

Indice	1
Abstract (italiano)	3
Abstract (inglese)	5
1. Premessa	7
2. Obiettivi del lavoro di tesi	11
3. Metodologie utilizzate	14
3.1. Remote sensing	14
3.1.1. I sensori utilizzati	19
3.2. Geofisica	21
3.2.1. Magnetometria	21
3.2.2. Ground Penetrating Radar (GPR)	22
3.2.3. Resistività	22
3.3. Geographic Information System (GIS)	23
3.4. Fotogrammetria	24
3.5. Global Positioning System (GPS)	25
4. Casi di studio	28
4.1. Il sito di Uşaklı Höyük	28
4.1.1. Metodi	31
4.1.1.1. Dati a disposizione	32
4.1.1.2. Campagna GPS	32
4.1.1.3. Stereoscopia satellitare	36
4.1.1.3.1. Orientamento e creazione DEM e ortofoto	37
4.1.1.3.2. Creazione della carta topografico-archeologica	46
4.1.1.3.3. Processing dell'ortoimmagine	51
4.1.1.3.4. Risultati della fotointerpretazione	56
4.1.1.4. Applicazioni geofisiche	59
4.1.1.4.1. Magnetometria	60
4.1.1.4.2. Resistività geoelettrica	61
4.1.2. Integrazione ed interpretazione dei dati tele rilevati e geofisici	62
4.1.3. Discussione	64
4.2. Il sito di Vésztő Mágor	67

4.2.1. Metodi	71
4.2.1.1. Dati a disposizione	72
4.2.1.2. Applicazioni di remote sensing	72
4.2.1.3. Foto aeree	72
4.2.1.3.1. Vésztő 1 - Elaborazione e fotointerpretazione	73
4.2.1.3.2. Vésztő 2 - Elaborazione e fotointerpretazione	78
4.2.1.4. Immagine satellitare	83
4.2.1.4.1. Miglioramenti spaziali	84
4.2.1.4.1.1. Filtri di convoluzione	84
4.2.1.4.1.2. Filtri ellittici	87
4.2.1.4.1.3. Derivative direzionali	89
4.2.1.4.1.4. Analisi focali	91
4.2.1.4.2. Miglioramenti spettrali	91
4.2.1.4.2.1. Indici	91
4.2.1.4.2.2. Componenti principali	92
4.2.1.4.2.3. Tasseled cap	93
4.2.1.4.3. Risultati della fotointerpretazione	94
4.2.1.5. Applicazioni geofisiche	100
4.2.1.5.1. Magnetometria	100
4.2.1.5.2. <i>Ground Penetrating Radar (GPR)</i>	102
4.2.1.6. Integrazione ed interpretazione dei dati tele rilevati e geofisici	103
4.2.1.7. Tecniche di <i>remote sensing</i> per l'integrazione dei dati telerilevati e geofisici	105
4.2.1.8. Discussione	111
5. Conclusioni	113
6. Ringraziamenti	117
7. Bibliografia	120

Abstract

Questa ricerca utilizza e sviluppa applicazioni di telerilevamento satellitare ad alta risoluzione volte all'individuazione e alla ricostruzione di siti archeologici. Al *remote sensing* sono state affiancate altre tecnologie non invasive che consentono di verificare e integrare i dati telerilevati, quali la geofisica, la fotogrammetria, il GIS (*Geographic Information System*), il GPS (*Global Positioning System*).

A tale scopo sono stati presi in esame due casi-studio.

Il primo caso-studio riguarda il sito di Uşaklı Höyük in Turchia. In seguito a differenti applicazioni di *processing*, la fusione di due immagini appartenenti a sensori satellitari diversi ha favorito l'individuazione di una serie piuttosto significativa di anomalie. Il confronto e l'integrazione con i dati provenienti da prospezioni geofisiche e *survey* di superficie ha consentito di confermare e migliorare l'interpretazione dei risultati ottenuti con i dati telerilevati. Inoltre, una stereocoppia di immagini satellitari ha permesso la creazione, tramite tecnica fotogrammetrica digitale, di una carta topografica a medio-grande scala, utile in ambiente GIS per gestire la totalità dei dati prodotti e che verranno raccolti in futuro, per condurre analisi a livello di micro e macro-scala e per creare DEM (*Digital Elevation Model*) e ortofoto dell'area.

Il secondo caso prende in considerazione il sito di Vésztő Mágor in Ungheria. Le analisi satellitari condotte e la loro integrazione con foto aeree multitemporali, indagini magnetometriche e *Ground Penetrating Radar* (GPR) hanno consentito di individuare una notevole quantità di anomalie. In particolare si è sviluppato un algoritmo volto ad individuare automaticamente elementi ellittici quali i tell. Si è inoltre, in via sperimentale, tentato di estrarre contemporaneamente informazioni contenute in immagini satellitari e in dati provenienti da indagini geofisiche, gestendo questi ultimi alla stregua di *layer* di immagini satellitari.

Il *remote sensing* ad alta risoluzione si è rivelato per questi siti uno strumento efficace ed in grado di fornire informazioni preliminari dettagliate utili per indirizzare altri tipo di prospezioni e/o scavi. L'integrazione con altre tecniche non invasive di prospezione archeologica ha dimostrato di potenziare tale risultati. È auspicabile che

la ricerca proceda nello sviluppo di processi sempre più automatici di individuazione di anomalie e nuove forme di integrazione dei dati.

Abstract

This research utilizes and develops high resolution satellite remote sensing applications with the aim of detecting and interpret archaeological sites. Other not invasive technologies have been applied together with remote sensing, allowing to verify and integrate remote sensed data, such as geophysics, digital photogrammetry, Geographic Information System (GIS) and Global Positioning System (GPS).

Two case studies have been examined to this purpose.

The first investigates Uşaklı Höyük site, in Turkey. After several processing, the fusion of two images acquired by two different satellite sensors supported the individualization of several anomalies. The comparison and the integration of data coming from geophysical prospection and surface surveys allowed to confirm and to improve the interpretation results coming from remote sensed data. Besides, a stereo couple of satellite images allowed the creation, through digital photogrammetric techniques, of a new topographic-archaeological map at a middle-large scale. The map will be useful to manage, within the GIS, the produced data and those that will be collected in the future and it will lead analyses on micro- and macro-scale. By means of photogrammetric techniques the Digital Elevation Model (DEM) and the orthophoto of the area have been also crated.

The second case study is related to Vésztő Mágor tell site, in Hungary. Satellite photointerpretation analyses have been carried out and integrated with multitemporal aerial photos and geophysical prospections such as magnetic and Ground Penetrating Radar (GPR), allowing to detect a remarkable quantity of archaeological anomalies. Particularly, a specific algorithm has been developed, aimed to detect elliptical elements such as tell. Besides, in an experimental way, a methodology able to extract contemporary information belonging to satellite images and geophysical images data has been developed. For this scope, the geophysical data have been managed such as different layers of a satellite image.

The high resolution remote sensing has shown to be, for these test sites, an effective instrument able to furnish preliminary information detailed enough to address other kinds of prospection and/or excavations. The integration with other not invasive techniques of archaeological

prospection has demonstrated to strengthen such results. It is advisable that the research continues on developing automatic processes of anomalies individualization and new kinds of data integration.

1. Premessa

La ricerca si pone come obiettivo l'indagine, a partire da immagini satellitari ad alta risoluzione (Very High Resolution - VHR), dei due siti archeologici di Uşaklı Höyük (Turchia) e Vésztő Mágor (Ungheria), affiancando al telerilevamento aereo e satellitare l'applicazione di ulteriori tecniche di *remote sensing*. Ciò anche allo scopo di valutare, in aree geografiche diverse, le potenzialità del *remote sensing* VHR come strumento di prospezione archeologica.

Entrambi i siti, che si sviluppano su ed intorno ad un tell, non sono attualmente oggetto di scavo (lo è stato parzialmente in passato Vésztő Mágor). Per tale motivo, le indagini VHR da satellite, integrate da survey di superficie e da prospezioni geofisiche, concorrono all'identificazione di strutture sepolte con metodologie non invasive.

Ciò equivale, per il sito di Uşaklı Höyük alla possibilità di fornire informazioni utili a confermare la presenza di un sito ittita nell'area, ad ottenere il permesso di scavo ed eventualmente a dare indicazione su dove dirigerlo. Per il sito di Vésztő Mágor coincide con la possibilità di indagare un'area protetta che difficilmente verrà nuovamente scavata, ma che costituisce un elemento importante per capire la tipologia di insediamento a cui appartiene all'interno della preistoria ungherese, e il tipo di relazione con gli altri insediamenti della regione circostante.

In senso vasto, con la terminologia di *remote sensing* si intende il metodo di acquisizione di dati attraverso una varietà di mezzi di rilievo o registrazione senza un contatto diretto o fisico con l'oggetto di studio.

In archeologia, tutte le forme di *remote sensing*, inclusi il *remote sensing* satellitare (Lasaponara e Masini 2012, Parcak 2009), la fotografia aerea (Riley, 1987; Wilson 2000), le analisi di immagini in un GIS (Chapman 2006; Conolly e Lake 2006), la geofisica (Schmidt 2001; Witten 2005) e la fotogrammetria (Bewley 2003; Kucukkaia 2004) si concentrano con l'identificazione di forme antropogeniche in un determinato paesaggio, nel momento in cui esse identificano strutture come edifici, o città, o un sistema di canali di irrigazione o strade.

Il *remote sensing* satellitare, comunemente denominato *remote sensing*, ha il vantaggio aggiunto di essere in grado sia di vedere un intero paesaggio a differenti risoluzioni e scale a seconda del variare del

senso che ha registrato l'immagine, sia di essere capace di registrare dati oltre la parte visibile dello spettro elettromagnetico.

Lo spettro elettromagnetico si estende al di là del visibile fino all'infrarosso, al termico e alle microonde; tutte queste lunghezze d'onda, variamente presenti in sensori montati a bordo di satelliti, sono state sfruttate dagli archeologi per indagare vari tipi di ambienti ed individuare resti del passato.

I sensori satellitari, ognuno in maniera leggermente diversa, registrano la radiazione riflessa o emessa dalla superficie della Terra nelle diverse parti dello spettro elettromagnetico. I resti archeologici influenzano l'ambiente circostante in modi differenti, alterando i suoli circostanti, influenzando la crescita della vegetazione, assorbendo umidità in maniera maggiore o minore.

L'obiettivo della elaborazione di immagini per le applicazioni archeologiche è quello di far emergere i modelli spaziali e/o le anomalie locali legate alle antiche attività umane e le tracce di paleo-ambienti ancora fossilizzati nel paesaggio moderno.

Fino a poco tempo fa, data la mancanza di immagini ad alta risoluzione, la maggior parte delle ricerche di *remote sensing* in campo archeologico si era fermata ad una macroscale. A tale livello emergono maggiormente questioni relative al paesaggio, includenti fattori ambientali, economici, politici e sociali. Il *remote sensing* è utile nell'individuare siti archeologici e nell'esaminarne la posizione, nel distinguere paleovalle o fattori geologici (Aminzadeh e Samani 2006; Fry et al. 2004; Menze 2007; Saturno et al. 2007).

Con il diffondersi di dati telerilevati VHR, è stato possibile affiancare a tali attività anche quelle competenti a studi di microscala (De Laet et al. 2007; Garrison et al. 2008; Masini et al. 2009) indicando potenziali target di scavo (mura, strade, case), aiutando l'archeologo ad aprire un numero limitato di trincee che permettano di ottenere il massimo numero di informazioni su un certo tipo di sito o paesaggio, o rendendo lo scavo non necessario attraverso il riconoscimento di specifici elementi.

Tuttavia, l'uso di immagini multispettrali ad alta risoluzione come un mezzo primario di prospezione archeologica non è ancora, a livello metodologico, sufficientemente sviluppato. Nel corso degli anni sono state sviluppate una grande varietà di tecniche di processing delle

immagini digitali per altri campi scientifici prevalentemente ambientali e geologici. Solo recentemente tali metodi hanno cominciato ad essere utilizzati anche nel campo dell'archeologia per una più facile estrazione delle informazioni quantitative utilizzando un'efficace ed affidabile elaborazione dei dati semiautomatica o automatica (Trier et al 2009; Larsen et al 2007; Lasaponara e Masini 2007; Lasaponara e Masini 2012; Traviglia e Cottica 2011) andando ad integrare la classica fotointerpretazione (White e El Asmar 1999).

Nella ricerca presentata, sono state applicate la fotointerpretazione e le metodologie di estrazione semi-automatica ritenute più funzionali in base al tipo di terreno e vegetazione presenti nelle aree di studio analizzate.

Come fin qui emerso, il *remote sensing* non è una tecnica autonoma, ma si basa anche sulla interrelazione con altre tecniche e campi scientifici, e ciò è ancor più valido per le applicazioni in archeologia, che hanno per natura una vocazione fortemente multidisciplinare.

L'analisi delle immagini satellitari è stata integrata con la survey di superficie presso Uşaklı Höyük e con prospezioni geofisiche in entrambi i siti per valutare la quantità e la corrispondenza di anomalie scoperte con ciascun metodo.

Le strumentazioni geofisiche, attive o passive, possono misurare i contrasti nelle proprietà del suolo (anomalie) e ottenere una mappa dettagliata delle *feature* sotto la superficie in maniera non distruttiva.

Dato lo sviluppo relativamente recente del *remote sensing* VHR in archeologia, risulta particolarmente importante il confronto con queste metodologie proprio per valutarne le potenzialità (Campana et al. 2009; Ross et al. 2009; Rowlands and Sarris 2007).

Altrettanto fondamentale la produzione di nuovi casi di studio per una specifica area geografica e relativamente ad un determinato periodo storico. La composizione del suolo, il suo stato di conservazione ed il tipo di materiale impiegato nelle strutture che si indagano, infatti, possono consentire o meno il successo di una tecnica di prospezione.

Nel caso di Vésztő Mágor si è inoltre tentato in via sperimentale di integrare, in varie combinazioni ed elaborando i dati con tecniche proprie

del *remote sensing*, le immagini satellitari, le foto aeree ed i risultati provenienti dalla geofisica.

Inoltre, al telerilevamento sono state affiancate anche altre tecniche quali la fotogrammetria, il GIS e il GPS, per poter utilizzare, gestire e sfruttare al meglio le potenzialità delle immagini satellitari.

Considerata la mancata disponibilità di una cartografia aggiornata e soprattutto di scala adeguata a fini archeologici, l'acquisizione di una stereocoppia di immagini satellitari e la tecnica fotogrammetrica hanno consentito, per l'area di Uşaklı Höyük, la creazione di una nuova carta topografico-archeologica in scala 1:10.000 in un'area di circa 100 Km².

La tecnica fotogrammetrica ha inoltre consentito la creazione del Modello Digitale di Elevazione e dell'ortofoto su cui si sono eseguite le ricerche e la restituzione degli elementi topografici e archeologici dell'area.

L'utilizzo del GPS ha permesso l'acquisizione delle coordinate geografiche di punti topografici necessari all'orientamento fotogrammetrico esterno della stereocoppia, nel caso di Uşaklı Höyük, e alla rettifica nel caso della scena relativa all'area di Vésztő Mágor.

In entrambi i siti, inoltre, il GPS è stato utilizzato per la misurazione di punti archeologici e geologici che, una volta inseriti in ambiente GIS, combinati con il Modello Digitale del Terreno (DTM) e intersecati con altre variabili, costituiscono un prezioso elemento di analisi per la ricostruzione del paleo-paesaggio.

Per ogni sito è stato creato un *master GIS*, contenente tutti i dati a disposizione (immagini satellitari, foto aeree, risultati geofisici, fotointerpretazioni ottenute dalle diverse tecniche, punti GPS archeologici e geologici, elementi stereo restituiti, dati pregressi, ecc.), in modo da poter visualizzare in contemporanea ogni elemento disponibile, gestire tutte le informazioni a disposizione e predisporre l'ambiente per successive analisi in funzione archeologica, geologica, ambientale e antropologica.

2. Obiettivi del lavoro di tesi

Il lavoro di tesi sviluppa l'indagine, condotta grazie a immagini satellitari ad alta risoluzione, dei siti archeologici di Uşaklı Höyük (Turchia) e Vészto-Mágor (Ungheria). Al telerilevamento satellitare si è affiancato il telerilevamento aereo e l'applicazione di tecniche di *remote sensing* infine validate con metodi geofisici quali la magnetometria, la resistività e il GPR.

Per il sito di **Uşaklı Höyük** (Turchia), il lavoro di ricerca si focalizza in due direzioni e per ognuna di esse mira al raggiungimento dei seguenti obiettivi:

Ricerca archeologica:

- Individuazione e rappresentazione grafica georiferita di *feature* e anomalie archeologiche sepolte visibili in immagini telerilevate;
- Ricostruzione della probabile topografia dell'insediamento, anche in seguito alla correlazione con risultati di prospezioni geofisiche e *survey* di campagna.

Applicazioni metodologiche:

- Sperimentazione dell'utilizzo di immagini Geoeye-1 nell'individuare resti sepolti attraverso *crop-* e *soilmarks* con tecniche di fotointerpretazione, automatiche e semiautomatiche, e individuazione delle bande spettrali più attendibili idonee a tale scopo;
- Rilevamento GPS differenziale volto all'acquisizione di punti topografici necessari all'orientamento delle immagini satellitari, di punti archeologici e di punti di interesse geologico da inserire nella nuova mappa topografico-archeologica;
- Creazione di una nuova carta topografico-archeologica in scala 1:10.000 attraverso l'utilizzo di stereocoppie di immagini satellitari e tecniche di restituzione fotogrammetrica digitale;
- Creazione di prodotti derivanti dalla fotogrammetria e utili all'indagine archeologica quali il DEM e l'ortofoto;
- Implementazione dei prodotti ottenuti dalle elaborazioni fotogrammetriche (DEM, ortofoto e *layer* topografici) in ambiente GIS

utile a gestire tutti i dati georeferenziati e a condurre successive analisi archeologiche *intra* ed *inter-site*;

- Fusione di immagini provenienti da differenti sensori satellitari (Geoeye-1 e Landsat7 ETM+) per testare la possibilità di accrescere la visibilità di resti sepolti attraverso *crop-* e *soilmarks*. Anche in questo caso, l'individuazione delle bande spettrali più attendibili e significative rappresenta un obiettivo del lavoro;
- Verifica e integrazione dei risultati della fotointerpretazione con quelli derivanti da prospezioni geofisiche di campagna.

Per il sito di **Vésztő Mágor** (Ungheria), gli obiettivi sono ugualmente volti in due direzioni:

Ricerca archeologica:

- Individuazione e rappresentazione grafica georiferita di *feature* e anomalie archeologiche sepolte visibili in foto aeree e in un'immagine satellitare Geoeye-1;
- Ricostruzione della probabile topografia dell'insediamento, anche in seguito alla correlazione con risultati di prospezioni geofisiche.

Applicazioni metodologiche:

- Sperimentazione dell'utilizzo di immagini Geoeye-1 nell'individuare resti sepolti attraverso *crop-* e *soilmarks* con tecniche di fotointerpretazione, automatiche e semiautomatiche, e individuazione delle bande spettrali più attendibili idonee a tale scopo;
- Elaborazione di una metodologia di miglioramento spaziale mediante la creazione di un filtro ellittico per testare la possibilità di individuazione automatica di tell che si basi sulla regolarità morfologica degli stessi;
- Elaborazione di una metodologia di miglioramento spaziale mediante fusione di dati provenienti da diverse tecniche di prospezione archeologica (foto aeree, immagini satellitari e immagini di prospezione geofisica magnetometrica e GPR);
- Classificazione secondo criteri di evidenza delle anomalie foto interpretate e sintesi della loro generale visibilità;

- Verifica e integrazione dei risultati della fotointerpretazione con quelli derivanti da prospezioni geofisiche di campagna.

3. Metodologie utilizzate

Di seguito viene presentato un excursus sulle varie tecnologie che sono state utilizzate all'interno della ricerca.

3.1 Remote sensing

Nella sua prima e larga accezione, con *remote sensing*, come già spiegato in precedenza, si intende l'insieme di tecniche, strumenti e mezzi interpretativi che forniscono informazioni qualitative e quantitative su oggetti posti a distanza dal luogo d'osservazione (Lillesand et al. 2004; Showengerdt 2006).

In senso lato e più comunemente utilizzato, il *remote sensing* viene identificato con il telerilevamento, tecnica di indagine per la raccolta di informazioni provenienti dalla superficie terrestre e osservate dall'alto, mediante mezzi di ripresa alloggiati su apparati in volo (aerei o satelliti).

Il *remote sensing* è in grado di riprendere e perciò permettere di osservare un paesaggio a scale di differenti risoluzioni e di registrare dati non solo nella parte visibile dello spettro elettromagnetico, ma anche dell'infrarosso, del termico e delle microonde. La scienza del *remote sensing* include anche la metodologia per l'analisi e l'interpretazione delle informazioni raccolte.

I diversi satelliti in orbita hanno montati a bordo dei sensori che costituiscono degli strumenti passivi (n.d.r. ce ne sono anche attivi) che misurano la radiazione elettromagnetica naturale proveniente dalla superficie terrestre sia per riflessione di energia solare che per emissione di energia propria.

Fra le caratteristiche dei sensori, l'alta risoluzione geometrica raggiunta, la multispettralità e la multitemporalità, vale a dire la rivisitazione dello stesso luogo, ad intervalli regolari, per lunghi periodi di tempo, sono senz'altro tra le più importanti.

Il prodotto che viene fornito al ricercatore consiste in un'immagine definita dalla scala, dalla luminosità, dal contrasto e dalla risoluzione (spaziale, spettrale, radiometrica, temporale).

Le immagini multispettrali sono fornite in singole bande corrispondenti a determinate lunghezze d'onda. Il numero di bande varia a seconda del sensore che registra l'immagine. Le immagini possono essere

visualizzate in non più di tre bande contemporaneamente, secondo il principio della codifica RGB (*Red, Green, Blue*).

Potendo visualizzare contemporaneamente tre bande ognuna in un canale diverso, si fondono più informazioni, e si aumentano le possibilità di discernere diversi oggetti sulla base della diversa risposta spettrale che essi hanno nelle varie bande. Inoltre, inserendo nel *composite* una o più bande che cadono al di fuori dell'intervallo del visibile, si creano combinazioni fittizie (*false color composite*), che, nelle immagini multispettrali, risultano di grande utilità sia nella fotointerpretazione che nelle tecniche di estrazione di informazioni più o meno automatiche.

In archeologia, tre sono i tipi di coperture contenenti le anomalie che si cerca di rintracciare più comunemente: *soil*, *shadow* e *crop marks* (Dassie 1978; Wilson 1982). Le loro caratteristiche variano e dipendono dal tipo di suolo, di copertura, di umidità e di vegetazione presenti nell'area oggetto di studio.

I *soil mark* appaiono come un cambiamento anomalo di colore o di *texture* sull'immagine.

Gli *shadow marks* possono essere riscontrati nella presenza di variazioni di rilievi micro-topografici che possono essere resi visibili dalle ombre soprattutto in condizioni di basso angolo solare.

Per ciò che riguarda i *crop marks*, il tipo di suolo e l'umidità all'interno di depositi archeologici vicino alla superficie possono riflettersi sulla crescita della vegetazione o sul suo colore creando tracce di vario tipo. I *crop marks* possono essere negativi, sotto fondazioni di muri, e positivi sotto un suolo umido e nutritivo di fossati sepolti.

Le caratteristiche di queste *feature* archeologiche dipendono, oltreché dalla copertura del suolo, dallo stato fenologico dell'eventuale copertura vegetale e dalla pedologia, anche dalla topografia.

A seguire, la descrizione del tipo di operazioni che sono state effettuate nelle immagini utilizzate nella ricerca, volte a favorire la fotointerpretazione e l'estrazione semiautomatica di *feature*.

Pansharpening

Con il termine *pansharpening* si intende il processo di combinare molteplici immagini di una scena satellitare per ottenere una singola

immagine. Nello specifico, si combina il contenuto spaziale ad alta risoluzione del dato pancromatico con il contenuto spettrale, a più bassa risoluzione, del dato multispettrale.

E' molto importante, in archeologia, individuare il tipo di algoritmo più idoneo per compiere questa operazione (Grøn et al 2008; Lasaponara et al. 2007; Traviglia e Cottica 2011).

Georeferenziazione

Questo processo ha comunemente più nomi legati ad operazioni di correzione geometrica diversi: georeferenziazione (condotta attraverso la semplice conoscenza delle coordinate planimetriche di un vertice e dei fattori di scala e rotazione), rettifica (da eseguire grazie alla conoscenza delle coordinate planimetriche di vari punti di controllo così da poter operare le necessarie operazioni di traslazione, rotazione e variazione di scala) e ortorettifica (correzione tridimensionale con la necessità di disporre dei dati di orientamento interno, di un DEM e delle coordinate plano-altimetriche dei punti di controllo) (Lillesand et al. 2004).

La georeferenziazione è il processo di assegnazione delle coordinate cartografiche ai dati di una immagine, ovvero ai suoi pixel. Ogni tipo di proiezione cartografica della terra è distorta in termini di distanza, forma, direzione, dal momento che si tenta di posizionare una superficie curva e tridimensionale in una superficie piatta e bidimensionale.

In ogni tipo di analisi di *remote sensing* va scelto il sistema di coordinate che si vuole utilizzare. La maggior parte degli studi di *remote sensing* esprime la posizione geografica utilizzando il sistema di proiezione *Universal Transverse Mercator* (UTM). Esso si basa su di un riferimento geodetico comune, l'ellissoide, che suddivide la Terra in 60 zone. Le parti numerate dell'UTM si riferiscono all'ellissoide locale contro cui la proiezione è applicata. Usando il sistema UTM, il punto centrale di una proiezione è accurato ma la distorsione cresce all'aumentare della distanza.

Combinazione di bande

Come esposto in precedenza, le immagini multispettrali hanno molteplici bande di dati, che mostrano la risposta spettrale delle coperture a terra in un diverso intervallo dello spettro elettromagnetico e che possono essere combinate in maniera diversa dall'operatore.

Quale sia la combinazione di bande che dia il miglior risultato in un progetto archeologico è un'operazione delicata che richiede molto lavoro, soprattutto quando si lavora con sensori dotati di molte bande (Alexakis et al. 2009; Comfort 1997; Fowler 1996; Sarris et al. 2002).

Tecniche di miglioramento radiometrico

Il contrasto è tra le caratteristiche più importanti nell'interpretazione delle immagini, dato che oggetti diversi verranno distinti solo se aventi livelli di luminosità sufficientemente distanti fra di loro.

E' quindi fondamentale, per un'efficace lettura delle immagini, migliorarne il contrasto ottimizzando le modalità di rappresentazione a video in funzione dei tipi di contenuti da evidenziare (Beck et al. 2007).

Tecniche di miglioramento spaziale

Filtraggio spaziale

Il filtraggio spaziale è un metodo usato per correggere eventuali disturbi presenti in una immagine digitale e per evidenziare le differenze nelle variazioni di tono. A seconda del filtro utilizzato, potranno essere enfatizzate o de-enfatizzate variazioni fra pixel vicini. Ciò è possibile grazie al processo di convoluzione spaziale, in cui una matrice di pixel, o kernel, viene fatta muovere su tutta l'immagine con un movimento che percorrerà tutti i pixel riga per riga.

I filtri possono essere applicati prima o dopo un altro processo di *remote sensing* e può essere usato più di un filtro nella stessa immagine.

Generalmente, in archeologia, i filtri che danno maggiori risultati sono quelli tipo "passa-alto" ed in particolare l'"edge detection", tuttavia provare differenti tipi di filtro è sempre importante poiché il tipo di filtro che funziona meglio dipende dalle condizioni locali e dal tipo di immagine disponibile.

Tecniche di miglioramento spettrale

Componenti Principali

Partendo dal fatto che le tecniche multispettrali forniscono diverse immagini della stessa scena ed ogni immagine rappresenta la distribuzione spaziale dell'energia riflessa o emessa a diverse lunghezze

d'onda, per ovviare al problema di ridondanza di informazioni di un'immagine satellitare multispettrale dovuto all'elevato grado di correlazione tra le diverse immagini, il metodo delle componenti principali crea bande sintetiche non correlate, note come componenti, che contengono il massimo contenuto di informazione e riducono il rumore delle bande. In questo modo gli archeologi devono pensare alle migliori combinazioni dei dati dell'immagine quando decidono di applicare le componenti principali, così da ridurre il disturbo nelle bande ed esaltare al massimo il contenuto informativo del dato.

Tasseled Cap

La trasformazione *Tasseled Cap* prevede la generazione di bande sintetiche meno correlate di quelle originali e, rispetto al metodo delle componenti principali, con significato fisico specifico a partire dalle informazioni originali raccolte dai sensori. Le nuove direzioni degli assi vengono scelte in accordo con le caratteristiche di luminosità della scena e con quelle naturali della vegetazione e dei suoli. I tre assi principali riguardano infatti *brightness* (luminosità, asse dei suoli), *greenness* (asse del verde) e *wetness* (asse dell'umidità), ad estrarre una grande quantità di informazioni che può permettere una più semplice identificazione di specifici tipi di superficie.

Indici Vegetazionali

Esistono vari tipi di indici vegetazionali che consentono di misurare il vigore della vegetazione nelle immagini multispettrali. Essi permettono infatti di mettere in relazione l'assorbimento spettrale della clorofilla nel rosso con il fenomeno di riflessione nel vicino infrarosso dove è fortemente influenzata dal tipo di struttura fogliare. I valori della vegetazione nel paesaggio variano in virtù della stagione, secca o umida, e ciò dovrebbe essere ricordato quando si applicano gli indici vegetazionali, così come il tipo di regione che si analizza.

Il tipo di indice più usato e che ha riscosso un maggior numero di successi in archeologia (Lasaponara e Masini 2007) è l'NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), il cui calcolo deriva dalla differenza normalizzata tra l'informazione di riflettanza registrata nell'infrarosso vicino (*Near Infrared* – NIR) e quella del rosso (*Red*) secondo la formula:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{Red}}{\text{NIR} + \text{Red}}$$

Più il risultato della formula tende a 1, più la vegetazione sarà rigogliosa, mentre più il valore sarà vicino a 0, più il suolo sarà scoperto. Tale valore può essere associato con lo stato di salute delle piante così come con *feature* archeologiche sepolte che condizionano lo stato della vegetazione che cresce sopra di loro. Delle varie bande di un'immagine satellitare, quelle del vicino infrarosso sono le più utili per l'individuazione di *crop mark*.

3.1.1 I sensori utilizzati

Geoeye-1

Il satellite Geoeye-1 è in orbita dal Settembre 2008, ma le immagini sono state disponibili per gli utenti a partire dall'autunno successivo in seguito a fasi di inizializzazione, calibrazione e check-out.

Si tratta di un satellite di ultima generazione che fornisce immagini ad alta risoluzione, ad oggi la più elevata in commercio insieme a Worldview 2 (n.d.r. 0,41 m in pancromatico e 1,65 m in multi spettrale). In realtà, a causa di restrizioni imposte dalla legge americana sulla privacy, le immagini in commercio non possono avere una risoluzione a terra inferiore a 0,51 m.

Il sistema di ripresa pancromatico ha un *range* spettrale che va da 450 a 800 nanometri (nm); il sistema di sensori multi-spettrali, invece copre un *range* spettrale che va da 450 a 510 nm per la banda del blu, da 510 a 580 nm per la banda del verde, da 655 a 690 nm per la banda del rosso e da 780 a 920 nm per l'infrarosso vicino.

L'accuratezza dei prodotti standard Geoeye-1 è superiore a 5 m rispetto alla loro posizione effettiva sulla Terra, tutto ciò senza l'inserimento di Ground Control Points (GCP). Prima del suo lancio, questo grado di accuratezza non era mai stato raggiunto da nessun sistema di immagini commerciali.

Il satellite è stato progettato per puntare la fotocamera *pushbroom* su più bersagli durante un singolo passaggio orbitale, permettendo al sensore di acquisire più immagini durante un singolo passaggio.

Questo consente di riprendere coppie di immagini stereoscopiche e di avere un'illuminazione e delle condizioni ambientali uniformi. Una scena copre circa 100 km² (10 km X 10 km).

GeoEye-1 è un satellite ad orbita polare eliosincrona, che compie 15 orbite al giorno volando ad un'altitudine di 681 Km (423 miglia) con una velocità di circa 7,5 Km/sec ed una inclinazione di 98°.

Data la sua altezza di volo, la sua orbita eliosincrona, la sua visione del terreno e la sua alta risoluzione, GeoEye-1 passa su uno stesso punto del globo in poco meno di 3 giorni.

Landsat 7 ETM+

Il sensore ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*) a bordo della piattaforma Landsat 7, rappresenta la missione più recente del programma Landsat. Venne lanciato in orbita nell'Aprile 1999.

