

O. BELVEDERE* · A. BURGIO* · G. CIRAOLO** · G. LA LOGGIA**
A. MALTESE** · D. RAMETTA**

TELERILEVAMENTO DI AREE ARCHEOLOGICHE MEDIANTE DATI IPERSPETTRALI MIVIS

* Dipartimento di Beni Culturali · Sezione Archeologica, Università di Palermo

** Dipartimento di Ingegneria Idraulica ed Applicazioni Ambientali, Università di Palermo

The aim of this study is to examine the relationship between physical parameters and the spatial distribution of buried archaeological structures, using data acquired by the airborne hyperspectral sensor mivis in the visible, near infrared and thermal infrared wavelengths. The study areas are the territories of *Halaesa*, an important city in the Hellenistic-Roman period, and the Punic city of Mozia in Sicily.

The influence of buried structures on thermal-radiative behaviour has been investigated using three parameters: Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), thermal inertia, and Thermal Balanced Gradient. These techniques are shown to be particularly effective in identifying surface phenomena caused by structures present in the top soil.

Multicriterial analysis has been carried out to investigate the possible presence of buried linear structures, which are linked to these parameters. Results show good agreement with the distribution of known structures.

1. INTRODUZIONE

LE tecniche di elaborazione delle immagini telerilevate, l'adozione di nuovi sensori quali lo scanner iperspettrale, e la possibilità di gestire dati territoriali in ambiente GIS, consentono una sempre maggiore integrazione tra archeologia e telerilevamento (SCOLLAR *et alii* 1990; MARCOLONGO, BARISANO 2000; TONELLI 2000). La distribuzione spaziale dei siti antichi è strettamente legata alle caratteristiche ambientali (morfologia, litologia, prossimità alle fonti di approvvigionamento idrico, copertura vegetale, ecc.), per questa ragione il ricorso ad immagini digitali telerilevate permette di elaborare modelli predittivi, nel tentativo di interpretare la distribuzione spaziale dei siti conosciuti, e di individuare le aree nelle quali è più alta la probabilità di localizzare insediamenti antichi (KVAMME 1989; CAMPANA, FORTE 2001).

All'uso delle fotografie aeree, che risale agli inizi del '900, si è associato a partire dagli anni '70 il telerilevamento sia da satellite che da piattaforma aerea, con l'adozione di scanner multispettrali a risoluzione spaziale sempre più elevata. Aree privilegiate di indagine sono state le zone desertiche o predesertiche dell'Africa settentrionale e del Vicino Oriente a causa dell'omogeneità del territorio e della conseguente facilità di applicazione della metodologia (MARCOLONGO 1987; MARCOLONGO, BARISANO 2000); nel Mediterraneo le ricerche sono state indirizzate sia allo studio dei paesaggi centuriati (MARCOLONGO, MASCELLANI 1978; ROMANO, TOLBA 1996), sia ad ambienti collinari (BARISANO, HELLY 1985), fluviali (BARISANO, BARTHOLOMÉ, MARCOLONGO 1988) e lagunari (BONETTA LOMBARDI, MARCOLONGO 1981). Normalmente queste aree di studio sono molto estese, riguardando un'intera isola, una valle fluviale (CARLA *et alii* 1998) o un contesto regionale (NEGRONI CATACCHIO, PARMEGIANI, POSCOLIERI 1998).

Più recenti sono le indagini realizzate con scanner iperspettrali, cui appartiene il sensore MIVIS, utilizzato dal CNR nell'ambito del Progetto Strategico «Tecnologie moderne per la Conservazione dei Beni Culturali», che ha promosso in Sicilia (CA-

VALLI, PIGNATTI 2001) due campagne di acquisizione dati nell'area urbana di Selinunte (Luglio 1994 e Maggio 1996), ed una nel territorio dell'antica città di Alesa (Luglio 1994). Con lo stesso sensore MIVIS nel Luglio 2002 è stato effettuato un volo (Progetto MIR, «Metodologie Integrate di indagine in aree di pregio ambientale mirate alla valorizzazione e gestione delle Risorse») sulla laguna costiera dello Stagnone di Marsala, dove si trova l'isolotto di San Pantaleo, sede dell'antico centro abitato di Mozia.

Diversi tra loro sono gli obiettivi perseguiti da queste ricerche: a Selinunte (CAVALLI *et alii* 1998) si è inteso individuare – ed i risultati sono stati reputati soddisfacenti – strutture lineari che mostrassero allineamenti coerenti a quelli dell'impianto urbano della città. Ad Alesa si è andati alla ricerca, all'interno di siti già noti tramite prospezione archeologica (BURGIO 1996), di anomalie termo-radiative interpretabili con una eventuale presenza di strutture sepolte (BELVEDERE *et alii* 2001), nel tentativo di comprendere le relazioni che intercorrono tra le caratteristiche fisiche del territorio e le strutture stesse; inoltre, i dati elaborati ed altre informazioni ottenute con tecniche GIS sono stati utilizzati in un modello predittivo implementato per la localizzazione degli antichi insediamenti rurali (CAVALLI, PIGNATTI 2001, p. 223). La metodologia e l'esperienza maturata nel territorio alesino sono state testate anche a Mozia, per la quale si dispongono sia i dati del volo del 1994 (CAVALLI, PIGNATTI 2001, pp. 229-230), sia le immagini ad alta risoluzione del Progetto MIR.

Nell'elaborazione delle immagini iperspettrali oggetto del presente studio, focalizzato su una zona agricola (il territorio di Alesa) e su un centro urbano abbandonato in antico e sede di regolari scavi archeologici (Mozia), si è cercato di andare oltre le analisi fino ad oggi condotte a Selinunte e Mozia (CAVALLI *et alii* 1998; BIANCHI *et alii* 1999; CAVALLI, PIGNATTI 2001). Qui infatti le variabili considerate non tenevano conto né di fattori fisici quali NDVI, indicativo della stabilità della temperatura e contemporaneamente della presenza di umidità nel primo strato di sottosuolo (CAMPANA, PRANZINI 2001, p. 31), né dell'analisi dei gradienti termici e dell'inerzia termica, i quali permettono di descrivere in maniera più completa il comportamento termocapacitivo delle strutture sepolte.

