aerosol, si utilizza la seguente formula, basata sui dati sperimentali di AERONET⁶¹:

$$d_{\text{vis}} = \min(\sqrt{2 * R' * h_1} + \sqrt{2 * R' * h_2}, \ln(C_o / C_{\text{min}}) / \beta_{\text{ext}})$$

dove d_{vis} è la distanza massima effettiva visibile (in m); h_1 è l'altezza dell'osservatore (m); h_2 è l'altezza dell'oggetto osservato (m); C_o – contrasto iniziale fra oggetto e sfondo (tipicamente 0,8); C_{min} – contrasto soglia dell'occhio umano (tipicamente 0,02); $\ln(C_o / C_{\text{min}}) = \ln(0,8 / 0,02) = \ln(40) \approx 3.6889$; β_{ext} è il coefficiente di estinzione atmosferica (in m^{-1}), stimato dai dati AOT di AERONET.

I valori di β_{ext} , basati sulle condizioni atmosferiche medie e critiche in Sicilia orientale, sono di $\beta_{\text{ext}} = 0,00013 \text{ m}^{-1}$ per condizioni medie (aerosol standard) e $\beta_{\text{ext}} = 0,00046 \text{ m}^{-1}$ in presenza di un'elevata concentrazione di aerosol, tipica durante lo Scirocco⁶². In condizioni medie, dunque, la visibilità massima, ossia a prescindere dalla distanza e dall'altezza di

⁵⁵ È fondamentale distinguere tra l'altezza sul livello del mare (h_2) e la dimensione lineare (L) dell'oggetto visibile. Mentre h_2 definisce il limite geometrico della visibilità per curvatura terrestre, L definisce la visibilità angolare. Un oggetto può infatti essere alto decine di metri ma avere una larghezza visiva (L) significativamente minore.

⁵⁶ Mauro, Durastante (2022), 27.

⁵⁷ Mauro, Durastante (2022), 32-33.

⁵⁸ AERONET (Aerosol Robotic Network) è una rete globale di fotometri solari automatizzati che misurano le proprietà degli aerosol atmosferici. Cfr. Mauro, Durastante (2022), 32-33.

⁵⁹ Assumendo uno spessore atmosferico efficace di 1.000 m, il coefficiente β_{ext} può essere approssimato come $\beta_{\text{ext}} \approx \text{AOD} / h$. Tale ipotesi è compatibile con le misure sperimentali e i modelli standard di trasparenza atmosferica.

⁶⁰ Mauro, Durastante (2022), 29-30.

⁶¹ Mauro, Durastante (2022) 29-30.

⁶² Mauro, Durastante (2022), 31 e 32 con fig. 3 e 4.

oggetto e osservatore, è di 28.376 m, mentre in caso di scirocco potrebbe calare drammaticamente fino a 8.019 m. In condizioni di elevata estinzione atmosferica (con $\beta_{\text{ext}} \geq 4 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ ($\geq 3 \text{ k}$), con l'apporto di k all'orizzonte apparente irrilevante), la visibilità effettiva è dunque limitata unicamente dall'assorbimento e diffusione della luce, rendendo trascurabile l'effetto della rifrazione atmosferica sulla distanza di visibilità⁶³.

Dunque, la formula complessiva per determinare la visibilità a distanza, ad esempio di navi o di uomini, deve tenere in conto sia la visibilità geometrica (legata alla curvatura della Terra e all'altezza dell'osservatore e dell'oggetto) sia la visibilità atmosferica (influenzata dall'estinzione ottica dovuta agli aerosol). Inoltre, la risoluzione angolare dell'occhio umano, espressa tramite θ , deve essere inclusa per determinare se l'oggetto è percepibile. La visibilità geometrica, la visibilità atmosferica e quella angolare possono essere combinate in un'unica formula complessiva. La distanza massima effettiva alla quale un oggetto (come una nave o un uomo) può essere visto è determinata dal valore minimo tra le tre distanze. Alla luce di queste considerazioni, la formula finale per la visibilità effettiva è:

$$d_{\text{vis}} = \min(2 * \sqrt{R' * h_1} + 2 * \sqrt{R' * h_2}, \ln(C_0 / C_{\text{min}}) / \beta_{\text{ext}}, L / \theta)$$

dove d_{vis} è la distanza massima effettiva di visibilità (in metri); R' è il raggio terrestre apparente, corretto per la rifrazione atmosferica, calcolato come: $R' = R / (1 - k)$, dove R è il raggio terrestre medio (circa 6.371.000 m) e k è il coefficiente di rifrazione atmosferica (variabile); h_1 è l'altezza dell'osservatore (m); h_2 viene mantenuto nella prima parte della formula come altezza dell'oggetto osservato rispetto al livello del mare, ma nella terza parte è sostituito da L , ovvero la dimensione reale trasversale visibile dell'oggetto (ad esempio l'altezza di una nave o la larghezza di un pennacchio di fumo), necessaria per calcolare la distanza angolare percepibile; C_0 è il contrasto iniziale (tipicamente $\approx 0,8$); C_{min} è il contrasto minimo percepibile (tipicamente pari a 0,02); β_{ext} è il coefficiente di estinzione atmosferica (m^{-1}); θ è l'angolo minimo di risoluzione dell'occhio umano (tipicamente 1 arcminuto = 0,00029 radianti); il termine L / θ va sempre calcolato come possibile limite percettivo, e limita d_{vis} solo se risulta inferiore agli altri due termini.

Questa formula permette di calcolare una stima realistica della visibilità effettiva di un oggetto come una nave o un uomo a distanza, tenendo conto delle variabili atmosferiche, geometriche e visive. In assenza di un dato specifico per il coefficiente di estinzione atmosferica per tutto il bacino del Mediterraneo occidentale e data l'impossibilità di misurazioni specifiche per il III a.C., utilizzeremo i valori di β_{ext} derivati dallo studio di Mauro e Durastante per la costa ionica siciliana ($\beta_{\text{ext}} = 0,00013 \text{ m}^{-1}$ per condizioni medie (aerosol standard) e di $\beta_{\text{ext}} = 0,00046 \text{ m}^{-1}$), non molto dissimili del resto dai dati medi raccolti di recente a Lampedusa, che ci confermano che in tempi di scirocco la visibilità poteva drammaticamente abbassarsi e oscillare ad un intervallo ancora più basso, con un valore che oscilla tra $0,000404 \text{ m}^{-1}$ a $0,001159 \text{ m}^{-1}$, e dunque con una visibilità tra $d = \ln(40)/0,000404 \approx 9130 \text{ m}$ e $d = \ln(40)/0,001159 \approx 3.182 \text{ m}$ ⁶⁴. In condizioni di elevata estinzione atmosferica ($\beta_{\text{ext}} \gg k$),

⁶³ Cfr. Middleton (1952), 206-209; WMO (2008), I.9-4-I.9-13.

⁶⁴ I valori di AOD misurati a Lampedusa da Meloni et al. (2006) da luglio 2001 a settembre 2003 hanno variato tra 0,03 e 1,16 (misurati a 415,6 nm e 868,7 nm). Con un'ipotesi semplificata, assumendo cioè che il coefficiente di estinzione sia costante sulla colonna di atmosfera, in modo che la relazione diventi $\text{AOD} = \beta_{\text{ext}} * h$, essa sarà tra $\beta_{\text{ext}} = 0,03/1000 = 0,00003 \text{ m}^{-1}$ e $\beta_{\text{ext}} = 1,16/1000 = 0,00116 \text{ m}^{-1}$, con una visibilità massima teorica tra 122.963 m e 3.181 m. Se confrontiamo poi i dati specifici dell'AOD per la polvere del deserto, che sono stati, a 415,6 nm, di 0,404, con un massimo di 1,159 secondo Meloni et al. (2006), 717, otteniamo $\beta_{\text{ext}} = 0,404/1000 = 0,000404 \text{ m}^{-1}$ e $\beta_{\text{ext}} = 1,159/1000 = 0,001159 \text{ m}^{-1}$, confermando che in tempi di scirocco la visibilità poteva drammaticamente abbassarsi e oscillare tra 9.130 m e 3.182 m.

l'effetto della rifrazione atmosferica (k) diventa trascurabile rispetto all'assorbimento e alla diffusione della luce da parte degli aerosol. Diverso è però il caso per la visibilità di fiamme e fumo.

3.2. Modelli fisici II: visibilità di fiamme e pennacchi di fumo

È dunque necessario individuare una formula che permetta di calcolare una stima realistica della visibilità effettiva di un segnale di fuoco e di fumo sia di giorno sia di notte, tenendo conto delle variabili atmosferiche, geometriche e visive. Calcolare la visibilità di un segnale di fuoco o di fumo, non è affatto semplice, non tanto per complessità di formule quanto per la difficoltà di misurare anche solo teoricamente tutte le variabili in gioco. Oltre al calcolo di visibilità, già citato in precedenza, occorre infatti stabilire:

1) per il segnale di fuoco, il suo flusso luminoso (in lumen), la sua intensità luminosa reale, in candele effettive, non isotropiche, determinata da curve fotometriche sperimentali ricavate con goniophotometro, con un fattore di riduzione variabile ($0,28 \approx 1/3,5$ per torce; $0,55-0,60$ per falò) in base alla geometria e alla dimensione della sorgente, per ricavare le candele effettive I_{eff} dai valori isotropici $I_{\text{iso}} = \Phi / (4 * \pi)^{65}$, e il suo contrasto, notturno e diurno, per stabilire l'indice di visibilità rispetto all'occhio umano, che può, a sua volta, variare con lo sfondo e le condizioni atmosferiche; le intensità luminose effettive I_{eff} così ottenute (nell'ordine di $10-25$ cd per una torcia singola e di circa 160 cd per un piccolo falò) devono comunque essere intese come intervalli di stima: esse dipendono in modo sensibile dalla geometria reale della sorgente, dal tipo di combustibile e dalle condizioni del vento, e l'assunzione di un angolo solido $\Omega \approx 1$ sr, pur fondata sulle curve goniophotometriche disponibili, resta un'approssimazione che richiederebbe una piena validazione sperimentale dedicata. Di conseguenza, le distanze ricavate dall'equazione di Allard vanno lette come ordini di grandezza operativi, non come soglie rigide di funzionamento.

2) per il segnale di fumo, il contrasto reale del fumo, che varia anche in base al suo colore.

Una ricostruzione specifica e minuziosa, necessariamente da condurre su base sperimentale, si scontrerebbe con l'intrinseca incertezza dei pochi dati forniti dalle fonti. Useremo pertanto i dati scientifici disponibili sulla visibilità media di fuochi e fumo integrandoli con gli studi moderni sull'illuminazione del mondo antico. Per calcolare la visibilità di una sorgente luminosa, utilizzeremo l'equazione di Allard, che descrive l'illuminamento prodotto da un segnale luminoso in funzione dell'intensità luminosa della sorgente, della distanza e del coefficiente di estinzione atmosferica⁶⁶.

La formula è la seguente:

$$E = (I / x^2) * \exp(-\beta_{\text{ext}} * x)$$

dove E è l'illuminamento (in lux, lx); I è l'intensità luminosa (in candele, cd); x è la distanza (in metri, m); β_{ext} è il coefficiente di estinzione atmosferica (in m^{-1}).

In questa equazione I indica sempre l'intensità luminosa effettiva I_{eff} derivata dai valori isotropici I_{iso} . Di notte la soglia di illuminamento minima percepibile $E_t = 3 * 10^{-6}$ lux corrisponde alla sensibilità scotopica dell'occhio umano in presenza di cielo rurale con lumi-

⁶⁵ Si veda, per la dimostrazione dell'anisotropia del fascio luminoso di sorgenti a fiamma, Lassandro et al. (2021), dove le misure goniophotometriche evidenziano che l'intensità lungo l'asse orizzontale è 3-5 volte inferiore al valore isotropico $\Phi / (4 * \pi)$. Nel calcolo dell'intensità luminosa effettiva $I_{\text{eff}} = \Phi / \Omega$, si assume un angolo solido $\Omega \approx 1$ sr, corrispondente a un cono visivo di circa 65° , coerente con la prevalente direzionalità verticale della fiamma in condizioni operative reali.

⁶⁶ WMO (2008), I.9-4.

nanza $< 1 \cdot 10^{(-4)} \text{ cd/m}^{267}$. Adotteremo direttamente $E_t = 3 \cdot 10^{-6} \text{ lux}$, che rappresenta un limite prudenziale realistico anche per il III sec. a.C.⁶⁸ Per mantenere un criterio prudenziale, non ridurremo il coefficiente di estinzione atmosferica, nonostante di notte il valore degli AOT tenda ad essere inferiore, tenendo conto che anche nell'antichità condizioni meteorologiche avverse (come nebbia o polveri portate dal vento) potevano limitare la visibilità. Come in precedenza, dunque, useremo dunque il coefficiente di estinzione atmosferica dello studio di Mauro e Durastante ($\beta_{\text{ext}} = 0,00013 \text{ m}^{-1}$ per condizioni medie / $\beta_{\text{ext}} = 0,00046 \text{ m}^{-1}$ durante lo Scirocco, tenendo presente in quest'ultimo caso anche il dato più alto di Lampedusa ($\beta_{\text{ext}} = 0,001159 \text{ m}^{-1}$)⁶⁹.

In condizioni di piena luce diurna, però, la visibilità delle sorgenti luminose risulta praticamente nulla, a causa dell'elevata luminanza del cielo che può raggiungere circa 3420 cd/m^{270} . Diversamente, in condizioni di luminanza meno estreme, come durante una giornata nuvolosa (342 cd/m^2), molto scura (34 cd/m^2) o al crepuscolo profondo ($3,4 \text{ cd/m}^2$), il contrasto visivo migliora sensibilmente⁷¹. In queste condizioni non è più corretto applicare direttamente la legge di Allard, bensì calcolare la distanza di visibilità sulla base del decadimento esponenziale del contrasto visivo residuo rispetto allo sfondo, secondo la legge di Koschmieder.

La distanza di visibilità d (in metri) si ottiene risolvendo:

$$d = (1 / \beta_{\text{ext}}) * \ln(C_o / 0,02)$$

dove C_o è il contrasto iniziale tra la sorgente e lo sfondo, e $0,02$ è la soglia minima di contrasto percepibile in condizioni diurne. Con $\beta_{\text{ext}} = 1,3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$, è possibile stimare valori indicativi per diversi scenari di visibilità, tenendo conto che per $\beta_{\text{ext}} \leq 4,6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ (scirocco) la variazione resta inferiore al 10%. Anche in scenari favorevoli come giornate molto scure o al crepuscolo profondo, la visibilità resta limitata, mentre in presenza di

⁶⁷ Il valore limite teorico di $2 \cdot 10^{(-6)} \text{ lux}$ è documentato – cfr. Hecht et al. (1942) – ma può sovrastimare la visibilità in condizioni reali e viene raramente adottato nei modelli operativi. La soglia $E_t = 3 \cdot 10^{-6} \text{ lux}$ è valida per condizioni di oscurità ottimali, benché in presenza di Luna piena (visione mesopica), la soglia può salire fino a circa $E_t = 1 \cdot 10^{-3} \text{ lux}$, riducendo significativamente la distanza di visibilità notturna: cfr. WMO (2008), I.9-4.

⁶⁸ Questa impostazione trova un ulteriore riscontro sperimentale nello studio di Krisciunas, Carona (2015), secondo cui una fiamma di candela – con un'intensità di circa $I = 1 \text{ cd}$, inferiore come vedremo a quella di una torcia antica – risulta visibile a occhio nudo fino a circa 2.600 m in condizioni ideali di buio completo. Tale valore è compatibile solo con $\beta_{\text{ext}} \approx 0$, oppure con una soglia $E_t \approx 1,5 \cdot 10^{-7} \text{ lux}$. Non è applicabile con $E_t = 3 \cdot 10^{-6} \text{ lux}$ e $\beta_{\text{ext}} = 0,00013 \text{ m}^{-1}$, perché in tali condizioni la distanza x ottenuta risolvendo l'equazione di Allard $E = (I / x^2) * \exp(-\beta_{\text{ext}} * x)$ risulta pari a circa 560 m .