Il sensore ETM+ comprende sette bande, dal blu all'infrarosso medio con risoluzione spaziale di 30 metri, due bande nell'infrarosso termico con risoluzione 60 metri ed una pancromatica con risoluzione a 15 metri.

Il sistema di ripresa pancromatico ha un *range* spettrale che va da 520 a 900 nm; il sistema di sensori multi-spettrali, invece, copre un *range* spettrale che va da 450 a 515 nm per la banda del blu, da 525 a 605 nm per la banda del verde, da 630 a 690 nm per la banda del rosso, da 775 a 900 nm per l'infrarosso vicino, da 1550 a 1750 nm e da 2090 a 2350 nm per l'infrarosso medio e da 10400 a 12500 nm per le due bande dell'infrarosso termico.

Il satellite percorre un'orbita eliosincrona ad una quota di 705 km dalla superficie terrestre, con 98° di inclinazione, un periodo di rivisitazione di 16 giorni ed attraversa l'equatore nel tratto discendente circa alle ore 10 antemeridiane. Una scena completa interessa un'area di 185 km X 185 km.

E' possibile effettuare il *download* di immagini satellitari Landsat gratuitamente da internet, a scopi scientifici, dal sito <http://glovis.usgs.gov/>. L' *United States Geological Survey* (USGS) è l'agenzia scientifica del governo degli Stati Uniti costituita per lo studio del territorio, delle risorse naturali e dei rischi che lo minacciano.

3.2 Geofisica

Le strumentazioni geofisiche, attive o passive, permettono di misurare i contrasti nelle proprietà del suolo (anomalie) e ottenere una mappa dettagliata delle *feature* che si trovano sotto la superficie in un modo non invasivo.

In un contesto archeologico, le prospezioni geofisiche sono state usate in scavi pianificati o di emergenza, in studi regionali e del paesaggio, e per la gestione del patrimonio culturale.

3.2.1 Magnetometria

Le misurazioni magnetiche hanno a che fare con anomalie del campo geomagnetico che sono causate da contrasti della magnetizzazione delle rocce o da suoli ricchi in ossidi magnetici. La magnetizzazione delle rocce contiene parti di magnetizzazione indotta e rimanente: la magnetizzazione indotta si origina dal campo magnetico terrestre e dipende dalla sua attuale forza e direzione e dalla suscettibilità di rocce o suoli. In contrasto, la magnetizzazione rimanente è costante e non è cambiata da alterazioni del recente campo magnetico. La magnetizzazione rimanente è un effetto a lungo termine, che è indipendente dal recente campo geomagnetico. Solo il ferro e minerali ferromagnetici possono essere fortemente magnetizzati. Altri materiali possono essere ferro-, para- e diamagnetici. Gli effetti di corpi magnetici che possono essere rilevati nella superficie della terra sono dipendenti non solo dalla loro magnetizzazione, forma e grandezza, ma anche dalla loro profondità, perché il campo magnetico si indebolisce con l'aumentare della distanza. Nelle indagini archeologiche vari tipi di costruzioni come fornaci, forni e focolari mostrano un accresciuto magnetismo rimanente producendo in tal modo pronunciate anomalie magnetiche. Il compito dell'interpretazione è di separare i risultati dell'attività umana dalle variazioni geologiche dei materiali sotto la superficie.

La strumentazione per effettuare questo tipo di prospezione geofisica è costituita dal magnetometro, atto a misurare l'intensità totale del campo magnetico o le sue componenti verticale e orizzontale.

3.2.2 Ground Penetrating Radar (GPR)

Il GPR misura la differenza di tempo fra i segnali elettromagnetici trasmessi e riflessi (n.d.r. tipicamente tra 50–1000MHz) per collocare la posizione di differenti strati del sottosuolo e di ogni oggetto in esso eventualmente presente. Quando il segnale trasmesso raggiunge uno strato riflettente con differenti proprietà elettriche, parte di questo è riflesso alla superficie e registrato dall'antenna ricevitrice. La strumentazione nel rilievo GPR consiste in un trasmettitore e in un ricevitore ed è trasportata lungo transetti. Radargrammi sono formati attraverso la registrazione della magnitudo dei segnali riflessi e della differenza di tempo fra trasmissione e la riflessione dei segnali. Conoscendo la velocità di propagazione tipica delle onde elettromagnetiche su differenti terreni, è possibile ottenere una stima della profondità a cui si trova lo strato con caratteristiche differenti o la sospetta anomalia. Un vantaggio di una *survey* di tipo radar è che è possibile produrre una dettagliata mappa della stratigrafia verticale con una profondità variabile di 1.5–10 m a seconda della frequenza dell'operazione e dalle proprietà elettriche del terreno. La profondità di penetrazione dipende dalla frequenza dell'antenna: più piccola è la frequenza, più grande è la profondità di penetrazione e più bassa la possibilità di risoluzione spaziale.

Con il metodo GPR possono essere facilmente individuate *feature* di marcata discontinuità e contrasti dielettrici, come muri, cavità, tombe e terreni compatti. Il radar, di contro, presenta seri problemi ad esempio in aree con suoli conduttivi argillosi a causa della forte attenuazione del segnale.

3.2.3 Resistività

I metodi geoelettrici misurano, mediante una serie di elettrodi infissi nel terreno, secondo diversi tipi di stendimenti, la resistività elettrica dei materiali. I metodi geoelettrici sono in grado di distinguere tra materiali di diversa resistività, permittività, e attività elettrochimica. In archeologia, una *survey* condotta con il metodo della resistività consente di rilevare livelli di differenti competenze, muri, cavità, strati e altre strutture localizzate. In una campagna geoelettrica, la corrente continua a bassa frequenza è trasmessa al terreno da due elettrodi metallici mentre altri due elettrodi misurano la differenza di potenziale che dipende dalla resistività del terreno attraversato dalla corrente. Date le caratteristiche

di anisotropia del terreno, la resistività misurata è un valore apparente rappresentativo di un volume e per l'interpretazione dei dati si parla perciò di resistività apparente. La configurazione degli elettrodi influenza la profondità, la risoluzione e la velocità del rilevamento. Esistono una serie di configurazioni di elettrodi (*Wenner, square, dipole–dipole, pole–dipole, twin* e *Schlumberger*); la scelta più appropriata dipende da vari fattori tra le quali la dimensione del sondaggio, la natura e la profondità dei target, le proprietà del sottosuolo, la profondità di indagine. Le anomalie di resistività del terreno costituiscono le variazioni del campo elettrico causate dalla presenza di terreni e/o *targets* nel sottosuolo con caratteristiche geoelettriche diverse.

Appaiono come forti anomalie ad alta resistenza strutture architettoniche, vuoti, grotte, tombe, murature e strutture rocciose. Trincee, concentrazione di materiale organico e terreni conduttivi restituiscono anomalie deboli di bassa resistenza.

3.3 Geographic Information System (GIS)

Un Sistema Informativo Geografico è uno strumento che serve per immagazzinare, aggiornare, manipolare, analizzare e gestire dati e attributi a questi associati che siano geograficamente referenziati.

I software GIS sono concepiti come pacchetti contenenti vari moduli operativi, autonomi ed interagenti, in grado di gestire tutte le fasi di un processo di lavoro su elementi spaziali, dall'acquisizione del dato alla sua restituzione, passando per le operazioni d'archiviazione, trattamento ed elaborazione delle informazioni. Si tratta dunque di una tecnologia modulare, le cui varie parti sono utilizzate secondo le esigenze e le finalità dell'utenza interessata.

I GIS possono essere utilizzati per molteplici applicazioni, privilegiando, a seconda dei casi, l'uso delle funzioni più idonee alla loro realizzazione.

In campo archeologico, tali funzioni sono riassumibili in tre categorie: archiviazione e processamento delle informazioni, supporto per analizzare e prendere decisioni o programmare interventi, produzione di informazioni ed ipotesi di lettura dei dati.

Il GIS sta incrementando il suo ruolo soprattutto nelle prospezioni archeologiche grazie alla sua abilità nell'integrare differenti dataset geografici e nel contribuire alla gestione dei Beni Culturali. In combinazione con immagini satellitari multitemporali, DEM e cartografie tematiche a vario tipo si possono eseguire analisi statistiche multivariate, basate su elementi geografici del terreno (analisi di vicinanza all'acqua oppure a risorse minerarie, elevazione, esposizione rispetto al sole, pendenza, corridoi di trasporto, di intervisibilità, ecc.), che possono contribuire nelle analisi dell'area di influenza di un sito, di modellazione della tipologia di insediamento e nel costruire modelli predittivi per localizzare aree di potenziale interesse archeologico.

In questa ricerca, il GIS è stato utilizzato come contenitore di tutti i dati disponibili sia in formato *vector* sia *raster*: foto aeree, immagini satellitari, mappe geofisiche, cartografie topografiche e tematiche, punti archeologici e geologici rilevati con il GPS e interpretazioni delle immagini e dei risultati delle prospezioni geofisiche. È stato utilizzato inoltre per l'allestimento cartografico e la stampa della topografia di Uşaklı Höyük.

3.4 Fotogrammetria

La fotogrammetria è una tecnica di rilievo che consente di ottenere informazioni metriche (forma e posizione) di oggetti tridimensionali mediante interpretazione e misura di immagini stereoscopiche fotografiche o satellitari. Effettuare il rilievo di un oggetto significa ricavare la posizione spaziale di tutti i punti di interesse.

A livello teorico l'applicazione fotogrammetrica comporta la risoluzione di un problema di fondo che è quello di relazionare lo spazio oggetto tridimensionale con lo spazio immagine bidimensionale in maniera univoca e così da poter far corrispondere punti discreti, opportunamente scelti, nei due sistemi di grandezze. Superato questo obiettivo sarà poi possibile relazionare qualsiasi punto del continuo spazio immagine al corrispondente punto nello spazio oggetto.

Con opportune operazioni si ricostruisce il modello stereoscopico, cioè la descrizione in termini geometrici della posizione reciproca di due o più immagini tra di loro e in relazione al terreno.

Tali operazioni sono l'orientamento interno, che consente la ricostruzione della corretta geometria interna dell'immagine in relazione al sistema ottico che l'ha generata, e l'orientamento esterno, vale a dire

la ricostruzione della geometria dell'immagine in relazione alla superficie terrestre.

Ciò permette di fotorestituire tridimensionalmente un'area o un oggetto mediante *feature* vettoriali e di produrre il Modello Digitale di Elevazione e l'immagine ortocorretta, in proiezione ortogonale rispetto al piano di riferimento selezionato, sovrapponibile al dato topografico e quindi molto utile in fase interpretativa anche in campo archeologico.

Il DEM creato con metodologie automatiche riproduce la rappresentazione del terreno comprendendo le quote di punti posti al di sopra della superficie naturale del terreno, siano essi naturali o artificiali. Attraverso opportune elaborazioni dal DEM si possono escludere i punti al di sopra della superficie ad ottenere un Modello Digitale del Terreno, rappresentazione numerica della superficie naturale del terreno.

In archeologia, su di esso si possono condurre analisi numerose analisi GIS morfologiche tra le quali quelle *inter-site*, *site catchment*, ecc.

Le ortofoto, la cui creazione è resa possibile dall'orientamento dell'immagine rispetto al terreno e dal DEM, sono immagini geometricamente corrette, georeferenziate, a scala costante e reale. Possono essere usate per misurare distanze reali, in quanto esse raffigurano una accurata rappresentazione della superficie terrestre.

3.5 Global Positioning System (GPS)

Il GPS è un metodo di posizionamento basato sulla ricezione di segnali radio provenienti da satelliti artificiali in orbita attorno alla Terra.

Permette di determinare le coordinate tridimensionali (latitudine, longitudine, altitudine) di siti occupati da stazioni riceventi in un sistema di riferimento geocentrico (WGS84).

La configurazione complessiva del sistema può essere suddivisa in tre distinti segmenti: segmento spaziale, segmento di controllo, segmento utente.

Il segmento spaziale rappresenta la costellazione satellitare orbitante intorno alla Terra. È costituito da 31 satelliti, disposti su 6 piani orbitali inclinati di 55° rispetto al piano equatoriale, ad una quota di circa 20.200 km. Il sistema è progettato in modo da renderne visibili almeno 4 da ogni punto della superficie terrestre. I satelliti trasmettono a terra dati contenenti un segnale di tempo, le proprie effemeridi orbitali (le coordinate) e informazioni varie come il proprio numero di identificazione e lo stato di "salute".

Il segmento di controllo è costituito da una stazione *master* e da 5 stazioni di monitoraggio distribuite approssimativamente lungo l'equatore. Si occupa di tracciare i satelliti, ne aggiorna la posizione e provvede alla calibrazione e sincronizzazione degli orologi presenti a bordo. In questo modo è possibile determinare l'orbita di ciascun satellite e prevederne il percorso.

Il segmento utente, infine, è rappresentato da chiunque usi un ricevitore GPS. Tale strumentazione è composta da un'antenna (da disporre sul punto da determinare) e dal vero e proprio gruppo di sintonizzazione e acquisizione dati.

Nel sistema GPS gioca un ruolo importante anche il software poiché permette la preparazione delle sessioni di misura (per stabilire in anticipo gli orari migliori per l'acquisizione) e il *post-processing* dedicato all'elaborazione dei dati registrati.

La posizione assoluta di un singolo ricevitore GPS è determinata con scarsa precisione. Per ottenere precisioni nell'ordine del centimetro o del millimetro si utilizzano tecniche di misura relative, denominate misure differenziali (DGPS). Queste consistono nell'impiego simultaneo di due apparati ricevitori, uno posizionato su un punto di coordinate note, l'altro da usare nel punto da determinare. Se la distanza (*baseline*) tra i due ricevitori non è troppo grande (20 km al massimo) essi si troveranno più o meno nelle stesse condizioni atmosferiche, vedranno gli stessi satelliti e riceveranno gli stessi segnali. Entrambi, quindi, potranno effettuare i relativi calcoli sulla base dei segnali ricevuti e determinare la propria posizione "inquinata" di un certo errore. Considerando in prima approssimazione questo errore uguale per entrambi i ricevitori, è possibile utilizzare la differenza tra la posizione reale e quella misurata per correggere l'errore del secondo ricevitore. Infatti, la posizione data dal GPS posto nella stazione *master* è pari alle sue coordinate "reali" più l'errore. Dal momento che le coordinate di una delle due stazioni sono note, sottraendole alla lettura del GPS, si ottiene per differenza proprio l'errore. A questo punto, il primo GPS comunica l'errore al secondo GPS che dovrà semplicemente sottrarlo dalla propria per ottenere la propria posizione esatta.

Le misure GPS relative si effettuano utilizzando fondamentalmente due tecniche: misura statica e misura cinematica.

Il GPS statico è il metodo più esatto e più frequentemente adottato, soprattutto quando sono richieste elevate precisioni. Richiede sessioni di misura di una certa durata (da un minimo di 30 minuti fino ad alcune ore) con 2 ricevitori fissi sugli estremi delle *baselines* da determinare. È

sempre necessario ricevere almeno quattro satelliti e non perdere il contatto con essi.

Il GPS cinematico consiste invece nel tenere fisso uno dei due ricevitori (*Master*) e nel trasportare il secondo (*Rover*) sui punti da determinare, seguendo un certo percorso con continuità di movimento ed eseguendo determinazioni di posizione a intervalli di tempo regolari. Anche in questo caso è necessario non perdere mai il contatto con i satelliti (NA *Leica Geosystem*, 2003) e con il ricevitore *Master* che comunica la correzione mediante sistemi telefonici o radio.

L'utilizzo del GPS fornisce pertanto la posizione esatta di un certo punto nel sistema di riferimento prescelto.

In archeologia è utilizzato per misurare i GCPs necessari ad orientare le immagini, aeree o satellitari, o per collezionare punti che misurino un dato luogo di valore archeologico, oppure, all'interno di un sito, che misurino ritrovamenti di particolare importanza. Tali misurazioni, una volta inserite in ambiente GIS, permetteranno di condurre analisi *intrasite* o *intersite*.

4. Casi di studio

4.1 Il sito di Uşaklı Höyük

Il sito di Uşaklı Höyük si trova nella provincia di Yozgat, in Anatolia Centrale, Turchia (Fig. 4.1).

La zona è stata oggetto di *survey* annuali, tuttora in corso, da parte dell'Università degli Studi di Firenze a partire dal 2008. Il progetto si sviluppa in collaborazione con il Centro di GeoTecnologie dell'Università degli Studi di Siena per la parte tecnologica riguardante il *remote sensing* satellitare, l'implementazione in ambiente GIS e lo studio geologico e geomorfologico dell'area.

La regione anatolica ha costituito sia un corridoio che una barriera nell'interfacciarsi fra Antico Vicino Oriente ed Europa. Nello stesso tempo è attraversata dal confine fra Cappadocia e Ponto, frontiera che è geografica e climatica, e che spesso è stata culturale. Le civiltà anatoliche che fiorirono in queste terre durante il II e il I millennio a.C. furono strettamente connesse con l'ambiente montano della regione che era ricco di peculiari forme naturali quali fiumi, sorgenti, rilievi e affioramenti rocciosi.



Fig. 4.1 Uşaklı Höyük in Anatolia Centrale (Turchia)

L'area di studio è dominata, così come appena sottolineato per la regione più ampia, da rocce granitiche e rilievi montuosi ricchi di sorgenti

e fiumi, in particolare a Sud del Fiume Egri Öz Dere, che scorre da Ovest-Nord-Ovest verso Est.

Il sito archeologico di Uşaklı Höyük si trova nella parte Sud-Ovest di una pianura alluvionale piuttosto ampia limitata a nord dal Fiume Egri Öz Dere elaborata dal corso tortuoso di questo tratto del fiume. L'area è limitata a Nord da colline dolci e a Nord-Ovest dalle montagne che confinano con Hattuša, la capitale dell'impero Ittita, che sono attraversate da una rete di fiumi che forniscono evidenti reti di percorso lungo il fondo delle valli. Il profilo alto e distinto di Kerkenes Dağ segna l'orizzonte meridionale del paesaggio; la montagna granitica può essere facilmente raggiungibile da Uşaklı Höyük attraverso due ampie vallate orientate circa Nord-Sud che corrono parallelamente ad Est, mentre più a Ovest e a Sud sono presenti profonde gole ricche di sorgenti naturali e piccoli corsi d'acqua (Mazzoni et al. 2010).

Relativamente alla storia del sito archeologico, Uşaklı Höyük (Fig 4.2), chiaramente visibile dalla strada che congiunge Yozgat a Sivas, fu visitato, agli inizi del XX secolo, da E. Forrer nel 1926 (Forrer 1927), da H.H. von der Osten nel 1927 (von der Osten 1929) e più tardi da P. Meriggi (Meriggi 1971).

La prima survey archeologica di Uşaklı Höyük è stata effettuata da G.D. e M.E.F. Summers nel 1993-1994 all'interno del Kerkenes Project (Summers et al. 1995). In questo contesto è stato possibile attribuire all'insediamento, sulla base di una raccolta di superficie, una datazione che include il II e il I millennio a.C. Alcuni blocchi granitici nel terrazzo inferiore, apparentemente *in situ*, furono riconosciuti da von der Osten, e più tardi da Meriggi e Summers, come appartenenti ad una porta e testimoniando una fase ittita piuttosto importante.

O.R. Gurney nel 1995 ha ipotizzato che l'insediamento potesse essere identificato con Zippalanda. Fonti testuali pongono Zippalanda a due o tre giorni, in rispetto a due differenti itinerari, da Hattuša (43 km a nord di Uşaklı Höyük). In accordo con la festa di primavera, il re ittita raggiungeva il monte Daha, sede del dio della tempesta, dopo aver raggiunto Zippalanda, dirigendosi poi verso Ankuwa. Il Monte Daha potrebbe essere identificato nel Kerkenes Dağ, a Sud di Uşaklı Höyük, e chiaramente ben visibile dal tell (Mazzoni et al. 2010).

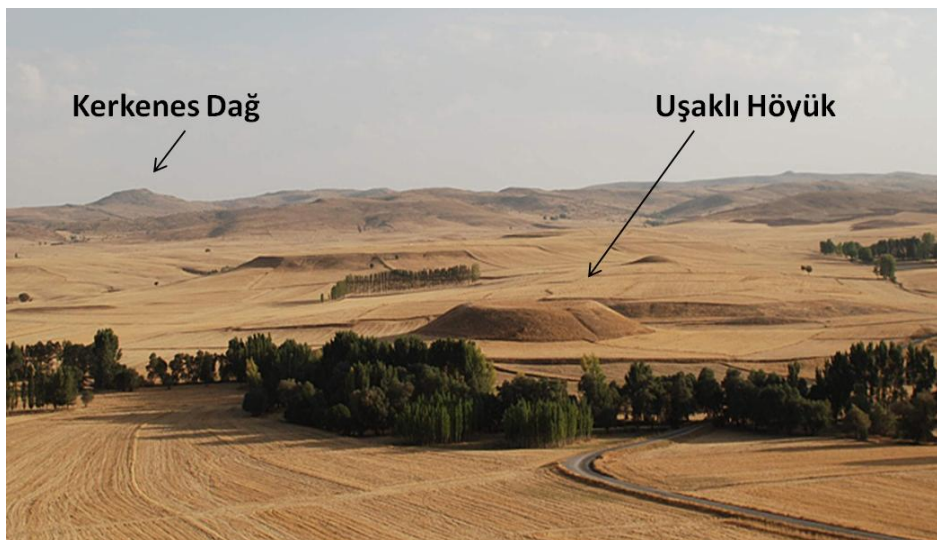


Fig. 4.2 Vista di Uşaklı Höyük, da Nord (nello sfondo, in alto a sinistra, Kerkenes Dağ)

All'interno di questo contesto, lo scopo del progetto condotto dall'Università di Firenze è diretto in primo luogo ad esplorare intensivamente il sito e la sua area di influenza e ad ottenere chiare informazioni riguardo al suo sviluppo storico. Allo stesso tempo, mira a raccogliere testimonianze sulla disposizione insediativa della pianura in cui si trova in un lungo periodo di tempo e ad esaminare il suo retroterra ambientale, cercando di ricostruirne l'assetto economico, politico e sociale. A tale fine la ricerca si connota di un carattere prettamente multidisciplinare coinvolgendo *survey* geologiche, geofisiche e topografiche, quest'ultime in particolare oggetto della presente tesi di Dottorato di Ricerca.

L'insediamento copre una superficie totale di circa 10 ha ed è costituito da un terrazzo di circa 7 ha, da un tell di circa 2 ha, e dall'acropoli. Il dislivello fra il terrazzo ed il tell è di circa 20 metri.

In base alla *survey* archeologica sono state evidenziate due strutture (Mazzoni et al. 2010):

- un gruppo di rocce di grandi dimensioni, in posizione assolutamente non primaria di affioramento, appartenenti ad una struttura di dimensioni notevoli, presenti sulla parte Est della parte bassa del terrazzo. Solo 9 blocchi di granito risultano apparentemente in posto rispetto all'originaria struttura (ve ne sono altri 20 rimossi presumibilmente appartenenti alla

medesima opera), attentamente lavorati e posti in due segmenti paralleli, orientati lungo un asse SudEst-NordOvest. L'uso del materiale non reperibile *in loco* e la taglia di tali blocchi attestano la natura monumentale della struttura;

- altri gruppi di pietre o singoli blocchi sparsi sono stati individuati e misurati con GPS differenziale. Ciò testimonia probabilmente la presenza di edifici e fortificazioni nell'area del tell, che possono essere assegnati al periodo ittita sulla base della tecnica di intaglio impiegata.

4.1.1 Metodi

Gli aspetti interessanti della presente ricerca sono costituiti dal fatto che i soli dati specifici disponibili al momento dell'inizio del lavoro erano quelli sull'esistenza dell'insediamento e sul periodo di occupazione. Dalle precedenti *survey* erano noti solo alcuni particolari, non del tutto precisi e localizzati con accuratezza, così come la letteratura sull'area è scarsa.

Per queste ragioni, poiché la regione è stata inoccupata per lungo tempo, è ancora non scavata e gli antichi testi suggeriscono una stretta connessione con altri importanti siti culturali nelle vicinanze, il sito e più in generale il paesaggio costituiscono un'area privilegiata per approfondire la ricerca mediante differenti tecniche di analisi.

Si sono integrati metodi di prospezione non invasivi, come il *remote sensing* e le prospezioni geofisiche, con la classica *survey* di superficie, il cui proposito è stato inizialmente quello di trovare indicazioni chiare sul campo di un sito ittita sepolto presso Uşaklı Höyük, identificandone in seguito la topografia, il circuito delle mura e l'estensione.

In tali casi, l'osservazione di immagini satellitari VHR può risultare di aiuto per un primo studio a distanza del luogo, anche se va sempre sottolineata la necessità di successive verifiche sul campo.

Inoltre, oltre all'aiuto nella fase archeologico-interpretativa della zona, è stato possibile, sempre grazie ad immagini satellitari di alta risoluzione, creare una carta topografica in scala 1:10.000 che potesse permettere sia indagini sul campo che, in seguito, sugli scavi e che potesse essere implementata su di un GIS archeologico sia per gestire i dati di scavo che per condurre analisi a livello di micro- e macro-scala (Castrianni et al. 2010; Di Giacomo et al. 2011; Salvini et al. in press). È da

sottolineare come la cartografia topografica disponibile prima di questo lavoro di tesi è in scala 1:25.000 ed è riferibile al 1959 provenendo dalla restituzione fotogrammetrica di fotografie aeree del 1950.

4.1.1.1 Dati a disposizione

I dati a disposizione per le operazioni di *remote sensing* sono stati i seguenti:

- 1 stereocoppia di immagini satellitari Geoeye-1, acquisite appositamente per il progetto, il 25 Settembre 2009. Le immagini sono state acquistate come prodotto Stereo, in cinque bande spettrali: pancromatica, blu, verde, rosso e infrarosso;
- 1 immagine satellitare Landsat7 ETM+, acquisita il 17 Novembre 2002, reperibile gratuitamente sul web (<http://glovis.usgs.gov/>). Le bande spettrali fornite sono 8, ed esattamente: blu, verde, rosso, infrarosso, primo infrarosso medio, infrarosso termico, secondo infrarosso medio, pancromatica;
- immagine georeferenziata proveniente dal processamento dei rilievi magnetometrici e relativo *shapefile* d'interpretazione;
- immagine georeferenziata proveniente dal processamento dei rilievi di resistività e relativo *shapefile* d'interpretazione;

4.1.1.2 Campagna GPS

La campagna GPS, svolta nell'Agosto-Settembre 2009 per la parte topografico-archeologica e nell'Agosto-Settembre 2010 per la parte geologica, ha riguardato appunto la raccolta di posizioni corrette con precisioni centimetriche di punti di interesse archeologico, geologico e topografico. Questi ultimi sono stati necessari per l'orientamento esterno della stereocoppia satellitare GeoEye-1 con lo scopo di studiare il sito in relazione al sistema geomorfologico dell'area e fornire uno strumento, cartaceo e digitale, per la gestione dei dati di *survey* e di scavo.

In particolare sono stati misurati mediante tecnica GPS differenziale 150 GCP in un'area di 100 Km² in modalità RTK con riferimento a otto postazioni fisse appositamente materializzate all'interno dell'area di concessione archeologica. Una nona base di riferimento è stata realizzata all'interno della missione archeologica di Kerkenes Kazi Evi presso Sahmuratli.

La strumentazione a disposizione è consistita in due ricevitori GPS Leica™1200 e un GPS Leica™SR530.

Il ricevitore Leica™SR530 è stato posto come stazione fissa in modo permanente (per la durata della missione – 3 settimane circa) a Sahmuratli (base della missione archeologica) mentre uno dei due Leica™1200 è stato adibito di giorno in giorno a stazione Master e l'altro a ricevitore Rover durante il rilievo RTK.

Il sistema di riferimento prescelto per il processamento dei dati è l'UTM-WGS84, Zona 36, emisfero Nord.

Come detto, il rilievo è stato progettato localizzando opportunamente otto postazioni (più una fissa) per lo strumento Base (Fig. 4.3) che fossero sufficienti a coprire tutta la zona da rilevare. Una volta individuate le posizioni più idonee, materializzate, montate e misurate le Basi, è iniziato il rilievo dinamico RTK, spostandosi rapidamente di punto in punto con il Rover, utilizzando la tecnica *stop and go* che consiste nel portarsi sul punto da determinare e fermarvisi per un tempo sufficiente per calcolarne le coordinate (almeno 2 minuti di misura).



Fig. 4.3 Stazione di riferimento permanente materializzata presso la missione di Sahmuratli

I GCPs sono stati selezionati così da essere uniformemente distribuiti nell'area di interesse (Fig. 4.4) e facilmente distinguibili nelle immagini satellitari GeoEye-1 (spigoli di tetti di abitazioni o di edifici, parte struttura di fontane, ecc. - Fig. 4.5). In aree non abitate, invece, la necessità comunque di avere GCP necessari all'orientamento esterno delle immagini, ha costretto a misurare elementi naturali il più possibile riconoscibili sulle scene quali la vegetazione o particolari morfologie del terreno.

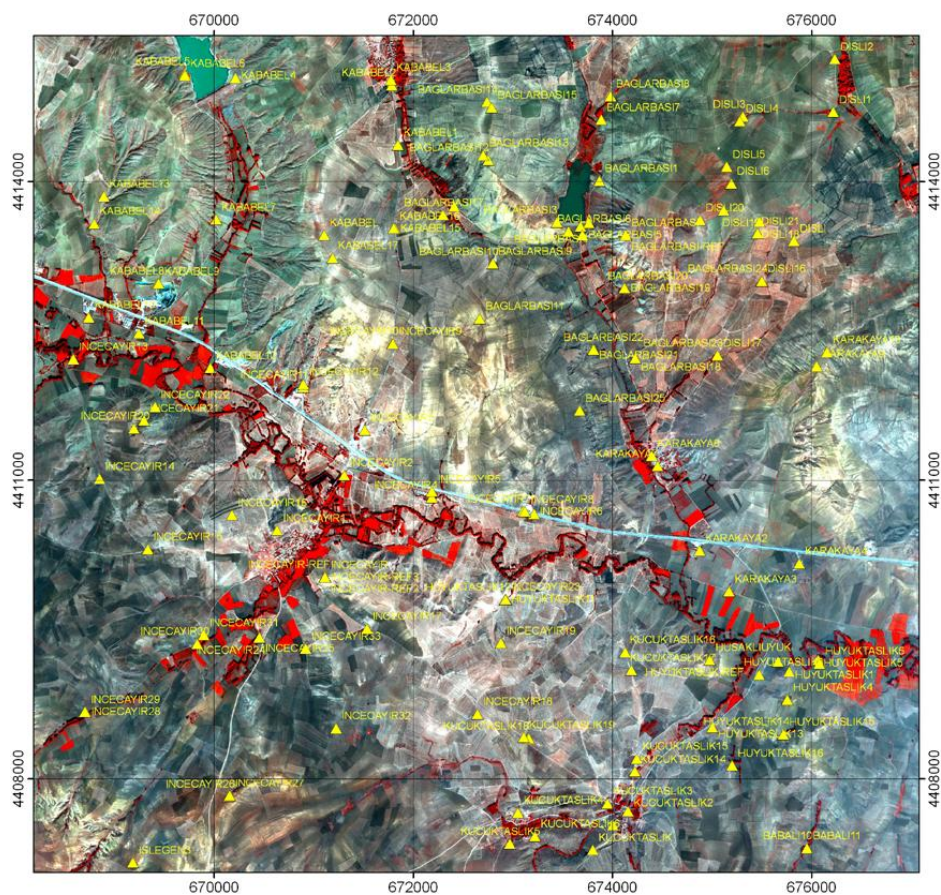


Fig. 4. 4 Distribuzione dei punti nell'immagine satellitare GeoEye-1

In funzione della Base attivata sono state quindi misurate, in modalità RTK, le coordinate di tutti i punti della zona circostante, in un raggio di circa 4 Km, per passare poi alla Base successiva. In media sono stati battuti circa 15 punti per ogni stazione di riferimento.



Fig. 4.5. Rilevamento punti GPS: parte strutturale di una fontana ad elevato contrasto radiometrico "acqua/cemento" riconoscibile nell'immagine satellitare grazie all'alta risoluzione spaziale (50 cm)

La tecnica statica è stata utilizzata invece sia per la misurazione delle 8 basi rispetto a quella posizionata a Sahmuratli, che per la misura di punti con coordinate note utilizzati nel *post-processing* dei dati per incrementare l'accuratezza.