L'obiettivo del nostro lavoro è quello di definire aspetti metodologici utili ad evidenziare anomalie che possano essere fisicamente spiegate tramite la presenza di strutture sepolte (DICEGLIE 1984) e, di conseguenza, fornire elementi per la tutela e per la programmazione di scavi archeologici in siti già noti.

2. AREE DI STUDIO

2. 1. Alesa

La città di Alesa, prossima al moderno centro di Tusa, fu fondata nel 403 a.C. su una collina a breve distanza dalla costa settentrionale della Sicilia (Fig. 1). Il suo territorio, collinare e accidentato, è caratterizzato da una spiccata erosione superficiale, cui contribuisce sia la composizione litologica, con prevalenza di argille, sia il progressivo abbandono delle tradizionali colture terrazzate; stretto tra il mare ed i primi contrafforti delle Caronie, raggiunge rapidamente i 900/1.000 m. s.l.m., ed è solcato dalla profonda valle del Torrente di Tusa, naturale via di comunicazione verso l'interno dell'isola. Oliveti, vigneti, frutteti, colture cerealicole sono, insieme al pasco-

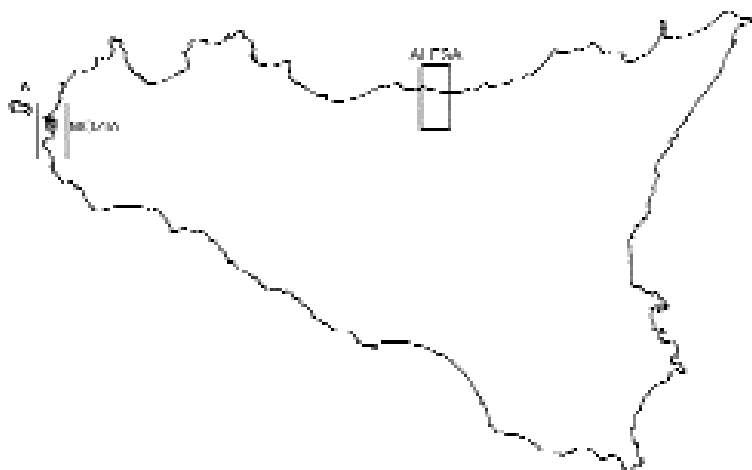


FIG. 1. Localizzazione delle aree di studio.

lo, le prevalenti forme di utilizzazione del suolo, mentre alle quote più elevate predominano querce da sughero e castagni.

Le ricerche archeologiche hanno fino ad oggi privilegiato il centro urbano, dalle mura che lo proteggevano sui lati sud, est e nord, e che in qualche tratto mostrano evidenti tracce di restauri di età tarda (CARETTONI 1959, p. 345; KARLSSON 1989), alla collina dell'acropoli e all'agorà (CARETTONI 1959 e 1961; SCIBONA 1971; VOZA 1982). Quanto al territorio, a parte occasionali ritrovamenti di mosaici (SALINAS 1899; ORSI 1931; MASTELLONI 2001) ed epigrafi (MANGANARO 1989), solo da pochi anni ci si è indirizzati ad una ricerca topografica mirante ad affrontare il problema della ricostruzione del sistema di popolamento del territorio e dello sfruttamento delle risorse (BURGIO 1996). Tale lacuna appare tanto più evidente, quando si consideri che i dati reperiti attraverso le prospezioni sono correlabili con le informazioni, di natura economica ed ambientale, ricavabili dalla lettura delle *Tabulae Halaesinae*, un documento epigrafico che fornisce elementi utili ad una ricostruzione del paesaggio antropizzato di età ellenistico-romana (SERENI 1961; PRESTIANNI GIALLOMBARDO 1993-1994). Sui pendii che digradano verso il fiume di Tusa rimangono infatti testimonianze di una vasta rete di insediamenti rurali, che possono contribuire a cogliere il rapporto uomo-ambiente e le modificazioni che quest'ultimo ha subito attraverso i secoli di vita della città.

2. 2. Mozia

La città fenicio-punica di Mozia (FIG. 1), fondata – tra la fine dell'VIII secolo e gli inizi del VII – all'estremo lembo occidentale della Sicilia, è oggetto di scavi archeologici già dagli inizi del '900 (WHITAKER 1921). Situata all'interno dello Stagnone di Marsala, occupa l'intero isolotto di S. Pantaleo, esteso ca. 45 ha e coltivato prevalentemente a vigneto, e rappresenta un luogo privilegiato di indagine perché mai occupato da insediamenti moderni, ad eccezione del piccolo nucleo edilizio dove oggi sorge il Museo. Gli scavi hanno interessato varie zone della città, dalla cinta muraria a quartieri di abitazione, necropoli, aree sacre (il *tophet*, il santuario di

‘Cappiddazzu’) ed artigianali. Recentissimo è il ricorso ad immagini MIVIS per lo studio dell’impianto urbano, che ha permesso di riconoscere serie di allineamenti riconducibili al tessuto urbano (BIANCHI *et alii* 1999; CAVALLI, PIGNATTI 2001).

3. DATI UTILIZZATI NELLA METODOLOGIA DI INDAGINE

3. 1. *Dati Telerilevati*

I dati utilizzati in tale indagine sono principalmente immagini MIVIS riprese ad Alesia nel Luglio del 1994 ed a Mozia nel Luglio del 2002. Il MIVIS (‘Multispectral Infrared and Visible Imaging Spectrometer’) è un sistema ottico a scansione meccanica, di tipo modulare, costituito da quattro spettrometri che riprendono simultaneamente, nello spettro elettromagnetico che va dal visibile all’infrarosso termico, la radiazione proveniente dalla superficie terrestre (BIANCHI *et alii* 1997).

Le caratteristiche principali dell’unità di scansione sono di seguito elencate:

- 102 bande spettrali;
- copertura spettrale compresa tra 0.43 e 12.7 μm ;
- n° 2 corpi neri di calibrazione (-15 °C e +45 °C rispetto alla temperatura ambiente);
- IFOV (‘Instantaneous Field of View’) 2.0 mrad;
- FOV (‘Field of View’) digitalizzato 71.1°;
- componenti ottico-meccaniche compensate termicamente;
- digitalizzazione dei dati a 12 bit per pixel;
- sistema PAS (‘Position and Attitude Sensor’) costituito da:
 1. ricevitore GPS, per la determinazione della posizione (accuratezza 12-40 m) e velocità (accuratezza 0.05-0.20 m/sec) della piattaforma aerea;
 2. giroscopio per la determinazione di rollio e beccheggio, e sistema per la determinazione delle variazioni della piattaforma aerea attorno all’asse di imbardata.