⁶⁹ Cfr. *supra*.

⁷⁰ Cfr. Middleton (1952), 167. In questi casi, il contrasto percepito tra sorgente e sfondo può risultare nullo o addirittura negativo, secondo la definizione del contrasto di Michelson: $C = (L_{\text{max}} - L_{\text{min}}) / (L_{\text{max}} + L_{\text{min}})$, dove L_{max} è la luminanza del fondo (es. cielo) e L_{min} quella della sorgente (cfr. Malm (2016), 158, che fornisce la definizione del contrasto di Michelson). Per oggetti isolati come fuochi o torce, è più opportuno applicare il contrasto di Weber: $C = (L_o - L_b) / L_b$, dove L_o è la luminanza dell'oggetto e L_b quella dello sfondo (cfr. Malm (2016), 158). Se il contrasto risulta negativo o inferiore alla soglia di percezione ($\approx 0,05 \text{ lux}$), la sorgente non è più distinguibile e non è possibile calcolare distanze di visibilità affidabili. Malm (2016), 165-166 conferma che in presenza di forte luminanza ambientale, come in pieno giorno, la soglia di contrasto visivo aumenta sensibilmente ed è influenzata anche dalla dimensione angolare del bersaglio. Occorre poi precisare che il contrasto effettivamente percepito dipende significativamente dall'angolo solido apparente sotteso dalla sorgente luminosa rispetto al cielo circostante: sorgenti con angolo solido molto piccolo possono risultare meno visibili di quanto previsto dal solo calcolo di contrasto statico

⁷¹ Middleton (1952), 167.

forte luce solare o elevata luminanza dello sfondo, il contrasto visivo scende drasticamente, rendendo inefficace l'uso di torce o ceppi come segnali visivi diurni su lunghe distanze. Considerata la scarsa efficacia delle sorgenti luminose in pieno giorno, è plausibile ipotizzare che, nelle ore diurne, si potesse allora fare maggiore affidamento sul fumo come segnale visivo.

La visibilità del fumo dipende da variabili fisiche differenti rispetto a quelle che regolano la visibilità del fuoco. Mentre quest'ultima è determinata dall'intensità luminosa emessa direttamente dalla fiamma, il fumo non genera luce propria, ma diventa percepibile in quanto crea un contrasto ottico rispetto allo sfondo atmosferico. Questo contrasto dipende dalla quantità di particolato sospeso, dalla geometria del pennacchio e dalle condizioni ambientali in cui avviene l'osservazione. Per stimare la massa di particolato fine prodotta dalla combustione, si adotta un valore medio conservativo pari a 12,6 g/kg per i combustibili legnosi⁷². Questo dato consente di determinare la quantità totale di materiale disperso nell'atmosfera, da cui si ricava la concentrazione volumetrica (ρ_{PM}), calcolata come rapporto tra la massa totale e il volume del pennacchio. Il volume viene stimato con un modello gaussiano tridimensionale:

$$V = 2\pi * \sigma_y * \sigma_z * H,$$

dove σ_y e σ_z rappresentano rispettivamente la dispersione laterale e verticale, e H l'altezza del pennacchio. A 2 km di distanza da una sorgente in condizioni neutre (classe D), si assumono valori indicativi di $\sigma_y \approx 150$ m e $\sigma_z \approx 40$ m⁷³. La dispersione cresce con la distanza e col vento, e riduce la densità ottica del fumo. La capacità del pennacchio di produrre contrasto dipende dalla trasmittanza ottica (T_p), che misura quanta luce attraversa la colonna senza essere assorbita o deviata. Essa si calcola come:

$$T_p = \exp(-\beta_{fumo} * L_{eff}),$$

dove $\beta_{fumo} = K_m * \rho_{PM}$ e $L_{eff} = \sqrt{2\pi} * \sigma_y$ rappresenta la lunghezza ottica effettiva attraversata dalla luce⁷⁴. Il coefficiente K_m , che esprime l'efficacia estintiva del particolato, varia da 4 m²/g per la legna⁷⁵ a 5–6 m²/g per la paglia⁷⁶. Il contrasto iniziale percepibile è dato da:

$$C_0 = 1 - T_p.$$

I valori di ρ_{PM} , K_m e dei parametri di dispersione (σ_y , σ_z , H) adottati in questo modello derivano da studi sviluppati per pennacchi di combustione su scala più ampia e per scenari di inquinamento atmosferico moderno; nel nostro caso essi forniscono quindi una stima di prima approssimazione, che descrive l'ordine di grandezza della visibilità di pennacchi da piccoli fuochi di biomassa, ma resta suscettibile di affinamenti futuri specifici per contesti antichi e sorgenti di dimensioni ridotte.

In ogni caso, anche un buon contrasto iniziale decade con la distanza a causa dell'estinzione atmosferica, che include scattering e assorbimento lungo la linea di vista. Il contrasto osservabile è regolato dalla legge di Koschmieder:

$$C_{app}(d) = C_0 * \exp(-\beta_{ext} * d),$$

⁷² Cfr. Tillman et al. (1981), 119–122, da cui si ricavano valori di emissione compresi tra 1,2 e 34,9 g/10⁶ J a seconda del tipo di legno e delle condizioni di combustione; il valore indicato corrisponde a una stima ottenuta assumendo un potere calorifico medio pari a 20 MJ/kg.

⁷³ Cfr. Achtemeier (2011); Lotrecchiano et al. (2020).

⁷⁴ Cfr. Stockie (2011).

⁷⁵ Cfr. Huff et al. (2021).

⁷⁶ Cfr. Amaral et al. (2016).

dove β_{ext} è il coefficiente di estinzione atmosferica, con valori compresi tra $0,00013 \text{ m}^{-1}$ in condizioni standard e $0,00046 \text{ m}^{-1}$ in presenza di Scirocco o forte umidità⁷⁷.

Affinché un pennacchio di fumo sia visibile, devono essere soddisfatte tre condizioni simultanee:

1. Soglia angolare: il fumo deve occupare un angolo visivo $\geq \theta_{\text{min}} = 0,00029 \text{ rad}$ (1' d'arco). Per una larghezza trasversale $W = 2\sigma_y$, la massima distanza compatibile è: $d_{\text{angolare}} = W / \theta_{\text{min}}$.
2. Contrasto sopra soglia: si assume una soglia percettiva $C_{\text{min}} = 0,05$, da cui si ricava la distanza massima per contrasto: $d_{\text{contrasto}} = \ln(C_0 / C_{\text{min}}) / \beta_{\text{ext}}$ ⁷⁸.
3. Condizione atmosferica favorevole: l'aria deve essere sufficientemente limpida perché il contrasto non si riduca sotto soglia prima di raggiungere l'osservatore.

La distanza operativa effettiva è dunque definita come:

$$d_{\text{effettiva}} = \min(d_{\text{angolare}}, d_{\text{contrasto}}).$$

In pratica, anche un pennacchio largo può risultare invisibile se eccessivamente diluito o osservato in condizioni atmosferiche avverse; al contrario, una colonna compatta e densa può essere visibile da molti chilometri se si staglia su un cielo terso.

Il modello presentato consente di calcolare in modo coerente i limiti di visibilità in base a parametri fisicamente fondati, riducendo il più possibile il ricorso a ipotesi arbitrarie, pur entro i limiti di approssimazione legati alla natura dei dati disponibili.

4.1. Trasmissione ottica I: torri e telegrafi

Stabiliti i modelli fisici, definiremo le soglie di percezione per le differenti tipologie di segnale che le fonti ci trasmettono e il loro possibile uso operativo. Anzitutto, occorre dire che il sistema di segnalazione 'semplice', costituito cioè da un fuoco/fumata, poteva essere costituito da fuochi anche di grande dimensione. Per la forma più complessa, come quello del telegrafo ad acqua, era invece necessario gestire il segnale, ossia interromperlo al momento giusto per permettere l'invio del messaggio per un certo numero di secondi, e dunque necessitava, con ogni verosimiglianza, di un'apposita schermatura o di un sistema di spegnimento e accendimento rapido. Per entrambi i sistemi, è necessario diversificare il calcolo nel caso essi fossero stati inviati di giorno o di notte.

Occorre anzitutto dire che un sistema come quello delle torri di segnalazione avrebbe avuto lo svantaggio, già notato nel celebre *excursus* sui segnali di Polibio⁷⁹, di portare solo un messaggio predeterminato, ed anche, se parte di un circuito, di non indicare in modo univoco da quale tra i punti/torri arrivasse la comunicazione originaria⁸⁰, a meno cioè di ulteriori informazioni tramite altri messaggi o di espedienti come quelli ipotizzati nel caso delle torri lungo il *limes* britannico o danubiano, dove si poteva probabilmente far partire il segnale verso una delle due direzioni⁸¹. In realtà, un numero maggiore di fuochi avrebbe potuto estendere il

⁷⁷ Cfr. Malm (2016), 158.

⁷⁸ Il valore adottato, più conservativo rispetto alla soglia standard di 0,02 comunemente utilizzata per oggetti a contrasto netto, riflette la natura più diffusa e meno definita dei bordi di un pennacchio di fumo, che tende a ridurre la percezione del contrasto visivo: cfr. Malm (2016), 157-158.

⁷⁹ Polyb. 10.43.

⁸⁰ Woolliscroft (2001), 24-25

⁸¹ Rossi et al. (2009), 197-198.

numero di messaggi. Wolliscroft cita l'esempio dei tre segnali della *Armada Beacons*⁸², ma un esempio più vicino a quello punico, almeno dal punto di vista geografico, è proprio delle torri 'camilliane' di segnalazione in Sicilia⁸³, dove l'avvistamento delle vele turche era comunicato con segnali di fumo di giorno e di fuoco di notte, in numero proporzionale alla gravità della minaccia⁸⁴. Se crediamo alle testimonianze coeve, la catena di torri in Sicilia poteva diffondere un allarme attraverso tutta la Sicilia in meno di un'ora⁸⁵.

Il sistema del telegrafo ad acqua, se è vera la testimonianza di Polieno⁸⁶, mostra chiaramente l'utilizzo da parte dei Cartaginesi in Sicilia. Esso, come accennato prima, trova due potenziali riscontri, uno iconografico e uno storiografico. Un cippo votivo cartaginese del IV secolo a.C., cilindrico e con aperture su tre livelli, è stato infatti interpretato come modello di una torre semaforica da J.-G. Demerliac e J. Meirat: secondo la loro ipotesi, forse più ingegnosa che vera, l'orientamento delle aperture potrebbe essere compatibile con linee di visibilità verso Lilibeo, Linosa, Grande Kuriate e Capo Bon⁸⁷. Tale configurazione lascerebbe supporre un si-

⁸² Cfr. Wolliscroft 2002, 24, che nota come essi fossero, per un segnale, 'enemy sighted off shore'; per due, 'enemy look likely to land', per tre, 'enemy landed in stronger force than can be handled locally'.

⁸³ Sulle torri 'camilliane' (termine che si riferisce a rigore alla costruzione-tipo di uno dei gruppi di torri fatti erigere dalla deputazione apposita, e legate ai disegni dell'ingegnere Camillo Camilliani) realizzate a partire dal XVI secolo per il potenziamento del sistema difensivo costiero e dotate di un sistema di comunicazione visiva basato su segnali di fuoco e fumo, si vedano Mazzarella, Zanca (1985); Santoro (1985), 105-126; Maurici et al. (2008); per il sistema di segnalazione, Ligresti (2013), 78-81 e Patti (2017), 184-185. Cfr. anche Genovese (2018) sul ruolo strategico e il riuso. Per una trattazione più ampia, Scott (2017) usa modelli ASTER GDEM per analizzare la rete: ogni torre vedeva in media 6,9 altre torri e copriva 238 km², ma lo studio non stima la distanza massima di visibilità né analizza sistematicamente i fattori che la influenzano.

⁸⁴ Cfr. Giuffrida (2007), 263, che riporta la lettera del 29 febbraio 1552 di Hernando de Vega, responsabile della difesa del Val di Noto, a Diego Peres, incaricato di ispezionare il sistema costiero da Siracusa a Spaccaforno. La lettera descrive l'uso dei "cavallari", esploratori a cavallo incaricati di segnalare l'avvistamento di "veli": «di jorno fazano tanti segnali con lo fumo, di nocti con lo foco quanto serrà lo numero de li veli». Cfr. Russo (2008), 165, che nota come i segnali fossero proporzionali al numero di imbarcazioni: uno per 1-4, due per 4-8, tre per 8-12, più di tre per formazioni maggiori. In caso di scarsa visibilità si usavano anche i mascoli, rudimentali cariche esplosive a polvere nera, il cui numero poteva indicare il livello della minaccia. Un confronto lontano ma istruttivo è offerto da Beers (2014), che documenta analoghe corrispondenze numeriche o convenzionali in Nord America: presso gli Apache del Sud-Ovest un fumo subito spento indicava nemico vicino, una piccola fumata su un pendio segnalava l'incontro con alleati, due o tre fumate consecutive equivalevano a una richiesta di parlamento; i Seminole della Florida e i Chippewa dei Grandi Laghi modulavano il fumo interrompendo la colonna con coperte o pelli per produrre puffi distinti; mentre gli Yavapai dell'Arizona descrivevano colonne alte fino a 300 metri, immediatamente riconoscibili a grande distanza.

⁸⁵ Cfr. Mazzarella, Zanca (1985), 52 n. 16 con testimonianze. È assai interessante, credo, notare come Russo (2008), 167 rilevi come un limite strutturale di questo sistema era l'incapacità di identificare con certezza il punto d'origine della segnalazione, a meno di non integrare ulteriori segnali o di combinare le trasmissioni ottiche con avvisi acustici, come l'uso delle broghe, strumenti a fiato utilizzati di notte per allertare la popolazione e le unità vicine.

⁸⁶ Polyæn. *Strat.* 6.16.2.

⁸⁷ L'oggetto, alto 41,1 cm e con un diametro di 13,3 cm, datato tra IV e II secolo a.C., rinvenuto da Nathan Davis a Cartagine tra il 1856 e il 1858 e oggi conservato al British Museum (ID 125324), è un ex-voto in calcare interpretato da J.-G. Demerliac e J. Meirat come una possibile rappresentazione schematica di una torre semaforica (https://www.britishmuseum.org/collection/object/W_1857-1218-37). Secondo l'ipotesi avanzata da Demerliac, Meirat (1983), 343-352 le piccole finestre poste in alto servivano per l'osservazione e la ricezione dei segnali, mentre quelle ai livelli inferiori erano destinate all'invio di messaggi luminosi. I due studiosi hanno analizzato l'orientamento delle aperture, verificando se potesse corrispondere a direzioni utili per un sistema di segnalazione ottica. Collocando idealmente la torre a Pantelleria e allineando uno degli assi verso Lilibeo, in Sicilia, è emerso che le altre aperture risultavano orientate, con uno scarto minimo, verso Linosa, Grande Kuriate e Capo Bon, nei pressi del Djebel Hamid e del Djebel Ben Ulid.

stema di trasmissione ottica a stazioni intermedie, con Pantelleria come nodo chiave ma, come vedremo meglio, solo con l'uso di navi come ripetitori dei segnali⁸⁸.