La postazione fissa di Sahmuratli è stata lasciata misurare in continuo secondo sessioni della durata di minimo 10 ore per giorno e sempre contemporanea a tutti gli altri punti. Essa è stata utilizzata come Reference per tutte le 8 basi del rilievo RTK. Gli 8 *benchmarks* di riferimento sono stati misurati in modo statico per almeno 4 ore e successivamente post-processati proprio rispetto ad essa.

Presso l'*Harita Genel Komutanligi – Jeodezi Dairesi Başkanligi (Mapping Agency)* di Ankara, sono state acquistate le monografie, complete di coordinate, di 6 punti trigonometrici. Di tali punti soltanto 3 sono stati trovati *in situ* apparentemente ben conservati, 1 non è stato rinvenuto mentre 2 sono andati distrutti.

Per i punti trigonometrici pervenuti *in situ*, sono state effettuate misurazioni di almeno 4 ore in modalità statica per consentire la correzione della Base posta nella missione a Sahmuratli.

Purtroppo, nelle fasi di *post-processing*, la loro accuratezza è risultata bassa, probabilmente perché anche questi punti sono stati manomessi dalle attività agricole.

Per ovviare a questo grave inconveniente, grazie al direttore della Missione archeologica Kerkenes Dağ, Prof. Jeffrey Summers, sono stati misurati in modalità statica 3 punti ben conservati all'interno del progetto Kerkenes le cui coordinate, nel sistema UTM-WGS84, sono anche state rese disponibili. I punti sono stati quindi utilizzati come riferimento per correggere le coordinate della Base di Sahmuratli. In particolare, il loro rilievo statico è stato effettuato posizionando un ricevitore GPS fisso a Sahmuratli e azionando gli altri due GPS in 2 dei 3 punti di Kerkenes. Dopo almeno 4 ore la posizione dei ricevitori nel sito archeologico di Kerkenes è stata cambiata in modo che tutti e 3 i punti noti fossero misurati e, soprattutto, con sovrapposizione di registrazione. Tutto ciò, verificato con le successive fasi di *post-processing*, ha permesso la determinazione delle coordinate esatte della stazione di riferimento di Sahmuratli. Il *software* di post-processamento utilizzato è Leica™ LGO. Considerate le tecniche di misura adoperate, le coordinate corrette delle basi sono da considerarsi di accuratezza centimetrica mentre i punti RTK presentano accuratezze inferiori al decimetro; per tale ragione, tutti i punti misurati sono largamente utilizzabili per le successive applicazioni fotogrammetriche, geologiche e archeologiche.

4.1.1.3 Stereoscopia satellitare

Il *software* usato per le operazioni di fotogrammetria digitale sull'immagine satellitare stereoscopica GeoEye-1 è stato ERDAS™ IMAGINE 2010; in particolare è stato utilizzato il modulo LPS (*Leica Photogrammetric Suite*) per gli orientamenti e la creazione dell'ortofoto e il modulo StereoAnalyst per la stereorestituzione.

Per poter visualizzare le scene nel loro contenuto completo multispettrale, è stata effettuata un'operazione di *layer stack* che ha composto in un unico file i canali di ripresa spettrali della luce blu, verde, rossa e dell'infrarosso vicino, rispettivamente appartenenti alle bande 1,

2, 3 e 4. Per avere informazioni di qualità più alta sia da un punto di vista spettrale che spaziale, è stata effettuata la fusione dell'immagine multispettrale-stack con l'immagine pancromatica attraverso il Metodo delle Componenti Principali (Chavez et al. 1991), così da ottenere una singola scena multispettrale di elevata risoluzione spaziale.

Solo per le operazioni di restituzione topografica, questa immagine è stata successivamente ricodificata da 16 bit a 8 bit, in modo da snellire le successive procedure digitali di orientamento e restituzione. Ciò non è stato fatto nella versione finale che ha previsto la creazione dell'ortofoto, così da non perdere il contenuto radiometrico del dato.

Tali operazioni sono state effettuate per entrambe le immagini stereoscopiche.

Le immagini sono state orientate secondo il sistema di riferimento UTM-WGS84, zona 36N mediante l'uso dei GCPs provenienti dal rilievo GPS.

4.1.1.3.1 Orientamento e creazione DEM e ortofoto

Le immagini satellitari sono caratterizzate da una particolare geometria di presa che genera delle distorsioni (il terreno viene scansionato per linee secondo una modalità di acquisizione tipo *pushbroom*).

La correzione di tali distorsioni passa attraverso la ricostruzione delle relazioni che legano lo spazio immagine e lo spazio oggetto. Tali relazioni possono essere definite attraverso due differenti approcci, uno di tipo parametrico ed uno di tipo rigoroso.

Dato il tipo di immagine disponibile (Standard stereo) l'approccio che si è seguito nella ricostruzione delle relazioni è di tipo parametrico: la corrispondenza tra spazio immagine e spazio oggetto è stata modellata analiticamente utilizzando delle funzioni polinomiali.

Per entrambe le scene satellitari GeoEye-1 sono stati rilasciati direttamente al momento dell'acquisto i file contenenti i *Rational Polynomial Coefficients* (RPC), cioè i coefficienti dei polinomi da utilizzare per l'orientamento.

Al fine di migliorare l'accuratezza dell'orientamento, così come raccomandato nell'applicazione di funzioni polinomiali mediante RPC, sono stati collimati i GCPs acquisiti durante il rilevamento topografico tramite GPS.

Attraverso la funzione *Point Measurement* di LPS, sono stati posizionati tutti i 150 GCPs. Questi sono stati selezionati sia come Control Point, ossia punti considerati come appoggio durante la triangolazione, sia come Check Point, di verifica. A tutti sono stati assegnati i valori delle coordinate X, Y e Z ottenuti dalla campagna di lavoro GPS.

Va sottolineato come la coordinata Z sia riferita correttamente al livello del mare e non all'ellissoide WGS84, come misurato dallo strumento, grazie al *post-processing* effettuato rispetto ai punti della missione archeologica Kerkenes Dağ.

Per il corretto posizionamento dei GCPs sulle immagini, sono state utilizzate le informazioni presenti nel "diario di campagna" dove, ad ogni punto GPS misurato è stata associata una monografia contenente il nome del punto, le coordinate, una breve descrizione della zona e la foto corrispondente.

Una volta visualizzate le caratteristiche del punto (Fig. 4.6), si è proceduto con il suo inserimento in LPS (Fig. 4.7).



Fig.4.6 Acquisizione del punto Karakaya12 e relative informazioni presenti nella monografia.

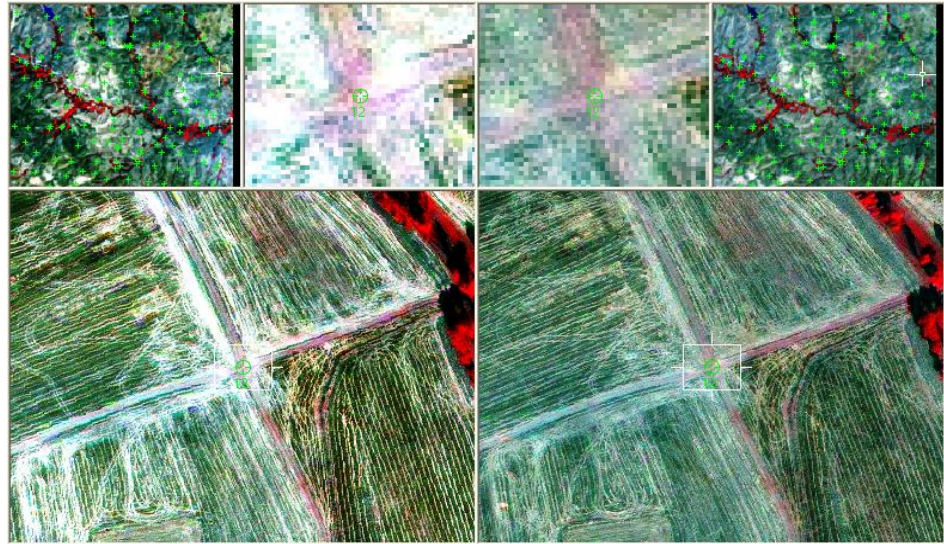


Fig.4.7 Inserimento del GCP Karakaya12 (incrocio di una strada)

Questa procedura è stata usata per tutti i 150 punti collimati.

Oltre ai GCPs di coordinate note, sono stati inseriti circa 60 *Tie Points*. Questi indicano la posizione dei punti di legame all'interno della zona di sovrapposizione delle immagini. In questo caso le coordinate non sono note ma vengono determinate con la procedura di triangolazione aerea. Tali punti servono quindi ad "irrobustire" la creazione dei modelli stereoscopici ossia a favorire il cosiddetto "orientamento relativo" tra le immagini.

I punti di legame possono essere collezionati manualmente, oppure in maniera automatica dal software grazie ad operazioni di *matching* tra le immagini. In questa tesi, cercando di incrementare la qualità del risultato, sono state utilizzate entrambe le tecniche in modo congiunto.

In automatico sono stati individuati solamente 13 *Tie Points*; i restanti 47 sono stati inseriti manualmente, riconoscendo punti omologhi nelle due immagini.

Una volta posizionati tutti i GCPs ed i *Tie Points*, si è proceduto con la triangolazione aerea stabilendo le relazioni matematiche fra le immagini che formano il *Block File* e le coordinate dei punti a terra.

L'errore RMSE (*Root Mean Square Error*) finale medio su tutti i punti, ottenuto dopo gli opportuni miglioramenti effettuati utilizzando come supporto il report di triangolazione creato dal software, è stato di 0,0506099 pixel. Considerato che un pixel equivale a 50 cm a terra, tale valore è stato considerato soddisfacente.

Una volta effettuato l'orientamento esterno della stereocoppia, si è iniziato a produrre nuovi dati necessari per creare il DEM e l'ortofoto dell'area di studio.

Inizialmente, si è generato in maniera automatica il 3D *shape* dell'intera area (Fig.4.8), cioè un file vettoriale, formato *shapefile*, di punti di coordinate tridimensionali note. Questo è stato fatto perché utilizzando uno *shape* e non un modello formato GRID quindi già interpolato, è possibile modificare i punti errati, aggiungere punti in zone dove l'estrazione non è precisa, ed eliminare i punti al di sopra della superficie topografica in modo da passare dal DEM all'effettivo DTM (*Digital Terrain Model*).

Per la produzione dello *shape3D* è stata impostata una *cell size* pari a 2 m. Inoltre, si è scelto di creare una *DEM Point Status Output Image* cioè un file formato *raster* che, attraverso delle classi di qualità rappresentate con colori diversi, illustra l'accuratezza ottenuta nell'estrazione del modello digitale di elevazione (da scarsa ad ottima).

Tale accuratezza rappresenta il valore del coefficiente di conversione con il quale si è realizzato l'*image matching* tra le due scene stereoscopiche orientate.

Una volta ottenuto lo *shape3D*, si è proceduto con la visualizzazione dell'immagine di qualità così da capire in modo intuitivo le zone dove era necessaria una correzione.

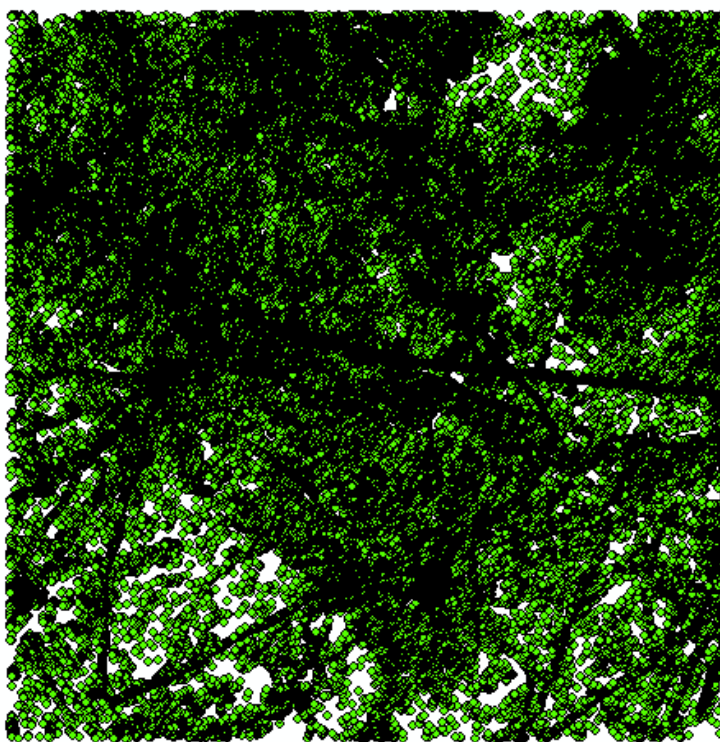


Fig.4.8 Shape 3d ottenuto con l'estrazione automatica

Nelle aree considerate poco accurate sono stati quindi sostituiti ed aggiunti, lavorando in stereoscopia, nuovi punti utilizzando il modulo Stereo Analyst di ERDAS IMAGINE 2010.

Lo *shape3D* ottenuto da quello creato con l'estrazione automatica più i punti aggiunti stereoscopicamente è stato la base di partenza utilizzata per ottenere il DEM utile alla estrazione delle isoipse e necessario nell'ortorettifica della scena.

Per far questo, il *3D shape* è stato importato in ESRI™ ArcMap e si è prodotto un modello continuo vettoriale formato TIN (*Triangular Irregular Network*). Secondo questa procedura, i punti vengono tra loro collegati generando una serie di triangoli che, senza soluzione di continuità, formano una superficie nello spazio. Ad ogni vertice del triangolo è associata una quota. I triangoli delimitano il piano passante per i suoi vertici per cui dal TIN può essere ricavato un DEM a grigliato regolare mediante interpolazione lineare.

Il TIN appena creato è stato convertito in DEM utilizzando una dimensione della cella di 2 m al fine di avere una rappresentazione realistica della morfologia e conforme alla densità dei dati di input (Fig.4.9).

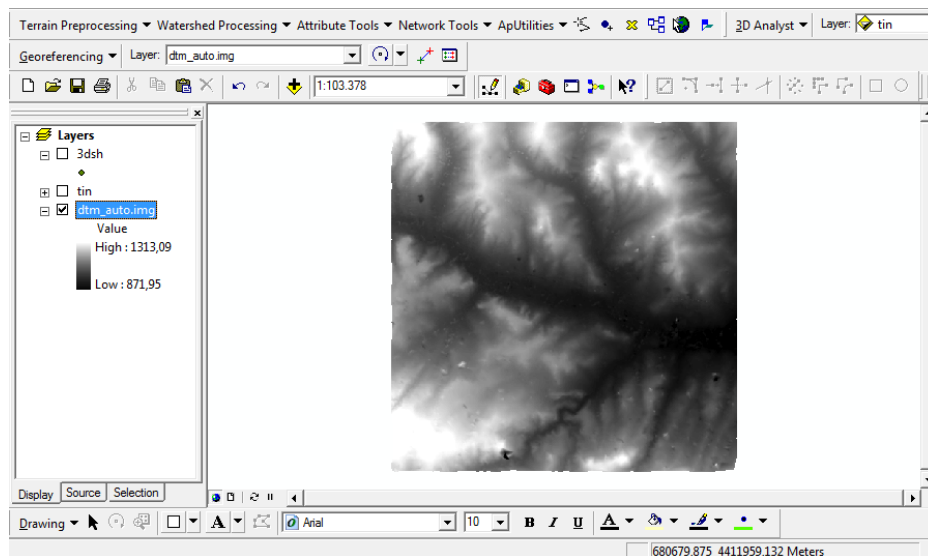


Fig. 4.9 Vista 2D del DEM

Gli errori, evidentemente ancora presenti, sono stati identificati e successivamente corretti, sempre in stereoscopia, sia in termini di punti quotati che di curve di livello.

Attraverso il *Contouring* di ESRI™ *ArcToolbox* sono state create le curve di livello a partire dal DEM appena descritto. Questa funzione permette di produrre un *dataset* di isolinee rappresentanti valori di cella costanti a partire dal raster di input. Il valore di equidistanza (differenza di quota tra due isoipse adiacenti) è stato impostato pari a 5 m.

Visto che le isoipse estratte in maniera del tutto automatica risultano inevitabilmente piuttosto "spigolose", si è reso necessario effettuare in prima analisi uno *smoothing*. La geometria delle linee è stata quindi sostituita da una serie di segmenti a morfologia più arrotondata (Fig. 4.10).

In questo caso è stato impostato un *maximum allowable offset* (valore che specifica quanto può essere distante la geometria di output rispetto a quella di input) pari a 10 m.

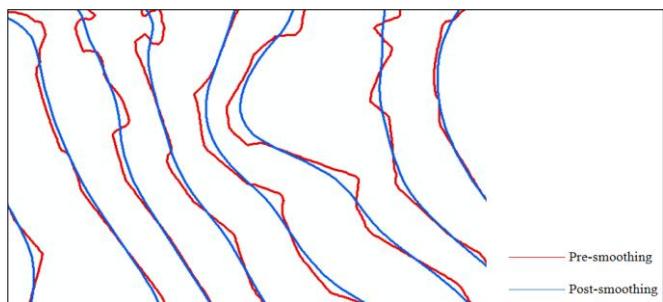


Fig.410 Curve di livello pre e post-smoothing

Grazie alle isoipse prodotte è stato possibile visualizzare le zone ancora errate del DEM proveniente dai punti del *3D Shape* con quota errata. In tali aree si notano degli addensamenti dove le isoipse sono dense in maniera assolutamente sospetta (Fig. 4.11).

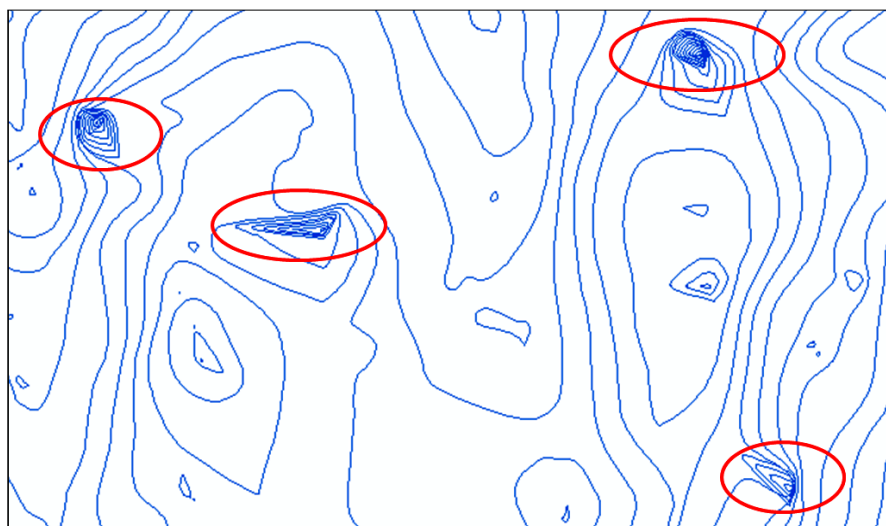


Fig. 4.11 In rosso sono evidenziate le aree ad alta densità di isoipse luogo di probabili errori

Una volta corretti tali punti in stereoscopia, è stato nuovamente creato il TIN e successivamente da questo il DEM secondo la procedura precedentemente descritta. Da tale modello digitale sono state prodotte delle nuove isoipse.

In aggiunta alle isoipse definitive con equidistanza pari a 5 metri, visto che l'obiettivo del lavoro è quello di produrre una cartografia utile per il *survey* archeologico, si è deciso di evidenziare il sito archeologico di Uşaklı Höyük creando curve di livello specifiche di tale area.

Per avere una precisione maggiore, in questa zona le isoipse sono state direttamente stereorestituite attraverso il modulo StereoAnalyst di ERDAS IMAGINE 2010. Nello specifico sono state digitalizzate quelle rappresentanti la vetta della collinetta, la base e alcune zone intermedie sempre con una equidistanza di 5 m (Fig. 4.12).

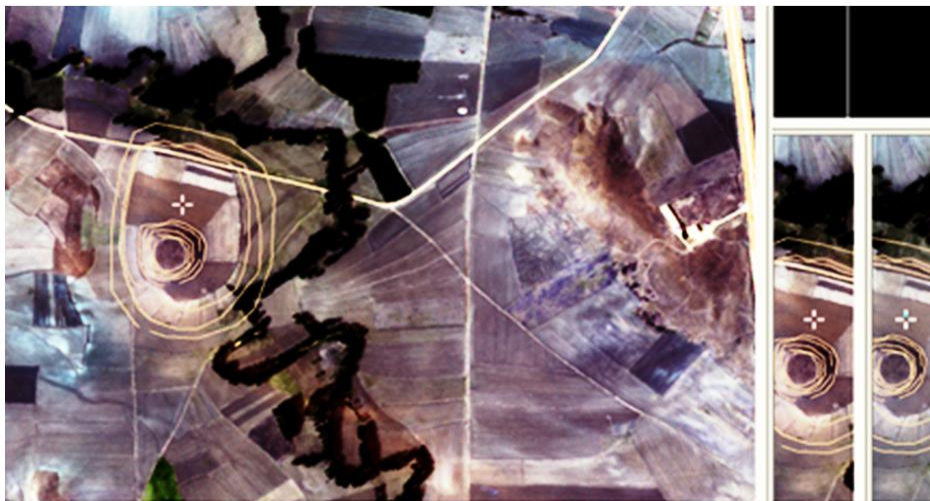


Fig. 4.12 Stereorestituzione delle isoipse del Tell di Uşaklı Höyük

Successivamente tali linee sono state importate in ArcGIS dove è avvenuta la loro integrazione con le altre.

Utilizzando le isoipse corrette e tutti gli altri elementi topografici dotati di quota è stato possibile produrre il DEM finale. Questo modello digitale è stato usato per la creazione delle ortofoto a partire dall'orientamento delle immagini satellitari.

Per avere una sicurezza maggiore che il DEM non presentasse ancora errori tipo alti morfologici irreali o depressioni, sono state elaborate alcune funzioni direttamente sul dato raster mediante analisi idrologica disponibile nell'estensione ArcHydro di ESRI™ ArcGIS.

Le funzioni di modellamento idrogeologico forniscono infatti metodi per descrivere le componenti fisiche di una superficie. Quella utilizzata è la funzione *Fill Sinks*. Con questa funzione si vanno a riempire le eventuali depressioni innaturali presenti in un GRID. Se una cella è circondata da celle con elevazione molto maggiore, o da celle con elevazione minore, tale funzione modifica il valore di elevazione di questa cella eliminando il problema dei “picchi” e delle “depressioni”.

Il risultato di questa operazione, dopo opportuna fase di verifica, è rappresentato da un nuovo DEM “ideologicamente” corretto (Fig. 4.13).

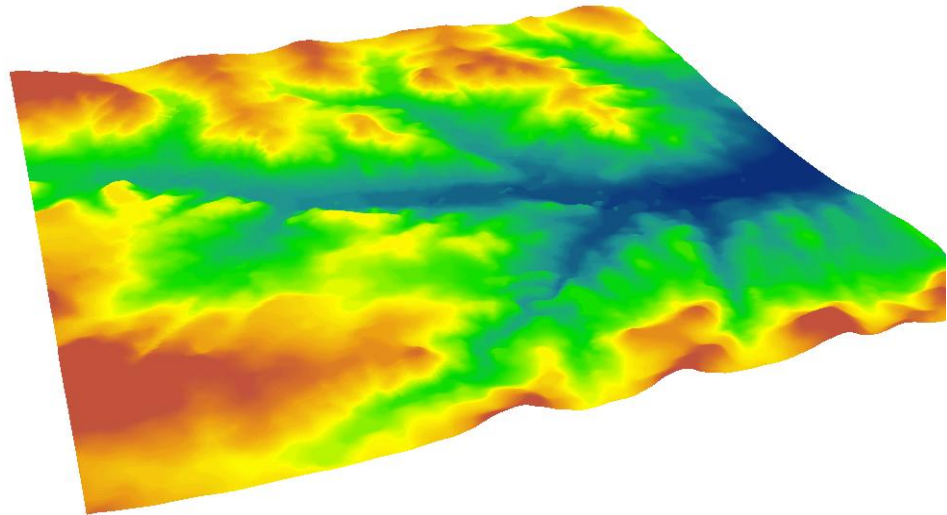


Fig. 4.13 Vista 3D del DEM ideologicamente corretto con esagerazione verticale 3

Tale prodotto rappresenta il DEM finale con il quale è stata creata l'ortoimmagine dell'area in esame, ultima operazione di *pre-processing* compiuta sulle immagini satellitari.

A partire dall'orientamento esterno delle scene e del DEM finale è stato infatti possibile ortocorreggere le immagini e sottoporle a ricampionamento. In accordo con la risoluzione spaziale del dato GeoEye-1, è stata impostata una risoluzione spaziale per le immagini di output pari a 0,5 m.

Come modello di ricampionamento è stato scelto il *Bilinear Interpolation*. Con tale algoritmo, considerato un punto di coordinate note nell'immagine di output, ad esso sarà attribuito il valore di radianza

relativo alla media pesata sulla distanza dei quattro pixel più vicini nell'immagine di input.

Nella figura 4.14 è possibile visualizzare in ambiente ESRI™ ArcScene l'ortofotografia prodotta sovrapposta al DEM dal quale è stata creata, in rappresentazione 3D.

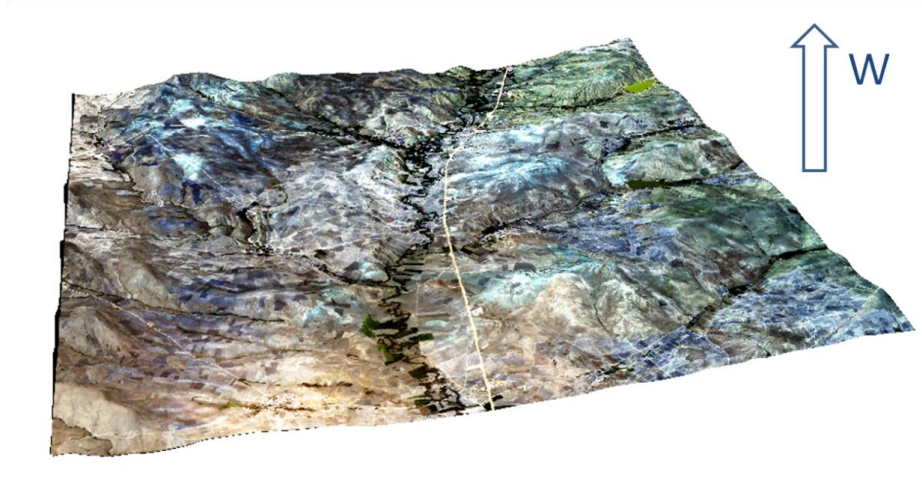


Fig. 4.14 Vista 3D dell'ortofoto con esagerazione verticale pari a 3

4.1.1.3.2 Creazione della carta topografico-archeologica

A partire dai dati rilevati in campagna e dai prodotti della stereoscopia è stata creata la carta topografica dell'area in scala 1:10.000.

I software utilizzati a tale scopo sono stati ESRI™ ArcGIS per la parte Gis e cartografica e Leica™ ERDAS IMAGINE 2010 per la stereorestituzione.

I dati a disposizione per la creazione della nuova carta topografica relativa all'anno 2009, data di acquisizione delle scene satellitari, sono stati:

- Il modello stereoscopico orientato;
- I GCPs;
- I Tie Points;

- Il DEM;
- L'ortofoto multispettrale.

La stereorestituzione digitale degli elementi topografici è stata effettuata tramite il modulo Stereo Analyst di ERDAS IMAGINE 2010. Prima di procedere con la restituzione, sono state individuate le entità da rappresentare, riferibili a:

- Il corso d'acqua principale
- Gli affluenti
- Le isoipse e punti quotati
- La strada principale
- La strada secondaria
- I Paesi o i villaggi
- Le dighe

Queste *features* sono state scelte in modo da poter produrre una carta topografica dettagliata a scala medio-alta.

A seconda della tipologia, è stata definita per ogni elemento una *feature class* puntuale, lineare o poligonale caratterizzata da differenti proprietà topologiche, semantiche e grafiche (spessore, colore, ecc.) (Fig. 4.15, 4.16, 4.17 e 4.18).

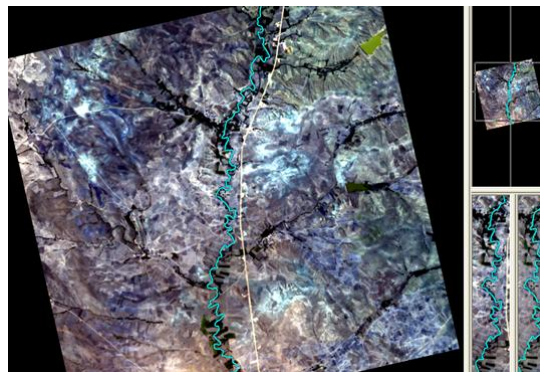


Fig. 4.15 Stereorestituzione del corso d'acqua principale



Fig. 4.16 Corso d'acqua principale e affluenti

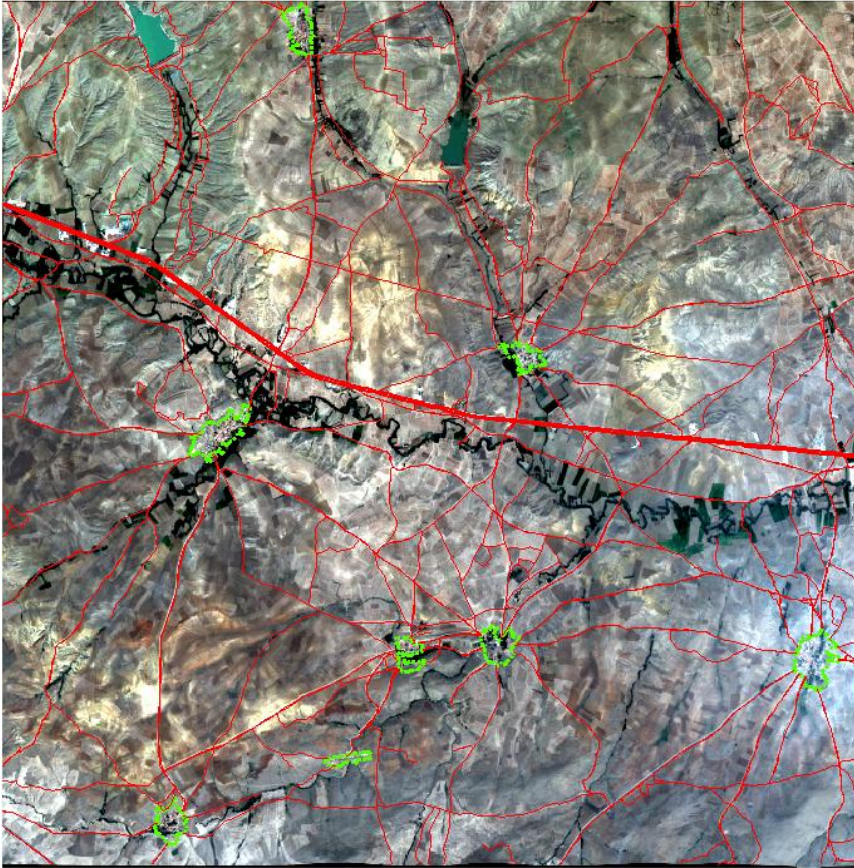


Fig. 4.17 Visualizzazione delle strade (in rosso principale, più spessa, e secondaria) e dei paesi (in verde)

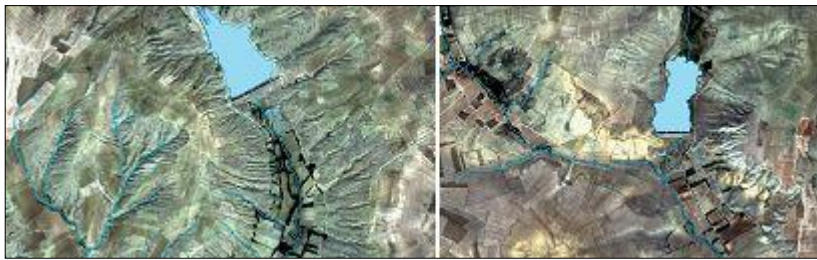


Fig. 4.18 Restituzione delle dighe

Una volta conclusa la fase di stereorestituzione, tutti gli elementi creati sono stati importati in ambiente GIS dove è stato allestito il *layout* della carta topografica.

Inoltre, sempre in ESRI™ ArcMap, è stato creato il livello informativo “toponimo” relativo ai nomi dei villaggi rappresentati inclusi nell’area.

Inoltre, per rendere più completo il contenuto informativo della carta, sono state digitalizzati altre due entità:

- gli edifici al di fuori dei limiti delle città. Questi si trovano principalmente lungo la strada principale;
- le cave (nella zona sono presenti solamente due cave, una in prossimità della strada l’altra nella parte a Nord).