La quota di volo in entrambe le acquisizioni è stata di 2000 m, con risoluzione geometrica al nadir di circa 4 m, che diminuisce fino a 4.90 m ai bordi della strisciata.

3. 2. *Mappe tematiche e fotografie aeree*

Oltre ai dati iperspettrali MIVIS, sono state utilizzate fotografie aeree (volo Regione Siciliana, A.T.A. 1987, scala 1:10.000) e carte tematiche, in particolare la Carta della visibilità del suolo e la Carta archeologica, redatte entrambe a scala 1:10.000 al momento delle prospezioni (BURGIO 1996). Di queste ultime ci si è serviti sia come strumento di inquadramento e di confronto dell’immagine MIVIS nello spettro del visibile, sia per verificare la corretta ubicazione dei rinvenimenti archeologici.

4. METODOLOGIA DI INDAGINE

4. 1. *Preprocessing*

I canali del visibile del MIVIS sono stati utilizzati per effettuare una verifica immediata del campo di studio, mentre i canali del termico sono serviti per estrapolare le caratteristiche fisiche di cui si parlerà in seguito.

Le immagini calibrate in radianza (PRICE 1987; MARKHAM, BARKER 1985) sono state georiferite utilizzando tecniche di trasformazione del tipo 'Rubber sheeting' (Erdas Inc. 1997). Poiché nel visibile l'acquisizione del dato è influenzata pesantemente dalla presenza dell'atmosfera, che costituisce un filtro ottico interposto tra la scena ed il sensore, si rende necessaria una operazione di correzione atmosferica. L'algoritmo di correzione, implementato con il modulo Model Maker del software Erdas Imagine (MALTESE 1998), è stato applicato per correggere entrambe le acquisizioni. L'algoritmo adotta l'ipotesi di diffusore sferico, per cui la radiazione diffusa è funzione soltanto dell'angolo attraverso il quale la si osserva (STURM 1981). La sua formulazione (CHAVEZ 1988, 1996), detta modello di 'scattering' relativo, deriva dall'evoluzione della teoria di sottrazione dell'oggetto scuro (CHAVEZ 1975); essa, per ogni banda, ipotizza la sottrazione di un valore di numero digitale (DN) costante, che si suppone dovuto solamente all'effetto di 'scattering' dell'atmosfera.

4. 2. Metodi

Uno dei parametri fisici rilevati tramite telerilevamento sul quale possono essere basati i metodi di prospezione archeologica è la temperatura del suolo; essa varia con la profondità e con il tempo, in funzione dei meccanismi di trasferimento di calore, ed assume un andamento di tipo sinusoidale, in accordo con le variazioni di temperatura giornaliera. L'andamento risulta smorzato all'aumentare della profondità, e presenta una differenza di fase tale da diminuire l'ampiezza dei picchi di temperatura spostandoli in avanti nel tempo. È stato misurato che già a 40 cm di profondità la curva risulta quasi piatta, ed il ritardo temporale è prossimo alle 6 ore (SCOLLAR *et alii* 1990, figg. 10.2, 10.9). Ciò significa che a tale profondità le variazioni di temperatura non sono tali da permettere l'evidenziazione di eventuali strutture sepolte tramite analisi di anomalie o gradienti.

Nella analisi che segue si sono presi in considerazione, come indicatori della presenza/assenza di potenziali strutture sepolte, indici basati sulle proprietà termoradiative degli oggetti, oltre ad un indice segnalatore della presenza di vegetazione.

Tali parametri sono:

- 1) *NDVI* (indice di vegetazione che tiene conto della marcata differenza in termini di riflettanza della clorofilla alle lunghezze d'onda del rosso e del vicino infrarosso);
- 2) *Inerzia termica* (rapporto tra la quantità di calore assorbita da un corpo e la relativa variazione di temperatura);
- 3) *Gradiente termico compensato* (operatore che permette di passare dalla rappresentazione del comportamento termico di una superficie alle variazioni di temperatura, e quindi allo scostamento tra il gradiente termico effettivo e quello previsto in funzione del livello termico del suolo).

4. 2. 1. NDVI, Normalised Difference Vegetation Index

L'NDVI (TUCKER 1979) è un indice che viene utilizzato per la caratterizzazione dei suoli vegetati. Per la sua definizione si sfrutta l'andamento tipico della *firma spettrale* della vegetazione, ovvero la capacità di riflettere l'energia elettromagnetica al variare della lunghezza d'onda. Tale firma è sempre caratterizzata da un picco di

riflessione nell'infrarosso vicino (720 nm) che si accompagna sempre con un minimo nella banda del rosso. L'indice di vegetazione NDVI è, pertanto, così definito:

$$\text{NDVI} = \frac{\rho_{\text{ir}} - \rho_{\text{r}}}{\rho_{\text{ir}} + \rho_{\text{r}}} \quad \text{eq. (1)}$$

dove ρ_{ir} è la riflettanza nell'infrarosso, mentre ρ_{r} è la riflettanza nel rosso. Il 'range' di variabilità è compreso tra -1 ed 1, dove i valori positivi indicano presenza di vegetazione; nella pratica i valori massimi sono pari a $0.6 \div 0.7$ in presenza di vegetazione molto densa.

4. 2. 2. Inerzia termica

L'inerzia termica viene presa in esame poiché mette in evidenza la diversa risposta nel tempo di un materiale sottoposto a riscaldamento, consentendo di indagare la natura dei corpi presenti nel territorio (MALTESE 1998). In seguito alla sottrazione o immissione di calore, un corpo può riscaldarsi più velocemente di un altro. Suoli molto umidi, rocce molto dense e compatte, sono caratterizzati da un rapporto elevato fra l'energia assorbita in corrispondenza della massima potenza radiante e rialzo termico conseguente, di conseguenza i valori di inerzia termica risultano molto elevati. Ciò permette di indagare sulla presenza / assenza di strutture sepolte che, naturalmente, hanno una capacità termica differente dal terreno circostante.