Una testimonianza di Polibio circa l'uso di segnali di fuoco per inviare messaggi durante l'assedio di Agrigento nel 262 è un tassello assai significativo: secondo lo storico di Megalopoli, Il generale Annone, accampato nella collina del Toro, comunicava messaggi con Annibale di Giscone, ad Agrigento⁸⁹. Se è vera la testimonianza polibiana, i due generali, riuscivano a comunicare messaggi complessi – “le truppe non resistevano più alla fame, e che molti disertavano passando ai nemici a causa della penuria di viveri” – ad una distanza in linea d'aria di 4 km⁹⁰. È dunque probabile in entrambi i casi si trattasse proprio del telegrafo ad acqua punico del cui raggio efficace di comunicazione Polibio ci fornisce un indizio significativo. Del resto, la testimonianza di Polieno, anche qualora in parte derivata da Enea tattico e/o Polibio, dà comunque conto di un uso punico, per altro con una variante specifica, di tale sistema.

Inoltre, il rinvenimento a Nora, in Sardegna, sull'altura del Coltellazzo, dei resti di una torre-faro punica, datata al IV secolo a.C. sulla base del ritrovamento di una lucerna punica e di ceramica campana, oltre che di materiale nuragico, fornisce un'ulteriore testimonianza concreta dell'impiego di strutture di segnalazione da parte dei Cartaginesi; in ambito sardo, alla stessa logica di controllo dei movimenti dal mare rimanda anche la torre punica di avvistamento di Porto Rotondo-Olbia, sulla Punta Nuraghe all'ingresso del golfo di Cugnana, interpretata come postazione costiera per segnalare con fuochi i pericoli provenienti dal mare ed eretta in età punica, con uso documentato fino alla tarda repubblica romana⁹¹.

La posizione elevata sul promontorio di Punta Nuraghe, la morfologia della struttura e il confronto con altri contesti punici coevi indicano con buona verosimiglianza una funzione di controllo visivo della costa e, verosimilmente, di segnalazione luminosa a distanza. Si tratta di una testimonianza più solida, anche sul piano stratigrafico, rispetto al caso di Nora, e conferma l'impiego sistematico di postazioni ottiche stabili nella rete di allerta cartaginese⁹².

Per stimare la portata visiva dei segnali, è necessario analizzare le caratteristiche delle sorgenti luminose. Diversi studi si sono occupati dell'illuminazione nel mondo antico, ma raramente offrono dati quantitativi riutilizzabili. Motsianos descrive diverse tipologie di torce bizantine, distinguendo tra modelli monouso e riempibili e illustrandone la terminologia e i materiali,

⁸⁸ Sia l'affermazione di Polieno dell'impiego di tale sistema in due postazioni, una in Sicilia e l'altra in Africa, sia la ricostruzione dei due studiosi francesi è infatti, secondo Medas (2000), 19-20, impossibile in modo diretto e difficile anche con un ponte ottico intermedio nell'isola di Pantelleria. Lo studioso ritiene che la portata visiva tra Sicilia e Africa sia al limite delle possibilità geografiche, anche considerando l'altitudine massima di Pantelleria (circa 830 m s.l.m.) e l'eventuale presenza di torri sopraelevate di almeno 10 metri. Sulla la possibilità dell'uso di navi come ripetitori dei segnali, cfr. *infra* § 4.2.

⁸⁹ Polyb. 1.19.5-7.

⁹⁰ Kromayer (1922), 4 identifica infatti la “collina del Toro” con il punto altimetrico 316, riportato nella sua carta *Römische Abteilung Nummer 1* del *Generalstabskarte* 1: 50.000. Tale altura sarebbe situata, secondo Kromayer, a circa dieci stadi (circa 1,8 km) dal campo romano, a nord dell'attuale Porto Empedocle e ad ovest rispetto all'acropoli di Agrigento. Lo studioso tedesco non fornisce ulteriori precisazioni sulla distanza tra il campo di Annone e l'acropoli di Agrigento, né indica un nome moderno per la collina, il cui toponimo “Toro” è oggi scomparso. Sulla base dei rilievi cartografici attuali, che ho verificato tramite Qgis, il punto altimetrico 316 corrisponde all'attuale monte di Monserrato, a nord-ovest rispetto all'acropoli di Agrigento (quota 354 m), dalla quale dista circa 4 km in linea d'aria.

⁹¹ Giardina (2010), 124; 289-290 per la torre di Nora. Per la torre punica di Punta Nuraghe cfr. D'Oriano, Mancini (2021) che mostrano come lo scavo del 2011-2012 abbia messo in luce una torre cilindrica in conci granitici, priva di vani interni e circondata da un anello murario, interpretata dagli autori come struttura di avvistamento e segnalazione luminosa dei pericoli dal mare, costruita in età punica e rimasta in uso fino al I sec. a.C.

⁹² D'Oriano, Mancini (2021).

ma non fornisce dati in lumen o candele⁹³. Lo studio di Roussos e Chalmers presenta una simulazione digitale dell'illuminazione nel palazzo di Knossos, focalizzata sull'effetto percettivo della luce, senza dati quantitativi sulla sua intensità⁹⁴. Mauro e Durastante propongono stime tra 100 e 250 lumen per torce e anfore, utilizzate per calcolare la visibilità teorica notturna secondo l'equazione di Allard, ma non indicano in modo esplicito su quali basi siano fondati tali valori⁹⁵. Wunderlich analizza il rendimento delle lampade a olio, evidenziando l'elevato dispendio energetico dell'illuminazione antica, ma si concentra esclusivamente su lampade di uso domestico⁹⁶. Forbes descrive l'uso di resine e legni ad alta resa per aumentare l'intensità e la durata della combustione, ma non riporta valori numerici sulla luce emessa⁹⁷.

Tra gli studi disponibili, l'unico a fornire dati misurabili sulle sorgenti luminose antiche è quello di I. Moullou e F. V. Topalis. Le torce analizzate, costruite con legni resinosi (pino, quercia, canna, vigna), mostrano rese variabili: la più luminosa è quella in quercia, avvolta in lino imbevuto di pece, con un flusso di circa 460 lumen e un'intensità massima di 36,6 candele isotropiche⁹⁸. Correggendo per il lobo di emissione reale, si ottiene un valore di ≈ 10 candele effettive (con fattore di riduzione $\approx 0,28$). Un'alternativa più stabile è rappresentata dal falò ("hearth"), anch'essi testati da Moullou e Topalis: due ceppi di legno d'ulivo producono un flusso medio di circa 1.100 lumen e una massima intensità di 45 candele isotropiche, valore però indicativo per via della combustione irregolare del legno⁹⁹. Applicando la correzione, l'intensità scende a ≈ 25 candele effettive.

Questi valori offrono un riferimento realistico per ipotizzare la portata luminosa delle segnalazioni operative. Per segnali complessi, come nel telegrafo ad acqua, si può pensare a un

⁹³ Motsianos (2012) esamina l'uso delle torce come dispositivi di illuminazione nel periodo bizantino (IV–XV sec. d.C.), distinguendo tra torce in legno, cortecchia, fibre e quelle riempibili con olio o liquidi infiammabili. Pur approfondendo la terminologia (λαμπάς, φανός, λαμπτήρ; taeda, candela, fax, funale) e l'uso di materiali grassi per migliorare la resa luminosa, egli non riporta dati quantitativi.

⁹⁴ Roussos, Chalmers (2003) simulano la luce prodotta da fiamme alimentate da olio d'oliva, cera d'api e grasso animale, misurandone lo spettro con uno spettrometro per riprodurre digitalmente l'effetto visivo negli ambienti interni. Il modello è verificato confrontandolo con video di fiamme reali, ma non vengono forniti valori in lumen o candele.

⁹⁵ Mauro, Durastante (2023) assegnano alle torce navali una luminosità compresa fra 100 e 200 lumen (con un aumento della visibilità di circa 10 m) e alle anfore traforate fra 150 e 250 lumen (illuminazione di un'area con raggio intorno ai 50 m), ricavando le distanze teoriche di visibilità tramite l'equazione di Allard, a partire da soglie di illuminanza e coefficienti di estinzione atmosferica. Si tratta di intervalli presentati come stime di ordine di grandezza, non supportati da misurazioni fotometriche dirette su torce o anfore antiche o su loro repliche. Le stesse grandezze sono riprese in Mauro, Durastante (2025), dove vengono inserite in una classificazione più ampia dei dispositivi luminosi per la navigazione notturna (torce, anfore traforate, lampade a olio, fuochi costieri) e confrontate, fra l'altro, con la luminosità lunare, senza che vengano aggiunti nuovi dati sperimentali.

⁹⁶ Wunderlich (2006) misura un consumo di circa 300 kJ per ora e un rendimento tra 0,1 e 0,15 lm/W, applicando la legge di Planck alla radiazione emessa dalle fiamme. Distingue tra fiamme luminose e non luminose, e discute il ruolo delle particelle incandescenti nella produzione di luce. Le analisi riguardano però lampade a olio, non torce o fuochi da segnalazione.

⁹⁷ Forbes (1958) approfondisce l'uso di legno resinoso e oli vegetali, distinguendo tra combustibili solidi e liquidi e sottolinea l'importanza dello stoppino e l'effetto negativo della fuliggine sull'efficienza luminosa: la trattazione è tuttavia limitata all'illuminazione interna e non fornisce dati quantitativi sulla potenza luminosa.

⁹⁸ Moullou, Topalis (2017) spiegano che le torce erano costruite con legni resinosi come pino, quercia, canna e vigna; una torcia di quercia, avvolta in lino imbevuto di pece, produceva 459,6 lumen e 36,62 candele, ma si consumava rapidamente, in particolare se realizzata in legno molto resinoso (p. 620). In generale le torce, pur generando molto fumo, erano la fonte luminosa più potente. La torcia in pino, con 168,7 lumen, era la più economica ed efficiente, mentre la "pot-torch", con combustione lenta e 58,8 lumen (p. 619), non sgocciolava ma richiedeva materiali aggiuntivi e maggiore sforzo costruttivo.

⁹⁹ Moullou, Topalis (2017), 620.

foculare di circa 1.100 lumen (≈ 25 cd), oppure a una torcia di quercia con lino e pece (460 lumen $\approx 10,3$ cd). A ben guardare, potremmo ipotizzare per il telegrafo anche un foculare alimentato con 300 kg di ulivo, per il quale sarebbe occorsa una schermatura per impedire la visibilità indesiderata. Una schermatura semplice, in legno spesso e manovrata con corde, poteva oscurare il fuoco per alcuni secondi. Un rivestimento in argilla cruda ne avrebbe potuto eventualmente aumentare la resistenza al calore, permettendo l'uso ripetuto senza combustione né esposizione diretta di chi segnalava. Nel caso delle torri con segnalazioni semplici, basate sull'alternanza acceso/spento, sono plausibili anche falò di dimensioni maggiori, alimentati con 500 kg di legna d'ulivo¹⁰⁰.

Possiamo adesso determinare la distanza dei due sistemi. Per un falò di 500 kg di legno d'olivo, che produce circa 3.400 lumen, equivalenti a circa 162 candele effettive¹⁰¹, 5.150 m^{102} , che si riduce a circa 3.270 m con Scirocco ($\beta_{\text{ext}} = 0,00046 \text{ m}^{-1}$)¹⁰³ e a circa 2.050 m con Scirocco forte ($\beta_{\text{ext}} = 0,001159 \text{ m}^{-1}$)¹⁰⁴.

Per il telegrafo ad acqua, cominceremo con la torcia di quercia, avvolta in fibra di lino imbevuta di pece, che produce un flusso luminoso di circa 460 lumen, equivalenti a circa 10 candele effettive¹⁰⁵, in condizioni atmosferiche medie ($\beta_{\text{ext}} = 0,00013 \text{ m}^{-1}$), la distanza massima alla quale la torcia è visibile è circa 1.650 m^{106} , valore che rappresenta una distanza teorica ideale, calcolata in condizioni ottimali. In condizioni di Scirocco ($\beta_{\text{ext}} = 0,00046 \text{ m}^{-1}$), poi, la visibilità si riduce sensibilmente, a circa 1.300 m^{107} . In caso di Scirocco forte, con il coefficiente di estinzione più alto registrato a Lampedusa ($\beta_{\text{ext}} = 0,001159 \text{ m}^{-1}$), la visibilità notturna della torcia scende drasticamente a circa 970 m^{108} . Per il falò con due ciocchi di legno d'ulivo che produce circa 1.100 lumen, equivalenti a circa 25 candele effettive¹⁰⁹, con un coefficiente di estinzione atmosferica medio ($\beta_{\text{ext}} = 0,00013 \text{ m}^{-1}$), la visibilità massima è di circa 2.370 m^{110} . In condizioni di Scirocco ($\beta_{\text{ext}} = 0,00046 \text{ m}^{-1}$), la visibilità scende a circa

¹⁰⁰ Un falò di tali dimensioni richiede una preparazione logistica non eccessiva, può essere acceso in pochi minuti da 3-4 uomini, con materiali già pronti.

¹⁰¹ $I_{\text{iso}} = 3.400 / (4 * \pi) \approx 270$ cd; intensità effettiva $I_{\text{eff}} \approx 162$ cd con fattore anisotropico $0,60 \pm 0,10$; FRE = 1.360 MJ (stima basata su Wooster et al. 2005); VEF = 0,0035 (valore medio ricavato da dati VIIRS secondo Wang et al. 2019); $E_{\text{vis}} = \text{FRE} * \text{VEF} \approx 4,76$ MJ; $t = 70$ min (valore operativo medio coerente con i test sperimentali su falò da ≈ 90 –100 kg in Wooster et al. 2005, dove l'emissione radiativa si mantiene per 70–75 minuti e la fase visibile è attiva per almeno 60 minuti); $P_{\text{vis}} = E_{\text{vis}} / (t * 60) \approx 1,13 * 10^3$ W; efficacia fotopica $\eta = 3$ lm/W; flusso $\Phi = \eta * P_{\text{vis}} \approx 3,4 * 10^3$ lm. La resa η è ottenuta da $\epsilon_{\text{vis}} \approx 650$ lm/W moltiplicata per VEF = 0,0035 $\pm 0,0005$, in assenza di misure dirette di ϵ_{vis} specifiche per i falò, come indicato da Wang et al. 2019. Il valore $I_{\text{eff}} \approx 162$ cd si ottiene correggendo I_{iso} con $k_{\text{aniso}} \approx 0,60$, adottato per falò > 100 kg in assenza di misure dirette. Si veda § 3.2 per la definizione $I_{\text{eff}} = \Phi / \Omega$ e la scelta di $\Omega \approx 1$ sr (cono di $\approx 65^\circ$), in accordo con Lassandro et al. (2021), che documentano una riduzione dell'intensità orizzontale di 3–5 volte nelle fiamme libere.

¹⁰² $3 * 10^{-6} = (162 / x^2) * \exp(-0,00013 * x)$; $x \approx 5.150$ m.

¹⁰³ $3 * 10^{-6} = (162 / x^2) * \exp(-0,00046 * x)$; $x \approx 3.270$ m.

¹⁰⁴ $3 * 10^{-6} = (162 / x^2) * \exp(-0,001159 * x)$; $x \approx 2.050$ m.

¹⁰⁵ $I_{\text{iso}} = 460 / (4 * \pi) \approx 36,6$ cd; intensità effettiva $I_{\text{eff}} \approx 10,3$ cd con fattore anisotropico prudenziale $k_{\text{aniso}} \approx 0,28 \pm 0,05$, sulla base di misure goniometriche che evidenziano una riduzione dell'intensità orizzontale di 3–4 volte nelle sorgenti a fiamma libera (cfr. Lassandro et al. 2021).

¹⁰⁶ $3 * 10^{-6} = (10,3 / x^2) * \exp(-0,00013 * x)$; $x \approx 1.650$ m.