Per quanto riguarda i punti quotati, dal modulo LPS di ERDAS™ IMAGINE 2010 sono stati esportati sia i GCPs che i *Tie Points*, per poi essere importati in ESRI™ ArcMap. Si è formato così uno *shape* puntuale di coordinate tridimensionali note. Questi, opportunamente editati, per evitare ridondanza e per non avere problemi nelle loro posizioni rispetto agli altri elementi topografici, sono stati inseriti nel *geodatabase* contenente tutti gli elementi della carta topografica a scala 1:10.000.

Per l’allestimento della stampa della carta topografica, si è innanzitutto definita una *Location Map* per localizzare l’area di interesse.

Per far questo è stato inserito un nuovo *Data Frame*, all’interno del quale, è stato possibile scegliere una delle immagini disponibili nel sito della ESRI™ Maps and Data.

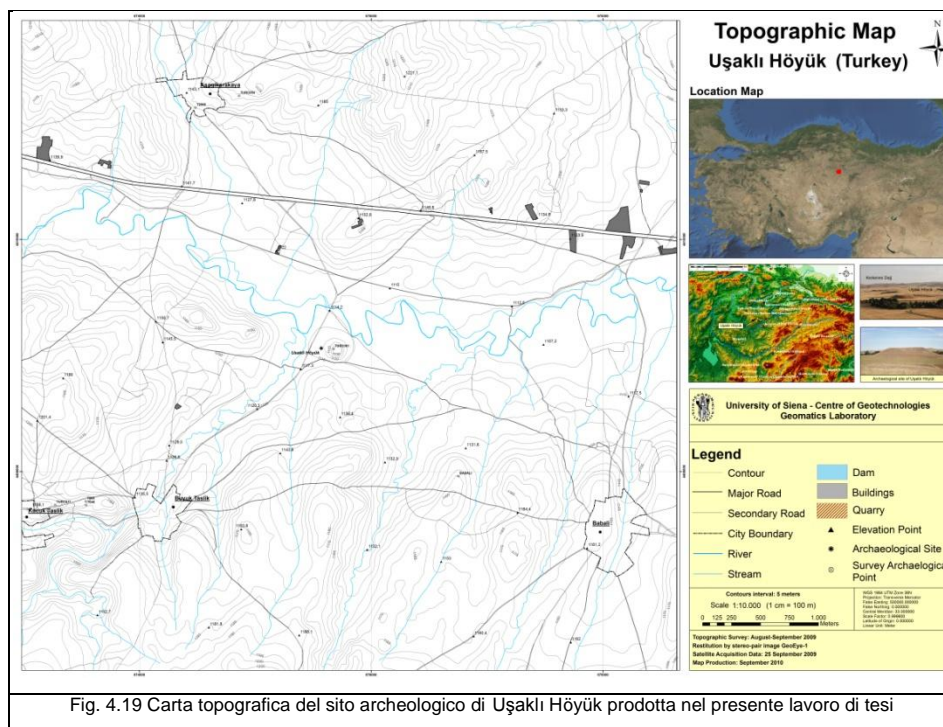
Per il *layout* in questione si è optato per l’*Imagery*, un file LYR, mosaicato dalla ESRI™, che combina *World Imagery*, *World Transportation*, *World Boundaries* e *Places reference*.

Sono state inserite nel layout le seguenti componenti:

- Titolo (riferito al sito archeologico in studio)
- Nord geografico
- Reticolato Chilometrico (cella unitaria 2 Km x 2 Km)

- Legenda
- Informazioni sull'equidistanza delle isoipse
- Scala grafica
- Scala testuale
- Sistema di riferimento
- Data del *survey* topografico
- Data dell'acquisizione satellitare
- Data della produzione della mappa

È stata quindi allestita la carta topografica in scala 1:10.000 di tutta l'area contenuta nella scena GeoEye-1. La Figura 4.19 mostra la carta prodotta, rappresentata non in scala.



4.1.1.3.3 Processing dell'ortoimmagine

Una volta prodotta l'ortoimmagine con risoluzione radiometrica pari a 16 bit, sono state in essa condotte delle operazioni di miglioramento spaziale e spettrale volte ad individuare eventuali resti archeologici sepolti. Vengono di seguito presentati i metodi risultati maggiormente significativi e l'eventuale interpretazione archeologica.

Filtri di convoluzione spaziale

I risultati migliori nell'applicazione di filtri di convoluzione spaziale, funzionali ad esaltare eventuali linee preferenziali, sono giunti dal 3×3 *non directional edge enhancement* e dal 3×3 *edge detection* (Fig. 4.20, Fig. 4.21). Questi, pur migliorando sensibilmente la visibilità dei lineamenti presenti sulla scena, non hanno però portato ad alcuna particolare individuazione di anomalie archeologiche come atteso (Due Trier 2009).



Fig. 4.20 3×3 Non-directional-edge enhancement

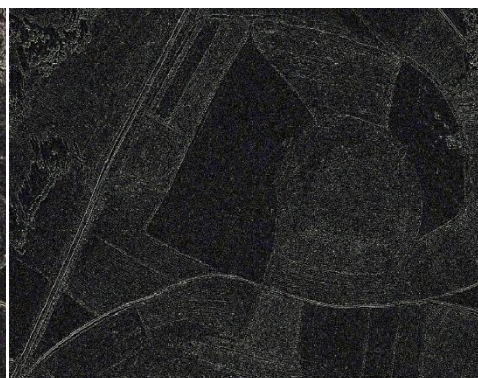


Fig. 4.21 3×3 Edge-detection

Componenti Principali

Le Componenti Principali (Fig. 4.22), estratte in numero di quattro e visualizzate in vari *composite* utilizzando in particolare le prime tre poichè contenenti il maggior numero di informazioni, hanno permesso di rilevare un'anomalia sul lato nord-ovest del tell, consistente in una linea retta orientata nordest-sudovest, riscontrata anche nella campagna dell'anno successivo sul campo.

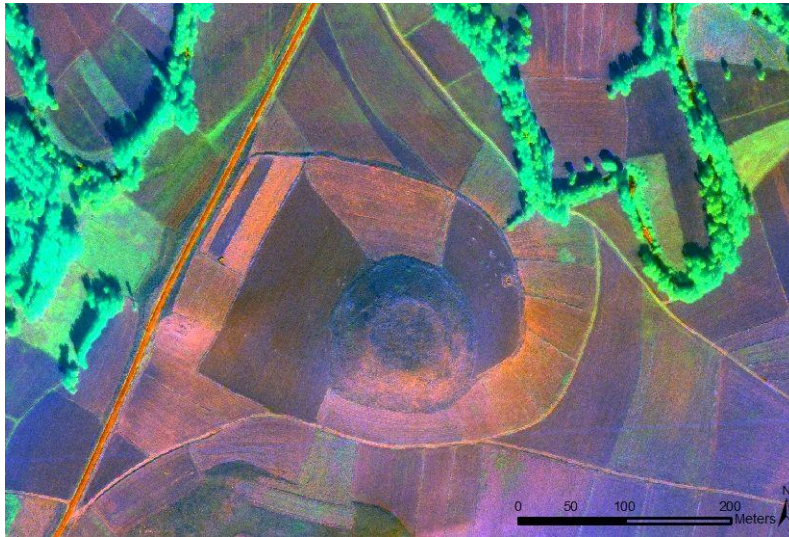


Fig. 4.22 Componenti Principali FCC 123 RGB

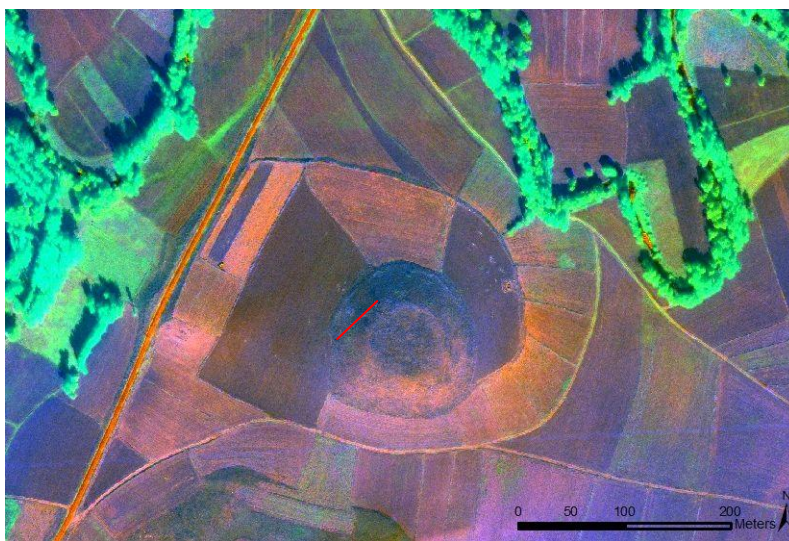


Fig. 4.22 Componenti Principali FCC 123 RGB con fotointerpretazione

Tasseled Cap

La trasformazione *tasseled cap* (Fig. 4.23), volta ad esaltare il contenuto spettrale delle immagini, non ha apportato alcun tipo di aiuto nell'individuare tracce antropiche nell'area relativa al tell. Non è stato ancora elaborato un algoritmo specifico per le immagini Geoeye-1, ma è stato utilizzato quello valido per le immagini IKONOS (Horne 2003), visto

che le lunghezze d'onda delle quattro bande di ciascuno dei due sensori, pur non perfettamente coincidenti, sono pressoché coincidenti.

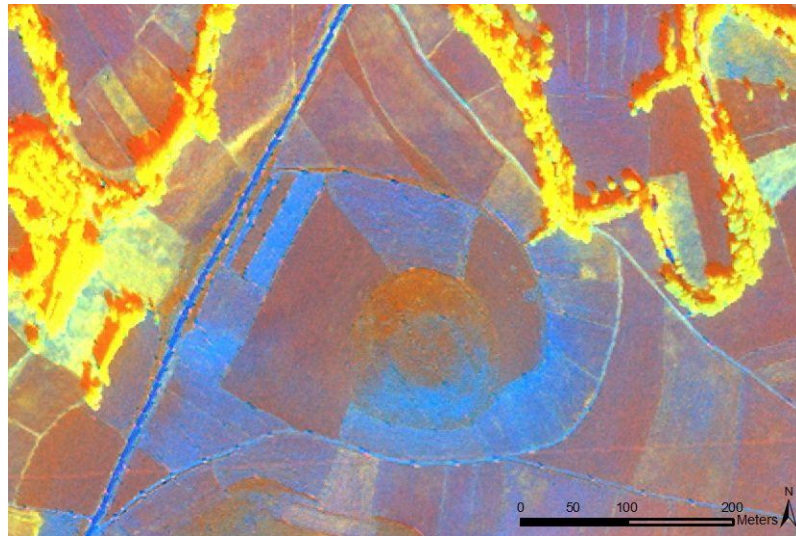


Fig. 4.23 Tasseled cap FCC 421 RGB

Indici vegetazionali

Estraendo dall'ortofoto l'NDVI (Fig. 4.24) non è emerso nessun elemento che potesse rivelare tracce attinenti ad elementi antropici sepolti, pur fornendo tale tipo di algoritmo dei responsi molto spesso positivi, ma in altre condizioni ambientali (Lasaponara e Masini 2007).

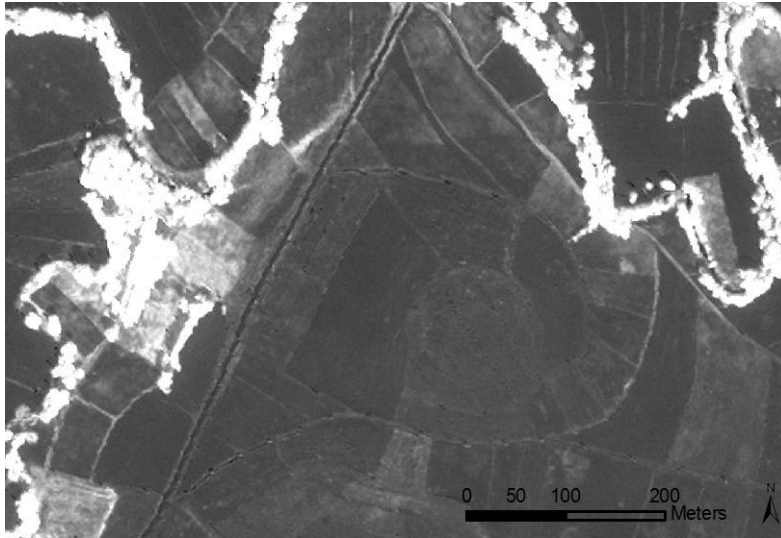


Fig. 4.24 Normalized Difference Vegetation Index

Fotointerpretazione dell'immagine Geoeye-1

Dalla fotointerpretazione delle 4 bande spettrali di Geoeye-1, visualizzate in vari *color composite*, particolarmente il FCC 321 e il FCC 432 RGB che privilegiano le bande legate alle lunghezze d'onda del rosso e dell'infrarosso a cui è legato il responso della vegetazione, sono emerse solo poche e labili anomalie. La più visibile consiste in una linea retta orientata NordEst-SudOvest posta a Nord-Ovest sul terrazzo del tell, visibile anche nelle Componenti Principali. È inoltre visibile una linea retta, sulla sommità Nord del tell, che potrebbe essere indice di fortificazioni, probabilmente tarde (romano-bizantine), vista la tipologia della ceramica rinvenuta in quest'area con la *survey* di superficie (Mazzoni et al. 2010) (Fig. 4.25-a, 4.25-b).



Fig. 4.25-a Fotointerpretazione immagine Geoeye-1 FCC 432 RGB



Fig. 4.25-b Fotointerpretazione immagine Geoeye-1 FCC 432 RGB con anomalie

Essendo in possesso di immagini stereo, si sono inoltre osservate le immagini in stereoscopia, ipotizzando una possibile individuazione di nuove tracce archeologiche "esposte" grazie alla terza dimensione (Casana e Fogel 2008; Castrianni et al. 2010; Di Giacomo et al. 2011): per la verità non è emersa alcuna anomalia particolarmente significativa, sono visibili in modo molto accentuato quelle già individuate, mentre è stato possibile individuare come falsa anomalia, confermata nella sua

erroneità l'anno successivo dalla verifica sul campo (*ground truthing*), una linea a Nord Ovest percorrente verticalmente il tell.

Fusione dell'immagine Geoeeye con l'immagine Landsat ETM+

Giunti a questo punto, per tentare di rendere più evidenti le scarse ma non del tutto assenti le anomalie individuate nell'immagine Geoeeye-1, si è compiuta in via sperimentale, relativamente all'area riguardante il tell, un'operazione di *pansharpening* fra la banda pancromatica di Geoeeye-1 e le bande multispettrali dell'immagine Landsat, includente, quest'ultima, anche le bande dell'infrarosso medio e termico, ed uno *stack* con le bande multispettrali di Geoeeye, per un totale di 12 bande con risoluzione spaziale di 50 cm: blu, verde, rosso, infrarosso, primo infrarosso medio, infrarosso termico, secondo infrarosso medio del Landsat, blu, verde, rosso, infrarosso di Geoeeye.

Questa operazione, come descritto nel paragrafo successivo, ha comportato netti miglioramenti nella visualizzazione e nella possibilità di fotointerpretare l'immagine.

4.1.1.3.4 Risultati della fotointerpretazione

Pur non essendo possibile, dopo la fusione delle immagini Geoeeye-1 e Landsat, visualizzare le bande secondo criteri spettrali e spaziali corretti (non esiste coincidenza spettrale tra banda pancromatica di Geoeeye-1 e le bande multispettrali dell'immagine Landsat; inoltre, un *pixel* dell'immagine Landsat copre 30 m, o 60 nel caso del termico, 1 *pixel* di Geoeeye-1 50 cm), i *color composite* che meglio hanno permesso di individuare le anomalie sono stati i seguenti:

2-12-4, 2-4-8 (per analizzare le aree agricole ad Ovest e ad Est del tell), 4-3-2, 12-4-1 (per individuare le rocce granitiche), 4-3-2 (per la parte Nord-Est del tell), 4-8-11, 4-8-12, 4-2-1 (per la parte a Sud-Ovest del tell), e per l'area nel suo complesso anche 12-10-9 e 4-12-2.

A tale immagine sono state anche aggiunte, una volta estratte, le componenti principali PC1 e PC2: una buona combinazione per la visualizzazione è stata la 13-12-4.

Dalla fotointerpretazione dell'immagine sono emersi dati piuttosto interessanti mostrati nelle Figure 4.26-a e 4.26-b.

Innanzitutto sul tell e sul terrazzo del tell sono individuabili le stesse anomalie emerse dalla fotointerpretazione dell'immagine singola Geoeye-1.

Si tratta, come già espresso in precedenza, di costruzioni di epoca probabilmente romano-bizantina; in ogni caso, non precedenti alla Media età del Ferro (periodo frigio; Mazzoni et al. 2010). Esse sono molto visibili nell'immagine sia per la loro parziale esposizione sia probabilmente perché la presenza di vegetazione in un suolo non arato aiuta nella loro identificazione.

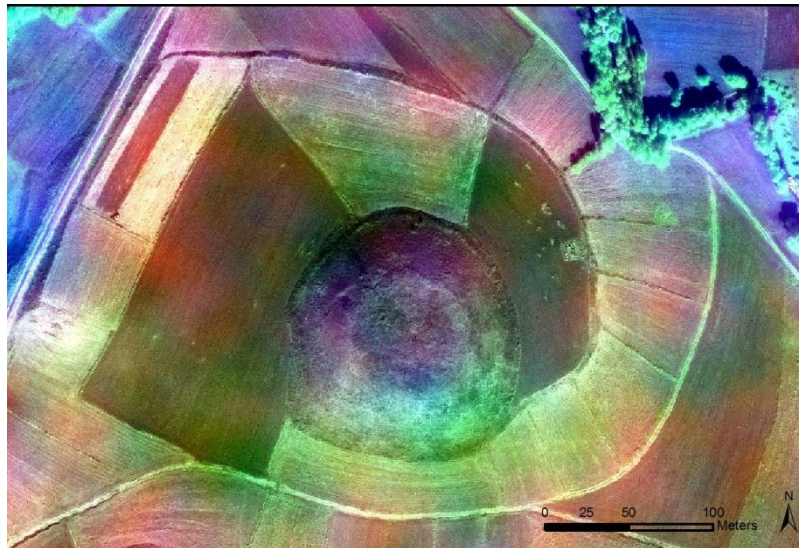


Fig. 4.26-a Fotointerpretazione dell'immagine fusa Landsat ETM+ Geoeye-1. FCC 2-12-4 RGB

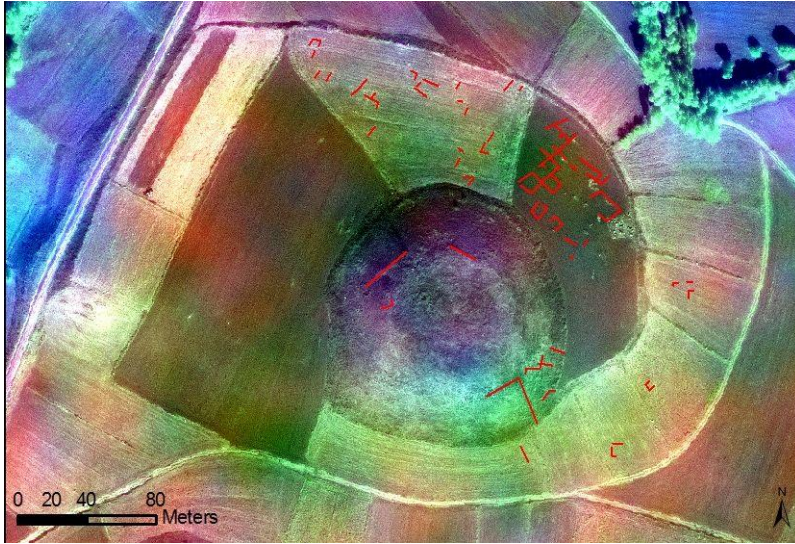


Fig. 4.26-b Fotointerpretazione dell'immagine fusa Landsat ETM+ Geoeye-1. FCC 2-12-4 RGB con anomalia

Si sono inoltre rese evidenti linee che probabilmente indicano le mura di epoca romano bizantina sulla cima del tell.

Sulla parte Sud-Est del tell sono stati rilevati altri elementi di derivazione presumibilmente antropica data la loro linearità, uno particolarmente imponente (Figg. 4.27 e 4.28).

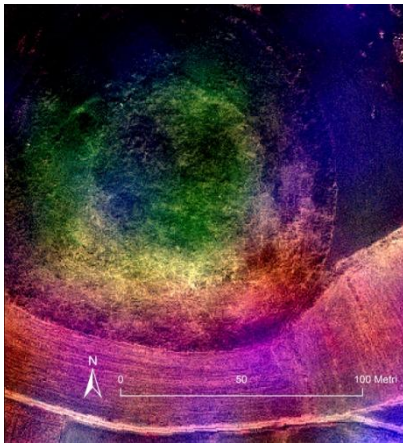


Fig. 4.27 Area del tell, FCC 12-4-1 RGB

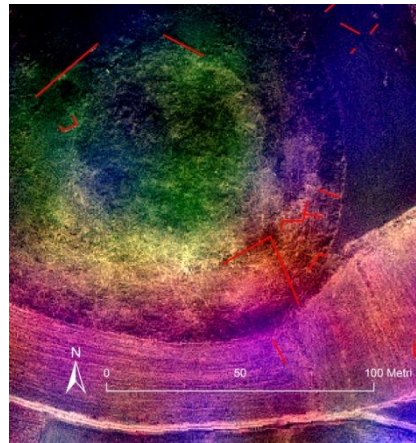


Fig. 4.28 Fotointerpretazione area del tell, FCC 12-4-1 RGB

Nella terrazzo, a Nord del tell si evidenziano dei *soil mark* che mostrano delle tracce lineari, alcune in forma complessa (Figg. 4.29 e 4.30). Non è

possibile ricostruire alcun tipo di edificio in particolare, ma tutta l'area è caratterizzata da tali anomalie, per cui si può ipotizzare che fosse occupata da altre costruzioni.

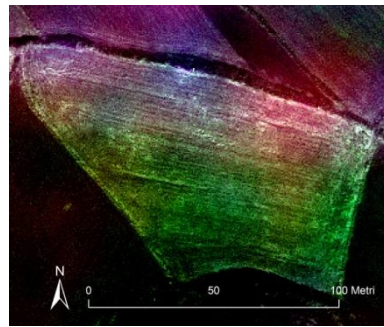


Fig. 4.29 Area Nord del terrazzo, FCC 2-12-4 RGB

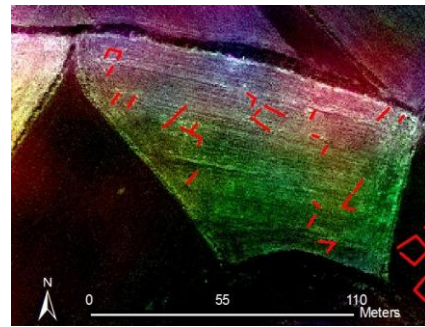


Fig. 4.30 Fotointerpretazione area Nord del terrazzo, FCC 2-12-4 RGB

A Nord-Est la situazione si rivela più strutturata: al momento della ripresa satellitare (mese di Settembre), il suolo era arato e la nuova vegetazione stava crescendo, e, per quanto labili, una quantità di *crop marks* indicano una serie importante di edifici orientati NordOvest-SudEst secondo lo stesso orientamento ritrovato nelle 9 grandi rocce di granito rinvenute nella *survey* (Figg. 4.31 e 4.32).

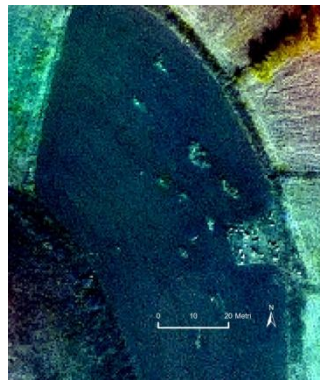


Fig. 4.31 Area Nordest del terrazzo, FCC 4-8-11 RGB

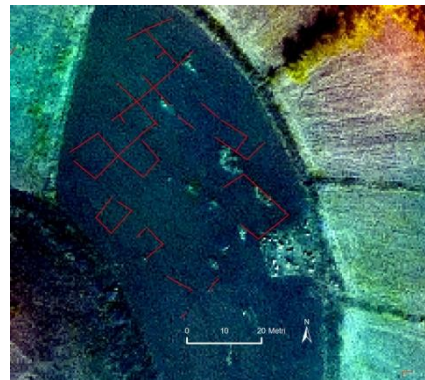


Fig. 4.32 Fotointerpretazione area Nordest del terrazzo, FCC 4-8-11 RGB

4.1.1.4 Applicazioni geofisiche

Le prospezioni geofisiche, utilizzate per validare i risultati della fotointerpretazione, sia per la parte di campagna che per l'elaborazione e interpretazione dei dati, sono state condotte dalla Dott.ssa Gabriella

Carpentiero dell'Università degli Studi di Siena. I dati mostrati di seguito riguardano le campagne di *survey* effettuate negli anni 2008 e 2009.

4.1.1.4.1 Magnetometria

L'acquisizione di dati magnetometrici è stata eseguita con lo strumento Fluxgate Gradiometer FM36 (Geoscan™ Research).

È stata coperta un'area di 3,68 ettari, per un totale di 92 griglie della misura di 20 x 20 m, e le misurazioni sono state prese ogni 0,50 m (*sample interval*) con 1 m di intervallo laterale. I dati sono stati processati con Geoplot™ software.

Nella parte a Nord del tell sono visibili tracce di strutture, alcune particolarmente evidenti in quanto probabilmente bruciate dal fuoco. A Nord-Est appaiono altri edifici organizzati in modo più articolato e consistente.

Nel versante Est del tell, si può individuare un'altra struttura piuttosto imponente. Sulla cima del tell, resti di quelle che potrebbero essere mura di una fortificazione tarda, mentre ai piedi della parte Sud del tell, sono evidenti tracce delle probabili mura di epoca ittita (Figg. 4.33 e 4.34).

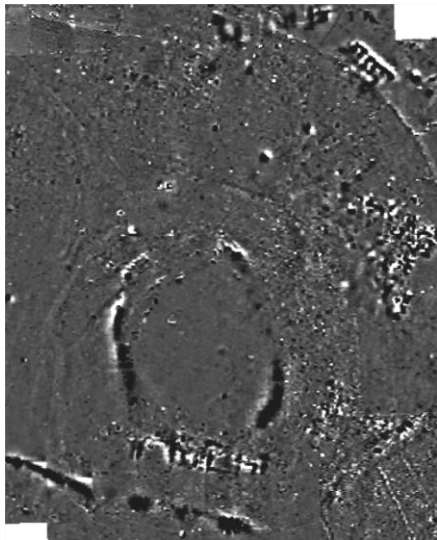


Fig. 4.33 Processamento dei dati di magnetometria

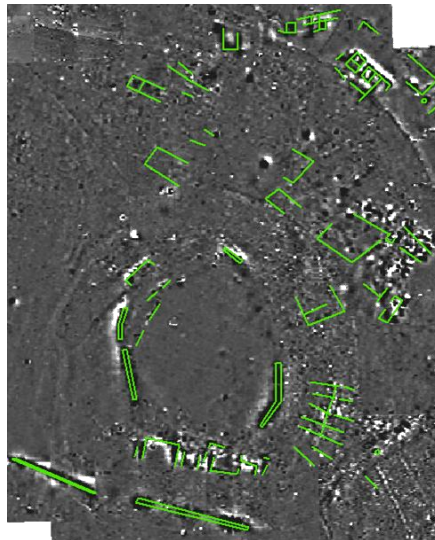


Fig. 4.34 Interpretazione delle proiezioni di magnetometria

4.1.1.4.2 Resistività geoelettrica

Le misure di resistività sono state acquisite con lo strumento RM15 Resistance Meter (Geoscan™ Research) ed hanno riguardato la parte Nord-Est dell'area già interessata dalla magnetometria. La *survey* è stata condotta con letture ogni 0,50 cm per 0,50 cm di spostamento laterale per un totale di 26 griglie riguardanti un'area di 10.400 m².

Dalle prospezioni di resistività emergono con maggior chiarezza strutture già individuate nell'indagine magnetometrica (Figg. 4.35 e 4.36).

Si evidenzia una larga struttura ad Est che, se integrata con i dati magnetometrici, copre un'area di 50x40 m con più stanze, probabilmente attorno ad una corte. Nell'angolo Nord-Est di quest'area, sono presenti evidenze di altre due anomalie da identificare probabilmente come tratto di mura della città.

A Nord-Est del tell, a Sud della prima struttura, si riscontra la presenza di un altro edificio in cui è possibile distinguere 4 stanze allungate e altre stanze più in basso.

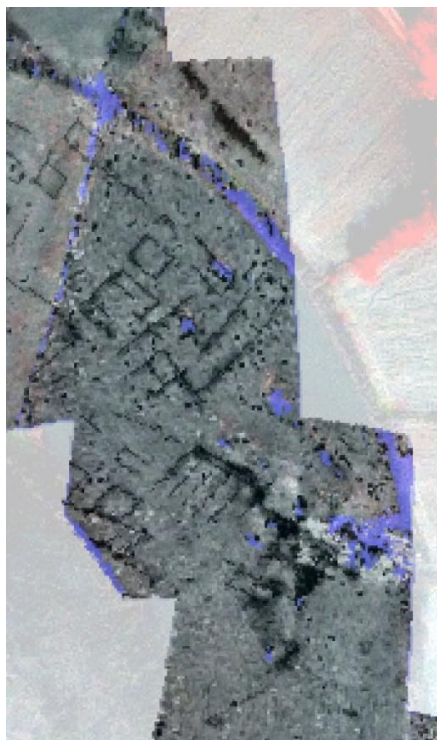


Fig. 4. 35 Processamento dei dati di resistività

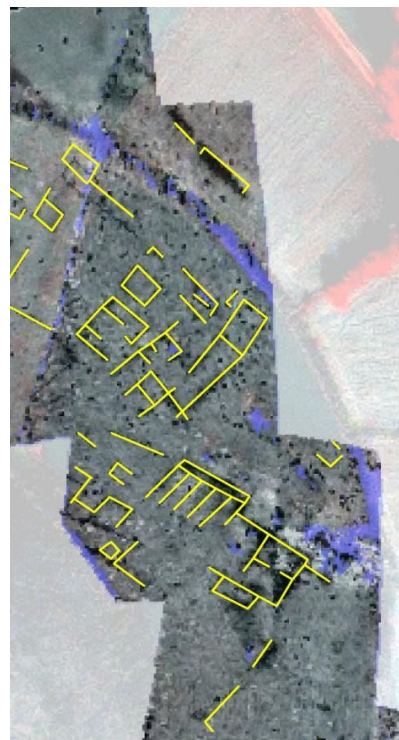


Fig. 4. 36 Interpretazione delle prospezioni di resistività

In Figura 4.37 è mostrata la visione integrata delle interpretazioni magnetometrica e di resistività.

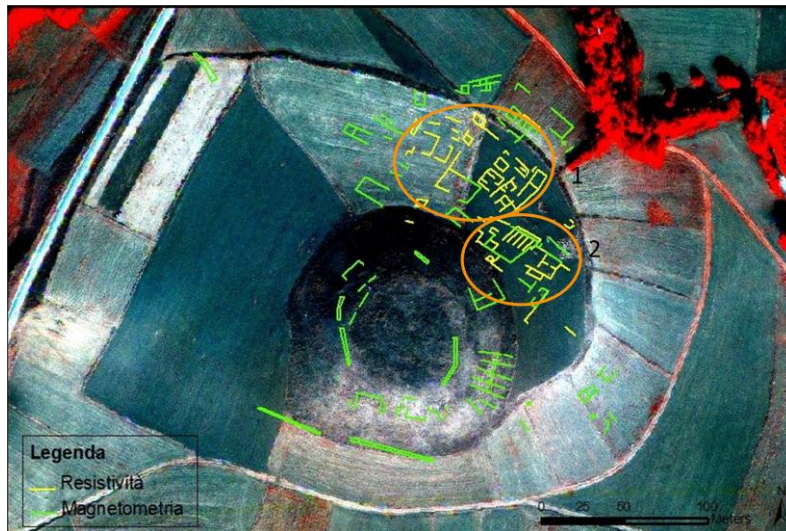


Fig. 4.37 Interpretazione generale delle indagini di prospezione geofisica

4.1.2 Integrazione delle interpretazioni dei dati telerilevati e geofisici

I dati della fotointerpretazione sono stati integrati con quelli dell'interpretazione magnetometrica e della resistività al fine di verificarne l'attendibilità e, se possibile, dare informazioni e indicazioni aggiuntive (Fig. 4.38).