L'ipotesi fondamentale, nella formulazione adottata, è che il livello termico raggiunto sia sostituibile all'escursione termica giorno-notte (ROSSI 1985). In base a questa ipotesi l'inerzia termica I può essere così determinata:

$$I = \frac{1 - \text{riflessione_ottica}}{\text{escursione_termica}} \quad \text{eq. (2)}$$

Supposta nulla la trasmissività τ del terreno ($\alpha = 1 - \rho$) il numeratore della eq. 2 esprime la co-albedo, o complemento della riflettanza, cioè la potenza radiante assorbita dal terreno. Al denominatore è rappresentata l'escursione di temperatura giorno-notte misurata in termini di temperatura di brillantezza (ipotesi di corpo nero) al sensore al momento dell'acquisizione. Nella nostra indagine, poiché è stata acquisita una sola immagine e non si hanno a disposizione voli notturni, si è considerata la temperatura notturna T_{min} pari a $+17,5^\circ \text{C}$ per Alesia e $+16,4^\circ \text{C}$ per Mozia (dato dedotto dalle serie termometriche registrate nelle zone di interesse dall'Ufficio Idrografico Regionale). Implicitamente si assume che la temperatura dell'aria misurata a pochi metri dal suolo è indicatrice della temperatura media del suolo stesso.

4. 2. 3. GTC, Gradiente termico compensato

L'analisi del gradiente termico compensato (ROSSI 1985) è un'operazione che permette di passare dalla rappresentazione del comportamento termico superficiale alla distribuzione spaziale delle anomalie termiche. L'analisi è divisa in due fasi: nella prima si calcola, per ogni pixel, il gradiente termico orizzontale $G(x,y)$, per il quale nelle elaborazioni precedenti (MALTESE 1998) erano stati rilevati problemi di sdoppiamento dei contorni, tipico degli operatori di convoluzione di 'edge enhance-

ments' di tipo derivativo Sobel, Prewitt o Roberts (BRIVIO, LECHI, ZILIOI 1992). Tali problemi sono stati risolti implementando un algoritmo che applica un filtro di tipo gradiente del secondo ordine (filtro di Laplace, eq. 3), risultato molto efficace nelle nostre elaborazioni.

$$DN_L(x,y) = (DN_E - 2DN + DN_W) / \Delta X^2 + (DN_N - 2DN + DN_S) / \Delta Y^2 \quad \text{eq. (3)}$$

dove:

- DN è il generico numero digitale di coordinate x, y;
- DN_N, DN_S, DN_W, DN_E sono i numeri digitali rispettivamente a Nord, Sud, Ovest, Est del generico DN considerato;
- $\Delta X, \Delta Y$ è la risoluzione del pixel lungo x ed y rispettivamente.

In questa operazione di filtraggio le informazioni considerate come rumore o disturbo sono appiattite o annullate, mentre quelle relative ai cambiamenti di temperatura (che costituiscono l'informazione utile) vengono evidenziate. Nel caso specifico si vuole individuare la presenza di eventuali strutture interrato, e poiché la risoluzione delle immagini MIVIS è di 4 m si sono scelti filtri di dimensione minima.

La seconda fase dell'elaborazione consiste nel calcolare gli scostamenti del gradiente dal comportamento medio previsto in funzione del suo livello di temperatura, per metterne in evidenza le anomalie (ROSSI 1985; MALTESE 1998, eq. 4):

$$GCT(x, y) = G(x, y) - (G_p - G_{\min}) \star \frac{T(x, y) - T_{\min}}{T_p - T_{\min}} \quad \text{eq. (4)}$$

dove:

- $GCT(x,y)$ è il gradiente termico compensato;
- $G(x,y)$ è il gradiente ricavato nell'elaborazione precedente;
- G_p è la moda (cioè il valore normale) dell'immagine gradiente;
- G_{\min} è il valore minimo dell'immagine gradiente;
- $T(x,y)$ è il valore di temperatura dell'infrarosso termico;
- T_p è la temperatura più probabile, per dati distribuiti secondo la legge di Gauss;
- T_{\min} è la temperatura minima.

Moltiplicare il 'range' di valori $G_p - G_{\min}$ per il rapporto, variabile, $[T(x,y) - T_{\min}] / [T_p - T_{\min}]$ equivale a fare assumere al gradiente l'andamento spaziale delle temperature e ciò significa ammettere una proporzionalità lineare del gradiente con la temperatura. In realtà, in presenza di sorgenti o pozzi di calore (come strutture sepolte o cavità sotterranee), il gradiente termico superficiale tende a crescere col crescere del livello termico stesso (la proporzionalità non è più lineare) e si discosta dal comportamento medio previsto.

4. 2. 4. Lineazioni

Nel riconoscimento delle lineazioni (allineamenti strutturali) concorrono le informazioni ottenute da rilievi termografici. Nello spettro dell'infrarosso termico, una lineazione è accompagnata da alternanza di valori di capacità termica, mettendo in evidenza gli effetti, indotti in superficie, da cause che risiedono nel primo spessore del sottosuolo (ROSSI 1985).

In presenza di lineazioni si ha:

1. allineamento di vegetazione in ottimo stato, per esempio per ristagno di umidità sul fianco di una consistente struttura sepolta (analizzabile tramite NDVI);
2. allineamento di gradienti di temperatura;
3. allineamento della inerzia termica.

In particolare, nella fase di riscaldamento, o transitorio termico crescente, la vegetazione mostra una temperatura inferiore a quella delle superfici inerti per i noti fenomeni di termoregolazione (traspirazione per mantenere la temperatura costante). Inoltre la presenza di disomogeneità nel primo strato del sottosuolo induce variazioni di umidità in superficie e quindi conseguenze sullo stato della vegetazione (TONELLI 1998).

I parametri descritti nei paragrafi precedenti, sono stati elaborati al fine di ottenere una mappa delle possibili strutture interrate (Lineazioni). A tal fine sono stati presi in considerazione – per Alesa – i valori che i parametri suddetti assumevano in un'area all'interno dell'Agorà, in corrispondenza del muro di fondo della *stoà* ellenistica: questi parametri sono stati tarati sia sulla struttura visibile al momento del volo MIVIS (1994), sia su un tratto di questo stesso muro messo in luce a SE successivamente (1998-1999) all'acquisizione dell'immagine. I dati così ottenuti si differenziano notevolmente da quelli ricavabili da bibliografia, dei quali si era tenuto conto nelle precedenti elaborazioni (MALTESE 1998) e che non avevano tuttavia fornito risultati soddisfacenti. Come si è già detto, gli stessi parametri elaborati per Alesa sono stati utilizzati nell'analisi delle più recenti immagini MIVIS di Mozia (2002).