¹⁰⁷ $3 * 10^{-6} = (10,3 / x^2) * \exp(-0,00046 * x)$; $x \approx 1.300$ m.

¹⁰⁸ $3 * 10^{-6} = (10,3 / x^2) * \exp(-0,001159 * x)$; $x \approx 970$ m.

¹⁰⁹ $I_{\text{iso}} = 1.100 / (4 * \pi) \approx 87,96$ cd; intensità effettiva $I_{\text{eff}} \approx 25$ cd con fattore anisotropico prudenziale $k_{\text{aniso}} \approx 0,28 \pm 0,05$, basato su misure goniometriche che mostrano una riduzione dell'intensità orizzontale di 3–4 volte per sorgenti a fiamma libera (cfr. Lassandro et al. 2021).

¹¹⁰ $3 * 10^{-6} = (25 / x^2) * \exp(-0,00013 * x)$; $x \approx 2.370$ m.

1.740 m¹¹¹. In caso di Scirocco forte ($\beta_{\text{ext}} = 0,001159 \text{ m}^{-1}$), la visibilità del falò si riduce a circa 1.170 m¹¹². Il falò di 300 kg di legno d'ulivo produce circa 2.040 lumen, equivalenti a circa 90 candele effettive¹¹³, e con coefficiente di estinzione atmosferica medio ($\beta_{\text{ext}} = 0,00013 \text{ m}^{-1}$), risulta visibile a una distanza massima di circa 4.150 m¹¹⁴. In condizioni di Scirocco ($\beta_{\text{ext}} = 0,00046 \text{ m}^{-1}$), la visibilità si riduce a circa 2.610 m¹¹⁵; con Scirocco forte ($\beta_{\text{ext}} = 0,001159 \text{ m}^{-1}$), a circa 1.860 m¹¹⁶.

Come detto nel § 3.2, con cielo perfettamente terso la luminanza media dello sfondo ($\approx 3.420 \text{ cd/m}^2$) è tale da ridurre a zero – o addirittura rendere negativo – il contrasto tra la fiamma e il cielo. In queste condizioni, nessuna delle sorgenti considerate – né la torcia ($\approx 10 \text{ cd}$), né i ceppi ($\approx 25 \text{ cd}$), né i falò da 300 e 500 kg (≈ 90 e 162 cd) – è distinguibile: la distanza di visibilità risulta formalmente nulla. Quando però la luminanza di fondo si riduce – ad esempio con cielo coperto (342 cd/m^2) o al crepuscolo profondo ($3,4 \text{ cd/m}^2$) – la portata (d) si calcola con la legge di Koschmieder, $d = (1 / \beta_{\text{ext}}) * \ln(C_0 / 0,02)$, assumendo $\beta_{\text{ext}} = 1,3 * 10^{-4} \text{ m}^{-1}$. Nel caso della torcia, il contrasto visivo risulta negativo e il logaritmo non è definito: la visibilità è formalmente nulla anche con cielo coperto¹¹⁷. Per i ceppi, con $L_0 = 25 / 0,07 \approx 357 \text{ cd/m}^2$ (stessa area apparente della torcia), il contrasto è positivo ma appena sopra la soglia ($C_0 \approx 0,0438$) e dà una distanza teorica di circa 6.025 m¹¹⁸. Siccome la luminanza di fondo nel “crepuscolo profondo” ($L_b \approx 3,4 \text{ cd/m}^2$) resta ben al di sopra della soglia per la visione scotopica ($L_b \leq 0,03 \text{ cd/m}^2$ secondo WMO (2008), § I.9-4.13), non è corretto applicare in questi casi la legge di Allard con soglie notturne, ma va adottata una soglia più elevata, compatibile con la visione mesopica. Con $E_t = 3 * 10^{-4} \text{ lux}$ e $\beta_{\text{ext}} = 0,00013 \text{ m}^{-1}$, la distanza di visibilità è di circa 183 m per la torcia, 283 m per i ceppi, 529 m per il falò da 300 kg e 702 m per quello da 500 kg¹¹⁹.

¹¹¹ $3 * 10^{-6} = (25 / x^2) * \exp(-0,00046 * x)$; $x \approx 1.740 \text{ m}$.

¹¹² $3 * 10^{-6} = (25 / x^2) * \exp(-0,001159 * x)$; $x \approx 1.170 \text{ m}$.

¹¹³ $L_{\text{iso}} = 2.040 / (4 * \pi) \approx 162 \text{ cd}$; intensità effettiva $I_{\text{eff}} \approx 90 \text{ cd}$ con fattore anisotropico prudenziale $k_{\text{aniso}} \approx 0,55 \pm 0,10$, modellato per falò $> 100 \text{ kg}$ in assenza di misure goniometriche dirette, assumendo emissione prevalente nell'emisfero superiore; $\text{FRE} = 814 \text{ MJ}$; $\text{VEF} = 0,0035 \pm 0,0005$; $E_{\text{vis}} = \text{FRE} * \text{VEF} \approx 2,85 \text{ MJ}$; $t = 70 \text{ min}$ (valore operativo medio giustificato da test sperimentali su falò di massa simile in Wooster et al. 2005); $P_{\text{vis}} = E_{\text{vis}} / (t * 60) \approx 680 \text{ W}$; efficacia fotopica media $\eta \approx 3 \text{ lm/W}$; flusso $\Phi = \eta * P_{\text{vis}} \approx 2,04 * 10^3 \text{ lm}$. La resa η deriva da $\epsilon_{\text{vis}} \approx 650 \text{ lm/W}$ moltiplicata per $\text{VEF} \approx 0,0035$, ottenuto da dati VIIRS (Wang et al. 2019). L'intensità effettiva è calcolata come $I_{\text{eff}} = \Phi / \Omega$, con $\Omega \approx 1 \text{ sr}$ secondo il criterio discusso in § 3.2 e in accordo con le misure sperimentali di Lassandro et al. (2021), che documentano una riduzione dell'intensità orizzontale di 3–5 volte nelle fiamme libere.

¹¹⁴ $3 * 10^{-6} = (90 / x^2) * \exp(-0,00013 * x)$; $x \approx 4.150 \text{ m}$.

¹¹⁵ $3 * 10^{-6} = (90 / x^2) * \exp(-0,00046 * x)$; $x \approx 2.610 \text{ m}$.

¹¹⁶ $3 * 10^{-6} = (90 / x^2) * \exp(-0,001159 * x)$; $x \approx 1.860 \text{ m}$.

¹¹⁷ Per $L_0 = 10,3 / 0,07 \approx 147 \text{ cd/m}^2$ (assumendo un'area apparente della fiamma di $0,07 \text{ m}^2$, valore plausibile per una torcia accesa in condizioni operative standard) e $L_b = 342 \text{ cd/m}^2$, si ottiene $C_0 = (L_0 - L_b) / L_b \approx -0,57$; con $C_0 < 0$, la formula di Koschmieder non è applicabile. Il valore di $0,07 \text{ m}^2$ corrisponde a un disco di diametro $\approx 0,3 \text{ m}$, coerente con le simulazioni geometriche delle torce antiche proposte da Moulou, Topalis (2017), che indicano superfici radianti comprese tra $0,005$ e $0,08 \text{ m}^2$ a seconda della struttura della fiamma. Si tratta di una stima intermedia, compatibile con una fiamma visibile a distanza.

¹¹⁸ $d = (1 / 0,00013) * \ln(0,0438 / 0,02) \approx 6.025 \text{ m}$.

¹¹⁹ Applicando la legge di Allard, $E = (I / x^2) * \exp(-\beta_{\text{ext}} * x)$, con intensità $I = 10,3 / 25 / 90 / 162 \text{ cd}$ rispettivamente, soglia $E_t = 3 * 10^{-4} \text{ lux}$ e coefficiente $\beta_{\text{ext}} = 0,00013 \text{ m}^{-1}$, si ottiene: torcia $\approx 183 \text{ m}$; ceppi $\approx 283 \text{ m}$; falò 300 kg $\approx 529 \text{ m}$; falò 500 kg $\approx 702 \text{ m}$. Applicando di nuovo la stessa equazione $E = (I / x^2) * \exp(-\beta_{\text{ext}} * x)$, con gli stessi valori di I e soglia E_t , ma con $\beta_{\text{ext}} = 0,00046 \text{ m}^{-1}$, si ottiene: torcia $\approx 178 \text{ m}$; ceppi $\approx 271 \text{ m}$; falò 300 kg $\approx 489 \text{ m}$; falò 500 kg $\approx 635 \text{ m}$.

Come appena mostrato e rilevato già alla fine del § 3.2, in pieno giorno il fuoco non era utilizzabile operativamente come segnale: l'unica alternativa efficace era il fumo, percepibile per contrasto ottico rispetto allo sfondo. Anche con cielo coperto, le distanze restano piuttosto modeste, confermando che il fumo costituiva la soluzione operativa più affidabile per le ore diurne. Occorre quindi verificare se i dati raccolti per le torce e i focolari — in particolare per la torcia di quercia e i ceppi d'ulivo — possano essere riutilizzati per stimare anche la visibilità dei segnali fumogeni. I casi analizzati di seguito applicano il modello definito nel § 3.2, che considera congiuntamente la soglia angolare, il decadimento del contrasto atmosferico e la trasmittanza interna del pennacchio per determinare la distanza effettiva di visibilità del fumo. Come già precisato, i parametri ottici utilizzati (β_{fumo} , K_m , ρ_{PM} , σ_y , σ_z , H) derivano da modelli di dispersione per pennacchi di biomassa su scala maggiore e forniscono qui stime conservative di ordine di grandezza per pennacchi più piccoli; una calibrazione sperimentale specifica per fuochi di segnalazione potrebbe affinare questi valori senza alterare il quadro complessivo delle distanze.

Per il focolare da 10 kg (legna mista), il contrasto resta nettamente sotto la soglia percettiva $C_{\text{min}} = 0.05$, rendendo il pennacchio non distinguibile (0 m)¹²⁰.

Per il falò da 300 kg, la distanza teorica è determinata dal contrasto, dunque 8.060 m¹²¹. Con Scirocco ($\beta_{\text{ext}} = 4.6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$) la visibilità scende a 2.280 m.

Anche per il falò da 500 kg, la distanza teorica è determinata dal contrasto, dunque 11.600 m in condizioni standard e 3.280 con Scirocco¹²².

Un caso particolare, utile per verificare l'analogia coi regolamenti delle torri camilliane siciliane, è quello della paglia: combustibile leggero e rapidamente combustibile, analogo alle buse e alle roselle attestate in quei contesti¹²³. Con un quantitativo di 150 kg di paglia, la distanza teorica è determinata dal contrasto, dunque ≈ 5.120 m in condizioni standard e ≈ 1.450 m con Scirocco¹²⁴. La combustione si esaurisce in circa 5 minuti, anche se la fase visibile raramente va oltre i 2 minuti¹²⁵.

In conclusione, la visibilità operativa delle colonne di fumo dipende dalla combinazione fra densità ottica (β_{fumo}), attenuazione atmosferica (β_{ext}) e dimensione angolare (θ_{min}). Le simulazioni mostrano che, anche in condizioni favorevoli ma non eccezionali, le distanze

¹²⁰ Con 126 g di particolato dispersi in $\approx 36.900.000 \text{ m}^3$ ($V = 2 \cdot \pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot H$), si ottiene $\rho_{\text{PM}} \approx 3.41 \cdot 10^{-6} \text{ g/m}^3$ e $\beta_{\text{fumo}} = K_m \cdot \rho_{\text{PM}} \approx 1.36 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ ($K_m = 4 \text{ m}^2/\text{g}$). Con $\sigma_y = 150 \text{ m}$ il cammino ottico è $L_{\text{eff}} = \sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma_y \approx 3.76 \cdot 10^2 \text{ m}$; da qui $T_p = \exp(-\beta_{\text{fumo}} \cdot L_{\text{eff}}) \approx 0.995$ e $C_0 \approx 5.12 \cdot 10^{-3}$. Cfr. Stockie (2011), 365.

¹²¹ Con 3.780 g di particolato in $\approx 36.900.000 \text{ m}^3$, si ottiene $\rho_{\text{PM}} \approx 1.02 \cdot 10^{-4} \text{ g/m}^3$ e $\beta_{\text{fumo}} \approx 4.09 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$. Con L_{eff} invariato ($\approx 3.76 \cdot 10^2 \text{ m}$) risulta $T_p \approx 0.857$ e $C_0 \approx 0.143$. Applicando $\beta_{\text{ext}} = 1.3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$, la distanza teorica è $d_{\text{contrasto}} = \ln(C_0 / 0.05) / \beta_{\text{ext}} \approx 8.060 \text{ m}$. La distanza angolare è $d_{\text{angolare}} = W / \theta_{\text{min}} = 300 / 0.00029 \approx 1.030.000 \text{ m}$, dunque il contrasto determina il limite operativo: cfr. Malm (2016), 158.

¹²² Con 6.300 g di particolato in $\approx 36.900.000 \text{ m}^3$, si ottiene $\rho_{\text{PM}} \approx 1.71 \cdot 10^{-4} \text{ g/m}^3$ e $\beta_{\text{fumo}} \approx 6.82 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$. La trasmittanza risulta $T_p \approx 0.774$ e $C_0 \approx 0.226$. Ne deriva $d_{\text{contrasto}} \approx 11.600 \text{ m}$ (condizioni standard) e 3.280 m (Scirocco), con d_{angolare} identico al caso precedente: anche qui è il contrasto a costituire il vincolo: cfr. Malm (2016), 158.

¹²³ Mazzearella, Zanca (1985), 74 n. 58.

¹²⁴ Con 2.010 g di particolato dispersi nello stesso volume, si ottiene $\rho_{\text{PM}} \approx 5.44 \cdot 10^{-5} \text{ g/m}^3$ e $\beta_{\text{fumo}} \approx 2.72 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ ($K_m = 5 \text{ m}^2/\text{g}$): cfr. Amaral et al. (2016). Con $L_{\text{eff}} \approx 3.76 \cdot 10^2 \text{ m}$ si ha $T_p \approx 0.903$ e $C_0 \approx 0.0972$. La visibilità risulta $d_{\text{contrasto}} \approx 5.120 \text{ m}$ (standard) e 1.450 m (Scirocco), con d_{angolare} invariato.

¹²⁵ Con una portata media di particolato nell'ordine di 6.7 g/s per la fase attiva: cfr. McMeeking et al. (2009). La fase visibile, tuttavia, è molto più breve, e raramente supera i 1–2 minuti: cfr. Huff et al. (2021).

teoricamente raggiungibili si collocano fra 1.450 m e 11.600 m, in funzione della quantità di combustibile, delle condizioni atmosferiche e della velocità del vento.

Questi valori vanno intesi come intervalli operativi indicativi, coerenti con gli ordini di grandezza attesi per piccoli e medi fuochi di biomassa: una diversa scelta dei parametri ottici all'interno delle fasce documentate in letteratura modificherebbe i singoli numeri, ma non la gerarchia relativa delle situazioni né il quadro d'insieme.

4.2. Trasmissione ottica II: fuochi in mare

Un'ulteriore considerazione riguarda la possibilità di usare le navi come 'ripetitori' dei segnali di fuoco e fumo provenienti dalla terraferma. Questa ipotesi era alla base di una mia proposta interpretativa della testimonianza di Plinio nel contesto della Prima guerra punica¹²⁶, che avevo considerato un indizio della capacità delle navi di fungere da intermediari ottici tra postazioni distanti, in particolare tra Erice e Lilibeo¹²⁷. Medas ha espresso forti perplessità sull'idea che una nave potesse fungere da ripetitore efficace tra Lilibeo, Pantelleria e il Capo Bon¹²⁸. Le sue obiezioni si concentrano su aspetti pratici: il movimento continuo delle imbarcazioni avrebbe reso difficile mantenere l'allineamento necessario per la trasmissione; la dispersione atmosferica e le condizioni del mare avrebbero limitato la visibilità; e mantenere un fuoco acceso a bordo avrebbe comportato rischi notevoli per la sicurezza dell'equipaggio.