Dalla sovrapposizione delle interpretazioni., effettuabile in ambiente ESRI™ ArcGIS, è di particolare interesse rilevare come i diversi dati effettivamente si integrino e completino a vicenda. Ogni metodo di prospezione, in base alle sue specificità, alle condizioni del terreno, al tipo di reperti che sono sepolti e alla profondità a cui si trovano, nonché in base al grado di precisione ad essi connesso, contribuisce ad apportare nuovi elementi alla singola interpretazione di una metodologia.

L'impressione generale è che tutte le strutture a Nord e Nord-Est del tell siano orientate nella direzione NordOvest-SudEst.

Le due grandi strutture sul terrazzo Nord del tell che emergono dalle indagini potrebbero, data la loro estensione (710 m² e 875 m² ca. rispettivamente) aver avuto funzione pubblica.



Fig. 4.38 Integrazione dei dati telerilevati e geofisici. FCC 432 RGB dell'immagine Geoeye-1

I risultati delle varie prospezioni mostrano una larga struttura a Nord che copre approssimativamente un'area di 50 x 40 m con più stanze, forse attorno ad una corte. In questo caso la resistività e il *remote sensing* danno indicazioni superiori a quanto emerso dalla magnetometria. Questo potrebbe essere causato dall'alta distribuzione di ceramica nella parte alta del suolo o dall'alto grado di rimaneggiamento sugli strati superiori del suolo.

Ciò che unitariamente emerge da tutte le analisi comparate, è un'area difensiva intorno al tell, con mura, porte e forse fortificazioni più tarde nell'acropoli, e una grande area monumentale, sita a NordEst, compatibile nel suo orientamento con l'asse SudEst-NordOvest delle grandi pietre di granito rinvenute nella *survey* archeologica.

In tale area monumentale è evidente ad Ovest un edificio composto di più stanze attorno ad una probabile corte, e un altro edificio più a Sud, con quattro stanze lunghe, interpretabile come un magazzino. L'area

monumentale era probabilmente raggiunta da una strada, che ancora deve essere individuata, che partiva dalla porta.

Un altro edificio monumentale è visibile sul versante Est del tell e si integra bene con l'orientamento generale degli altri edifici.

La magnetometria ha comunque permesso di individuare la presenza di due lunghe mura che corrono a Sud, ai piedi del tell, che potrebbero rappresentare le mura della città.

4.1.3 Discussione

Elemento essenziale del lavoro svolto presso il sito archeologico di Uşaklı Höyük è senz'altro la disponibilità di una stereocoppia di immagini che ha prodotto molteplici vantaggi.

Innanzitutto la possibilità di poter creare ex-novo una carta a medio-grande scala che permette di avere uno strumento da utilizzare sia durante i lavori di *survey*, sia durante gli scavi nell'area del tell, che per muoversi e indagare nella regione circostante secondo le metodologie di archeologia del paesaggio.

Tutti i dati ottenuti, geologici, topografici, di *survey*, di prospezioni telerilevate e geofisiche, l'ortofoto, il DEM, sono stati inseriti in ambiente GIS per avere la possibilità di visualizzare, gestire e compiere analisi su tali dati, nonché accogliere i futuri dati di scavo.

Relativamente alle analisi di *remote sensing*, le indagini condotte sull'immagine Geoeye-1, e in particolar modo le operazioni di *processing* automatico di tipo spettrale e spaziale, non hanno portato i risultati aspettati.

Un chiaro risultato nella ricerca di anomalie da satellite dipende, come già esposto, da varie caratteristiche del sito, dei sensori e del periodo del rilievo.

Riguardo al sito, il terreno ai piedi del tell è stato largamente arato in questi anni, ed in particolare nell'anno della ripresa satellitare (alternativamente il suolo è tenuto a maggese). Il terreno arato provoca, nell'osservazione satellitare, dei disturbi difficili da attenuare (Oltean et al. 2012).

Relativamente alle immagini satellitari, le bande spettrali di Geoeye-1 sono 4, il rilievo è stato effettuato a fine Settembre in buone condizioni di illuminazione ed atmosferiche. Casi simili in Turchia, appartenenti allo stesso periodo storico, hanno utilizzato, a buon fine, immagini nella stagione autunnale-invernale, per cui si può ipotizzare che forse un'acquisizione multitemporale con cadenza stagionale potrebbe fornire indicazioni maggiori e risultati migliori (Casana 2008 , Casana 2010) .

Si deve anche tenere in conto che il tipo di costruzioni, secondo struttura a "casematte", costruite cioè con uno zoccolo di pietra alla base e l'alzato in mattoni crudi e travi in legno, non è di facile rilevamento e interpretazione tramite *remote sensing* (ne è testimone l'assenza in bibliografia di questa tipologia di edifici in analisi con immagini VHR di aree non scavate).

La differente individuazione delle strutture potrebbe anche dipendere dalla tipologia di suolo prevalentemente alluvionale con locali vertisuoli.

Differentemente, l'immagine fusa di Geoeye-1 con Landsat7 ETM+, ha contribuito ad una più efficiente individuazione di potenziali elementi archeologici con il metodo della fotointerpretazione.

I maggiori risultati sono emersi dall'individuazione, nella parte Nord-Ovest del tell e sull'acropoli, di *crop marks* legati alla crescita differenziale della vegetazione.

È da dire che proprio l'assenza di vegetazione e la presenza di terreno arato, nel terreno a Nord del tell, hanno permesso di ottenere ottimi risultati con il metodo geofisico e scarsi con il *remote sensing*: talvolta la vegetazione, pur rappresentando un ostacolo tra l'anomalia e la posizione di ripresa, fornisce indicazioni fondamentali nell'individuazione di un reperto sepolto grazie a tipologie diverse e crescite differenziate (Campana e Forte 2006).

I dati telerilevati, quelli geofisici e quelli derivanti da *survey* si integrano e completano fra di loro, contribuendo a fornire una più chiara idea generale del sito.

Dall'esame dei diversi dati di prospezione messi a confronto, compresa la *survey* archeologica, appare evidente un'importante area di periodo presumibilmente ittita che si sviluppa nella parte Nord-Est del tell, ed un

altra area, nell'acropoli, testimoniante un importante periodo in epoca tarda, romano-bizantina.

L'area ittita si sviluppa all'interno delle supposte porte granitiche: sono stati individuate due grandi strutture complesse e, data la grandezza e la disposizione delle stanze potrebbe trattarsi di un'area pubblica dell'antica città.

Le informazioni ricavate saranno di supporto agli archeologi nel momento in cui si dovrà scegliere in quale area scavare.

4.2 Il sito di Vésztő Mágor

Lo studio del sito di Vésztő Mágor si inserisce all'interno del più vasto progetto, The Körös Regional Archaeological Project, frutto di una collaborazione ungherese-americana, ricerca in atto dal 2002 che si prefigge lo scopo di studiare il sorgere e lo sviluppo preistorico degli insediamenti agricoli nella Regione del Körös nella Grande Pianura Ungherese (Fig. 4.39) durante il Neolitico e l'Età del Rame.

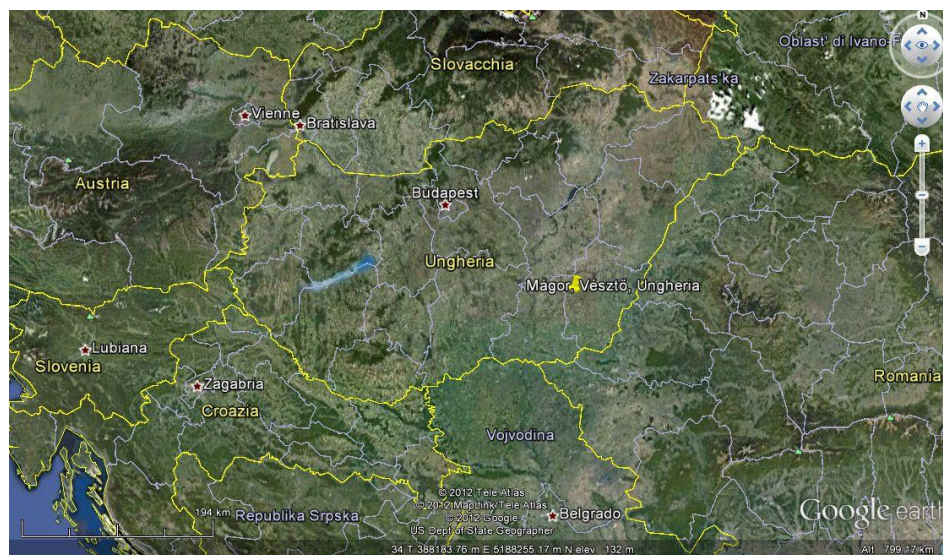


Fig. 4.39 Il sito di Vésztő Mágor, nella Regione del Körös

Il progetto coinvolge *The Field Museum* di Chicago, il *Field Service of Cultural Heritage* ungherese, l'*Ohio State University*.

Presso l'*Institute for Mediterranean Studies - Foundation for Research and Technology*, Grecia, che da anni svolge all'interno del progetto le indagini geofisiche sui siti studiati, sono state svolte dalla candidata le attività di ricerca descritte di seguito nell'ambito di un periodo di stage svolto presso il *Laboratory of Geophysical - Satellite Remote Sensing and Archaeo-environment* dal Novembre 2009 al Novembre 2011.

La valle del Körös (Fig. 4.40) rappresenta uno dei più significativi *loci* per indagare lo sviluppo a lungo termine di villaggi agricoli, grazie alla sua posizione geografica e alle sue caratteristiche geomorfologiche, distinte da un fitto reticolo di fiumi, che favorì un'intensiva occupazione e

che giocò un ruolo principale nella comunicazione e nel commercio fra Nord e Sud Europa ma anche fra Est ed Ovest (Gyucha et al. 2009).

Nell'Europa centrale e sudorientale il processo di neolitizzazione coincide con l'emergere di villaggi agricoli e con la loro evoluzione verso una complessità economica e politica che si rivela attraverso il sorgere di insediamenti con tell fortificati (Parkinson 2010).

Tali cambiamenti avvenuti in questo periodo mutarono profondamente gli aspetti della vita sociale nella regione (Gyucha 2010, Parkinson 2006; Parkinson et al. 2010; Salisbury 2010).

Informazioni relative a questo periodo e l'organizzazione di singoli insediamenti (Kőrösladány-Bikery, Véstö-Mágor, Okány 16, Szeghalom-Sebes-Körös Mente) stanno cominciando ad essere note particolarmente grazie allo studio dei ricercatori coinvolti nel progetto (Gyucha 2010; Parkinson et al. 2004; Yerkes et al. 2007).



Fig. 4.40 La valle del Körös (immagine Landsat FCC 721 RGB)

Ulteriori dati sulla presenza e localizzazione di siti appartenenti a questo periodo sono disponibili da una *survey* regionale che è stata condotta

dal servizio archeologico ungherese a partire dagli anni '60 fino agli anni '90 del secolo scorso (Ecsedy et al. 1982; Jankovich et al. 1989, 1998).

Dall'inizio del Neolitico, quando furono stabiliti per la prima volta nella regione dei villaggi agricoli, i record archeologici documentano, insieme all'emergere di una complessità economica e politica, lo sviluppo a lungo termine di vasti insediamenti orizzontali più larghi, fortificati, con tell, e organizzati nel paesaggio in gruppi distinti.

Questi macro-insediamenti furono abbandonati alla fine del Neolitico, quando furono sostituiti da più numerosi e piccoli siti durante l'Età del Rame. Il cambiamento in grandezza, locazione e organizzazione degli insediamenti è stato associato con varie mutazioni ambientali e socio-economiche (Parkinson et al., 2010).

L'approccio al progetto è di tipo multi-scalare (Gyucha et al. 2009), per cui risulta molto importante, per poter dare un'interpretazione all'evoluzione generale della regione, la conoscenza dei singoli siti, la loro conformazione e la loro disposizione.

La parte ungherese della valle del Kö r ö s, area generale di studio, si trova nel SudEst del Bacino Carpatico, all'incirca 3 metri sotto l'area circostante.

L'area è quasi perfettamente piatta, con elevazioni che variano fra 83 e 102 metri sul livello del mare.

I differenti affluenti del fiume Kö r ö s, il Fehér-, il Fekete-, e il Sebes-Kö r ö s, così come il Berettyó, costituiscono gli elementi geografici più importanti dell'area.

Dati provenienti da carotaggi profondi indicano che dalle più recenti fasi dell'Olocene, i fiumi assunsero la loro attuale posizione nella regione (Mike 1991; Nàdor et al. 2007).

Il sito oggetto di studio nella presente tesi è locato sulla porzione Est del drenaggio del Kö r ö s, a NordEst della contea di Békés.

Prima della regolamentazione idrologica del XIX secolo che ha completamente cambiato il paesaggio, un fitto e intricato sistema idrico costituito da fiumi e torrenti dominava la topografia. Esistevano pure zone paludose, alimentate dal Berettyó e dal Kö r ö s, e l'area era sottoposta a inondazioni biannuali (Gyucha et al. 2011).

Per questa ragione, i siti archeologici dall'inizio del Neolitico alla fine del Medioevo tendono a trovarsi sulle maggiori elevazioni della valle, sulle basse sporgenze lungo i letti dei fiumi e sulle isole delle zone inondate; in ogni caso in prossimità dei corsi d'acqua.

Il tell di Vésztő Mágor è situato sulla riva sinistra del fiume Holt Sebes Kö rő s, e ricopre un'area di 4.25 ettari e raggiunge un'altezza massima di 9 metri (Fig. 4.41).

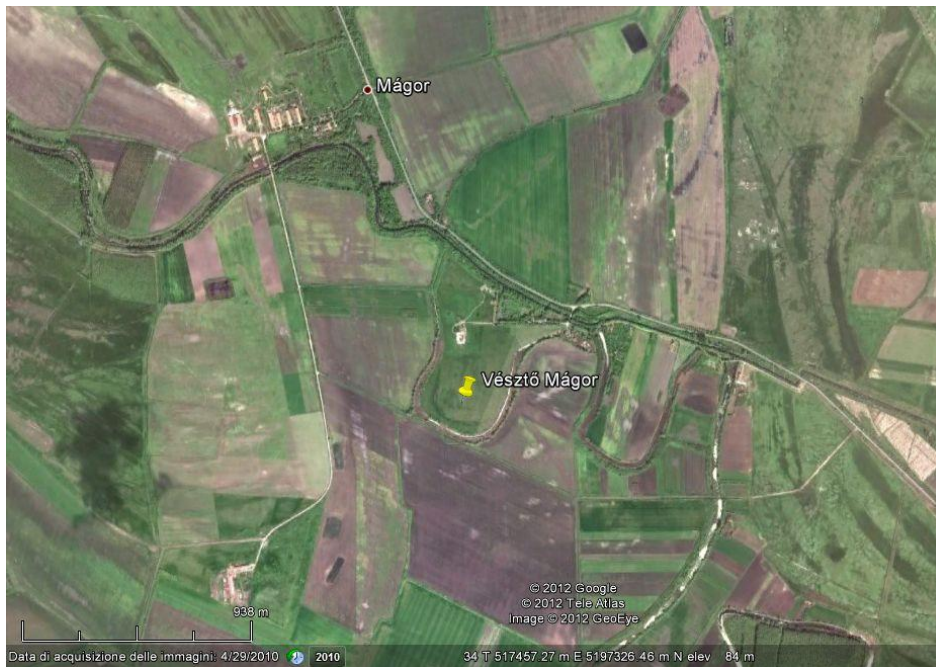


Fig. 4.41 Il sito di Vésztő Mágor (da Google Earth)

Gli scavi archeologici hanno raggiunto i 7 metri sotto la cima del tell e provato che esso venne inizialmente occupato durante il tardo Neolitico Medio (cultura Szakalhat) con un'occupazione ininterrotta fino al Tardo Neolitico (cultura Tisza). I dati più tardi risultanti dal Tardo Neolitico corrispondono alla fase classica della cultura Tisza. In cima alla fase tardo-neolitica, c'è uno strato di interruzione che testimonia l'abbandono del sito fino all'insediamento della Prima Età del Rame (cultura Tiszapolgar), seguita da uno della Media Età del Rame (cultura Bodrogkeresztur). Gli scavi della Prima Età del Rame hanno portato alla luce un numero di resti strutturali con 19 sepolture. A tale fase è seguito

un periodo di abbandono durante la fine del Neolitico Medio, dopo il quale il sito fu ancora occupato nel Primo/Medio Bronzo (Parkinson 2006).

A Vésztő Mágor è presente anche il monastero del clan Csolt (cultura Vata), che possedette la contea di Bekes. Testimonianze della chiesa risalgono fino al 1222. L'attività del monastero è ancora testimoniata nel XIV secolo e le due torri che gli appartenevano erano erette ancora nel 1798. Il monastero ha passato diverse fasi di costruzione: una prima chiesa fu eretta nell' XI secolo, seguita da una nel tardo XI, in stile romanico. Durante il XII secolo la chiesa venne ricostruita a tre navate, e alla fine del secolo divenne una grande cattedrale, con due torri all'estremità occidentale. In periodi più recenti, il monastero di periodo Arpad che era stato costruito nella parte Sud della collina venne completamente distrutto per lasciare spazio allo scavo della costruzione di una cella per il vino agli inizi del XIX secolo (Hegedus & Makkay, 1987, Hegedus 1982).

Gli scavi archeologici nel sito cominciarono per un primo periodo dal 1968 al 1976 ad opera di K. Nagy, seguito da I. Juhasz (con enfasi nelle strutture del monastero), K. Hegedus e J. Makkay. Un'ultima stagione di scavo venne condotta nel 1986. Infine, il sito divenne uno dei Parchi Nazionali Ungheresi, all'interno del cui Museo è possibile visitare l'esibizione archeologica che è locata nella cella vinaria e nella trincea del 1986 dove un certo numero di resti e strutture archeologiche dei differenti periodi rimane *in situ*.

4.2.1 Metodi

Lo studio del sito di Vésztő Mágor è stato affrontato nella presente tesi di Dottorato di Ricerca con indagini di *remote sensing*, condotte con il software Erdas Imagine 2011 applicate sistematicamente a foto aeree e immagini satellitari.

Sono stati in seguito utilizzati dati geofisici provenienti da indagini magnetometriche e *Ground Penetrating Radar* (GPR) allo scopo di confrontare e integrare i risultati provenienti dalle operazioni di telerilevamento.

I risultati delle operazioni sono stati gestiti in ambiente ESRI™ ARCGIS, allo scopo di poter contemporaneamente visualizzare e analizzare i diversi prodotti provenienti dalle varie metodologie.

Si è inoltre cercato, in via sperimentale, utilizzando il software Erdas Imagine 2011, di integrare le immagini satellitari con quelle provenienti dal *processing* delle indagini geofisiche, per testare se fosse possibile ottenere un prodotto che potesse restituire visivamente in contemporanea i risultati di tutte le indagini “indirette”.

4.2.1.1 Dati a disposizione

I dati a disposizione per le indagini di *remote sensing* sono stati i seguenti:

- foto aerea in bianco e nero dell'area di Vésztő Mágor, acquistata presso il Mapping Agency di Budapest, datata 1963 e alla risoluzione di scansione di 1200 dpi;
- foto aerea in bianco e nero dell'area di Vésztő Mágor, acquistata presso il Mapping Agency di Budapest, datata 1976 e alla risoluzione di scansione di 1200 dpi;
- un'immagine satellitare Geoeye-1, già presente nell'archivio <http://www.geoeye.com/CorpSite/>, datata 29 Aprile 2010, ortorettificata e radiometricamente corretta. L'immagine, disponibile in formato Geo™ con risoluzione radiometrica di 16 bit, è stata acquistata in formato *bundle*, 4 bande (*Blue, Green, Red, e Infrared*), già fuse con la banda pancromatica, ad una risoluzione spaziale di 50 cm. L'accuratezza posizionale del prodotto fornito è di 5 metri. Il sistema di riferimento è di tipo UTM-WGS 84, Zona 34, emisfero Nord;
- immagine georeferenziata proveniente dal processamento dei rilievi magnetometrici e relativo *shapefile* d'interpretazione;
- scatterogrammi georeferenziati provenienti dal processamento dei rilievi GPR e relativi *shapefile* d'interpretazione.

4.2.1.2 Applicazioni di *remote sensing*

Le indagini di *remote sensing* nell'area di Vésztő Mágor sono state condotte con l'obiettivo di individuare anomalie di origine archeologica o paleo-ambientale e di riconoscere le trincee delle precedenti campagne di scavo.

4.2.1.3 Foto aeree

Considerate le dimensioni ridotte e la morfologia praticamente pianeggiante dell'area, le foto aeree disponibili sono state rettificare

rispetto all'immagine satellitare Geoeye-1 (già opportunamente ortocorretta) e proiettate nel sistema di coordinate UTM-WGS 84, Zona 34, emisfero Nord. La risoluzione spaziale delle immagini rettificate, in base alla risoluzione delle pellicole di partenza e a quella di scansione, è stata posta per entrambe pari a 50 cm. Per coprire l'intera area di interesse è sufficiente 1 singola foto: le 2 foto aeree multitemporali utilizzate nella fotointerpretazione sono di seguito denominate per praticità Vésztő 1 (anno 1963) e Vésztő 2 (anno 1976).

4.2.1.3.1 Vésztő 1 – Elaborazione e fotointerpretazione

La foto Vésztő 1 (Fig. 4.42) è stata acquisita nel 1963, prima che gli scavi avessero inizio.

Per aumentare il contrasto e favorire la fotointerpretazione, sono stati applicati dei miglioramenti radiometrici. Tra i più significativi in termini di visibilità delle strutture sono risultati il miglioramento del contrasto di tipo statistico con funzioni tipo *min max* e *standard deviation* (con valore pari a 2.8) (Fig. 4.43).

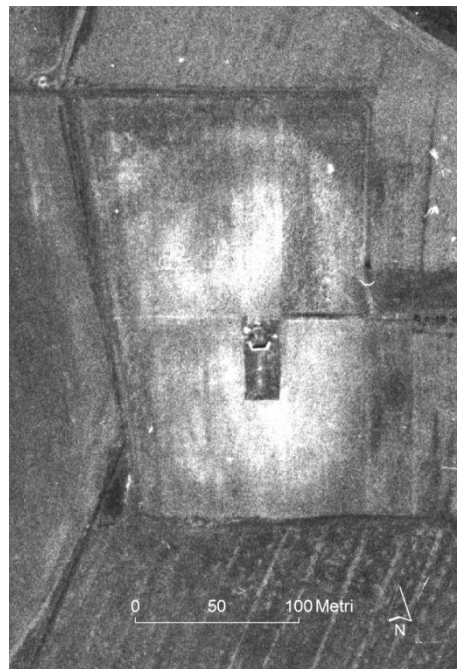


Fig. 4.42 Vésztő1 originale

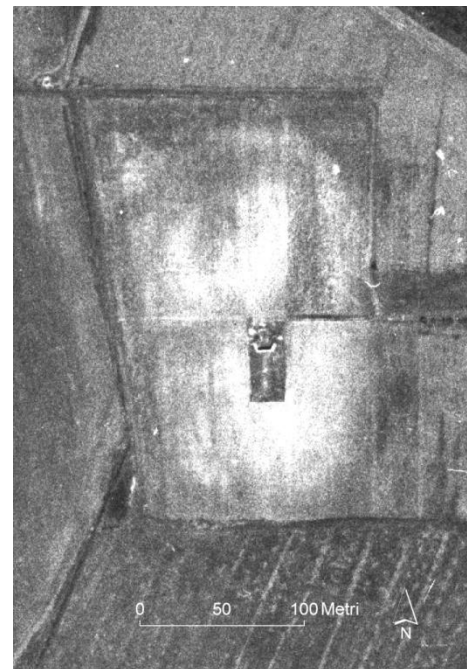


Fig. 4.43 Vésztő1 migliorata (*min max*, *st. dev.* 2.8)

La foto aerea è stata sottoposta anche a filtri di convoluzione spaziale per valorizzare o scoprire nuove anomalie rispetto all'immagine originale, evidenziando le differenze nelle variazioni tonali dell'immagine.

Sono state prese in considerazione solo strutture sepolte, anche se erano visibili strutture moderne riconducibili a strade e costruzioni.

Analizzando le immagini nel dettaglio, il filtro 3×3 *cross edge detection* (Fig. 4.44) mostra i limiti di una vecchia strada che va verso Nord per poi piegare ad Ovest e parallelamente i limiti del monastero, il 3×3 *edge detection* (Fig. 4.45) è invece molto rumoroso. Il 3×3 *edge enhancement* (Fig. 4.46) mostra bene sia la strada di cui sopra e i limiti del monastero che una linea curva riferibile forse ai fossati circondanti l'insediamento in epoca preistorica. Il filtro 3×3 *highpass* (Fig. 4.47) mostra bene la strada e i confini del monastero anche se molto rumorosi, e un'idea della curva indicante i fossati. Non così per i *Kernel* con dimensioni 5×5 (Fig. 4.48) e 7×7 (Fig. 4.49) che producono immagini molto rumorose dove solo i limiti del monastero e la strada sono visibili.

Il filtro 3×3 *horizontal edge detection* (Fig. 4.50) mostra scarsamente la strada, i limiti del monastero e dei fossati ed è molto poco contrastato, come anche il filtro 3×3 *vertical edge detection* (Fig. 4.51).

I *Kernel* 3×3 *left diagonal* e *right diagonal* (Fig. 4.52 e Fig. 4.53) mostrano molto bene e in modo complementare la strada, i limiti del monastero e in modo più attenuato dei fossati.

Il filtro 3×3 *lowpass* (Fig. 4.54), ed ancor di più il 5×5 *lowpass* (Fig. 4.55), mette bene in evidenza la strada, e le curve dei fossati. Applicando matrici di dimensioni più grandi l'immagine di output perde di contrasto.

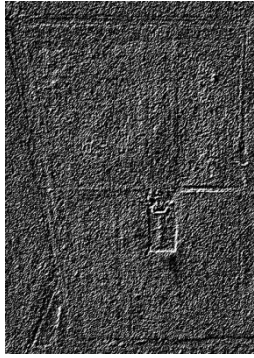


Fig. 4.44 - 3*3 cross edge detection

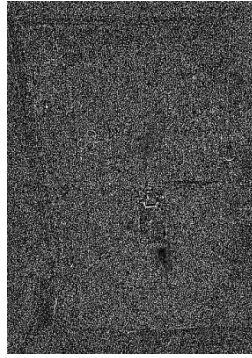


Fig. 4.45 - 3*3 edge detection

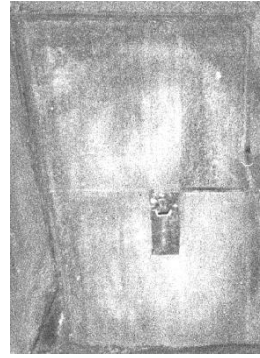


Fig. 4.46 - 3*3 edge enhancement

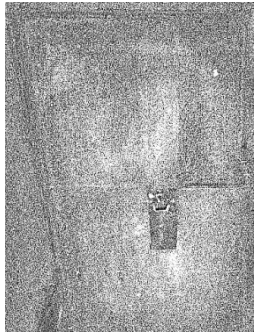


Fig. 4.47 - 3*3 highpass filter

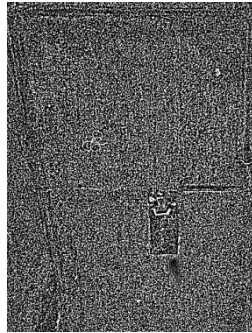


Fig. 4.48 - 5*5 highpass filter

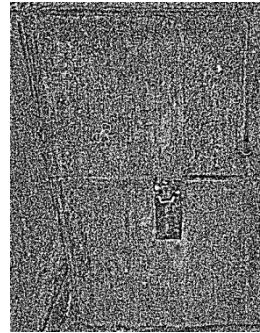


Fig. 4.49 - 7*7 highpass filter

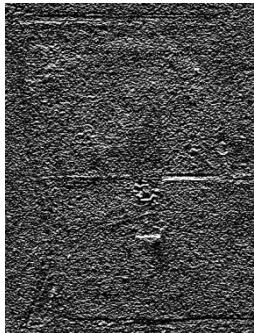


Fig. 4.50 - 3*3 horizontal edge det.

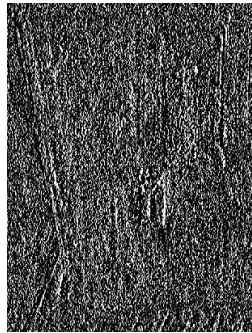


Fig. 4.51 - 3*3 vertical edge det.

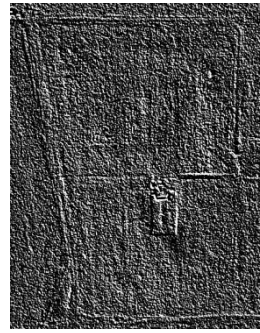


Fig. 4.52 - 3*3 left diagonal

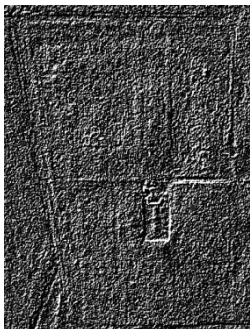


Fig. 4.53 - 3*3 right diagonal

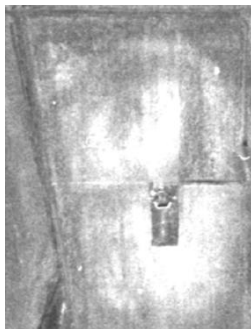


Fig. 4.54 - 3*3 lowpass



Fig. 4.55 - 5*5 lowpass

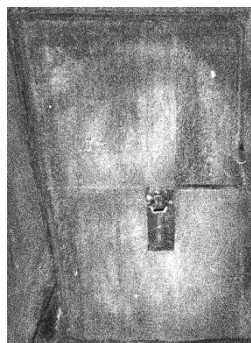


Fig. 4.56 - 3*3 sharpen 2

Anche i filtri 3*3 *sharpen* e 3*3 *sharpen2* (Fig. 4.56) si sono rivelati adatti per mostrare tutte le anomalie fin qui elencate, mentre i *Kernel* di dimensioni maggiori hanno prodotto ancora una volta immagini più sfuocate.

La maggior parte dei filtri indicati e la conseguente fase di fotointerpretazione (Fig. 4.57) hanno chiaramente mostrato un sentiero che va a Nord e poi verso Ovest, oggi invisibile in campagna.

Immediatamente a Sud di questa e anche a Sud dell'immagine, sono probabilmente individuabili i limiti del monastero.

Un'anomalia che sembra essere rilevante, anche se non chiaramente delineata, è una linea curva, larga circa 2 metri, che tende a coincidere con i limiti dei fossati che circondavano l'insediamento in epoca preistorica provenienti dalle interpretazioni delle anomalie magnetometriche (Fig. 4.58).