4. 2. 5. Analisi multicriteriale

I valori delle tre immagini (NDVI, inerzia termica, gradiente termico compensato) sono stati riportati ad un comune 'range' di variabilità (operazione di 'rescaling') mediante la relazione:

$$DN \text{ rescale}(x,y) = (DN(x,y) - \text{Global min}) / (\text{Global max} - \text{Global min}) \quad \text{eq. (5)}$$

dove:

- $DN \text{ rescale}(x,y)$ è il valore del numero digitale riscaloato;
- $DN(x,y)$ è il valore del numero digitale originale;
- Global min è il valore minimo fra i numeri digitali dell'immagine;
- Global max è il valore massimo fra i numeri digitali dell'immagine.

Ciò permette di poter confrontare fra loro elementi che hanno significato fisico e 'range' di variabilità diversi. Successivamente è stata eseguita la somma ponderata secondo pesi ricavati tramite analisi multicriteriale (VOOGD 1983) ed è stata costruita una matrice (TAB. 1a) le cui celle rappresentano l'importanza relativa fra i fattori; nella matrice i termini diagonali unitari descrivono l'importanza di un fattore rispetto a se stesso; i termini simmetrici rispetto alla diagonale principale sono dati dai valori reciproci (ad esempio il termine 7 indica che l'inerzia è 7 volte più indicativa dell'NDVI nella individuazione delle *lineazioni*). Successivamente mediante un algoritmo sono stati calcolati gli autovalori della matrice di comparazione che fornisce i pesi (TAB. 1b).

	NDVI GTC Inerzia				Pesi
NDVI	1			NDVI	0, 1111
GTC	5	1		GTC	0,3333
Inerzia	7	5	1	Inerzia	0,5556

Tab. 1. a) matrice di comparazione; b) pesi della analisi multicriteriale.

La somma ponderata di NDVI, GTC ed Inerzia termica produce uno strato informativo in cui i valori elevati di DNs sono indice di probabili lineazioni.

5. RISULTATI

Dall'analisi dell'immagine prodotta tramite analisi multicriteriale è possibile individuare le zone dove le *lineazioni* non coincidono con qualcosa di immediatamente riconoscibile nella *rappresentazione in colori naturali*. Tali zone sono quelle in cui è probabile la presenza di una struttura sepolta ed in cui è necessaria una prospezione *in situ*.

Come già detto, nel territorio di Alesa è stata condotta una prospezione archeologica (BURGIO 1996) che ha portato all'identificazione di alcune decine di siti, estremamente diversi tra loro per caratteristiche, tipologia e frequenza dei reperti archeologici (essenzialmente ceramica). Alcuni saranno stati insediamenti stabili, a carattere rurale, altri potrebbero avere avuto insieme funzione rurale e residenziale; in alcuni casi si può ipotizzare l'esistenza di necropoli, mentre altri siti potrebbero essere sorti in stretta relazione con i percorsi viari che – seguendo la valle del Torrente di Tusa – si indirizzavano verso l'interno della Sicilia. L'arco cronologico entro cui si collocano queste testimonianze va dal IV-III sec. a.C. al V-VI sec. d.C., e la percentuale più alta riguarda le fasi tardo-ellenistica e alto-imperiale, coincidenti con i periodi di massima floridezza della città; inoltre, per molti insediamenti rurali è stato possibile ipotizzare continuità di vita dall'età ellenistica ai primi secoli della nostra era.

Come è noto, la prospezione archeologica permette di formulare ipotesi per un corretto inquadramento cronologico e culturale dei siti individuati, ma l'andamento del rilievo, l'osservazione del livello di erosione del suolo, con l'eventuale assenza dell'*humus* superficiale ed il conseguente affioramento del banco roccioso, ma anche le stesse pratiche agricole, sono elementi che possono contribuire sia alla distruzione, o all'affioramento, di alcuni orizzonti cronologici, sia alla dispersione dei reperti su una superficie molto ampia, ben maggiore rispetto a quella originaria. Particolare importanza assume pertanto l'individuazione di anomalie riconducibili a strutture sepolte all'interno di un sito, e la loro ubicazione rispetto all'area di dispersione dei reperti.

Proprio l'analisi delle immagini mivis ha permesso di riconoscere anomalie di un certo interesse in alcuni di questi siti. Utilizzando la metodologia – di cui si è detto sopra – raffinata nell'area dell'agorà di Alesa, sono stati scandagliati tutti i rinvenimenti già individuati nel territorio, riuscendo così a riconoscere elementi di un certo interesse in alcuni siti, di cui si presentano due esempi (BURGIO 1996, nn. 10, 20).

5. 1. 1. Sito 10

Ubicato, in contrada Lagano, circa 500 m ad Ovest della città antica, sul limite di un'area in moderato pendio, naturalmente delimitata a Nord ed Est da una piccola

balza, si presenta parte coltivato e parte coperto da vegetazione arbustiva. La localizzazione, la distribuzione superficiale (4000 m²) ed il tipo dei reperti archeologici (*solenes*, ceramica da dispensa e da fuoco di produzione locale, ceramica a vernice nera e sigillata italica) suggeriscono l'esistenza di un insediamento stabile, attivo verosimilmente con continuità tra l'età ellenistica e la prima età imperiale.

Attraverso le lineazioni si individua, appena all'esterno dell'area di distribuzione superficiale dei reperti, un allineamento N-S, pari a 7 pixel, ad Ovest del quale sull'immagine *MVIS* si distingue la traccia di un forte trattenimento di umidità; altri pixel interpretabili in modo analogo si riscontrano ad Ovest dell'allineamento principale (FIG. 2). Il sito in oggetto occupa l'estremità orientale di una dorsale in moderato pendio verso Est. Si può dunque ipotizzare la presenza di una struttura sepolta che trattenga l'umidità. Ciò determina elevati valori dell'inerzia Termica (FIG. 3), mentre i valori dell'NDVI sono superiori alla media della zona circostante (FIG. 4). L'integrazione tra lineazioni e GTC offre dati ulteriori, poiché superfici ad alta riflettanza, interpretabili come muretti, si affiancano e si sovrappongono agli allineamenti riconoscibili nell'immagine delle lineazioni (FIG. 5).