Queste riserve non escludono, tuttavia, che su distanze più brevi le navi potessero fungere da 'ripetitori' temporanei, specie in contesti tattici dove fosse necessario mantenere il contatto tra postazioni non collegate da linea diretta. La presenza di navi in punti strategici poteva garantire una trasmissione ottica limitata, utile per coordinare manovre o comunicare tra avamposti. In assenza di dati archeologici dirimenti, un mosaico del III sec. d.C. da Sousse raffigura una galea con una fiamma a poppa, interpretata da Seidel come possibile segnale ottico a scopo tattico¹²⁹. Come visto in precedenza, la torcia di quercia, lino e pece da 2 kg, con un'emissione di 460 lumen e intensità effettiva $\approx 10,3 \text{ cd}$ ¹³⁰, da noi esaminata per i segnali notturni, risulterebbe visibile di notte, a 1.650 m¹³¹, sulla base di una soglia di $3 \cdot 10^{-6} \text{ lux}$. Una sorgente di questo tipo sarebbe perfettamente maneggiabile e utilizzabile a bordo¹³².

Anche il sistema delle anfore forate, utilizzato per l'illuminazione notturna, potrebbe essere stato adattato alla segnalazione¹³³. L'anfora punica Mañá D, attestata nel III sec. a.C. e do-

¹²⁶ Plin. *HN* 7.85 racconta di un certo Strabone, appostato sul Capo Lilibeo, in grado, durante una non meglio specificata guerra punica, di vedere il numero di navi in uscita dal porto di Cartagine.

¹²⁷ Vacanti (2012), 146-148.

¹²⁸ Per Medas (2000), 23 non vi sarebbero prove archeologiche che confermino la destinazione ottica delle fosse identificate da Pottino (1976), discusse anche in Vacanti (2012), 146-148. Egli contesta inoltre l'ipotesi di Demerliac e Meirat (1983) di un sistema di segnalazione tra Sicilia e Africa, ritenendolo incompatibile con la curvatura terrestre e con l'insufficienza delle fonti luminose nel coprire distanze superiori ai 50 km.

¹²⁹ Seidel (2009), 239. Rawlings (2010) ritiene che non vi siano prove di un sistema strutturato di comunicazione ottica nella marina cartaginese; ipotizza invece l'uso di navi veloci, come nel caso di Annibale il Rodio (Polyb. 1.46), e giudica implausibile la versione di Polieno (6.16.2) relativa a collegamenti tra Africa e Sicilia.

¹³⁰ Valore ottenuto applicando un fattore anisotropico 0,28 a $I_{\text{iso}} = 460 / (4 \cdot \pi) \approx 36,6 \text{ cd}$.

¹³¹ $E = (10,3 / x^2) \cdot \exp(-0,00013 \cdot x)$; $x \approx 1.650 \text{ m}$.

¹³² Nel 1657 il Gran Maestro Redin sarebbe stato avvisato a Messina della sua elezione a Malta in sole quattro ore, probabilmente attraverso battelli di avviso che trasmettevano segnali visivi; allo stesso modo, fani accesi a Ustica sarebbero stati visti a Palermo durante un attacco corsaro nel 1762 (cfr. Mazzearella, Zanca 1985, 52 n. 17 con testimonianze).

¹³³ Seidel (2009), 238 richiama un rilievo della Colonna Traiana che raffigura una nave con una lanterna a poppa, interpretandolo come possibile indizio dell'uso di illuminazione artificiale a bordo. Southern (1990) esamina le stesse scene nel quadro dei fuochi di frontiera, mettendo in luce i limiti pratici dei segnali ottici a

cumentata anche ad Erice¹³⁴ probabilmente proprio nel contesto della fase finale della Prima punica, se dotata di fori adeguati, potrebbe essere considerata una fonte luminosa efficace per l'impiego navale. L'intensità luminosa isotropa (I_{iso}) stimata varia tra 47 e 95 cd, con una visibilità teorica compresa tra 3.090 e 4.070 m in condizioni normali, ma per tener conto, in modo prudentiale, del moto ondoso e dell'instabilità angolare della sorgente su piattaforma mobile, considereremo anche un intervallo operativo ridotto a metà ($\approx 1.540-2.030$ m), che non sostituisce i valori teorici ma li delimita verso il basso come stima cautelativa¹³⁵. Le segnalazioni luminose a bordo appaiono dunque praticabili anche in mare, con portate visive notturne simili a quelle terrestri. I segnali di fumo, invece, risultano meno gestibili in ambiente navale per via delle maggiori quantità di combustibile richieste.

4.3. Trasmissione ottica III: messaggi fragili

Un segnale di fuoco o di fumo, sia diurno che notturno, ha l'inevitabile caratteristica di poter essere visibile anche al nemico. Se, come mostrano alcuni esempi storici, poteva essere manipolato a scopo di inganno¹³⁶, è altrettanto certo che un messaggio d'allarme come quello "binario" fosse facilmente intercettabile e interpretabile. Per le torri 'camilliane' in Sicilia abbiamo notizia dell'uso di fumo di giorno e di fuoco (o di fascine accese) di notte o in condizioni di scarsa visibilità. Il segnale veniva alzato e abbassato tante volte quanti erano i vascelli avvistati, con istruzioni codificate per casi eccezionali¹³⁷.

lunga distanza e osservando che le torri con torce rivolte verso il Danubio si prestano a essere intese soprattutto come luci per la navigazione fluviale, più che come elementi di una catena di segnali codificati. Nel complesso, egli sottolinea come molti fuochi e roghi servissero anzitutto a illuminare l'area immediatamente circostante, non a trasmettere messaggi complessi. Mauro e Durastante (2023; 2025) ipotizzano che le anfore forate ritrovate in contesti navali potessero servire per l'illuminazione o la segnalazione: a sostegno, citano un affresco egizio nella Tomba di Kenamon (Luxor, XIV sec. a.C.), dove anfore con fuoco acceso sono fissate alla prua di navi cananee, e un'anfora Dressel 1A del II sec. a.C., rinvenuta nel fiume Hérault, con fori, tracce di combustione e segni di legatura.

¹³⁴ Cfr. Filippi (1998). Sulla diffusione di questo tipo di anfora anche lungo la costa tirrenica della Magna Grecia, cfr. da ultimo Mollo (2015).

¹³⁵ In condizioni normali ($\beta_{ext} = 0,00013 \text{ m}^{-1}$), la visibilità teorica si calcola con la formula $E = (I / x^2) * \exp(-\beta_{ext} * x)$, assumendo $E_t = 3 * 10^{-6} \text{ lux}$. Ne derivano: $x \approx 3.090 \text{ m}$ per $I = 47 \text{ cd}$; $x \approx 4.070 \text{ m}$ per $I = 95 \text{ cd}$. In caso di mare mosso non disponiamo di misure sperimentali sulla combinazione fra moto ondoso, oscillazione del fascio luminoso e soglia di percezione: il fattore 0,5 applicato alla distanza di visibilità va dunque inteso come stima prudentiale di ordine di grandezza, che approssima la perdita di efficacia osservata quando la sorgente oscilla di $\pm 10-15^\circ$ attorno alla linea di vista. Dal punto di vista fotometrico esso equivale, in prima approssimazione, a considerare una riduzione del tempo in cui il segnale si mantiene sopra soglia e una minore sovrapposizione fra il lobo principale di emissione e l'osservatore. I valori ridotti ($x \approx 1.540 \text{ m}$ e $x \approx 2.030 \text{ m}$) non sostituiscono le distanze teoriche, ma le delimitano verso il basso come scenario operativo cautelativo. Una trattazione più rigorosa richiederebbe misure goniometriche in mare aperto e un modello dinamico sorgente-osservatore, che esula dagli scopi del presente lavoro. Tutti i valori sono stati calcolati con $E_t = 3 * 10^{-6} \text{ lux}$; $\beta_{ext} = 0,00013 \text{ m}^{-1}$ rappresenta condizioni atmosferiche medie. Parametri complementari: $\Omega = 0,84 \text{ sr}$ (cono di 30°); potenza ottica stimata $P \approx 780 \text{ W}$; efficacia fotopica $\eta = 0,05-0,1 \text{ lm/W}$; flusso luminoso $\Phi = P * \eta$. Il fattore 0,5 non implica una riduzione reale dell'intensità (cd), ma costituisce una stima cautelativa della perdita di efficacia visiva dovuta al movimento irregolare della sorgente.

¹³⁶ Cfr. Thuc. 3,22.7-8: durante l'assedio di Platea i Plateesi usarono segnali ingannevoli per impedire l'arrivo di rinforzi da Tebe e facilitare la loro fuga notturna; cfr. anche Front. *Str.* 2.5.16, dove si riferisce che gli Arabi falsificarono intenzionalmente i segnali per ingannare il nemico.

¹³⁷ Cfr. Mazarella, Zanca 1985, 74 con n. 58: "Per ogni vascello che si scopriva bisognava fare un fumo, di giorno; di notte, o di giorno scuro, poiché il fumo non sarebbe stato visibile, il segno andava fatto con un lume acceso (un fascio di buse o roselle accese, secondo le istruzioni del 1804), alzandolo ed abbassandolo tante volte quanti erano i vascelli scoperti, e se questi erano dodici o più (ciò che, evidentemente, voleva dire gran pericolo) facendolo ruotare continuamente".

Al di là della soluzione complessa proposta da Polibio, che introduceva un livello superiore di criptazione, anche altri sistemi offrivano margini di segretezza¹³⁸. Anche il telegrafo ad acqua permetteva di cifrare il messaggio trasmesso, pur restando vulnerabile alla visibilità da parte del nemico. È verosimile che i significati predeterminati dei recipienti — anche nella variante dell’asta descritta da Polieno o, ancor più, nel caso delle 24 lettere ipotizzate da Woolliscroft — potessero essere cambiati rapidamente previo accordo. Non occorre la complessità dei meccanismi della macchina Enigma per aggiornare i codici. Semmai, il vero rischio era duplice: da un lato, l’eventuale mancata ricezione nei sistemi più semplici basati sull’accensione di fuochi o fumate; dall’altro, l’ambiguità interpretativa nei sistemi più complessi come il telegrafo ad acqua.

In definitiva, sotto il profilo della sicurezza e dell’efficienza, i sistemi di segnalazione erano strumenti potenti ma fragili, vulnerabili sia alla decodifica da parte del nemico sia a limiti operativi. Messaggi complessi erano trasmissibili solo di notte, e per distanze teoriche comprese tra circa 1.650 m (torcia da 2kg con 10,3 cd) e 4.150 m (falò con 300 kg di legna con 90 cd). Di giorno, invece, solo segnali fumogeni prodotti da grandi quantità di legna o paglia potevano garantire una visibilità efficace, con una portata massima teorica di 11 km per 500 kg di legna in condizioni ideali. Queste distanze restano tuttavia stime di primo ordine, ricavate dal modello del § 3.2 con parametri di fumo (β_{fumo} , K_m , ρ_{PM}) adattati da studi su pennacchi di combustione di biomassa (Stockie 2011): sono grandezze sensibili alle scelte di questi coefficienti e richiederebbero una validazione sperimentale dedicata, su scala controllata, per la combustione di legna e paglia in condizioni analoghe. Visibilità superiori erano teoricamente possibili, ma richiedevano quantità di combustibile incompatibili con l’uso tattico o mobile e si ottenevano solo in condizioni atmosferiche eccezionalmente favorevoli.

5.1 Quadro operativo

Nel corso di questo studio abbiamo definito un quadro operativo per valutare la visibilità effettiva dei principali sistemi di segnalazione ottica utilizzati dai Cartaginesi, combinando fonti antiche, dati fisici e ricostruzioni archeologiche. Rispetto alla letteratura esistente, che ha avuto il merito di evidenziare la rilevanza dei segnali visivi nel mondo antico — ma che spesso si è basata su stime qualitative o su ipotesi non supportate da modelli ottico-fisiologici — questo lavoro si propone di colmare una lacuna metodologica, fornendo parametri misurabili e verificabili. Integrando la legge di Allard per l’illuminamento notturno, la legge di Koschmieder per il contrasto atmosferico, la soglia angolare minima di rilevazione ($\theta = 0,00029$ rad) e il coefficiente di trasmittanza interna del fumo (T_p), abbiamo calcolato le distanze massime realisticamente raggiungibili da ciascun tipo di segnale, tenendo conto delle condizioni atmosferiche documentate in Sicilia tra valori medi ($\beta_{\text{ext}} = 0,00013 \text{ m}^{-1}$) e critici (fino a $\beta_{\text{ext}} = 0,001159 \text{ m}^{-1}$). I dati sono stati ricavati e confrontati con le emissioni documentate da Moullou e Topalis per torce e falò antichi, e dai modelli di Mauro e Durastante sul comportamento degli aerosol. Secondo questi modelli, le torce più luminose (≈ 10 cd) risultano visibili di notte fino a 1.650 m, i falò piccoli (≈ 25 cd) fino a 2.370 m, e i falò schermati alimentati con 300 kg di legna (≈ 90 cd) fino a 4.150 m. I falò di maggiore intensità con 500 kg di legna (≈ 162 cd) raggiungono ≈ 5.150 m in aria limpida. Una precisazione riguarda l’impiego pratico del telegrafo ad acqua. Di notte la modulazione rapida delle

¹³⁸ Cfr. Diepenbroek (2019), che analizza lo sviluppo storico dei segnali di fuoco nelle fonti greche e romane, concentrandosi sul metodo di Enea Tattico e Polibio e sulla loro influenza sulla crittografia moderna, incluso il cifrario ADFGX usato nella Prima guerra mondiale.

ventiquattro tacche graduate è assicurata dalla fiamma schermata: l'intensità passa dall'accensione all'oscuramento in pochi secondi, condizione che permette la trasmissione di messaggi complessi fino a 4.150 m con focolari da 300 kg.

Alla luce del giorno, invece, il pennacchio di fumo prodotto da 300 kg, e a maggior ragione da 500 kg di legna o da fasci di paglia di 150 kg, non può essere "spento" altrettanto rapidamente: l'inerzia della colonna protratta per decine di secondi non consente più la codifica alfabetica di Filone-Polibio. In questa fascia oraria il sistema si riduce quindi a un segnale semplice (numero o durata dei pennacchi). In condizioni atmosferiche medie ($\beta_{\text{ext}} = 0,00013 \text{ m}^{-1}$), la visibilità effettiva del fumo generato da 300 kg di legna raggiunge circa 8.060 m, quella da 500 kg circa 11.600 m, mentre un quantitativo molto minore di paglia, 150 kg, grazie al maggiore contenuto di potassio e alla riflessione più intensa, consente di arrivare fino a circa 5.120 m. In presenza di Scirocco ($\beta_{\text{ext}} = 0,00046 \text{ m}^{-1}$), con aumento della dispersione aerodinamica e maggiore attenuazione atmosferica, questi valori si riducono rispettivamente a circa 2.280 m, 3.280 m e 1.791 m. Tuttavia, il fumo della paglia ha una durata estremamente ridotta: la combustione si esaurisce in circa cinque minuti, e la fase visibile del pennacchio si concentra in 1–2 minuti, rendendo il segnale utilizzabile solo per impulsi rapidi e su distanze contenute. Il fumo prodotto da una torcia (2 kg) o da un piccolo focolare (10 kg), invece, risulta troppo tenue per superare la soglia minima di percezione: la trasparenza del pennacchio ne annulla completamente la visibilità in condizioni diurne.