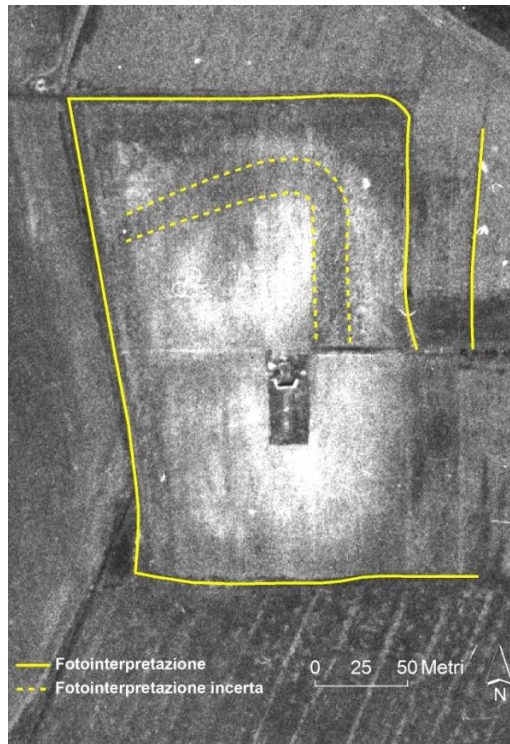


Fig. 4.57 Fotointerpretazione di Vésztő1

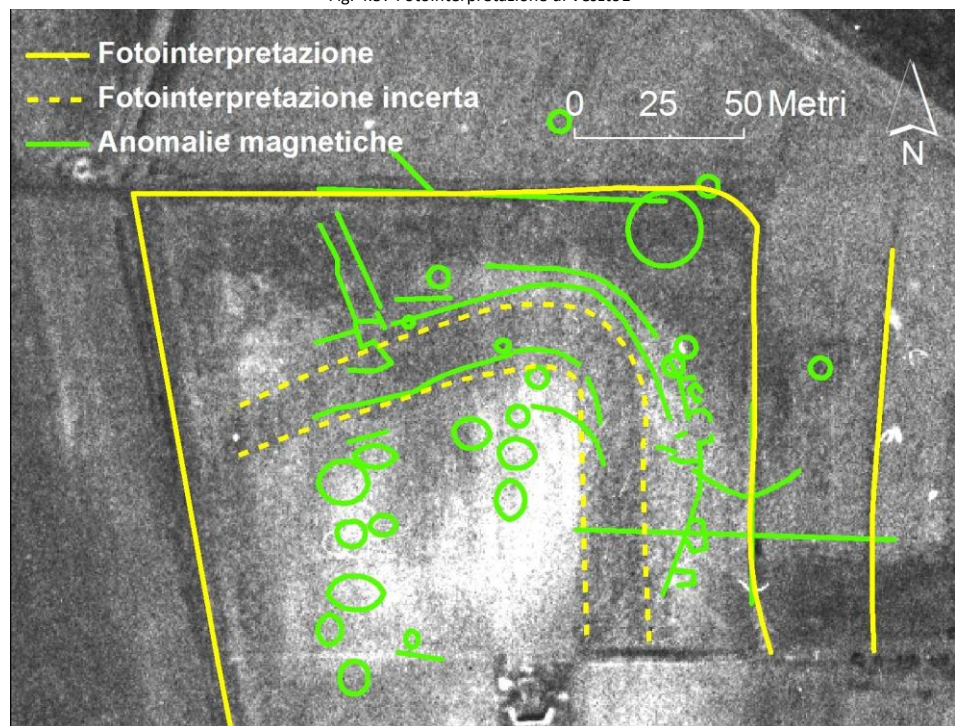


Fig. 4.58 La linea curva proveniente dalla fotointerpretazione (in giallo) sovrapposta ai risultati delle indagini geofisiche di magnetometria

4.2.1.3.2 Vésztő 2 – Elaborazione e fotointerpretazione

La foto Vésztő 2 (Fig. 4.59) è stata ripresa, come detto, nel 1976. In essa sono pertanto visibili le trincee aperte negli ultimi anni delle missioni di scavo relative ai tardi anni '60 e a metà degli anni '70.

Come per la foto precedente, sono stati applicati dei miglioramenti di immagine al fine di facilitare la successiva operazione di fotointerpretazione. Tra le elaborazioni radiometriche più proficue, in Figura 4.60, è mostrato il risultato della modifica tipo *min max contrast* applicata alla foto originale.



Fig. 4.59 Vésztő2 originale



Fig. 4.60 Vésztő2 migliorata

La foto aerea è stata sottoposta anche a *filtering* di tipo spaziale per enfatizzare o scoprire nuove anomalie rispetto all'originale.

Sono stati considerati nella fotointerpretazione (Fig. 4.61) solo dati di strutture eventualmente sepolte senza ovviamente considerare strutture moderne come strade e edifici erano chiaramente visibili.

Quasi tutti i filtri applicati hanno mostrato chiaramente il medesimo sentiero individuato in Vésztő1 in direzione verso Nord che poi piega verso Ovest.

Sempre a Nord, visibili due linee: quella più meridionale coincide con la linea identificata con fossati nelle indagini magnetometriche, mentre l'altra, tratteggiata da Nord a Sud, rappresenta il possibile ingresso antico all'insediamento.

Tratteggiata come non nettamente visibile, è presente una *feature* di derivazione chiaramente antropica, ma a cui non è possibile riferire alcuna ipotesi di destinazione o di appartenenza.

Una serie di trincee sono aperte ad Ovest, la più grande delle quali mostra un sentiero che conduce alla trincea. Rispetto a questa, sono presenti 2 trincee una ad Est e l'altra a SudEst.

Nella parte centrale dell'immagine, verso Nord, sono presenti una serie di *feature* che potrebbero rappresentare solamente l'attività dei precedenti anni di scavo.

Più a Sud lo scavo mostra lo schema della chiesa e una serie di stanze appartenute, presumibilmente, al monastero.

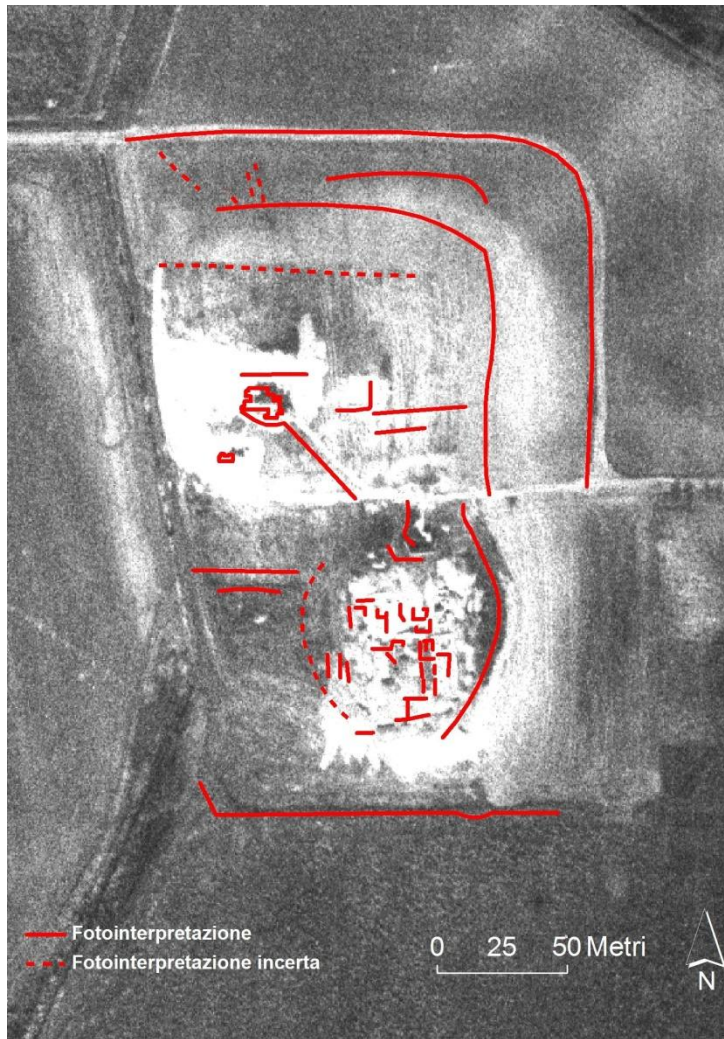


Fig. 4.61 Vésztő2 Fotointerpretazione

Tutte le caratteristiche osservate sono ben distinguibili in dettaglio dal risultato dell'applicazione del filtro 3×3 *edge enhancement* dal quale il contesto di informazione risulta completo anche se un po' rumoroso (Fig. 4.62).

Nel 3×3 *cross edge detection* (Fig. 4.63) e nel 3×3 *highpass* (Fig. 4.64) le informazioni sono tutte presenti ma i dettagli sono più sfuocati e rumorosi.

Il filtro 3×3 *horizontal edge detection* (Fig. 4.65) evidenzia un sentiero che conduce ad una possibile trincea e la trincea stessa; il 3×3 *left diagonal edge detection* (Fig. 4.66) fornisce una precisa informazione di

tutti i dettagli, sentiero e trincee nella parte Sud così come il 3×3 *right diagonal edge detection* (Fig. 4.67). Il filtro 3×3 *vertical edge detection* produce, al contrario, un'immagine più disturbata (Fig. 4.68).

I filtri *lowpass*, come era attendibile, diminuiscono il contrasto nell'immagine rendendo la fotointerpretazione più difficile e pertanto non sono stati utilizzati. La Figura 4.69 mostra il risultato dell'applicazione di un filtro 3×3 *lowpass*.

Il filtro 3×3 *sharpen* presenta un buon livello di dettaglio ma con un eccesso di rumore (Fig. 4.70).

Il filtro 5×5 *highpass* (Fig. 4.71) sottolinea meglio degli altri la divisione interna della chiesa a SudEst, un elemento curvilineo a Est della chiesa, la strada al centro che conduce agli scavi e gli scavi stessi; lo stesso accade, anche se in modo più rumoroso, per il 7×7 *highpass* (Fig. 4.72).

Altri filtri, come il 3×3 *edge detection* (Fig. 4.73), il 3×3 *horizontal* (Fig. 4.74) e il 3×3 *vertical* (Fig. 4.75), producono immagini estremamente rumorose.

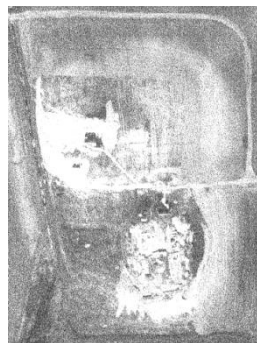


Fig. 4.62 - 3×3 edge enhancement



Fig. 4.63 - 3×3 cross edge detection

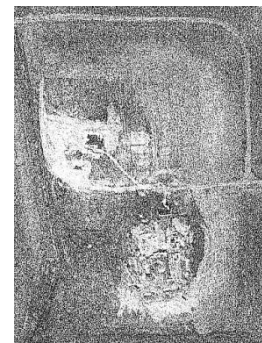


Fig. 4.64 - 3×3 highpass

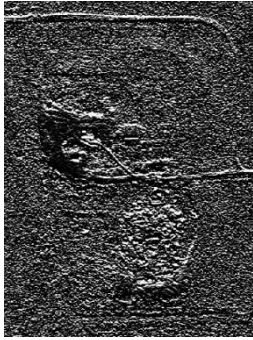


Fig. 4.65 - 3*3 horizontal edge det.



Fig. 4.66 - 3*3 left diagonal edge det.



Fig. 4.67 - 3*3 right diagonal edge det.

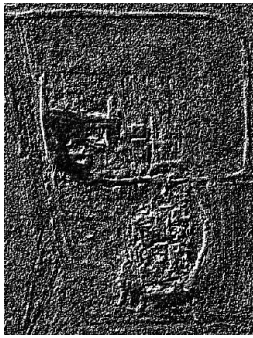


Fig. 4.68 - 3*3 vertical edge det.



Fig. 4.69 - 3*3 lowpass



Fig. 4.70 - 3*3 sharpen

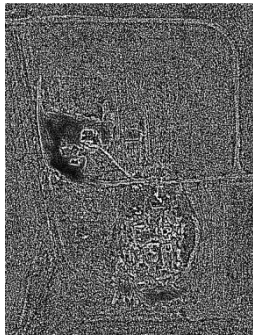


Fig. 4.71 - 5*5 highpass

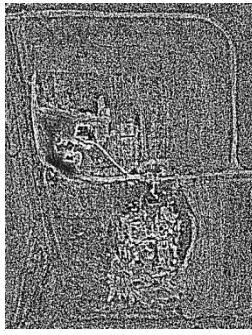


Fig. 4.72 - 7*7 highpass

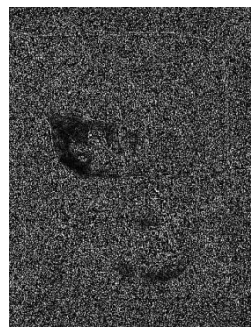


Fig. 4.73 - 3*3 edge detection



Fig. 4.74 - 3*3 horizontal



Fig. 4.75 - 3*3 vertical

4.2.1.4 Immagine satellitare

Per l'area di interesse dell'intero progetto sono state acquistate tre subset di immagini già presenti negli archivi Geoeye-1 mentre, relativamente all'area di interesse del tell di Vésztő Mágor, è stato creato un ulteriore subset che consentisse di elaborare l'immagine più agevolmente (Fig. 4.76).

Per poter visualizzare la scena nel suo contenuto completo multispettrale, è stata effettuata un'operazione di *layer stack* che ha composto in un unico file i canali di ripresa della luce blu, verde, rossa e dell'infrarosso vicino.

Per incrementare l'accuratezza posizionale del prodotto di consegna (5 metri), è stata effettuata un'ulteriore rettifica del subset, ottenuta grazie a 10 punti acquisiti in campagna con GPS differenziale.



Fig. 4.76 Immagine Geoeye di Vésztő Mágor (FCC 432 RGB)

4.2.1.4.1 Miglioramenti spaziali

Mentre le tecniche di miglioramento radiometrico non hanno fornito risultati particolarmente interessanti, lo stesso non si può dire per i miglioramenti spaziali e per tale motivi vengono di seguito mostrati gli output di molteplici applicazioni.

4.2.1.4.1.1 Filtri di convoluzione

I filtri di convoluzione sono stati applicati all'area nel tentativo di evidenziare possibili anomalie sul tell. I filtri mostrano piuttosto bene il limite del monastero. Le anomalie presenti nell'immagine sono varie e non tutte facilmente distinguibili. La più evidente è costituita dal sentiero che va verso Nord e poi si sposta verso Ovest, oggi, come già detto, invisibile in campagna. È poi riconoscibile un elemento di forma quadrata ad Ovest, probabilmente riferibile ad una vecchia trincea di scavo, ed un elemento circolare, ancora ad Ovest. È evidente inoltre un grosso elemento quadrato intorno alla piattaforma a Nord del Museo, alcuni elementi ad Est del Museo, ed elementi circolari distribuiti in quasi tutta l'area (vedi sopra, Fig. 4.76).

Il filtro 3×3 *cross edge detection* (Fig. 4.77) mostra i limiti del monastero a Nord-Ovest ed una supposta trincea ad Ovest, mentre il 3×3 *edge detection* (Fig. 4.78) è più rumoroso. Il filtro 3×3 *edge enhancement* (Fig. 4.79), ma anche meglio il 7×7 (Fig. 4.80) e più di tutti il 5×5 (Fig. 4.81) evidenziano molto bene tutti i dettagli.

Il filtro 3×3 *highpass* (Fig. 4.82) risulta piuttosto rumoroso, ma sottolinea una trincea ed un elemento circolare ad Ovest ed alcuni elementi ad Est del Museo.

Nessun buon risultato per il filtro 3×3 *horizontal edge detection* (Fig. 4.83), per il 3×3 *horizontal* (Fig. 4.84) e il 3×3 *left diagonal edge detection* (Fig. 4.85), mentre nel 3×3 *right diagonal edge detection* (Fig. 4.86) la trincea è più visibile.

Il filtro 3×3 *lowpass* mantiene un soddisfacente contesto informativo pur diminuendo evidentemente il contrasto (Fig. 4.87).

Il filtro 3*3 *sharpen3* (Fig. 4.88) è buono, ma rumoroso, così come il 3*3 *sharpen5* (Fig. 4.89).

Il filtro 3*3 *summary* dà risultati di minor contrasto ma buoni (Fig. 4.90), come estremamente buono, con tutte le anomalie evidenti, è il 5*5 *summary* (Fig. 4.91). Il filtro 7*7 *summary* (Fig. 4.92) mostra evidentemente la trincea, il grande elemento circolare ad Ovest, gli elementi curvilinei ad Est, e altre non ben definite anomalie.

Il filtro 3*3 *vertical edge detection* fornisce un'immagine più sfuocata (Fig. 4.93), mentre il 3*3 *vertical* (Fig. 4.94) risulta essere molto rumoroso.



Fig. 4.77 - 3*3 cross edge detection (FCC 432 RGB)

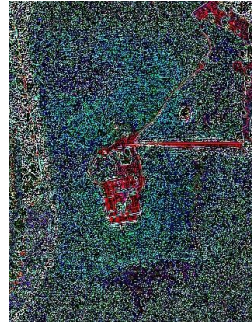


Fig. 4.78 - 3*3 edge detection



Fig. 4.79 - 3*3 edge enhancement



Fig. 4.80 7*7 edge enhancement



Fig. 4.81 5*5 edge enhancement



Fig. 4.82 - 3*3 high pass



Fig. 4.83 - 3*3 horizontal edge det.



Fig. 4.84 - 3*3 horizontal

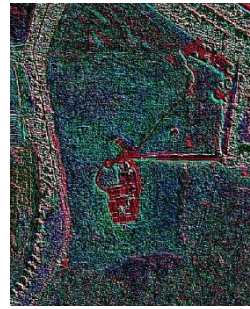


Fig. 4.85 - 3*3 left diagonal edge det.



Fig. 4.86 - 3*3 right diagonal edge det.



Fig. 4.87 - 3*3 low pass



Fig. 4.88 - 3*3 sharpen3



Fig. 4.89 - 3*3 sharpen5



Fig. 4.90 - 3*3 summary



Fig. 4.91 - 5*5 summary



Fig. 4.92 - 7*7 summary



Fig. 4.93 - 3*3 vertical edge det.



Fig. 4.94 - 3*3 vertical

I filtri che hanno restituito immagini degradate o rumorose con il Kernel 3×3 hanno restituito, come era attendibile, anche peggiori risultati con le matrici di dimensioni 5×5 e 7×7 .

4.2.1.4.1.2 Filtri ellittici

Per il fatto che il tell ha una forma ellittica regolare, sono stati creati appositi Kernel con l'obiettivo di delineare in modo automatico la forma del sito così da poterne sviluppare un algoritmo da applicare anche ad altri casi studio.

Nel campo della ricerca, sono stati fatti diversi tentativi di estrazione automatica in questo campo, sia attraverso l'utilizzo di foto aeree (Grøn 2011) che attraverso l'utilizzo di immagini satellitari (Alexakis 2009, Larsen 2008, Trier 2009), ma ancora non si è giunti ad un algoritmo utilizzabile "universalmente". Questo anche perché le forme e le dimensioni dei tell variano notevolmente fra di loro, in base all'area geografica e ai periodi storici in cui si sono formati.

Sono stati creati molteplici tipi di filtro, sia di forma circolare che ellittica, con matrici di diverse dimensioni e contenenti numerici coefficienti di convoluzione differenti miranti a far emergere la forma regolare del tell rispetto ai pixel circostanti.

In Figura 4.95 e 4.96 sono mostrati 2 esempi di filtro circolare ed ellittico prodotti.

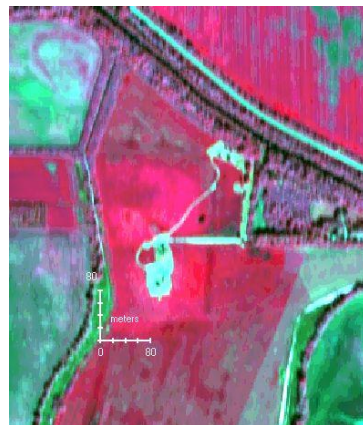


Fig. 4.95 Filtro ellittico (FCC 432 RGB)



Fig. 4.96 Filtro circolare (FCC 432 RGB)

I risultati purtroppo non sono stati così incoraggianti da individuare ed esaltare nettamente la forma del tell, forse perché le matrici erano troppo piccole rispetto alle dimensioni originali del tell. Considerata la dimensione del tell (circa 4.25 ettari) e la risoluzione spaziale dell'immagine (50 cm) sono necessari filtri di almeno 80.000 pixel che rendono i tempi di elaborazione lunghi e la modifica del contenuto radiometrico della scena eccessiva (più la matrice si avvicina alle dimensioni originali del tell più alte sono le possibilità di un esito positivo).

Si è stati invece in grado, grazie ad un filtro ellittico, di esaltare in modo evidente la forma circolare che si trova sotto il Museo moderno a Sud (Fig. 4.97a e 4.97b).

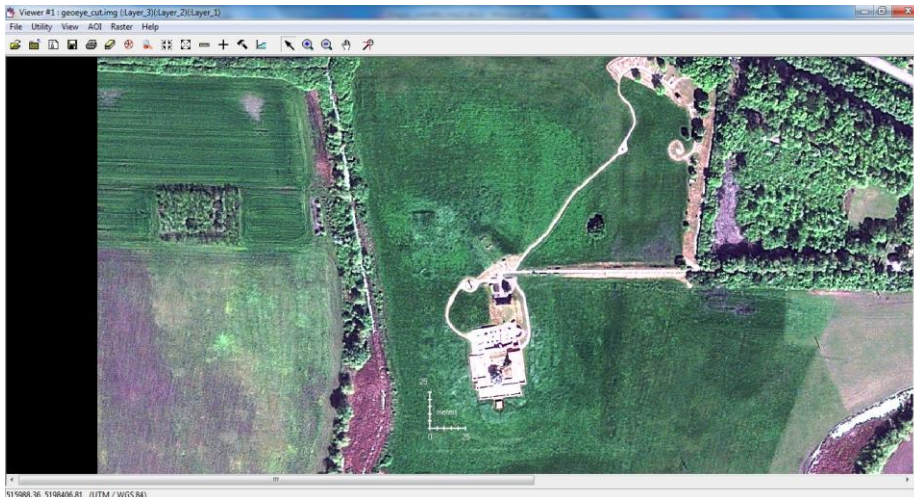


Fig. 4.97a Immagine prima del filtraggio ellittico (FCC 321 RGB)

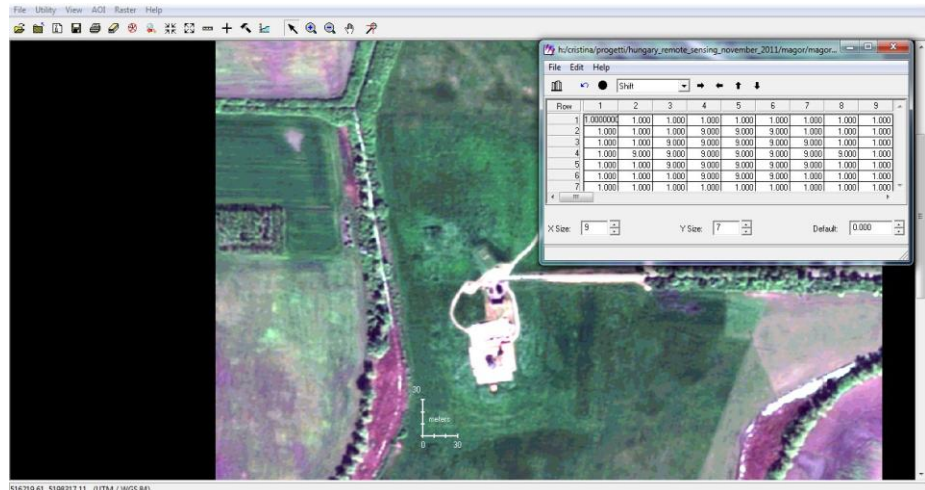


Fig. 4.97b Matrice e risultato del filtraggio ellittico (FCC 321 RGB)

In seguito a tale risultato, sono stati creati ulteriori filtri semi-ellittici per cercare di rendere maggiormente evidente tale anomalia, ma i risultati non sono stati altrettanto buoni.

4.2.1.4.1.3 Derivative direzionali

Sono state applicate all'immagine le derivate direzionali Est (Fig. 4.98), Nord (Fig. 4.99), Sud (Fig. 4.100), Ovest (Fig. 4.101), Nord Est (Fig. 4.102), Nord Ovest (Fig. 4.103), Sud Est (Fig. 4.104) e Sud Ovest (Fig. 4.105). La loro applicazione ha consentito di evidenziare una più chiara demarcazione dei piedi del tell rispetto alla scena originale. Nessun particolare risultato invece è emerso dalla somma delle 8 derivate direzionali (Fig. 4.106).

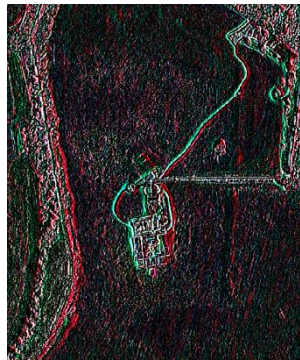


Fig. 4.98 Est (FCC 432 RGB)

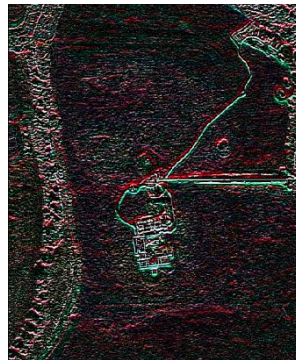


Fig. 4.99 Nord

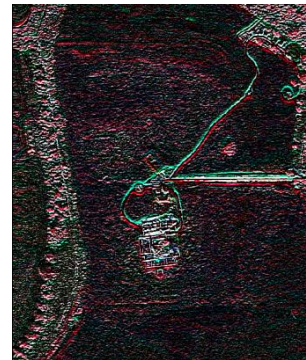


Fig. 4.100 Sud

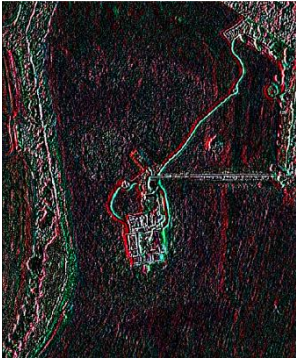


Fig. 4.101 Ovest



Fig. 4.102 Nod Est



Fig. 4.103 Nord Ovest

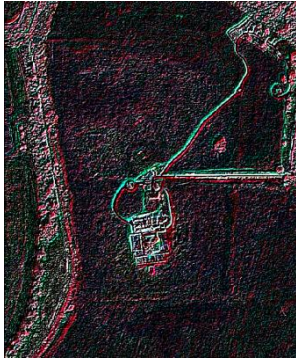


Fig. 4.104 Sud Est



Fig. 4.105 Sud Ovest



Fig. 4.106 Somma di tutte le derivate direzionali (FCC 432 RGB)

4.2.1.4.1.4 Analisi focali

Sono state anche applicate tecniche di analisi focale riguardanti gruppi anziché singoli pixel nell'elaborazione; in particolare sono state sperimentate le funzioni *Mean*, *Maximum*, *Median*, *Minimum*, *Standard Deviation* e *Sum*, anche se non hanno mostrato particolari miglioramenti nella scena non evidenziando anomalie aggiuntive.

4.2.1.4.2 Miglioramenti spettrali

4.2.1.4.2.1 Indici

Gli indici vegetazionali sono, per la maggior parte, derivati dai dati registrati nelle bande spettrali della luce rossa e dell'infrarosso vicino. Tutti gli indici, dopo essere stati calcolati, sono stati migliorati e l'applicazione del contrasto Gaussiano è quella che ha restituito il miglior risultato, probabilmente perché il contenuto organico all'interno delle vecchie trincee e i fossati che si possono supporre hanno consentito di evidenziare in modo migliore le anomalie. Il *SQRT (IR/R)* [$\sqrt{\text{banda 4} / \text{banda 3}}$] Fig. 4.107] e l'*NDVI* [$(\text{banda 4} - \text{banda 3}) / (\text{banda 4} + \text{banda 3})$] Fig. 4.108] sono risultati essere i migliori fra gli altri e mostrano, nell'immagine migliorata, una chiara anomalia a Sud del Museo che potrebbe rivelare il fossato dell'antico tell, non visibile altrimenti in alcun altro *image processing* di Geoeye-1. Si tratta della stessa anomalia indicata dopo l'applicazione del filtro ellittico mostrato in Figura 4.97b. La stessa anomalia è visibile, ma in maniera meno accentuata, in alcuni altri Indici come l'*IR/R* [$\text{banda 4} / \text{banda 3}$] Fig. 4.109] e il *TNDVI* [$\sqrt{(\text{banda 4} - \text{banda 3}) / (\text{banda 4} + \text{banda 3}) + 0.5}$] ; Fig. 4.110]. Il *Vegetation Index* [$(\text{banda 4} - \text{banda 3})$] Fig. 4.11] non ha fornito informazioni di particolare interesse.

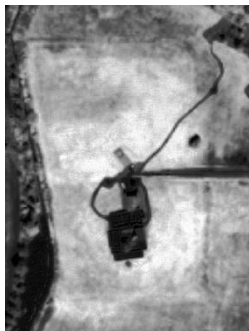


Fig. 4.107 SQRT (IR/R)

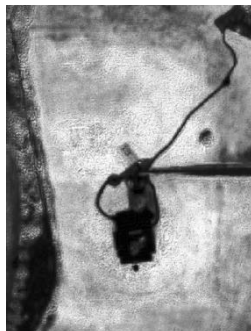


Fig. 4.108 IR/R

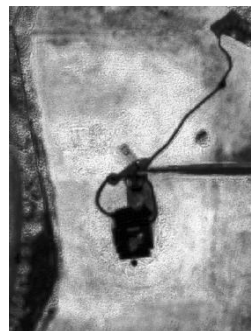


Fig. 4.109 NDVI

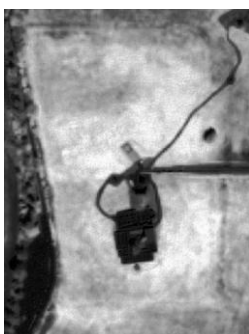


Fig. 4.110 TNDVI



Fig. 4.11 VI

4.2.1.4.2.2 Componenti principali

L'analisi delle componenti principali ha permesso la creazione di nuove bande sintetiche con variabili non correlate, e si è rivelata molto utile per distinguere anomalie sulla collina (Fig 4.112). Sono state estratte quattro componenti principali e sono state visualizzate in vari *false color composite* le prime tre, meno correlate e più ricche di informazioni. Le anomalie più evidenti riguardano elementi sia più antichi, quali possibili fossati, che risalenti presumibilmente al monastero, quali il suo recinto esterno esterno a Nord e Sud, che elementi recenti e contemporanei come trincee di scavo.



Fig. 4.112 Componenti Principali (FCC 123 RGB)

4.2.1.4.2.3 Tasseled Cap

La trasformazione Tasseled Cap, in grado di produrre nuove immagini relative in particolare alle informazioni *Brightness*, *Greenness* e *Wetness* nelle bande di nuova generazione, non ha fornito risultati particolarmente utili alla ricerca anche dopo l'applicazione di miglioramenti al contrasto (Fig. 4.113).

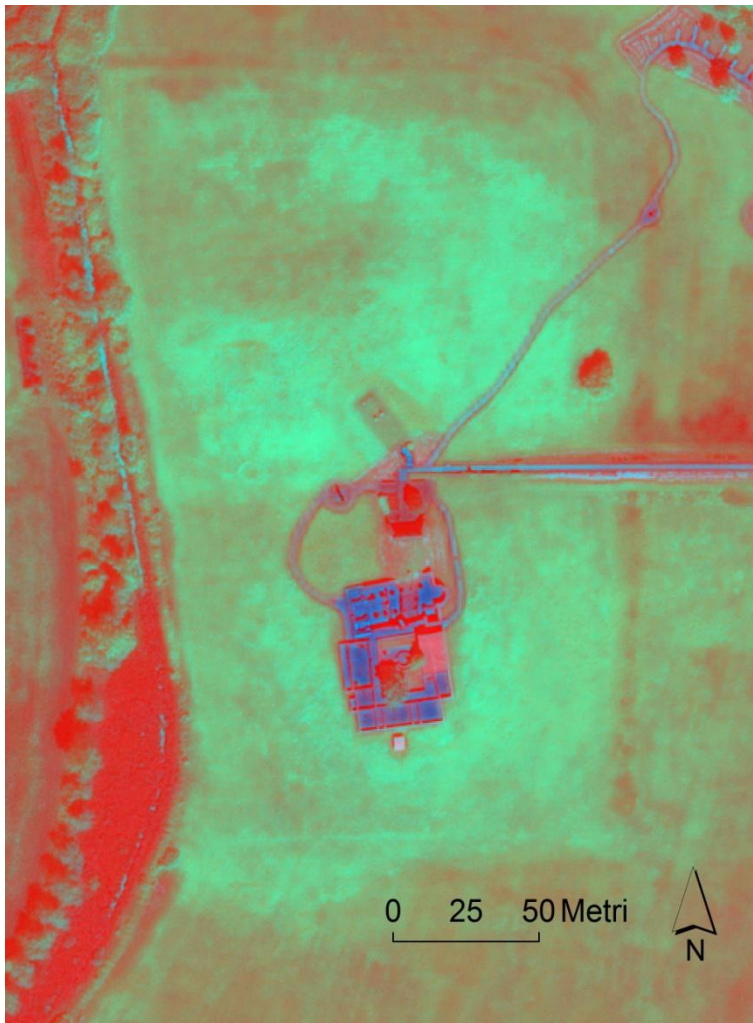


Fig. 4.113 Tasseled cap (FCC 321 RGB)

4.2.1.4.3 Risultati della fotointerpretazione

Per ottenere tutte le diverse interpretazioni estraibili da ogni immagine e per limitare la soggettività nell'interpretazione, sono state scelte le 6 migliori immagini provenienti dai differenti tipi di *processing* fin qui mostrati e sono state in seguito restituite mediante digitalizzazione le *feature* in esse riconoscibili.

In particolare, le 6 immagini usate sono state le seguenti:

- Geoeye, immagine originale;

- *7x7 edge enhancement*;
- *5x5 summary*;
- *3x3 sharpen3*;
- Componenti Principali;
- NDVI.