Poiché in questo settore dell'insediamento non esistono strutture murarie emergenti, si può ipotizzare che le due lineazioni risultanti definiscano uno o più ambienti, pertinenti ad una struttura stabile, probabilmente una fattoria, costruita su un piccolo dosso.

5. 1. 2. Sito 20

Il sito n. 20 si estende per oltre un ettaro su un'area in pendio verso Est, a tratti frazionata da piccole terrazze artificiali. Abbondantissimi sono i reperti archeologici, soprattutto *solenes* e mattoni, ceramica da dispensa e da fuoco, ma numerosi sono anche i frammenti di anfore, ceramica a vernice nera, sigillata italica e africana, prova dell'esistenza di una grande fattoria tra l'età ellenistica e il tardo-impero. Tra le strutture murarie affioranti se ne segnala una orientata all'incirca N-S, interamente rivestita di cocciopesto e caratterizzata dalla presenza di una nicchia sul fianco orientale; attraverso quest'ultima scorre un ruscello che, sgorgando pochi metri a monte dell'insediamento, va ad alimentare una vasca di età moderna. Un allineamento riferibile alla struttura *in situ*, cui può collegarsi anche un contiguo allineamento E-O, è indicato dalle lineazioni osservabili in questo settore (FIG. 6). Si può ipotizzare che la struttura antica appartenga ad una vasca, sia per la sua ubicazione e per la presenza di muri impermeabilizzati, sia perché il GTC presenta qui valori elevati.

Pochi metri a Nord della struttura descritta affiora, per alcuni centimetri dal piano di campagna, un ambiente delimitato su tre lati da muri in mattoni, pietre e malta, al cui interno si conserva un pavimento in cocciopesto. Le lineazioni, e la sovrapposizione a queste ultime del GTC, consentono in questo caso una lettura puntuale: la pavimentazione è infatti ben riconoscibile da un pixel molto brillante a causa della sua alta riflettanza, ed i muri, che trattengono l'umidità, sono stati individuati come lineazioni.

5. 2. Mozia

Le procedure implementate per Alesia sono state applicate anche a Mozia e i risultati delle analisi hanno confermato le indicazioni emerse. In particolare valori di inerzia termica, GTC ed NDVI del tutto simili a quelli riconosciuti come indicatori di presen-



FIG. 2. Territorio di Alesa: sito n. 10. Le frecce indicano le lineazioni (in colore marrone) interpretabili come strutture sepolte.



FIG. 3. Territorio di Alesa: sito n. 10. Inerzia Termica (in tono scuro i valori più elevati).

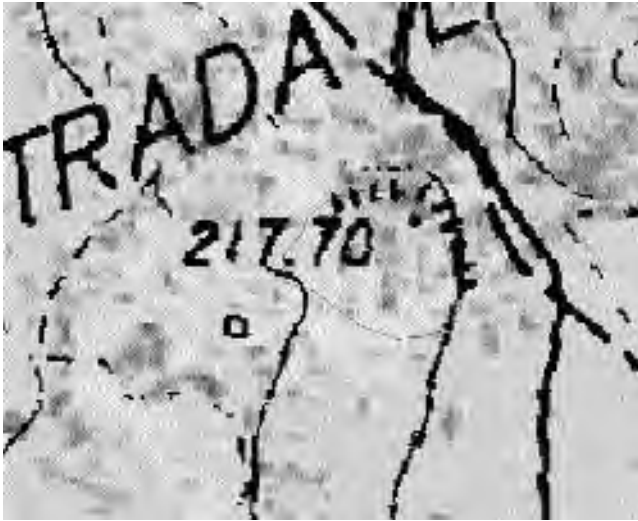


FIG. 4. Territorio di Alesa: sito n. 10. NDVI (in tono scuro i valori più elevati).



FIG. 5. Territorio di Alesa: sito n. 10. Gradiente Termico Compensato su visibile (in arancio i pixel ad alto grc).



FIG. 6. Territorio di Alesa: sito n. 20. La freccia in alto si riferisce all'ambiente con pavimentazione in cocciopesto (si noti il pixel in giallo, definito da quelli in marrone relativi alle strutture murarie), la freccia in basso al muro con nicchia.

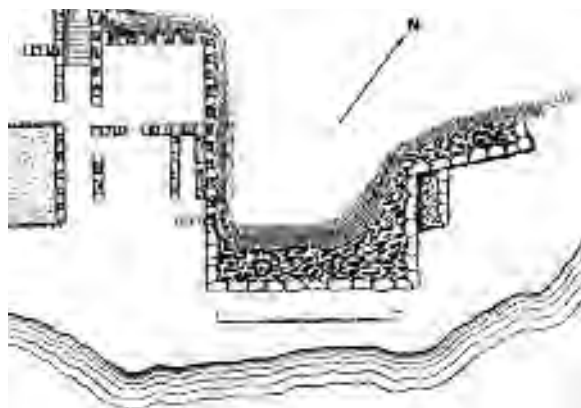


FIG. 7. Mozia: fortificazioni, settore SE
(da WHITAKER 1921, p. 162, tav. B).



FIG. 8. Mozia: fortificazioni, settore SE. Nelle lineazioni in rosso si possono riconoscere la torre messa in luce da Whitaker e strutture sepolte.