Dal punto di vista fisico, le distanze così ottenute restano comunque legate a una doppia incertezza strutturale: da un lato l'intensità luminosa effettiva delle sorgenti (I_{eff}), ricavata da un numero limitato di misure goniometriche e sensibile alla geometria reale della fiamma, ai combustibili e alle condizioni del vento; dall'altro i parametri ottici del fumo (β_{fumo} , K_m , ρ_{PM} , T_p , C_o), adattati da modelli per pennacchi di combustione di biomassa su scala diversa. In assenza di misure dedicate per torce e falò punici, le portate di visibilità vanno quindi lette come intervalli di ordine di grandezza, non come soglie rigide di funzionamento, e risultano suscettibili di variazioni significative al variare delle condizioni meteorologiche locali.

I valori qui presentati indicano la distanza massima a cui ciascun segnale poteva risultare visibile in condizioni ottimali, ma non implicano che tali distanze costituissero il riferimento operativo delle autorità cartaginesi. Simulando le esigenze di uno Stato maggiore cartaginese, cui non interessava certo la visibilità massima raggiungibile in condizioni ideali ma la solidità e certezza delle comunicazioni, si può ipotizzare che le scelte progettuali fossero guidate da criteri di affidabilità e continuità, privilegiando la costanza della trasmissione rispetto al massimo raggi teoricamente ottenibile.

Alla luce di questi risultati, molte testimonianze letterarie risultano pienamente compatibili: i segnali di fuoco notturni per trasmissioni a distanza tra torri descritti da Appiano, gli allarmi costieri attestati da Cicerone, le segnalazioni fumogene in ambito romano attestate da Cesare, Vegezio, Frontino e Maurizio, fino al telegrafo ad acqua descritto da Filone, Polibio e Polieno, se riferito a distanze non superiori a 4000 m come nel caso dell'assedio di Agrigento. Al contrario, la comunicazione diretta tra Sicilia e Cartagine, richiamata da Filone, non risulta compatibile con i limiti imposti dalla fisica, se non ipotizzando l'esistenza di nodi intermedi (Pantelleria o unità navali statiche).

La tabella seguente sintetizza questi dati e rappresenta il fondamento per la simulazione operativa che sarà proposta nel paragrafo successivo, volta a verificare la plausibilità tecnica di una comunicazione visiva in contesto bellico tra le due sponde del Canale di Sicilia.

1. Tabella sintetica visibilità

Segnale / visibilità	Contesto operativo	Condizioni medie ($\beta_{\text{ext}} = 0,00013 \text{ m}^{-1}$)	Scirocco ($\beta_{\text{ext}} = 0,00046 \text{ m}^{-1}$)	Note
Vista passiva – Uomo (1,7 m)	Giorno	5.860 m / 28.400 m	8.020 m	Il valore 5.860 m è il limite angolare per un uomo di 1,7 m visto da terra. I limiti geometrici e atmosferici (28.400 / 8.020 m) diventano rilevanti solo se l'osservatore si trova in quota.
Vista passiva – Nave (albero $\approx$ 9 m)	Giorno	31.000 m / 28.400 m	8.020 m	Il limite angolare (31.000 m) è superiore a quello geometrico (28.400 m), che rappresenta la massima distanza teorica di visibilità dalla costa. In condizioni di Scirocco prevale il limite atmosferico (8.020 m)
Segnale semplice – Falò 500 kg	Notte	5.150 m	3.270 m	Visibilità notturna calcolata in base all'intensità luminosa e all'assorbimento atmosferico. Di giorno prevalgono i limiti di contrasto e dimensione apparente.
Telegrafo ad acqua – Torcia, falò piccolo, falò 300 kg	Notte	1.650 m – 2.370 m – 4.150 m	1.300 m – 1.740 m – 2.610 m	Portata variabile in base all'intensità della sorgente. La visibilità peggiora in condizioni atmosferiche sfavorevoli.
Segnale semplice – Fumo 500 kg legna	Giorno	11.600 m	3.280 m	Visibilità determinata da C_o , attenuazione atmosferica e angolo visivo. Con Scirocco: forte calo per maggiore estinzione ottica.
Segnale semplice – Fumo 150 kg paglia	Giorno	5.120 m	1.450 m	Visibilità determinata da C_o , attenuazione atmosferica e angolo visivo. Contrasto maggiore rispetto alla legna, ma durata molto breve. Con Scirocco: calo netto per estinzione ottica
Segnale semplice/complesso – Torcia, falò piccolo, falò 300 kg	Crepuscolo profondo	183 – 283 – 529 m	178 – 271 – 489 m	Invisibili con cielo sereno o coperto. Diventano distinguibili solo al crepuscolo profondo, quando il contrasto visivo è sufficiente.
Telegrafo ad acqua – Anfora (47–95 cd)	Notte – da nave	3.090–4.070 m (1.540–2.030 m con beccheggio)	2.400–3.000 m	Visibilità influenzata dall'intensità luminosa e dalla stabilità della piattaforma (nave): le oscillazioni dovute al beccheggio possono ridurre la distanza utile

5.2 *Request immediate reinforcements*

Proveremo adesso ad effettuare più che una simulazione l'equivalente storico di un *Gedankenexperiment*. Proviamo a immaginare uno scambio di comunicazioni nel corso della Prima punica, durante l'assedio romano di Agrigento nel 262¹³⁹. Supponiamo che il comandante della guarnigione cartaginese, Annibale figlio di Giscone, avesse richiesto all'esercito di soccorso guidato da Annone un attacco massiccio contro l'esercito romano allo scopo di alleggerire la pressione sugli assediati; e che questi si fosse reso conto che per potere effettuarlo avesse necessità di cavalleria aggiuntiva e avesse inviato una richiesta in tal senso a Cartagine. Supponiamo quindi che Cartagine rispondesse negativamente ad Annone e che questi ne informasse Annibale. Verifichiamo infine se i Romani si fossero potuti rendere conto dello scambio dei messaggi. Per seguire meglio la sequenza degli eventi, a ciascun punto corrisponde, in calce, una carta che ne illustri andamento e inquadramento geografico.

1) Dall'acropoli di Agrigento, il 15 luglio, poco dopo il calare del sole (20:45) e con l'oscurità sufficiente a rendere visibile il segnale, Annibale invia un messaggio ad Annone¹⁴⁰. La distanza in linea d'aria tra l'acropoli e la collina del Toro è di circa 4 km¹⁴¹. Il messaggio, grazie a condizioni atmosferiche favorevoli, viene trasmesso di notte mediante un segnale luminoso utilizzabile per il telegrafo ad acqua. Considerata la distanza e le condizioni atmosferiche medie, il segnale deve essere generato da un falò schermato alimentato con circa 300 kg di legno d'ulivo. La trasmissione avviene mediante accensione visibile del falò, sincronizzazione del telegrafo ad acqua, e oscuramento o spegnimento al raggiungimento della tacca desiderata, che trasmette il messaggio predeterminato "Richiesta di attacco". La trasmissione avviene con successo. Annone riceve il messaggio e prepara l'invio di una nave.

(Vedi Fig. 1 alla pagina seguente)

2) Nel corso della notte, poco più di un'ora dopo la trasmissione del messaggio da Agrigento, verso le ore 22:00, Annone ordina la partenza di una nave dalla zona di Porto Empedocle in direzione della costa occidentale della Sicilia¹⁴². La rotta seguita è costiera, lungo il litorale sud dell'isola, fino a Lilibeo. Nonostante i venti dominanti da nord-ovest rendano sfavorevole una circumnavigazione in senso orario, la navigazione sottocosta resta comunque praticabile

¹³⁹ Sull'assedio di Agrigento, cfr. per tutti Lazenby (1996), 54–59, che ricostruisce con accuratezza lo svolgimento dell'assedio sulla base di Polyb. 1.17–20, Diod. Sic. 23.8–9, Oros. 4.7.5, Frontin. *Str.* 2.1.4 e Zonar. 8.10, e menziona espressamente l'esistenza di comunicazioni tra la guarnigione cartaginese e l'esercito di soccorso guidato da Annone. Quest'ultimo, dopo aver occupato Herbesos, tentò una manovra diversiva inviando la cavalleria numidica a provocare un'uscita della cavalleria romana (Polyb. 1.19.3–6): l'inseguimento fu seguito da un'imboscata, che inflisse gravi perdite ai Romani. Zonar. 8.10 menziona genericamente l'intervento di Annone, ma omette del tutto la manovra e la cavalleria, riducendo lo scontro a una battaglia campale.

¹⁴⁰ D'estate, il 15 luglio, il tramonto solare ad Agrigento avviene attorno alle 19:15. Secondo i modelli di decadimento dell'illuminamento naturale, la soglia $3 \cdot 10^{-6}$ lux richiesta per la visibilità notturna del segnale ottico viene raggiunta circa 90 minuti dopo il tramonto, ovvero attorno alle 20:45.

¹⁴¹ Cfr. *supra* nt 90.

¹⁴² La rotta alternativa Porto Empedocle–Pantelleria–Cartagine è in sé percorribile, ma sfavorevole nelle condizioni di vento più comuni nel Canale di Sicilia. La tratta Pantelleria–Cartagine è orientata grosso modo verso O; con venti frequenti da NO l'angolo vento–rotta ricade nella fascia più stretta dei 50–60° di bolina stimati per le vele quadre antiche (Medas, 2000, 212–214), con conseguente forte riduzione del rendimento. Per questo Arnaud (2005, 163) osserva che la traversata è realmente agevole solo nel senso O–E, mentre nel senso inverso resta ai limiti della fattibilità per la vela antica; con venti di Scirocco, al contrario, la stessa rotta diventa sensibilmente più favorevole.

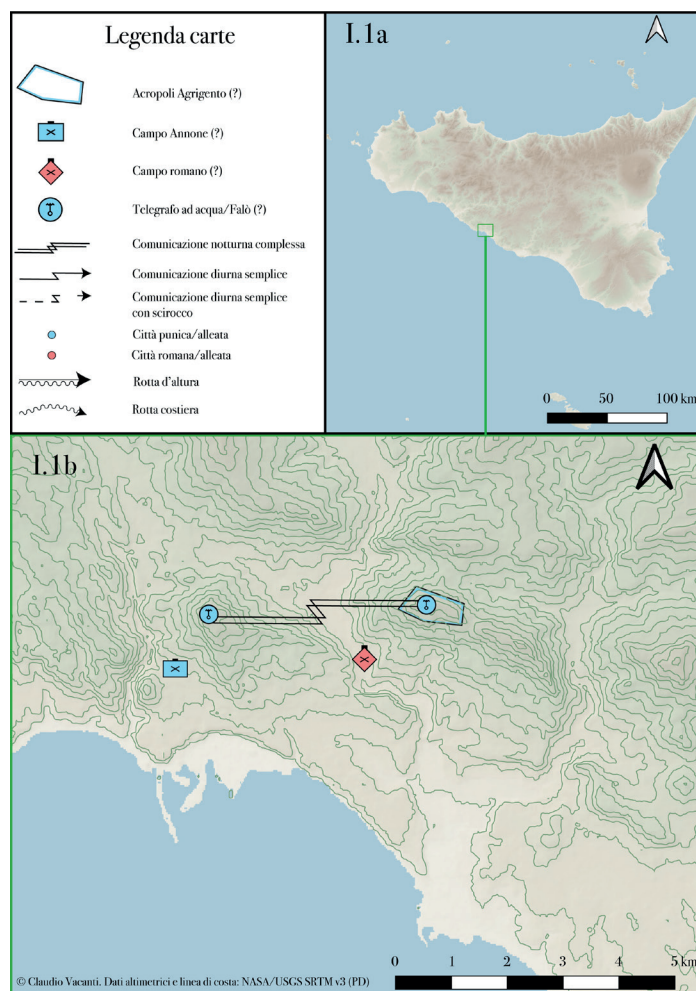


Fig. 1.

grazie all'effetto delle brezze parallele alla linea di costa¹⁴³. La nave raggiunge un punto situato a poco meno di 4 km dalla costa lilibetana la notte del giorno successivo, il 16 luglio, intorno alle ore 22:30, dopo una traversata di circa venticinque ore¹⁴⁴. Da lì, tramite telegrafo ad acqua, si trasmette il messaggio predeterminato "Richiesta cavalleria aggiuntiva" mediante un'anfora Mañá D, riempita con miscela combustibile (olio, pece, resina), che consente una trasmissione, sempre tramite telegrafo ad acqua, del messaggio predeterminato, compatibile con una distanza ottica di circa 3.700 m¹⁴⁵, che viene quindi trasmesso ad una seconda nave, già pronta presso Lilibeo, che parte immediatamente alla volta della costa africana. Questa

¹⁴³ Arnaud (2005), 213 segnala che la Sicilia si circumnaviga più agevolmente in senso antiorario per effetto dei venti da nord-ovest, ma ammette la possibilità di navigazione controvento lungo costa grazie a brezze parallele al litorale, che richiedono soste regolari.

¹⁴⁴ Distanza stimata: Porto Empedocle–Lilibeo ≈ 139 km. Arnaud (2005), 98-107 sottolinea la variabilità della velocità delle navi antiche che si ricava dalle fonti antiche, con una media di 1000 stadi/24 h $\approx 4,15$. In questo caso presupporremo una velocità più bassa della media visto il tragitto controvento di 3 nodi. Tra Porto Empedocle e il punto di trasmissione al largo della costa lilibetana (punto a 3.710 m da terra) vi sono $\approx 135,67$ km. Con la velocità assunta di 3 nodi = 5,556 km/h, il tempo di percorrenza risulta = $135,67 \text{ km} / 5,556 \text{ km/h} \approx 24,42 \text{ h} \rightarrow 24 \text{ h e } 25 \text{ min}$. Ora di arrivo = 22:00 + 24 h 25 min = 22:25 del 16 luglio.

¹⁴⁵ Calcolo effettuato con un'anfora Mañá D, I_{eff} compreso tra 47 e 95 cd secondo il modello di Allard, già corretto per anisotropia. Con $E_t = 3 \cdot 10^{-6} \text{ lux}$ e $\beta_{\text{ext}} = 0,00013 \text{ m}^{-1}$, la visibilità teorica varia tra 3.090 e 4.070 m, secondo la formula $E = (I / x^2) \cdot \exp(-\beta_{\text{ext}} \cdot x)$.

soluzione evita l'attracco, la gestione degli approvvigionamenti e le operazioni di riassetto, soprattutto se la nave da segnalazione era una nave lunga, in grado di mantenere una buona andatura anche a remi. Il risparmio è in questo caso di circa un'ora e mezza, che si riduce ad almeno quaranta minuti se, com'è da presupporre, immaginiamo in ogni caso, anche in caso di attracco, l'uso di una nuova nave per l'invio del messaggio a Cartagine¹⁴⁶. La seconda nave arriva in vista di Cartagine il giorno successivo, il 17 luglio, intorno alle ore 13:25, ma il messaggio può essere trasmesso solo direttamente a voce dall'equipaggio della nave dopo l'attracco, poiché la trasmissione ottica da mare aperto non è praticabile in pieno giorno¹⁴⁷.