A ciascun elemento digitalizzato è stato attribuito in ambiente GIS un codice che descrivesse la rilevanza dell'evidenza rispetto ad ogni immagine (Fig. 4.114). I codici individuati possono assumere un valore compreso fra:

- 3 = alta evidenza,
- 2 = media evidenza,
- 1 = bassa evidenza,
- 0 = non visibile.

La somma dei valori riflette la visibilità, e così facendo l'attendibilità, anche se parzialmente ancora in maniera soggettiva, delle diverse anomalie (Fig. 4.115).

Attributes of interpretation_geoeye_compared_2

FID	Shape	Id	geoeye int	7x7enh int	5x5sum int	3x3sh3 int	prcomp int	ndvi int	sum
0	Polyline	0	3	3	3	3	3	3	18
1	Polyline	0	3	3	3	2	2	2	15
2	Polyline	0	3	3	3	2	3	2	16
3	Polyline	0	3	3	3	3	3	2	17
4	Polyline	0	3	3	3	3	3	2	17
5	Polyline	0	3	3	3	3	3	1	16
6	Polyline	0	3	3	3	3	3	3	18
7	Polyline	0	3	3	3	3	3	3	18
8	Polyline	0	3	3	3	3	3	0	15
9	Polyline	0	3	3	3	3	3	3	15
10	Polyline	0	3	3	3	3	3	3	18
11	Polyline	0	3	3	3	3	3	3	18
12	Polyline	0	3	3	3	3	3	2	17
13	Polyline	0	3	3	3	3	3	2	17
14	Polyline	0	3	3	3	2	2	3	16
15	Polyline	0	3	3	3	2	2	3	16
16	Polyline	0	3	3	3	3	3	1	16
17	Polyline	0	3	3	3	3	3	1	16
18	Polyline	0	3	3	3	3	3	3	18
19	Polyline	0	3	3	3	3	3	3	18
20	Polyline	0	3	3	3	3	3	2	17
21	Polyline	0	3	3	3	3	3	3	18
22	Polyline	0	3	3	3	3	3	3	18
23	Polyline	0	3	3	3	3	3	1	16
24	Polyline	0	3	3	3	2	3	3	17
25	Polyline	0	2	2	2	1	1	1	9
26	Polyline	0	2	2	2	1	1	1	9
27	Polyline	0	3	3	3	2	2	2	15
28	Polyline	0	3	3	3	2	3	2	16
29	Polyline	0	3	3	3	2	3	2	16
30	Polyline	0	3	3	3	3	3	3	18
31	Polyline	0	3	3	3	2	3	3	17
32	Polyline	0	3	3	3	2	3	3	17
33	Polyline	0	2	2	2	2	2	2	12
34	Polyline	0	2	2	2	2	3	3	14
35	Polyline	0	2	2	2	2	2	3	13
36	Polyline	0	2	2	1	1	1	2	9
37	Polyline	0	2	2	1	1	1	2	9
38	Polyline	0	2	2	1	1	1	2	9

Record: 1 | Show: All Selected | Records (0 out of 132 Selected) | Options

Fig. 4.114 Tabella delle evidenze



Fig. 4.115 Fotointerpretazione e grado di evidenza FCC 432 RGB

In seguito, sulla base della sommatoria del valore di evidenza, è stata eseguita una riclassificazione secondo 3 classi principali di visibilità alta, media e bassa (Fig. 4.116).



Fig. 4.116 Elementi fotointerpretati riclassificati in base all'evidenza
FCC 432 RGB

Un elemento molto chiaramente visibile risulta essere un sentiero che si dirige verso Nord e poi vira verso Ovest presenta sul lato orientale del sito (Fig. 4.117).

È poi presente una *feature* lineare che, anche se interrotta, percorre tutto il tell, da Nord a Sud e da Est ad Ovest, presumibilmente riferibile al confine del monastero. In Figura 4.118 ne è mostrato il limite meridionale.

A Nord sono evidenti delle linee curve, forse identificabili con i fossati del tell.

Linee curve, anche se più rotondeggianti rispetto a quelle presenti a Nord, si ritrovano anche a Sud (Fig. 4.119), forse indicanti anch'esse fossati (n.d.r. - non possiamo escludere che i fossati che circondavano l'insediamento non abbiano cambiato forma e dimensioni nell'avvicinarsi delle diverse culture che hanno occupato il tell).

Nella parte interna della collina, risultano evidenti elementi lineari che possono far pensare a precedenti attività di scavo (Fig. 4.120), così come molti elementi circolari. Un esempio è mostrato in Figura 4.121, sono dispersi un po' in tutta l'area. Non è da escludere che tali elementi siano testimonianza di altri interventi e lavori di epoca storica o moderna di cui non siamo a conoscenza.

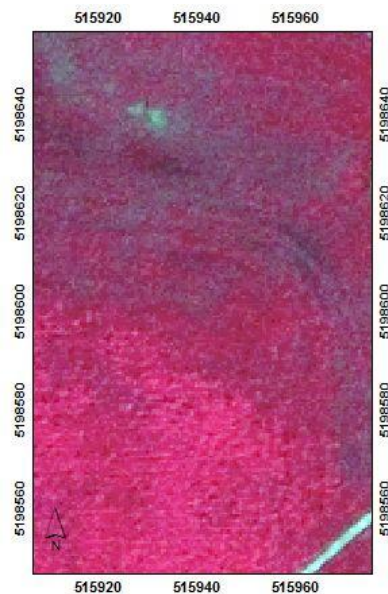


Fig. 4.117 Sentiero FCC 432 RGB

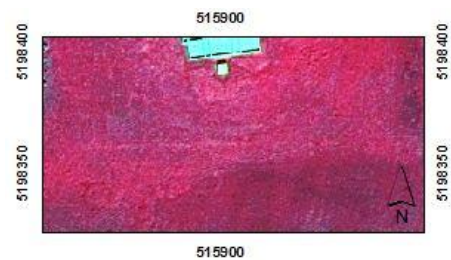


Fig. 4.118 Limite meridionale del confine del monastero FCC 432 RGB

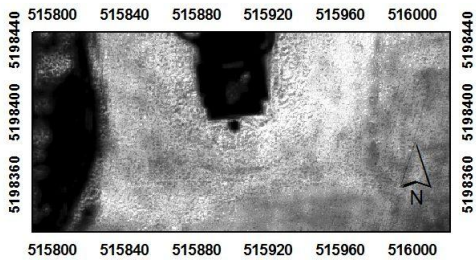


Fig. 4.119 Linee curve probabilmente riferibili ai fossati marginali del tell NDVI

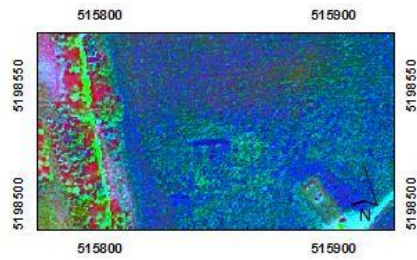


Fig. 4.120 Tracce di precedenti attività di scavo FCC 432
RGB

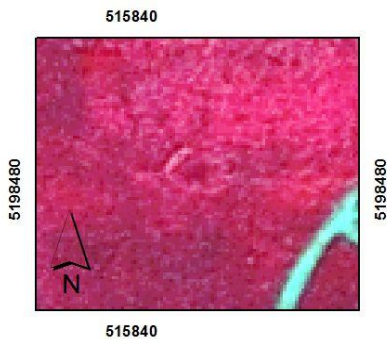


Fig. 4.121 Esempio di elemento circolare FCC 432 RGB

4.2.1.5 Applicazioni geofisiche

Presso il sito di Vésztő Mágor sono state condotte, dal *Laboratory of Geophysical - Satellite Remote Sensing and Archaeo-environment di Rethymno* (Grecia), una campagna di prospezioni geofisiche con il magnetometro nel 2006 e con il GPR nel 2011.

La *survey*, il processamento dati e la loro interpretazione sono state effettuate dal Dott. A. Sarris e dal Dott. N. Papadopoulos. Alla *survey* 2011 ha preso parte anche la candidata.

4.2.1.5.1 Magnetometria

L'indagine magnetometrica a Vésztő Mágor è stata svolta con il magnetometro Bartington™ GRAD601.

Dopo le adeguate operazioni di *processing*, i risultati (Fig. 4.122 e 4.123) hanno mostrato come la collina sembra essere circondata da tre

elementi curvilinei presenti nella parte Nord, collegati probabilmente alle trincee di fondazione. L'andamento, più che circolare, sembra avere una forma rettangolare curvilinea. In mezzo alle trincee, i risultati della magnetometria sembrerebbero suggerire tracce di buche di pali. Una possibile entrata all'accampamento potrebbe essere individuata nella parte NordOvest dell'area. Le tracce di trincee si vanno affievolendo andando verso Est e verso Sud. Una linea curva, quasi circolare, è evidente a Sud, ma non è possibile affermare che appartenga al sistema di trincee evidente a Nord. Inoltre, è difficile individuare resti strutturali all'interno dell'area investigata.

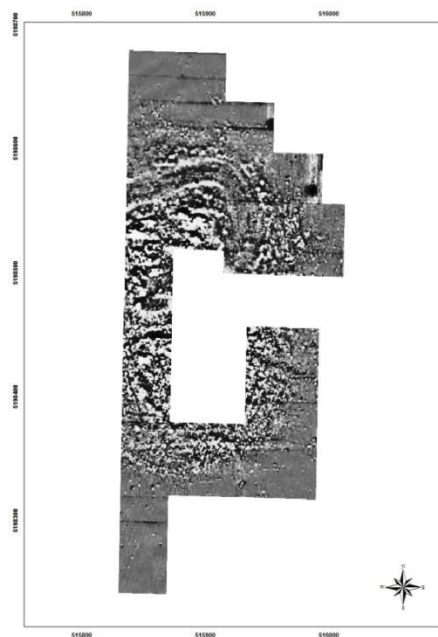


Fig. 4.122 Elaborazione dei dati magnetometrici

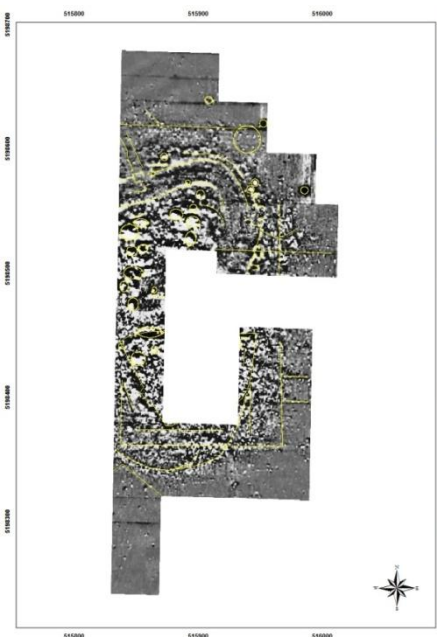


Fig 4.123 Interpretazione dei dati magnetometrici

La maggior parte delle anomalie che si trovano sulla parte superiore della discesa del tell sono rumorose e non mostrano *feature* regolari, sebbene alcune di loro potrebbero essere resti di vecchie trincee di scavo o testimonianze di interventi storici o moderni. Alcuni elementi lineari o curvilinei sono presenti a Sud della collina, alla stessa elevazione di 87.5-88m. Se tali anomalie appartengono alla stessa, potrebbero essere identificate con i confini interni del monastero nella sua area di servizio. Ad una altezza minore, un gruppo di anomalie disposte Nord-Sud e Est-Ovest definisce una forma rettangolare delle dimensioni di 135 x 260 m, che possono essere correlate all'esistenza di un muro che avrebbe circondato i confini del monastero. Alcune altre

anomalie possono essere correlate a periodi più recenti dell'occupazione del sito di Vésztő Mágor (Sarris 2006).

4.2.1.5.2. Ground Penetrating Radar (GPR)

Le indagini GPR sono state condotte con lo strumento Noggin Plus-Smart Cart (Sensors&Software™) GPR con antenne di 250 MHz.

La campagna GPR è stata condotta in via sperimentale su uno specifico target che aveva dato ottimi risultati con il magnetometro, per testare le possibilità del radar di riconoscere in questo tipo di suolo fossati individuati con la magnetometria, per ottenere informazioni stratigrafiche dal tell, nel tentativo di individuare resti strutturali che potessero essere presenti in strati più profondi ed anche per stabilire la locazione di vecchie trincee di scavo. Le griglie si sono estese a Nord del tell, in parziale sovrapposizione con quelle magnetometriche, estendendosi poi più ad Ovest rispetto a quest'ultime. In Fig. 4.124 sono mostrate diverse *slide* con i risultati ottenuti dal GPR a diverse profondità (90-100 cm, 140-150 cm e 150-160 cm).

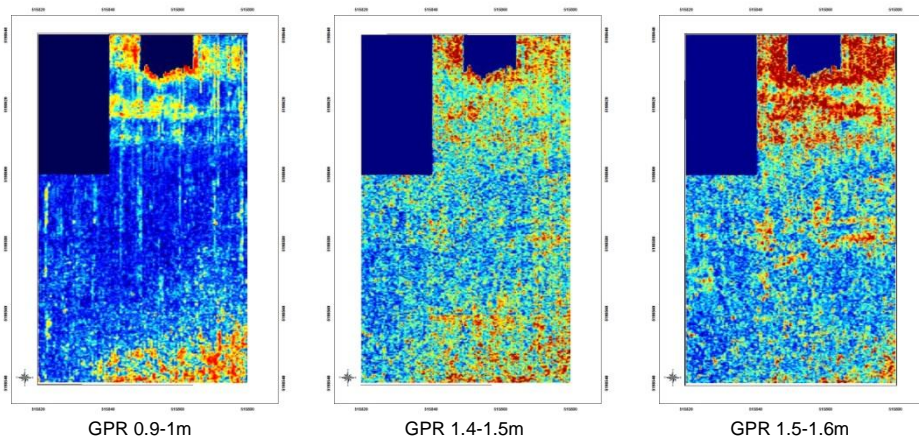


Fig. 4.124 Risultati GPR

La parte Nord dell'area al momento del rilievo era saturata di acqua ed i segnali elettromagnetici erano pertanto completamente attenuati. Muovendosi verso Sud, una debole anomalia lineare appare essere in buona correlazione con quella che è stata ipotizzata essere appartenere al confine Nord dell'antico monastero (Sarris 2006).

Questa anomalia sembra consistere di due linee parallele, distanti l'una dall'altra circa 2 m e aventi una direzione Ovest-Est. Un'altra *feature* lineare, parallela a quelle soprannominate ma non così evidente nei risultati magnetici, appare a Sud. Segni dei fossati circondanti il tell appaiono visibili a una profondità di 1.2-1.3 m e si estendono fino a 1.7-1.8 m in una relativamente buona correlazione con i risultati magnetometrici. Infine, muovendosi verso Sud, è presente tutta una serie di segnali a una profondità di 70 - 80 cm, ma il loro andamento è confuso e non è possibile ricavare precise indicazioni, come del resto nella stessa area con l'indagine geomagnetica, in seguito alla presenza, in passato, di scavi archeologici oppure interventi storici o moderni nell'area del tell (Sarris e Papadopoulos 2011).

4.2.1.6 Integrazione ed interpretazione dei dati telerilevati e geofisici

I dati fotointerpretati dalle foto aeree multitemporali e dalle immagini satellitari sono stati comparati e integrati con quelli provenienti dalla campagna geofisica effettuata con il magnetometro. Non è stato possibile fare altrettanto con i risultati del GPR in quanto quest'ultimi non sono stati così estesi da poter permettere una correlazione con la fotointerpretazione (n.d.r. - il radar ha risoluzione centimetrica mentre un pixel nell'immagine Geoeye-1 corrisponde a 50 cm a terra).

Relativamente ai risultati fra le due tecniche comparate, la fotointerpretazione in questo sito ha aggiunto molti nuovi elementi ed esiste un buon grado di correlazione fra i risultati (Fig. 4.125).

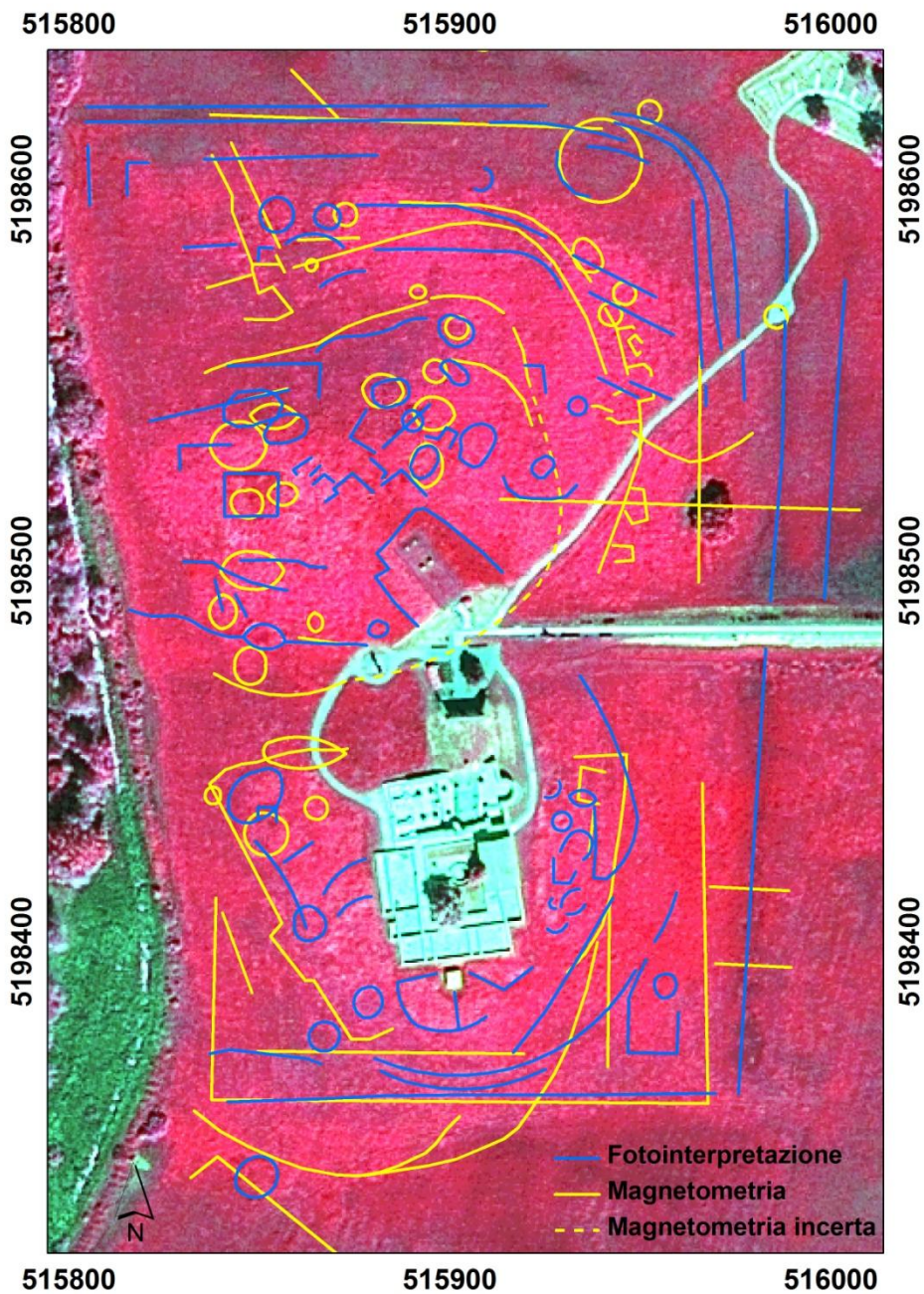


Fig. 4.125 Sovrapposizione dei risultati ottenuti dalla fotointerpretazione e dall'interpretazione magnetometrica FCC 432 RGB

Coincidono e si integrano molto bene quelli che sono stati identificati come i confini del monastero, presenti nelle immagini satellitari, nelle due foto e nell'interpretazione geomagnetica.

Coincidono nella foto Vésztő1 e nei risultati magnetometrici, e parzialmente nell'immagine Geoeye-1 le linee curve riconducibili ai fossati circondanti il tell.

Coincide nella foto Vésztő2 e nell'interpretazione geomagnetica il possibile ingresso all'insediamento.

Coincidono alcuni elementi circolari presenti nell'immagine satellitare e nell'indagine geofisica, probabilmente testimonianze di lavori di epoca storica o moderna.

Dalla foto Vésztő 2 si possono ricavare elementi sia architettonici relativi alla chiesa del monastero che a trincee di scavo, in quanto scattata in un momento in cui gli scavi erano in corso.

Linee curve sono presenti a sud sia nell'immagine satellitare che nelle prospezioni geofisiche. Non è possibile fare ipotesi precise sulla loro destinazione, anche se si potrebbe pensare, come a Nord, che possano essere attribuite a fossati. Non coincidono però nella forma, più tondeggianti, con le anomalie presenti a Nord, soprattutto nell'immagine magnetometrica. Come esposto in precedenza, però, l'impianto dei fossati potrebbe non essere unico ed essere rimasto lo stesso nel corso del tempo.

Elementi strutturali di forma rettangolare sono presenti nella parte Nord della foto satellitare.

Infine vi sono una serie di elementi presenti esclusivamente in alcuni dei dati utilizzati. Elementi circolari non coincidenti l'un con l'altro appaiono sia nelle prospezioni magnetometriche che nell'immagine satellitare.

4.2.1.7 Tecniche di *remote sensing* per l'integrazione dei dati telerilevati e geofisici

Si è voluto infine esplorare, in modo del tutto sperimentale, la possibilità di integrare in ambiente ERDAS IMAGINE™ le immagini provenienti da tutte le tecniche utilizzate, nel tentativo di visualizzare in un'unica soluzione i dati registrati da ciascuna tecnica.

Si è cercato di trattare le immagini come se fossero singole bande di un'immagine multispettrale e di fonderle fra loro per testare la possibilità

di far emergere, da una visione contemporanea e integrata, dati e anomalie che non fossero emerse dalla visione separata.

Sono stati fatti in precedenza tentativi di integrare per via automatica dati provenienti da diverse tecniche geofisiche (Kvamme 2006), oppure di gestire diverse tecnologie di *survey* (Böniger e Tronicke 2010) ma non risultano alla candidatura testimonianze bibliografiche relative nell'integrazione di immagini telerilevate e indagini geofisiche.

A tale scopo, sono stati applicati differenti metodi di *merging* (*Principal Component, Multiplicative, Brovery Transform*) ma i risultati sono stati parzialmente soddisfacenti perché l'interpretazione risulta difficile prima di tutto per l'intensità del segnale magnetometrico. La stessa cosa è accaduta quando si è tentato di fondere le immagini geomagnetiche con le foto aeree.

Poiché l'input di alta risoluzione del metodo di fusione può essere costituito da un unico *layer*, nei vari tentativi sono stati usati alternativamente i risultati dell'indagine magnetometrica (Fig. 4.126) e le bande 3 e 4 di Geoeye-1 ritenute più significative in termini vegetazionali e di umidità al suolo e quindi indicatrici di possibili tracce archeologiche.

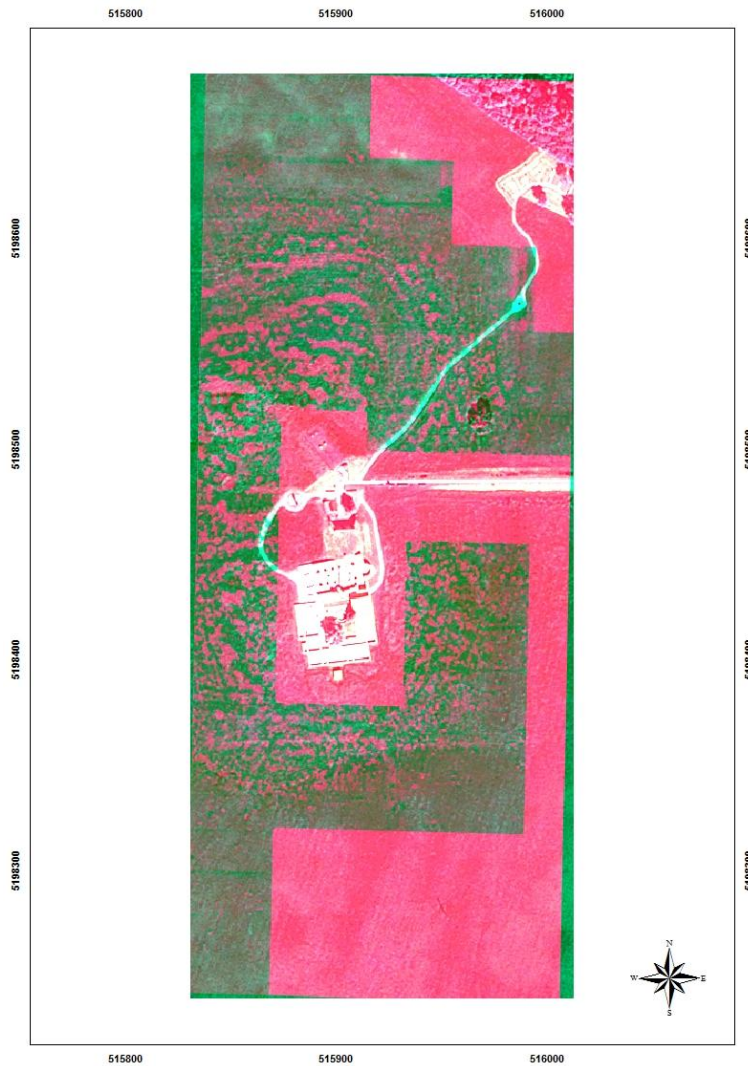


Fig. 4.126 Fusione mediante metodo delle Componenti Principali tra l'immagine dei dati magnetometrici e Geoeye-1 (FCC 432 RGB)

Come *multilayer* da fondere, sono stati usati differenti *stack* di bande e prodotti derivati dall'elaborazione, ma con esiti tanto interessanti quanto rumorosi. Va comunque sottolineata la visibilità della strada che va verso Nord, molto evidente in tutte le nuove scene sintetiche prodotte (Fig. 4.127).

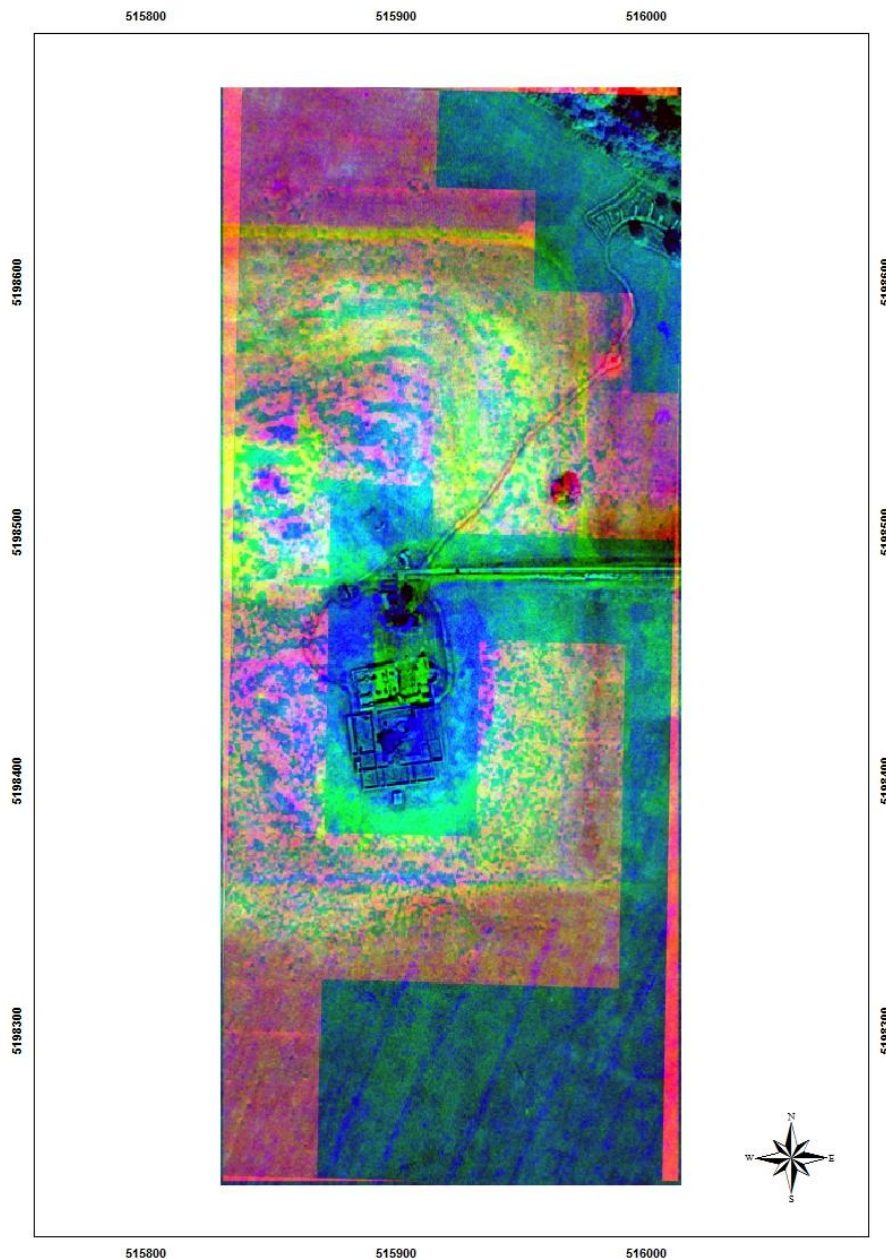


Fig. 4.127 Fusione mediante metodo delle Componenti Principali tra Geoeye-1 banda 4 e lo stack del dato magnetometrico, e delle componenti principali calcolate tra Geoeye-1, Vésztő 2 e Vésztő 1 (FCC 134 RGB).

Anche gli scatterogrammi provenienti dalle diverse profondità raggiunte dal GPR sono stati integrati con il dato magnetometrico, con le foto aeree Vésztő 1 e Vésztő 2 e con l'immagine satellitare Geoeye-1 (Fig. 4.128).

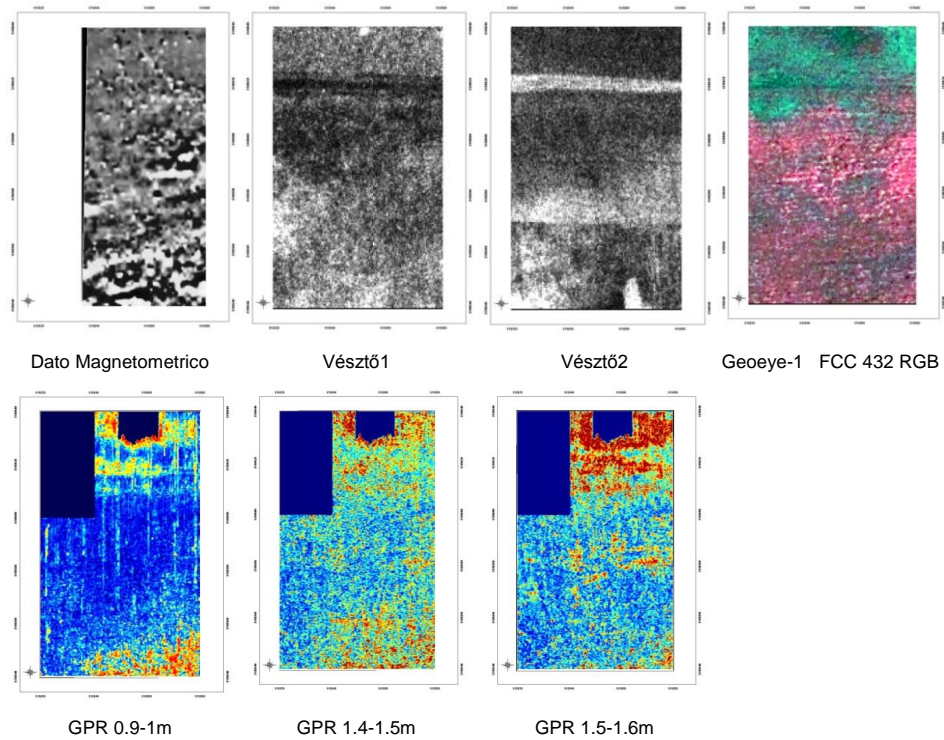


Fig. 4.128 Dati disponibili per l'integrazione TROPPO PICCOLE

Sono stati utilizzati molteplici metodi di *merging* (*Principal Component*, *Multiplicative*, *Brovery Transform*) usando i dati del GPR alle profondità di indagine più significative in base ai risultati emersi (0.9-1m; 1.4-1.5m; 1.5-1.6m); dalla fusione dei dati, purtroppo, non appare niente di particolarmente chiaro e evidente. Nel fondere i dati provenienti dal GPR con quelli dell'indagine magnetometrica attraverso i metodi *Principal Component*, *Multiplicative* e *Brovery Transform*, essendo il segnale della magnetometria particolarmente intenso, l'unico elemento apprezzabile è la linea che denota la fine del tell nella parte sud delle immagini derivanti dalla fusione col metodo *Multiplicative* e *Brovery Transform* (Fig. 4.129).