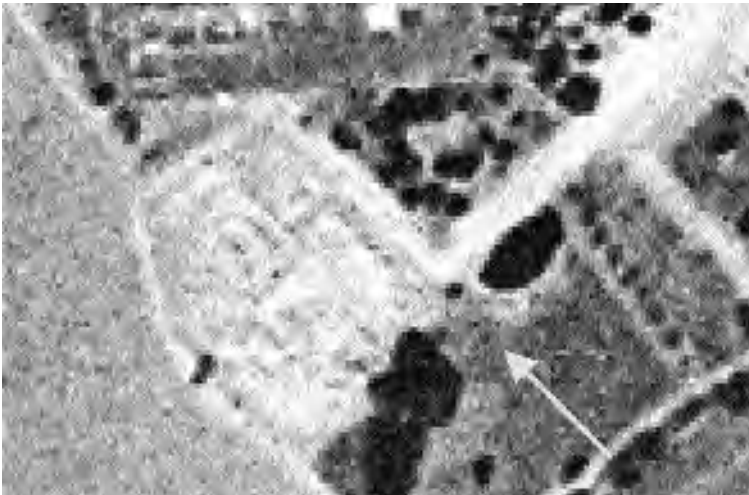


FIG. 9. Mozia: santuario di 'Cappiddazzu'. La freccia indica una delle lineazioni individuate.

za di strutture sepolte sono stati riscontrati nelle zone caratterizzate da bassi valori di riflettività nel visibile. La validità del metodo è confermata dalle elaborazioni su un tratto delle mura della città, nel settore sud-est, dove è possibile seguire distintamente strutture non ancora portate alla luce (FIGG. 7-8); inoltre, nell'area del santuario di 'Cappidazzu' (FIG. 9), in una zona in cui non sono visibili strutture fuori terra o rocce affioranti, si è individuata una lineazione interpretabile come traccia di struttura sepolta.

6. CONCLUSIONI

Le elaborazioni dei dati iperspettrali MIVIS qui presentate, condotte sul territorio di Alesia e nell'area urbana di Mozia, possono dunque essere interpretate come testimonianza di strutture sepolte, interrato poco al di sotto del piano di campagna, e tuttavia riconoscibili attraverso l'integrazione tra i valori dell'NDVI, dell'Inerzia Termica e del Gradiente Termico Compensato. La metodologia adottata può dunque favorire non solo l'impostazione di campagne di scavo, ma anche una puntuale e corretta analisi del 'rischio archeologico'. Ci sembra importante, infine, rilevare che, nonostante la differente geomorfologia tra Mozia e Alesia produca nel primo caso risultati leggibili più chiaramente, grazie alla riduzione dei principali elementi di disturbo, primo fra tutti la presenza di rocce affioranti, l'indagine sui siti rurali dell'entroterra alesiano sembra offrire dati rilevanti per quanto riguarda il rapporto tra distribuzione superficiale dei reperti archeologici e la puntuale ubicazione del sito stesso (BELVEDERE 2002, pp. 17-18).

BIBLIOGRAFIA

- BARISANO E., HELLY B. 1985, *Remote sensing and archaeological research in Thessaly (Greece): new prospects in archaeological landscape*, in *European Remote Sensing Opportunities*, Proceedings of EARSeL/ESA Symposium (Strasbourg), pp. 203-209.
- BARISANO E., BARTHOLOMÉ E., MARCOLONGO B. 1988, *Interprétation intégrée d'image du satellite LANDSAT et de photos aériennes verticales pour la déduction de paramètres physiographiques et archéologiques (Vallée de l'Adige, Italie du Nord)*, Notes et Monographies Techniques, 18, CNRS, Paris.
- BELVEDERE O., BURGIO A., CIRAIOLO G., LA LOGGIA G., MALTESE A. 2001, *Hyperspectral MIVIS data analysis for archaeological applications*, in *Proceedings of Fifth International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition*, San Francisco [CD-ROM].
- BELVEDERE O. 2002, *Metodologia e finalità della ricerca*, in BELVEDERE O., BERTINI A., BOSCHIAN G., BURGIO A., CONTINO A., CUCCO R. M., LAURO D., *Himera III.2. Prospezione archeologica nel territorio*, Palermo, pp. 1-23.
- BIANCHI R., CAVALLI R. M., MARINO C. M., PIGNATTI S., COLOSI F., POSCOLIERI M. 1997, *Airborne Hyperspectral MIVIS data over Selinunte ancient town area (Sicily, Italy) as a support to classical archaeological investigation*, in *Proceedings of Third International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition*, Copenhagen [CD-ROM].
- BIANCHI R., CAVALLI R. M., CORSI C., MARINO C. M., PIGNATTI S. 1999, *Ricerche topografiche in Sicilia: integrazione tra metodi e dati iperspettrali da piattaforma aerea*, in *Proceedings of the xvth International Congress of Classical Archaeology*, Amsterdam, pp. 70-72.
- BONETTA LOMBARDI R., MARCOLONGO B. 1981, *Fotointerpretazione archeologico-ambientale della laguna di Torcello e zone limitrofe*, «RdA», 5, pp. 86-92.
- BRIVIO P. A., LECHI G. M., ZILIOLO E. 1992, *Il telerilevamento da aereo e da satellite*, Sassari.
- BURGIO A. 1996, *Il paesaggio agrario nella Sicilia dell'età ellenistico-romana: il caso di Halaesa*, Tesi di Dottorato di Ricerca (IX ciclo), Università degli Studi di Bologna, rel. L. Quilici.