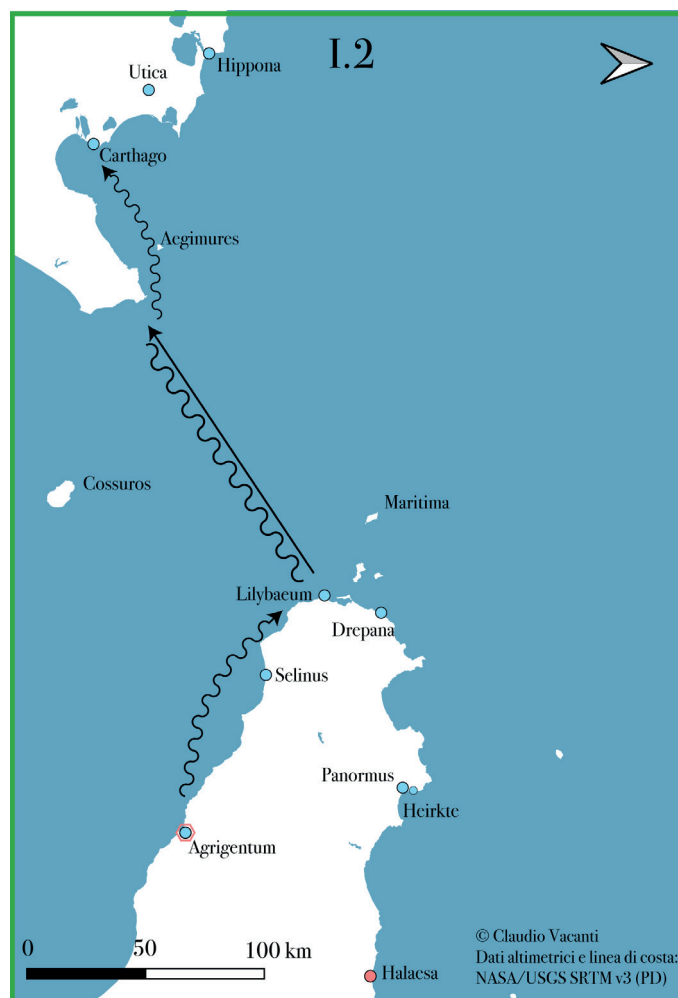


Fig. 2.

¹⁴⁶ Con l'impiego di una sola nave per l'intero tragitto da Porto Empedocle a Cartagine, si deve infatti presupporre una sosta a Lilibeo di almeno un'ora per rifornirsi d'acqua e consentire il riposo dell'equipaggio, al fine di migliorare l'efficienza della navigazione nella seconda parte del percorso specie in caso di presenza di remi. Arnaud (2005), 107, 137 e 213 osserva che in tratte plurigiornaliere le basse medie di percorrenza non indicano necessariamente lentezza strutturale, ma riflettono la normalità di scali tecnici, soste non commerciali legate a esigenze operative. Evitare l'ingresso in porto consente comunque un risparmio di circa 40 minuti se l'ultimo tragitto di circa 3700 m fossero stati percorsi a 3 nodi ($3.710 \text{ m} / 5,556 \text{ km/h} \approx 0,668 \text{ h} \approx 40 \text{ min}$), risparmio che appunto si deve comunque considerare anche se si immagina l'uso di una nuova nave staffetta.

¹⁴⁷ Percorrendo i 114 km fino a Cartagine, alla velocità media di 4,1 nodi = 7,593 km/h, si ottiene un tempo di percorrenza pari a $114 \text{ km} / 7,593 \text{ km/h} \approx 15,01 \text{ h}$. Partenza da Lilibeo alle 22:25 del 16 luglio → arrivo alle 13:25 del 17 luglio.

3) Nel giro di due ore viene convocata e conclusa una riunione, verosimilmente della Gerusia, in cui si decide di non inviare rinforzi¹⁴⁸. Alle 15:30 del 17 luglio una nuova nave, o la medesima arrivata da Lilibeo che nel frattempo avrebbe potuto effettuare le operazioni di sbarco e riassetto, parte da Cartagine con l'incarico di comunicare ad Annone l'esito della deliberazione. Viene seguita la rotta in direzione di Pantelleria, più agevole nel senso ovest-est grazie all'orientamento favorevole dei venti dominanti da nord-ovest¹⁴⁹. La distanza da percorrere è di circa 88 miglia nautiche, pari a 163,38 km, percorribili in circa ventuno ore e mezza a una velocità media di 4,1 nodi¹⁵⁰. L'arrivo presso la costa sud-orientale dell'isola è collocabile attorno alle ore 14:00 del 18 luglio, in pieno giorno, il che impedisce l'uso del telegrafo ottico da mare aperto. Il messaggio deve quindi essere trasmesso via terra dopo l'attracco. Questa scelta è rafforzata dal fatto che le alture di Pantelleria presentano spesso foschia o visibilità ridotta anche in estate, elementi che ne limitano l'impiego come nodo ottico di lunga distanza e rendono più affidabile, in uno scenario operativo, l'utilizzo dell'isola come semplice scalo di trasmissione terrestre.



Fig. 3.

¹⁴⁸ Sui meccanismi decisionali a Cartagine in tempo di guerra cfr. Loreto (1996); Fariselli (2006).

¹⁴⁹ Arnaud (2005), 164.

¹⁵⁰ 163,38 km / 7,593 km/h $\approx$ 21,51 h.

4) L'imbarcazione parte alle 14:15 del 18 luglio in direzione di Porto Empedocle, dove sbarca il 19 luglio intorno alle 9:15¹⁵¹. Vista la difficoltà di inviare un segnale di fumo a bordo, il messaggio viene comunicato a voce. Annone non può inviare ad Annibale un messaggio complesso, giacché il telegrafo ad acqua richiedeva la visibilità di un segnale preciso, condizione non realizzabile in pieno giorno con un segnale di fumo gestibile e realizzabile solo da una torcia o un piccolo falò. Potrebbe però inviare un messaggio semplice, come ad esempio due fumate simultanee da due falò da 500 kg di legna, o due con 150 kg di paglia, per indicare un eventuale "no" prestabilito, poiché tale configurazione avrebbe una portata operativa massima di circa 11.600 m (legna) e 5.120 m (paglia) purché in condizioni favorevoli, mentre, con un leggero vento di scirocco, la portata si ridurrebbe rispettivamente a circa 3.280 e 1.450 metri, oltre al rischio che la fiamma potesse propagarsi, e la segnalazione sarebbe impossibile. Per comunicare un messaggio più complesso però – ad esempio un messaggio formato da tre messaggi predeterminati come 1) "rinforzi non autorizzati", 2) "sortita minore" 3) "domani attacco all'alba" – Annone è invece costretto ad attendere il calare del sole per trasmettere alle ore 21 del 19 luglio dalla collina del Toro con telegrafo ottico il messaggio di risposta alla richiesta inviata da Amilcare il 15 luglio alle 20:45.



Fig. 4a.

¹⁵¹ La distanza, pari a 143,95 km, è percorsa in circa diciannove ore ad una velocità media di 4,1 nodi: $143,95 \text{ km} / 7,593 \text{ km/h} \approx 18,96 \text{ h}$.

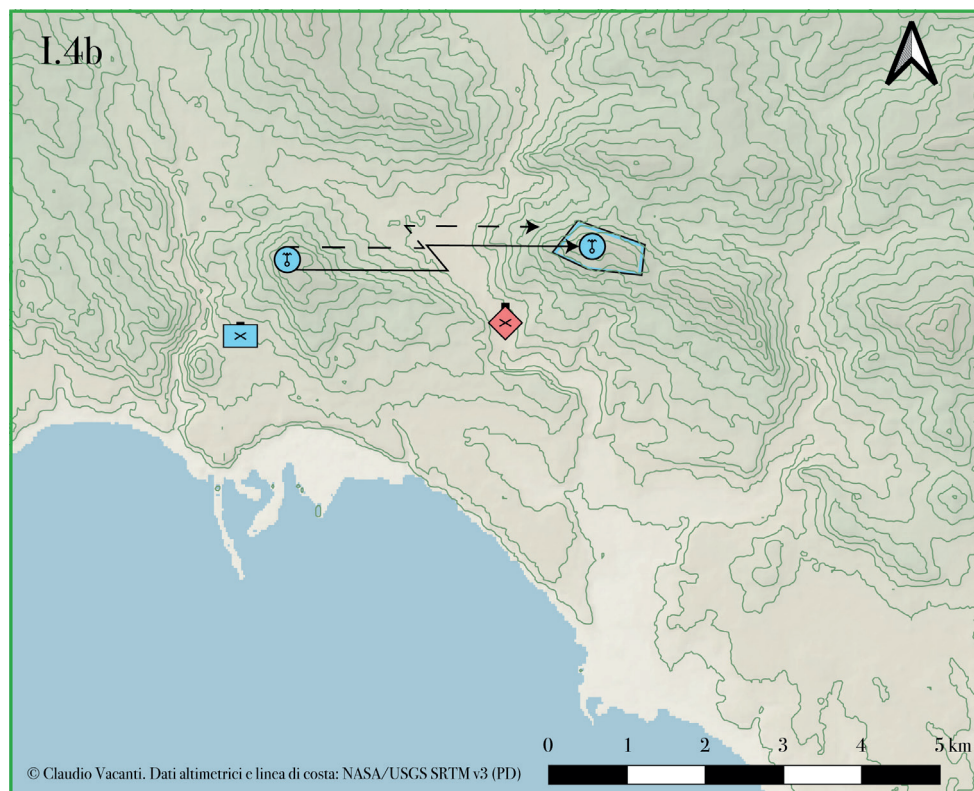


Fig. 4b.

Il messaggio ha dunque impiegato 40 ore per fare il percorso Agrigento-Cartagine, poco meno di 43 ore per arrivare ad Annone e, in maniera semplificata ad Annibale di Giscone, ma sono stati necessari quattro giorni (96 ore) perché quest'ultimo possa ricevere istruzioni operative aggiornate in merito alla sua richiesta. Naturalmente, le circa 40 ore ipotizzate indicano un tempo operativo cautelativo, legato alle condizioni di vento e alle velocità assunte, e non una prestazione limite della rotta: con meteomare più favorevole, la traversata potrebbe risultare sensibilmente più rapida. Il sistema adottato consente un risparmio netto di quattro ore rispetto all'invio di una singola nave per l'intero tragitto, e di un'ora rispetto a una staffetta priva di trasmissione ottica¹⁵². Il vero vantaggio del sistema, tuttavia, non consiste tanto nel risparmio assoluto di tempo, quanto nella possibilità di modulare la comunicazione in modo flessibile e rapido. Esso permetteva infatti di raggiungere postazioni isolate, di mobilitare in tempi brevi più vettori indipendenti e di adattarsi con efficacia a una struttura di comando reticolare. In particolare, senza il segnale ottico tra Annibale e Annone, la richiesta iniziale avrebbe dovuto essere affidata all'invio di un messaggero fuori dalle mura, con un altissimo rischio di intercettazione. I Romani, pur potendo rilevare l'accensione dei fuochi e i movimenti delle navi, non avrebbero avuto modo di decifrare il contenuto dei messaggi senza disporre del relativo cifrario cartaginese, che poteva essere modificato secondo schemi e intervalli prefissati.

¹⁵² Con una nave unica da Porto Empedocle a Cartagine, si devono calcolare: 135,67 km in 24 h 25 min (a 3 nodi) per Lilibeo, sosta nel porto di 1 h, 114 km in 15 h (a 4,1 nodi) per raggiungere Cartagine, tempo della riunione 2 h, 163,38 km in 21 h 30 min per arrivare a Pantelleria, sosta nell'isola di 1 h, 143,95 km in 19 h per raggiungere Porto Empedocle: totale 100 h 15 min, ossia 4 h in più. Nel caso di staffetta senza segnale ottico, la nave completrebbe i 3,7 km fino al porto (+40 min) ma partirebbe subito per Cartagine: arrivo ad Annibale si collocherebbe sempre il 19 luglio alle 21:00, ma dopo 97 h 15 min, ossia 1 h in più.

5.3 Per una conclusione aperta.

Questo saggio non pretende di restituire un sistema pienamente ricostruito, né di dimostrare con certezza il funzionamento delle comunicazioni puniche. Ma può forse offrire uno strumento di lavoro. Un modello verificabile, discutibile, eventualmente falsificabile, costruito per offrire a chi studia questi fenomeni – e più in generale a chi si occupa di storia militare, logistica, comunicazione e comando nel mondo antico – un punto d'appoggio concreto. È in questo senso che il tentativo va letto: non come una sintesi né come un esercizio di ricostruzione, ma come una piattaforma operativa, da usare per affinare domande, orientare confronti, esplorare scenari.

Tutti i modelli discussi in queste pagine – dalla visibilità geometrica alla trasmissione ottica del segnale – non sono stati concepiti come simulazioni fisiche esaustive, ma come strumenti operativi: coerenti con i dati disponibili e orientati a definire soglie di plausibilità storica. In questa prospettiva, il modello qui proposto va inteso come quadro parametrico aperto: non sostituisce la necessità di misurazioni fotometriche e di prove di campo dedicate, ma fornisce il perimetro quantitativo entro cui tali esperimenti potranno essere progettati, verificati e, se necessario, corretti. Variabili come l'anisotropia delle sorgenti, la rifrazione atmosferica o la luminanza del cielo sono state considerate solo in forma semplificata e non modellate in modo esaustivo, mentre altri fattori – come la dispersione tridimensionale del particolato, il decadimento del contrasto ottico e il vincolo angolare per la soglia di percettibilità – sono stati inclusi nei limiti in cui potevano essere storicamente modellati, senza pretese di completezza. L'obiettivo non è riprodurre ogni dettaglio, ma testare ipotesi verificabili, secondo parametri sperimentali e logiche comparative.

Come ogni modello, anche questo ha limiti che non vanno nascosti: la sua utilità non risiede nell'eshaustività, bensì nella capacità di affinare le domande, chiarire i margini di incertezza, e definire con più precisione la linea d'orizzonte delle possibilità storiche, rendendole meno opache, più leggibili. L'esperimento conclusivo serve solo a mostrare come – e se – il modello regga. Il resto è lavoro aperto, ma orientato: spetta ora a chi verrà dopo testarne la solidità, esplorarne le implicazioni, e – se necessario – spingere oltre la linea d'orizzonte che qui si è cercato di tracciare. Perché un segnale, per essere utile, deve poter essere visto — e non restare senza risposta.