- CAMPANA S., FORTE M. (a cura di) 2001, *Remote Sensing in Archaeology*, XI Ciclo di Lezioni sulla Ricerca Applicata in Archeologia, Certosa di Pontignano 1999, Firenze.
- CAMPANA S., PRANZINI E. 2001, *Il Telerilevamento in Archeologia*, in CAMPANA, FORTE, pp. 17-62.
- CARETONI G. 1959, *Tusa (Messina). Scavi di Halaesa (prima relazione)*, «NSC», s. VIII, XIII, pp. 293-349.
- CARETONI G. 1961, *Tusa (Messina). Scavi di Halaesa (seconda relazione)*, «NSC», s. VIII, XV, pp. 266-321.
- CARLA R., CARRARA A., JACOLI M., ALESSANDRO V., BARONTI S. 1998, *Analysis of multispectral imagery for archaeological investigation*, in Proceedings of 1st International Congress on «Science and Technology for the Safeguard of Cultural Heritage in the Mediterranean Basin», Catania 1995, Palermo, I, pp. 349-353.
- CAVALLI R. M., COLOSI F., PIGNATTI S., POSCOLIERI M. 1998, *Il telerilevamento aereo per lo studio dei beni archeologici: applicazione dei dati iperspettrali MIVIS sul Parco Archeologico di Selinunte*, in *Selinunte 4*, Roma, pp. 337-358.
- CAVALLI R. M., PIGNATTI S. 2001, *Il telerilevamento iperspettrale da aereo per lo studio dei Beni Archeologici: applicazione dei dati iperspettrali MIVIS*, in CAMPANA, FORTE, pp. 221-232.
- CHAVEZ P. S. JR. 1975, *Atmospheric, solar, and MTF corrections for ERTS digital imagery*, in Proceedings of the American Society of Photogrammetry, Falls Church, VA, pp. 61-74.
- CHAVEZ P. S. JR. 1988, *An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data*, «Remote Sensing of Environment», 24, pp. 459-479.
- CHAVEZ P. S. JR. 1996, *Image-Based Atmospheric Corrections - Revisited and Improved*, «Photogrammetric Engineering and Remote Sensing», 62, pp. 1025-1036.
- DICEGLIE S. 1984, *La termografia nella prospezione archeologica: applicazioni sull'acropoli di Egnazia*, in *Esperienze e prospettive del telerilevamento*, Atti del Convegno Nazionale, Bari, pp. 765-786.
- Erdas Inc. 1997, *Erdas Field Guide: Fourth edition, revised and expanded - Rectification*, USA 317-318.
- KARLSSON L. 1989, *Some notes on the fortifications of Greek Sicily*, «OpRom», XVII, pp. 77-89.
- KVAMME K. L. 1989, *Geographic information systems in regional archaeological research and data management*, in *Archaeological Method and Theory*, a cura di M. B. Schiffer, vol. 1, Tucson, pp. 139-203.
- MALTESE A. 1998, *Telerilevamento e GIS applicati all'archeologia: il caso di Halaesa*, Tesi di laurea, Università degli Studi di Palermo, Dipartimento di Ingegneria Idraulica ed Applicazioni Ambientali, rel. G. La Loggia.
- MANGANARO G. 1989, *Iscrizioni latine nuove e vecchie della Sicilia*, «Epigraphica», 51, pp. 161-196.
- MARCOLONGO B. 1987, *Natural resources and palaeoenvironment in the Tadrart Acacus (Libya): the non climatic factors determining human occupation*, «BAR International Series», 368, Oxford.
- MARCOLONGO B., BARISANO E. 2000, *Télé-détection et archéologie: concepts fondamentaux, état de l'art et exemples*, in PASQUINUCCI, TRÉMENT, pp. 15-30.
- MARCOLONGO B., MASCELLANI M. 1978, *Immagini da satellite e loro elaborazioni applicate alla individuazione del reticolato romano nella pianura veneta*, «AV», I, pp. 131-146.
- MARKHAM B. L., BARKER J. L. (a cura di) 1985, *Special Issue on Landsat Image Data Quality Assessment*, «Photogrammetric Engineering and Remote Sensing», 51, pp. 1245-1493.
- MASTELLONI A. M. 2001, *Tusa (ME): Pavimenti da uno scavo di A. Salinas (1912). Nota preliminare*, in Atti dell'VIII Congresso dell'Associazione Internazionale per lo Studio e la Conservazione del Mosaico (AISCOM), Ravenna, pp. 689-704.
- NEGRONI CATAACCHIO N., PARMEGIANI N., POSCOLIERI M. 1998, *Analisi delle caratteristiche territoriali degli abitati pre-protostorici dell'Etruria meridionale*, in Proceedings of 1st International Congress on «Science and Technology for the Safeguard of Cultural Heritage in the Mediterranean Basin», Catania 1995, Palermo, I, pp. 245-259.
- ORSI P. 1931, *Notiziario archeologico sulla Sicilia orientale*, «Il mondo classico», 2, p. 3.
- PASQUINUCCI M., TRÉMENT F. 2000 (a cura di), *Non-Destructive Techniques Applied to Landscapes Archaeology*, «The Archaeology of Mediterranean Landscape», 4, Oxford.
- PRESTIANNI GIALLOMBARDO A. M. 1993-1994, *Revisioni epigrafiche alessine e nuove inedite trascrizioni della grande tabula di Alesa*, «Kokalos», XXXIX-XL, I, 2, pp. 528-533.

- PRICE J. C. 1987, *Radiometric Calibration of Satellite Sensors in the Visible and Near Infrared: History and Outlook*, «Remote Sensing of Environment», 22, pp. 3-9.
- ROMANO D. G., TOLBA O. 1996, *Remote Sensing and GIS in the Study of Roman Centuriation in the Corinthia, Greece*, in *Interfacing the past. Computer applications and quantitative methods in archaeology*, «CAA» 95, vol. II, Leiden, pp. 457-463.
- ROSSI L. 1985, *Telerilevamento e batimetria*, Milano, pp. 34-40.
- SALINAS A. 1899, *TUSA - Colombario di età romana scoperto a S. Maria dei Palazzi presso Tusa, nell'area dell'antica Alesa (provincia di Messina)*, «NSC», s. V, VII, pp. 500-502.
- SCIBONA G. 1971, *Epigraphica Halaesina I (schede 1970)*, «Kokalos», XVII, pp. 3-20.
- SCOLLAR I., TABBAGH A., HESSE A., HERZOG I. 1990, *Archaeological Prospecting and Remote Sensing*, Cambridge University Press.
- SERENI E. 1961, *Storia del paesaggio agrario italiano*, Bari.
- STURM B. 1981, *The atmospheric correction of remotely sensed data and the quantitative determination of suspended matter in marine water surface layers*, in *Metereology, Oceanography and Hydrology*, a cura di A. P. Cracknell, Scotland Halsted Press.
- TONELLI A. 1998, *Complementi di telerilevamento*, Atti del ciclo di conferenze del Museo Civico di Rovereto, maggio 1997, Milano-Rovereto.
- TONELLI A. 2000, *Metodi di telerilevamento in archeometria e nella diagnostica non invasiva*, in PASQUINUCCI, TRÉMENT 2000, pp. 38-48.
- TUCKER C. J. 1979, *Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation*, «Remote Sensing of Environment», 8, pp. 127-150.
- VOOGD H. 1983, *Multicriterial Evaluation for Urban and Regional Planning*. London.
- VOZA G. 1982, *L'attività della Soprintendenza ai Beni Archeologici della Sicilia Orientale dal 1976 al 1982*, «BCASic», III, 1-4, pp. 93-137.
- WHITAKER J. 1921, *Motya. A Phoenician Colony in Sicily*, London.