Bibliografia

- Achtemeier G. L., Goodrick S. A., Liu Y., GarciaMenendez F., Hu Y., Odman M. T. (2011), Modeling Smoke Plume Rise and Dispersion from Southern United States Prescribed Burns with Daysmoke, *Atmosphere*, 2(3), 358–388.
- Amaral S. S., Costa M. A. M., Pinheiro C., Carvalho J. A. (2016), Particulate matter emission factors for biomass combustion, *Atmosphere*, 7(11), 1–25.
- Arnaud P. (2005), *Les routes de la navigation antique: itinéraires en Méditerranée*, Paris.
- Beers W. (2014), Fire and Smoke: Ethnographic and Archaeological Evidence for Line-of-Sight Signaling in North America, in *Enduring Curiosity, Generous Service: Papers in Honor of Sheila K. Brewer*, Archaeological Society of New Mexico (Papers of the Archaeological Society of New Mexico, 40), Brown E. J., Condie C. J., Crotty H. K. [eds], Albuquerque, 23–32.
- Borowski O., Howell B. F., Sever T. L. (1998), *Communication by Fire (and Smoke) Signals in the Kingdom of Judah*, NASA Technical Report, Doc. ID 19980237255.
- Byram G. M., Jemison G. M. (1948), *Some Principles of Visibility and Their Application to Forest Fire Detection*, USDA Forest Service Technical Bulletin 954, Washington DC.
- Carrington J. F. (1949). *The talking drums of Africa*, London.
- Cerezo Andreo F., Pérez-Reverte Mañas C., Mauro C. M. (2016), New approaches to maritime visibility: a comparative study of traditional mathematical methods, GIS application and experimental archaeology, in *Actas del V Congreso Internacional de Arqueología Subacuática Un patrimonio para la humanidad* (Cartagena, 15-18 de octubre de 2014), Madrid, 288-290.
- Christiansen J. (2014), La signalisation maritime dans l'Antiquité : aménagement du littoral et appropriation territoriale, in *Implantations humaines en milieu littoral méditerranéen : facteurs d'installation et processus d'appropriation de l'espace (Préhistoire, Antiquité, Moyen Âge)*, Atti del XXXIVe Rencontre internationale d'Antibes (Antibes, 2013), Mercuri L., González Villares R., Bertonecello F. [eds], Antibes, 229-241.
- Christiansen J. (2021), La signalisation des ports dans l'Antiquité. Quelques éléments de réflexion, in *Les ports dans l'espace méditerranéen antique*, Carré M.-B., Excoffon P. [eds], Aix-en-Provence, 41-52.
- Čučković Z. (2015), Čučković, Z. (2015), *Exploring intervisibility networks: A case study from Bronze and Iron Age Istria (Croatia and Slovenia)*, in *CAA2014: 21st Century Archaeology. Concepts, methods and tools, Proceedings of the 42nd Annual Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*, Giligny F., Djindjian F., Costa L., Moscati P., Robert S. [eds], Oxford, 469-477.
- Dahm M. K. (2011), Roman Frontier Signalling and the Order of the fupark, *Journal of Indo-European Studies*, 39(1–2), 1–12.
- Demerliac J. G., Meirat J. (1983), *Hannon et l'Empire punique*, Paris.
- Diepenbroek M. (2019), From fire signals to ADFGX: a case study in the adaptation of ancient methods of secret communication, in *Kleos. Amsterdam Bulletin of Ancient Studies and Archaeology*, 2, 63–76.
- D'Oriano R., Mancini P. (2021), La torre di avvistamento punica di Porto Rotondo-Olbia, in *Luci dalle tenebre. Dai lumi degli Etruschi ai bagliori di Roma*, Donati L., Bruschetti P., Mascelli V. [eds], Cortona, 287-292.
- Fariselli A. C. (2006), Il progetto politico dei Barcidi, *Pallas*, 70, 105–122.
- Filippi A. (1998), Le fortificazioni militari sul Monte Erice durante la prima guerra punica, *SicA*, 31, 96, 165-184.
- Finnegan R. (2012), *Oral Literature in Africa*, Cambridge (edizione originale 1970, Oxford)
- Forbes R. J. (1958), *Studies in Ancient Technology*, vol. 6, Leiden.
- Garfinkel B. (1967), Astronomical Refraction in a Polytropic Atmosphere, *The Astronomical Journal*, 72(2), 235–254.

- Genovese C. (2018), Le torri difensive della costa siciliana, in *Sicilia fortificata. Difesa e controllo del territorio tra Medioevo ed Età Moderna*, Barone G. [ed], Palermo, 651–658.
- Giardina B. (2010), Navigare necesse est: *Lighthouses from Antiquity to the Middle Ages*, Oxford.
- Giuffrida A. (2007), La fortezza indifesa e il progetto del Vega per una ristrutturazione del sistema difensivo siciliano, in *Mediterraneo in armi (secc. XV–XVIII)*, R. Cancila [ed], Palermo, 227–288.
- Hecht E. (2002), *Optics*, San Francisco.
- Hecht S., Shlaer S., Pirenne M. H. (1942), Energy, Quanta, and Vision, *Journal of General Physiology*, 25(6), 819–840.
- Huff A. K., Kondragunta S., Zhang H., Laszlo I., Zhou M., Caicedo V., Delgado R., Levy R. (2021), Tracking smoke from a prescribed fire and its impacts on local air quality using temporally resolved GOES16 ABI aerosol optical depth (AOD), in *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 38(5), 963–976.
- Hunter J. (1913), *Formulae for atmospheric refraction and their application*, London.
- Koschmieder H. (1925), Theorie der horizontalen Sichtweite, *Beiträge zur Physik der freien Atmosphäre*, 12, 33–53 e 171–181.
- Krisciunas K., Carona D. M. (2015), At what distance can the human eye detect a candle flame?, arXiv:1507.06270.
- Kromayer J. (1922), *Schlachten-Atlas zur antiken Kriegsgeschichte*, Berlin-Leipzig.
- Kulikova M. (2024), Antique hydraulic telegraph: refinement of the data transfer rate in Ancient Greece by an experiment and a mathematical model, *Eurasian Scientific Journal*, 1.
- Lassandro P., Fioriello C. S., Lepore M., Zonno M. (2021), Analysing, modelling and promoting tangible and intangible values of building heritage with historic flame lighting system, *Journal of Cultural Heritage*, 47, 166–179.
- Lazenby J. F. (1996), *The First Punic War*, London.
- Lewandowski M. J., Murphy E. A., Reubelt V. A., Steinhaus M. K. (2019), *Daytime Distress Signal Effectiveness*, New London (CT).
- Ligresti D. (2013), *Le armi dei Siciliani. Cavalleria, guerra e moneta nella Sicilia spagnola (secoli XV–XVII)*, Palermo.
- Lo Cascio P. (2001), *Comunicazioni e trasmissioni. La lunga storia della comunicazione umana dai fani al telegrafo*, Soveria Mannelli (CZ).
- Loreto L. (1996), I processi ai generali a Cartagine: prime considerazioni su diritto pubblico e guerra nello stato punico, in *Processi e politica nel mondo antico*, Sordi M. [ed.], Milano, 107–128.
- Lotrecchiano N., Sofia D., Giuliano A., Barletta D., Poletto M. (2020), Pollution Dispersion from a Fire Using a Gaussian Plume Model, *International Journal of Safety and Security Engineering*, 10(4), 431–439.
- Malm W. C. (2016), *Visibility: The Seeing of Near and Distant Landscape Features*, San Diego–Amsterdam.
- Maurici F., Fresina A., Militello F. (2008), *Le torri nei paesaggi costieri siciliani (secoli XIII–XIX)*, Palermo.
- Mauro C. M., Durastante F. (2025), On the Use of Lights as Night Navigation Aids During Antiquity, in *International Journal of Nautical Archaeology*, 1–8. <https://doi.org/10.1080/10572414.2025.2525130>.
- Mauro C. M., Durastante F. (2023), Nocturnal seafaring: the reduction of visibility at night and its impact on ancient Mediterranean seafaring. A study based on 8–4th centuries BC evidence, *Journal of Maritime Archaeology*, 18, 733–751.
- Mauro C., Durastante F. (2022), Evaluating visibility at sea: Instrumental data and historical nautical records. Mount Etna from the Calabrian Ionian coast (Italy), *The Journal of Island and Coastal Archaeology*, 17(1), 21–42.
- Mazzarella S., Zanca R. (1985), *Il libro delle Torri: le torri costiere di Sicilia nei secoli XVI–XX*, Palermo.

- McMeeking G. R., Kreidenweis S. M., Baker S., Carrico C. M., Chow J. C., Collett J. L. Jr, Hao W. M., Holden A. S., Kirchstetter T. W., Malm W. C., Moosmüller H., Sullivan A. P., Wold C. E. (2009), Emissions of trace gases and aerosols during the open combustion of biomass in the laboratory, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D19), D19210.
- Mecella L. (2009), Die Überlieferung der *Kestoi* des Julius Africanus in den byzantinischen Textsammlungen zur Militärtechnik, in *Die Kestoi des Julius Africanus und ihre Überlieferung*, Wallraff M., Mecella L. [eds], Berlin–New York, 85–144.
- Medas S. (2000), *La marineria cartaginese. Le navi, gli uomini, la navigazione*, Sassari.
- Meloni D., Di Sarra A., Pace G., Monteleone F. (2006), Aerosol optical properties at Lampedusa (Central Mediterranean): 2. Determination of single scattering albedo at two wavelengths for different aerosol types, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6(3), 715–727.
- Meursius J. (1746), *Ioannis Meursi Operum Volumen Septimum ex recensione Ioannis Lami*, Florentiae.
- Middleton W. E. K. (1952), *Vision Through the Atmosphere*, Toronto.
- Mirto V. (2021), Il paesaggio fortificato di monte Erice ed il controllo militare della costa trapanese tra età classica ed età ellenistica, *Cronache di Archeologia*, 40, 219–256.
- Mollo S. (2015), Note sulla presenza di anfore fenicie e puniche e di tradizione punica nella Lucania e nel Bruzio tirrenico, *Rivista di Studi Fenici*, 43, 39–65.
- Moret P. (2010), Les tours rurales et les maisons fortes de l’Hispanie romaine : éléments pour un bilan, in *Los paisajes rurales de la romanización. Arquitectura y explotación del territorio* (Reunión científica celebrada en el Museo Arqueológico Provincial de Badajoz, 27–28 ottobre 2008), Mayoral V., Celestino S. [eds], Badajoz, 9–36.
- Motsianos I. (2012), Torches as lighting devices in Byzantium, in *Le Luminaire antique. Lychnological Acts 3. Atti del 3e Congrès International d’études de l’ILA* (Heidelberg, 21–26 septembre 2009), Chrzanowski L. [ed], Montagnac, 263–280.
- Moullou D., Topalis F. V. (2017), Reconstructing artificial light in ancient Greece, in *The Oxford Handbook of Light in Archaeology*, Papadopoulos C., Moyes H. [eds], Oxford, 604–627.
- Parker S. T. (1986), *Romans and Saracens: A History of the Arabian Frontier*, Philadelphia.
- Patti V. (2017), La difesa siciliana in una prospettiva digitale (XVI–XVIII sec.) in *Isole e frontiere nel Mediterraneo moderno e contemporaneo*, Gallia A., Pinzarrone L., Scaglione G. [eds], Palermo, 183–205.
- Pottino G. (1976), *Cartaginesi in Sicilia*, Palermo.
- Rawlings L. (2010), The Carthaginian navy: questions and assumptions, in *New perspectives on ancient warfare*, Fagan G. G., Trundle M. [eds], Leiden–Boston, 253–287.
- Rossi C., Russo F., Russo F. (2009), *Ancient Engineers’ Inventions. Precursors of the Present*, Dordrecht.
- Roussos I., Chalmers A. (2003), High fidelity lighting of Knossos, in *Proceedings of the 4th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage* (Brighton, 5–7 novembre 2003), Airela-Ville, 195–202.
- Russo F. (2008), Le torri costiere siciliane: armamento e sistemi di segnalazione, in *Le torri nei paesaggi costieri siciliani (secoli XIII–XIX)*, Maurici F., Fresina A., Militello F. [eds], Palermo, 147–169.
- Santoro R. (1985), *La Sicilia dei castelli. La difesa dell’isola dal VI al XVIII secolo*, Palermo.
- Scott J. (2017), Sicilian castles and coastal towers: A GIS-based analysis of post-medieval signalling, *Open Archaeology*, 3, 313–338.
- Seidel, Y (2009), *Künstliches Licht im individuellen, familiären und öffentlichen Lebensbereich*. Wien.
- Southern P. (1990), Signals versus Illumination on Roman Frontiers, *Britannia*, 21, 233–242.
- Stockie J. M. (2011), The Mathematics of Atmospheric Dispersion Modeling, *Society for Industrial and Applied Mathematics Review*, 53(2), 349–372.

- Thévenot, M. (ed.) (1693), *Veterum Mathematicorum Athenaei, Apollodori, Philonis, Bitonis, Heronis et aliorum opera graece et latine pleraque nunc primum edita*, Parisiis.
- Tillman D. A., Rossi A. J., Kitto W. D. (1981), *Wood Combustion: Principles, Processes and Economics*, New York.
- Vacanti C. (2012), *Guerra per la Sicilia e guerra della Sicilia. Il ruolo delle città siciliane nel primo conflitto romano-punico*, Napoli.
- Vacanti C. (2024), A Kind of Strategy: Carthage's confrontation with Roman soft power during the First Punic War, in *The Practice of Strategy. A Global History*, Black J. [ed], Roma, 87-119.
- Vaniček P., Krakiwsky E. J. (1986), *Geodesy: The Concepts*, Amsterdam–New York.
- Vieillefond J.-R. (1970), *Les Cestes de Julius Africanus. Étude sur l'ensemble des fragments avec édition, traduction et commentaires*, Firenze.
- Wang J., Roudini S., Hyer E. J., Xu X., Zhou M., Castro Garcia L., Reid J. S., Peterson D. A., da Silva A. M. (2019), Detecting nighttime fire combustion phase by hybrid application of visible and infrared radiation from VIIRS, *Remote Sensing of Environment*, 237, 111466.
- Wheatley D., Gillings M. (2002), *Spatial Technology and Archaeology. The archaeological applications of GIS*, London, New York.
- Woolliscroft D. J. (2001), *Roman Military Signalling*, Stroud.
- Wooster M. J., Roberts G., Perry G. L. W., Kaufman Y. J. (2005), Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: FRP derivation and calibration relationships between biomass consumption and fire radiative energy release, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110(D24), 1–24.
- World Meteorological Organization (2008), *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation* (WMO No. 8), Geneva.
- Wunderlich C.-H. (2006), Appendice 1. Archéologie expérimentale. Éclairage antique high-tech, in *Lumière ! L'éclairage dans l'antiquité. Catalogue de l'exposition itinérante – Nyon, Olten, Avenches, Nîmes, Millau 2003–2006. 2e édition, revue et augmentée*, Chrzanowski L. [ed.], Milan, 40–45.
- Zamora Merchán M. (2011-2012), La altura de los faros de época romana en relación con su visibilidad marítima: El Faro de Brigantium y el posible Faro de la Campa Torres (Gijón), *Cuadernos De Prehistoria y Arqueología*, 37-38, 705–721.

Riassunto / *Abstract*

Riassunto. Il saggio ricostruisce in che misura i sistemi di segnalazione ottica attestati per l'ambito cartaginese potessero funzionare operativamente. A partire da un confronto tra fonti antiche, dati archeologici e limiti fisici della visibilità (curvatura terrestre, contrasto atmosferico, soglie percettive), viene proposto un modello che consente di valutare la plausibilità tecnica dei segnali visivi — fuochi, fumo, telegrafi ad acqua — in funzione della distanza, della quantità di combustibile, delle condizioni ambientali e dell'orario. Senza mirare a una ricostruzione completa, il modello intende verificare se i segnali attestati nelle fonti potessero essere effettivamente trasmessi e ricevuti, mettendo per la prima volta in relazione diretta testimonianze, evidenza materiale e parametri ottico-fisici. Un esperimento mentale finale ne mette alla prova la coerenza, simulando uno scambio di messaggi durante la Prima guerra punica in Sicilia. Il saggio offre uno strumento per discutere, entro limiti verificabili, l'effettiva realizzabilità delle comunicazioni ottiche in ambito punico.

Abstract. This paper investigates to what extent the optical signalling systems attested in the Carthaginian context could have functioned operationally. Based on a comparison between ancient sources, archaeological evidence, and the physical limits of visibility (Earth curvature, atmospheric contrast, perceptual thresholds), it proposes a model for assessing the technical plausibility of visual signals — fire, smoke, water telegraphs — in relation to distance, fuel quantity, environmental conditions, and time of day. Rather than offering a complete reconstruction, the model aims to determine whether the signals described in the sources could actually be transmitted and received within realistic constraints, by systematically linking textual evidence, material data, and optical parameters. A final thought experiment tests the internal consistency of the model by simulating a message exchange during the First Punic War in Sicily. The study provides a framework for discussing the effective feasibility of Carthaginian visual communications within verifiable limits.

Parole chiave: segnalazione ottica, Cartagine, comunicazioni militari, visibilità atmosferica, telegrafo ad acqua

Keywords: optical signalling, Carthage, military communication, atmospheric visibility, water telegraph

Come citare questo articolo / *How to cite this paper*

Claudio Vacanti, Telegramma da Cartagine. Per un'analisi integrata delle segnalazioni militari puniche, *CaSteR* 10 (2025), DOI: 10.13125/caster/6687, <http://ojs.unica.it/index.php/caster/>