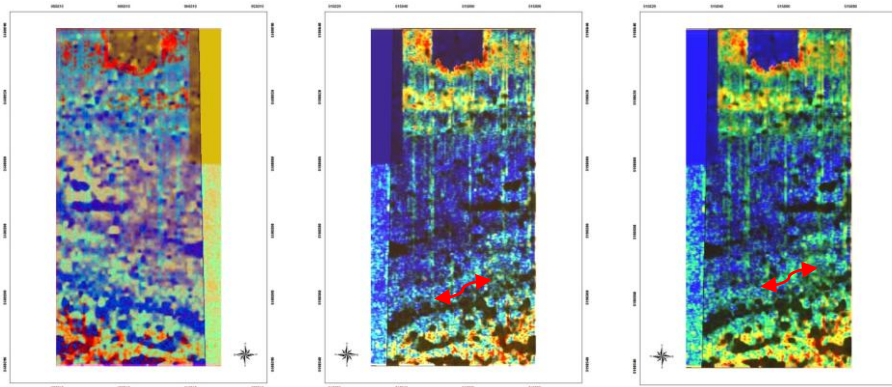


Fig. 4.129 Fusione tra il dato magnetometrico e GPR (profondità di indagine 0.9-1m) risultante dai metodi *Principal Component*, *Multiplicative* e *Brovery Transform* – FCC 421 RGB

Nella fusione del dato GPR con le foto aeree il risultato, nel metodo *Principal Component*, evidenzia grandi anomalie come la strada larga che da sud muove verso Nord e poi piega verso Ovest.

Anche se appare evidente dai risultati, che pure ci sono stati, quale vuole essere la finalità del metodo, tuttavia tali risultati non sono per adesso abbastanza soddisfacenti per supportare una ricerca di dettaglio. Si conta di portare avanti la ricerca e di sviluppare tale metodo con altre tipologie di sito e di architetture.

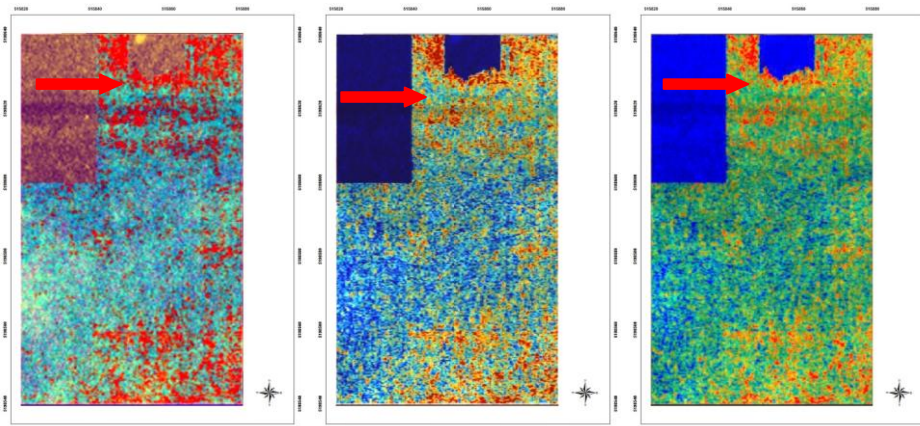


Fig. 4.130 Fusione tra Vésztó1 e GPR (profondità di indagine 1.4-1.5m) risultante dai metodi *Principal Component*, *Multiplicative* e *Brovery Transform* – FCC 123 RGB

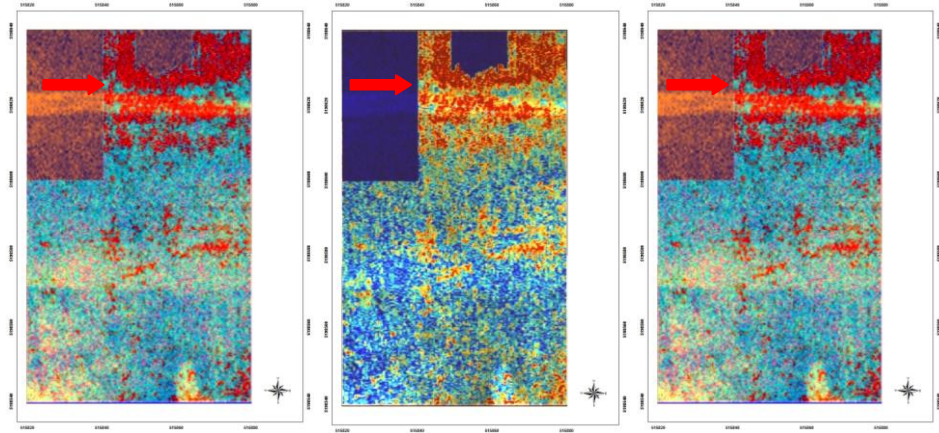


Fig. 88 Fusione tra Vésztő2 e GPR (profondità di indagine 1.5-1.6m) risultante dai metodi *Principal Component*, *Multiplicative* e *Brovery Transform – FCC 123 RGB*

4.2.1.8 Discussione

L'integrazione di foto aeree e satellitari multitemporali ha permesso di poter individuare nell'area oggetto di studio numerose anomalie relative a stagionalità e all'annualità differenti, fornendo informazioni che hanno contribuito ad una più ricca ed efficiente contestualizzazione del sito.

L'uso di immagini ad alta risoluzione spaziale, sia aeree che satellitari, e informazioni multispettrali si è confermato un valido strumento nella fotointerpretazione di nuove e differenti anomalie altrimenti non individuabili se non con estensive e quindi costose indagini geofisiche.

Tecniche di miglioramento radiometrico e spettrale si sono rivelate molto utili ed in particolare si sono rivelate efficaci in questo suolo contesto la trasformazione delle Componenti Principali, l'indice vegetazionale *NDVI* e i filtri di convoluzione tipo *edge enhancement*, *sharpen* e *summary*.

Utile all'individuazione di una struttura nella parte meridionale del tell si è rilevato un filtro ellittico specificamente creato nell'ambito della tesi di Dottorato di Ricerca.

In seguito all'applicazione di tali tecniche, la fotointerpretazione ha permesso di individuare i limiti del monastero di epoca medioevale e delle linee curve da identificare probabilmente con i fossati dell'insediamento di epoca neolitica.

L'utilizzo di immagini satellitari ha fornito risultati interessanti sia per la tipologia di sito, interessato da molteplici interventi differenziati nei secoli, sia perché in Ungheria non esiste ancora una larga casistica di studi su immagini satellitari relativi a siti archeologici in generale e al periodo storico (Neolitico - Età del Rame - Età del Bronzo) in particolare.

Il confronto mediante sovrapposizione in ambiente GIS con i dati geofisici è risultato essere efficiente e produttivo: le principali anomalie sono state confermate, e si è potuto verificare come anche il telerilevamento, benché abbia una risoluzione minore rispetto alle indagini geofisiche, possa individuare altre anomalie possibilmente non catturate da tipi di indagini geofisiche anche diverse fra loro.

In questo specifico caso, non ugualmente utile si è rivelata la tecnica sperimentale di fondere risultati provenienti dalla geofisica con immagini aeree e satellitari. Tuttavia si ritiene che l'integrazione di molteplici metodologie geofisiche e il loro utilizzo come fossero *layer* diversi di un'immagine, nonché la loro integrazione con immagini satellitari possa costituire un nuovo approccio e possa essere una promettente sfida in campo archeologico, in altri tipi di suolo e/o con resti appartenenti ad altre epoche storiche.

5. Conclusioni

La ricerca si è posta l'obiettivo di indagare, principalmente attraverso l'uso di immagini satellitari ad alta risoluzione spaziale, i siti archeologici di Uşaklı Höyük (Turchia) e Vésztő Mágor (Ungheria), affiancando al *remote sensing* ulteriori tecniche non invasive quali la geofisica, la fotogrammetria digitale, il GPS e i Sistemi Informativi Geografici.

Nel primo caso-studio, quello di Uşaklı Höyük, il dato più interessante è costituito dal notevole incremento nell'individuazione di strutture sepolte che si è ottenuto con la fusione dell'immagine pancromatica di Geoeye-1 con le bande spettrali dell'Infrarosso Medio e Termico del sensore Landsat 7 ETM+. Questo a dimostrazione del fatto che un'immagine ad elevata risoluzione spaziale ma con un limitate informazioni spettrali non sempre è sufficiente ad ottenere buoni risultati in termini di interpretabilità. In questo senso, un volo aereo effettuato con sensore multispettrale, o meglio ancora iperspettrale, a bassa quota per cui ad alta risoluzione spaziale, potrebbe sicuramente fornire ottime informazioni sulle ulteriori strutture sepolte presenti nell'area di studio.

Nel secondo caso, relativo al sito di Vésztő Mágor, l'immagine Geoeye-1 si è rivelata sufficiente e utile a rilevare un numero notevole di anomalie. Miglioramenti radiometrici e spettrali hanno apportato o reso più esplicite informazioni relative a evidenze nel sottosuolo appartenenti a diversi periodi storici.

La classificazione secondo criteri di evidenza ha permesso di visualizzare tutte le anomalie risultanti dai diversi tipi di *processing* effettuati e di individuarne il grado di attendibilità fornendo contemporaneamente una maggiore oggettività all'interpretazione.

Interessante si mostra il risultato del tentativo di creare un algoritmo in grado di individuare i tell in maniera automatica tramite l'evidenziazione della forma. Oltre che essere stato funzionale all'interpretazione del sito di Vésztő Mágor, questa tecnica di filtraggio spaziale potrebbe essere applicata, una volta perfezionata, ad aree in cui i tell sono particolarmente diffusi contribuendo ad una ricerca di tipo regionale.

Infine, sempre relativamente al sito ungherese, è utile sottolineare per la prima volta il tentativo di fusione tra dati telerilevati e dati geofisici allo scopo di produrre bande sintetiche di probabile maggiore interpretabilità. Anche se nel caso di studio in esame i risultati non si sono rivelati del

tutto soddisfacenti, si sostiene l'importanza di vagliare la possibilità di estrazione automatica di informazioni da contenuti multispettrali e di integrazione di dati provenienti da diverse tecniche di *remote sensing*, in modo da ottenere la visualizzazione contemporanea di dati di diversa origine che possano offrire una lettura diversa e più ricca di contenuti del sito in esame.

Prendendo in esame entrambi i due casi studio affrontati in questa tesi, è da sottolineare come le immagini satellitari Geoeye-1, utilizzate per ambedue i siti, abbiano fornito risultati differenti. Nel primo caso la valenza è stata prevalentemente topografica mentre nel secondo, la risoluzione spettrale, seppur bassa con solamente 4 bande, si è rivelata sufficiente nell'individuazione di anomalie archeologiche riferibili a strutture sepolte.

L'applicazione di immagini satellitari VHR al settore archeologico sono in continuo aumento ma non sono ancora in numero sufficiente a costituire una letteratura adeguata in cui si possano confrontare i tipi di sensori VHR e di *processing* che hanno fornito i risultati migliori e che possibilmente siano in seguito stati verificati nella loro esattezza da altri tipi di prospezioni archeologiche oppure da scavi. Tutto ciò tenendo conto delle variabili, più volte esposte nell'elaborato, che influenzano l'individuazione di strutture sepolte (area geografica, tipo di costruzione relativo all'epoca storica, materiale di costruzione, stato di conservazione del sito, tipo di suolo, uso del suolo, tenore d'acqua, ecc.).

In tal senso, aver avuto la possibilità di confrontare i risultati ottenuti dal telerilevamento con quelli provenienti dalle indagini geofisiche ha costituito un'opportunità molto importante per testare le potenzialità e la validità dei risultati ottenuti da immagini del sensore Geoeye-1; si sono aggiunti due casi studio a quelli già presenti in letteratura, così da incrementare la documentazione necessaria per l'avanzare di questo tipo di ricerca.

Passando ad un ambito più generale, dai risultati ottenuti è emerso come il *remote sensing* satellitare possa permettere scavi o, prima ancora, prospezioni geofisiche mirate, mettendo gli archeologi in condizioni di aprire un numero di trincee strategicamente individuate per fornire il massimo delle informazioni su uno specifico sito o paesaggio.

Nello stesso tempo è risultato altrettanto chiaro come sia auspicabile, ai fini di un risultato più completo e dettagliato, l'integrazione di differenti metodologie archeologiche, riferibili *in primis* a *survey* di superficie e prospezioni geofisiche.

In combinazione con successivi carotaggi e scavi, il *remote sensing* satellitare permette una ricostruzione olistica del paesaggio, favorendo l'individuazione dell'assetto di siti e forme altrimenti invisibili.

Altre tecniche di *remote sensing* sono state funzionali alla produzione e gestione dei dati utili a studi di micro-scala riguardanti il sito e studi di macro-scala riguardanti la regione e il paesaggio in cui il sito si inserisce.

La tecnica fotogrammetrica tramite l'utilizzo di una stereocoppia satellitare nel caso di Uşaklı Höyük ha permesso la creazione di una mappa topografico-archeologica a medio-grande scala.

Oltre alla produzione cartacea, utile durante i lavori di *survey* sia sul sito che nell'area vasta, tutti i *layer* ad essa correlati, e i prodotti derivati dalla fotogrammetria, quali il DEM e l'ortofoto, sono stati gestiti in ambiente GIS.

Il Sistema Informativo Geografico prodotto è in grado di contenere tutte le informazioni spaziali che verranno generate sia a livello di micro-scala, consentendo la gestione di prospezioni archeologiche e dati di scavo, che di macro-scala, favorendo la ricostruzione del paleopaesaggio, dell'antico corso dei fiumi, del *network* di strade, e la conduzione di analisi di *site-catchment* volte ad individuare l'area di influenza dei siti presenti nella regione e l'eventuale individuazione di siti sconosciuti.

Relativamente a sviluppi futuri, la ricerca continuerà su entrambi i siti, sia in campo archeologico che più strettamente tecnologico.

In Turchia, come illustrato precedentemente, lo studio si aprirà all'archeologia del paesaggio, mirando alla ricostruzione del paleo-ambiente grazie ai dati archeologici fin qui collezionati e ai dati geologici, geomorfologici e idrogeologici che sono stati raccolti e cartografati già presenti all'interno del GIS.

In Ungheria le ricerche proseguiranno a livello di micro-scala, conducendo analisi simili a quelle effettuate per Vésztő Mágor sul sito, anch'esso con tell, di Sceghalom-Kovácsalom. In questo caso nel sito

sono in corso, oltre a indagini geofisiche magnetometriche e GPR, *survey* di superficie e scavi. A livello prettamente metodologico, si procederà nella direzione di sviluppare processi automatici di individuazione di anomalie e nuove forme di trattamento dati.

6. Ringraziamenti

Nel percorso dei quattro anni di dottorato, ho avuto modo di entrare in contatto con diverse realtà e persone. A molte di loro sento il bisogno e il piacere di esprimere la mia gratitudine per avere accompagnato il mio cammino e aver contribuito alla mia crescita professionale ed umana.

A Riccardo Salvini, co-tutore e amico, che mi ha ascoltato, incoraggiato e sostenuto in tutte le tappe di questo percorso e nella scelta di andare all'estero. Il mio interesse verso il telerilevamento e la fotogrammetria sono nati durante le sue lezioni di Master e il relativo stage ormai sette anni fa e fin da allora Riccardo si è sempre rivelato un valido interlocutore e punto di riferimento. La sua competenza, la sua disponibilità, la sua apertura a farsi coinvolgere nel mondo dell'archeologia, il suo contagioso buonumore e ottimismo sono stati di particolare stimolo e aiuto nell'intraprendere e condurre la mia ricerca. A lui mi legano ricordi professionali e personali che spesso sono parte integrante dello stesso momento: con lui ho imparato ad utilizzare molteplici software e strumentazioni, ma anche a fischiare con le dita un pomeriggio a Kerkenes mentre aspettavamo che il GPS terminasse di misurare.

Presso il "*Laboratory of Geophysical - Satellite Remote Sensing and Archaeo-environment*" di Rethymno (Grecia), dove ho portato avanti la mia ricerca per due anni, ho trovato un ambiente accogliente, aperto, stimolante, all'avanguardia nelle applicazioni tecnologiche al mondo dell'archeologia, il luogo ideale in cui poter svolgere ricerca e crescere. Il poter lavorare in ambiente internazionale con colleghi di disparate nazionalità, collaborare a progetti del laboratorio, fare esperienze di *fieldwork*, mi ha fatto maturare e concepire un modo diverso di fare ricerca.

Ad Apostolos Sarris va tutta la mia gratitudine per avermi trasmesso l'entusiasmo, la curiosità verso qualunque forma di sapere, il gusto di farsi domande, la voglia di sperimentare. Per la grande competenza messa a disposizione senza riserve di tempo. Per l'attenzione posta nell'accogliere e far sentire parte integrante del laboratorio i nuovi arrivati. Per la sua disponibilità all'ascolto e per aver affrontato con comprensione e sensibilità alcuni miei momenti difficili. Lo ringrazio per avuto fiducia in me, anche quando a me mancava. E, non ultima cosa,

per avermi introdotto all'arte del buon bere; se non sono più astemia, lo devo a lui.

A Sylviane, "compagna di banco", di *survey*, di domeniche passate in laboratorio, di pita gyros, di gite per Creta, di chiacchierate stimolanti. Grazie per essermi stata vicino anche in momenti in cui non era facile.

A Nikos, Aris, Anghelos: per due anni il laboratorio e i suoi componenti sono stati la mia casa e la mia famiglia.

Ringrazio la prof. Stefania Mazzoni, dell'Università degli Studi di Firenze, per avermi dato la possibilità di partecipare al progetto di Uşaklı Höyük e per aver acquistato, tramite la Fondazione OrMe, Oriente Mediterraneo, la stereocoppia di immagini Geoeye utilizzate nella ricerca.

Un sentito grazie a Gabriella Carpentiero, che ha messo a disposizione i dati e le interpretazioni geofisiche relative a Uşaklı Höyük che sono servite per integrare i dati satellitari con quelli geofisici.

Un grazie altrettanto grande ad Eleonora Magnani, studentessa ora laureata, che ha contribuito alla restituzione fotogrammetrica della carta topografica di Uşaklı Höyük.

La ricerca relativa a Vèszttö-Mágor si inserisce nel più ampio progetto *The Körös Regional Archaeological Project (KRAP)*, un progetto diretto da William A. Parkinson del *The Field Museum* di Chicago e Attila Gyucha del *Field Service of Cultural Heritage*, Ungheria, a cui il *Laboratory of Geophysical - Satellite Remote Sensing and Archaeo-environment* collabora da anni. Ringrazio Billy, Attila, Richard Yerkes e Paul Duffy: essere coinvolti nel loro progetto, travolti dal loro entusiasmo è un'esperienza che spaventa ed esalta al tempo stesso. Grazie per aver messo a disposizione tempo, know-how, dati, ricerche, per avermi permesso di partecipare alla *fieldwork* 2011 in Ungheria e per avermi guidato in tutta l'area della Körös Valley per le verifiche sul campo della mia ricerca.

Le immagini satellitari e le foto aeree del progetto ungherese sono state acquistate grazie ad una borsa di studio *Wenner-Grant* ed al progetto *Archaeolandscape*, volto a favorire la conoscenza delle metodologie di prospezione in campo archeologico. Il progetto *Archaeolandscape* mi ha inoltre concesso una borsa di studio di 3 mesi per condurre le analisi sulle immagini satellitari ed aeree.

I dati e le interpretazioni geofisiche relative al sito di Vèsztó Mágor utilizzati per essere integrati con i risultati delle immagini satellitari sono stati forniti dal *Laboratory of Geophysical - Satellite Remote Sensing and Archaeo-environment*.

Ringrazio inoltre il laboratorio per aver reso possibile il mio prolungato periodo di permanenza all'estero grazie a due borse di studio.

A tutto lo staff dell'*Institute for Mediterranean Studies - Foundation for Research and Technology, Hellas*, grazie per la cordialità, la disponibilità e la professionalità sempre dimostrate.

A Creta, isola che mi ha accolta con generosità: il suo mare, i suoi colori, il suo vento, la sua musica, l'accoglienza della sua gente, li porterò sempre dentro di me.

Infine, ancora una volta, alla mia "grande famiglia", composta di parenti e amici, sempre pronta ad amare senza riserve, a condividere ogni momento, gioie e difficoltà.

Un ringraziamento che è impossibile esprimere a parole ad Alice, amica insostituibile, a Sabrina, altrettanto preziosa, a mio fratello Gabriele, sempre presente, a zia Anna, che si dona senza risparmio, a zia Bruna, che fa altrettanto, a Beppe, Severino, Simonetta, Silvia, Gianni, Serena, Claudio. È un privilegio per me averli accanto. Grazie al loro amore e alla loro incondizionata disponibilità e accoglienza. Senza il loro appoggio e incitamento questa tesi non ci sarebbe stata.

Un grazie anche ad Alice C., a Francesca, a Elisa, a Mila e Laura, presenze discrete. Senza di loro questo periodo sarebbe stato più buio.

Infine, grazie ai miei genitori, per aver accettato sempre le mie scelte e per essere sempre e comunque al mio fianco.

A mia nonna, che mi ha lasciato durante questi anni, ma che è sempre presente in me.

A mia nipote Matilde, per aver pronunciato il mio nome in un giorno d'estate.

7. Bibliografia

- Alexakis, D., Sarris, A., Astaras, T., 2011. Integrated GIS, remote sensing and geomorphologic approaches for the reconstruction of the landscape habitation of Thessaly during the neolithic period, *Journal Of Archaeological Science* (38), 89 - 100.
- Alexakis, D., Sarris, A., Astaras, T., Albanakis, K., 2009. Detection of Neolithic Settlements in Thessaly (Greece) Through Multispectral and Hyperspectral Satellite Imagery, *Sensors* (9), 1167 – 1187.
- Allen, K.M.S., Green, S.W., Zubrow, E.B.W., (Eds.) 1990. *Interpreting space: GIS and archaeology*. London/New York: Taylor & Francis.
- Altaweel, M., 2005. The Use of ASTER Satellite Imagery in Archaeological Contexts, *Archaeological Prospection* (12), 151 – 166.
- Aminzadeh, B., Samani, F., 2006. Identifying the boundaries of the historical site of Persepolis using remote sensing, *Remote Sensing of Environment* (102), 52 – 62.
- Ashmore, W., Knapp, A.B., (Eds.)1999. *Archaeologies of landscape: contemporary perspectives*. Malden, MA: Blackwell Publishers.
- Atalan Çayirezmez, N., Ertepinar Kaymakçı, P., Summers, G.D., 2008. Remote Sensing at Kerkenes: Combining Geophysical and Other Methods, *Yerbilimleri* 29, no. 2, 87 – 100.
- Baiocchi, V., Crespi, M., De Vendictis, L., Lorenzon, F., 2003. Impiego cartografico di immagini satellitari ad alta risoluzione. Le problematiche metriche: dati primari, metodologie, sperimentazioni, in *La Cartografica per il controllo e la gestione del territorio. Atti del Convegno (LameziaTerme, 12 – 13 giugno 2003)*.
- Baiocchi, V., Crespi, M., De Vendictis, L., Giannone, F., 2004. Ortorettificazione di immagini satellitari ad alta risoluzione per scopi cartografici: Metodologie ed implementazione di un nuovo software, *bollettino sifet*, 1, 11 – 33.
- Beck, A., Phillip, G., Abdulkarim, M., Donoghue, D., 2007. Evaluation of Corona and Ikonos high resolution satellite imagery for

- archaeological prospection in western Syria, *Antiquity*, 81 (311), 161 – 75.
- Bender, B., 2002. Time and Landscape. *Current Anthropology* (43), 5103 – 5112.
- Bewley, R.H., 2003. Aerial survey for archaeology, *Photogrammetric Record* (18), 273-292.
- Böniger, U., Tronicke, J., 2010. Integrated data analysis at an archaeological site: a case study using 3D GPR, magnetic, and high resolution topographic data, *Geophysics* (75) B169 - B176.
- Braasch, O., 2002. Aerial Survey and Neolithic Enclosures in Central Europe, *Enclosures in Neolithic Europe: Essay on Causewayed and Non-Causewayed Sites* (7), 63 – 68.
- Bradley, R., 2000. *An Archeology of Nature Places*. London and New York: Routhledge.
- Branting, S., 1996. The Alişar Regional Survey 1993-1994: A Preliminary Report, *Anatolica* (22), 145 – 158.
- Campana, S., 2002. High resolution satellite imagery: a new source of information to the archaeological study of Italian landscapes? Case study of Tuscany, in B. Warrembein (ed.) *Proceedings of the Conference Space Application for Heritage Conservation*, Strasbourg: European Space Agency.
- Campana, S., Francovich, R., 2003. Landscape Archaeology in Tuscany: cultural resource management, remotely sensed techniques, GIS based data integration and interpretation, 15 – 28.
- Campana, S., Forte, M., (Eds.) 2006. *From Space to Place. Proc. Of the 2nd International Conference on Remote Sensing in Archaeology* (CNR, Rome, 4 – 7 December 2006), Archaeopress BAR International Series 1568, Oxford.
- Campana, S., Piro, S., (Eds.) 2009. *Seeing the Unseen*, Taylor and Francis Group, London.
- Campana, S., Dabas, M., Marasco, L., Piro, S., Zammer, D., 2009. *Integration of Remote Sensing , Geographical Surveys and Study*

- of a Medieval Mound (Tuscany, Italy), *Archaeological Prospection* (16), 167 – 176.
- Casana, J., Corthen, J., 2008. Stereo analysis, DEM exaction and orthorectification of CORONA satellite imagery: archaeological application from the Near Est, *Antiquity* (00), 1 – 18.
- Casana, J., Hermann, J.T., Fogel, A., 2008. Deep Subsurface Geophysical Prospection at Tell Qarqur, Syria, *Archaeological Prospection* (15), 207 – 225.
- Casana, J., Hermann, J.T., 2010. Settlement History and Urban Planning at Zincirli Höyük, Southern Turkey, *Journal of Mediterrean Archaeology* (231), 55 – 80.
- Castrianni, L., Di Giacomo, G., Ditaranto, I., Scardozzi, G., 2010. High resolution satellite ortho-image for archaeological research: different methods and experience in the Near and Middle East, *Advanced Geosciences* (24), 97 – 110.
- Chao, G., Xinyuan, W., Tong, J., Gaojie, J., 2009. Spatial Distribution of Archaeological Sites in Lakeshore of Chaohu Lake in China Based on GIS, *Chinese Geographical Science* (19), 333 – 340.
- Challis, K., Carey, C., Kincey, M., 2011. Airborne Lidar Intensity and Geoarchaeological Prospection in River Valley Floors, *Archaeological Prospection* (18), 1 – 13.
- Chapman, H., 2006. *Landscape Archeology and GIS*. The History Press, Stroud.
- Chavez, P.S. Jr., Sides, S.C., Anderson, J.A., 1991. Comparison of three different methods to merge multi-resolution and multi-sectoral data: Landsat TM and SPOT Panchromatic, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 57, 295-303.
- Cheng, P., Toutin, P., Zhang, Y., 2003. QuickBird – Geometric correction, data fusion, and authomatic DEM extraction, in 24th Asian Conference on Remote Sensing.
- Ciminale, M., Gallo, G., Lasaponara, R., Masini, N., 2009. A Multiscale Approach for Reconstructing Archaeological Landscapes:

- Application in Northern Apulia (Italy), *Archaeological Prospection* (16), 143 – 153.
- Clark, C.D., Garrod, S.M., Parker Pearson, M., 2010. Landscape archaeology and remote sensing in southern Madagascar, *International Journal of Remote Sensing* (19), 1461 – 1477.
- Comfort, A., 1997. Satellite remote sensing and archaeological survey on the Euphrates, *Archaeological Computing Newsletter* (48), 1 – 8.
- Conolly, J., Lake, M., 2006. *Geographical Information System in Archaeology*. Cambridge University Press , Cambridge.
- Contreras, D.A., 2009. Reconstructing landscape at Chavín de Huántar, Perú : A GIS-based approach, *Journal Of Archaeological Science* (36), 1006 – 1017.
- Creekmoore, A., 2010. The Structure of Upper Mesopotamian Cities: Insight from Fluxgate Gradiometer Survey at Kazane Höyük, Southeastern Turkey, *Archaeological Prospection* (17), 73 – 88.
- Dassie, J., 1978. *Manuel d'archeologie aerienne*. Editions Technip, Paris.
- De Laet, V., Paulissen, E., Meuleman, K., Waelkems, M., 2009. Effects of image characteristics on the identification and extraction of archaeological features from Ikonos-2 and Quickbird-2 imagery: case study Sagalassos (southwest Turkey), *International Journal of Remote Sensing* (30), 5655 – 5668.
- De Laet, V., Paulissen, E., Waekens, M., 2007. Methods for the extraction of archaeological features from very high-resolution Ikonos-2 remote sensing imagery, Hisar (southwest Turkey), *Journal of Archaeological Science* (34), 830 – 841.
- De Sherbinin, A., Balk, D., Yager, K., Jaiteh, M., Pozzi, F., Giri, C., Wannebo, A., 2002. A CIESIN Thematic Guide to Social Science Applications of Remote Sensing, 1 – 68.
- Di Giacomo, G., Ditaranto, I., Scardozzi, G., 2011. Cartography of the archaeological surveys taken from an Ikonos stereo-pair: a case

- study of the territory of Hierapolis in Phrygia (Turkey). *Journal of Archaeological Science* (38), 2051 – 2060.
- Dial, G., Grodecki, J., 2003. Applications of Ikonos Imagery. *American Society of Photogrammetry and Remote Sensing Annual Conference Proceedings*, Anchorage, Alaska.
- Duffy, P.R., 2010. Complexity and Autonomy in Bronze Age Europe: Assessing Cultural Developments in Eastern Hungary.
- Ecsedy, I., László, K., Borbála, M., István, T., 1982. *Magyarország Regészeti Topográfiaja VI. Bekes Megye Regészeti Topográfiaja: A Szeghalmi Járás (IV/1)*. Akadémiai Kiadó, Budapest.
- Evans, T.L., Daly, P.T., 2006. *Digital Archaeology: Bridging Method and Theory*. Routledge, London.
- Ferencz, C.S., Bognár, P., Lichtenberger, J., Hamar, D., Tarcsai, Gy., Timár, G., Molnár, G., Pásztor, S.Z., Steinbach, P., Székely, B., Ferencz, O. E., Ferencz-Árkos, I., 2004. Crop yield estimation by satellite remote sensing, *International Journal of Remote Sensing* (25), 4113 – 4149.
- Fisher, C., Thurston, T.L., 1999. Dynamic Landscapes and Sociopolitical Process: The Topography of Anthropogenic Environments in Global Perspective. *Special Section in Antiquity* (73).
- Forrer, E., 1927. Ergebnisse einer archäologischen Reise in Kleinasien, 1926. In: *Mitteilungen der Deutschen Orient Gesellschaft* (65), 31-37.
- Fowler, M., 1996. Declassified intelligence satellite photographs, *Aerial Archeology Research Group News* (13), 30 – 35.
- Fraser, C.S., Dial, G., Grodecki, J. 2006. Sensor orientation via RCPs, *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* (60) 182 – 194.
- Frisen, D., Boaretto, E., Eliyahu-Behar, A., Shahack-Gross, R., 2011. Degradation of mud brick houses in an arid environment: a geoarchaeological model, *Journal of Archaeological Science* (38), 1135 – 1147.
- Fry, G.L.A., Skar, B., Jerpåsen, G., Bakkestuen, V., Erikstad, L., 2004. Locating archaeological sites in the landscape: a hierarchical

approach based on landscape indicators, *Landscape and Urban Planning* (67), 97 – 107.

- Gaffney, V.L., Stančič, Z., 1996. GIS approaches to regional analysis: a casa study of the island of Hvar Ljubljana: Znanstveni inéstitut Filozofske fakultete.
- Galaty, M.L., 2005. European Regional Studies: A Coming of Age?, *Journal of Archaeological Research* (13), 291 – 336.
- Gallo, D., Ciminale, M., Becker, H., Masini, N., 2009. Remote sensing techniques for reconstructing a vast Neolithic settlement in Southern Italy, *Journal of Archaeological Science* (36), 43 – 50.
- Garrison, T. G., 2010. Remote sensing ancient Maya rural populations using QuickBird satellite imagery, *International Journal of Remote Sensing* (31), 213 — 231.
- Garrison, T.G., Huston, S.D., Golden, C., Inomata, T., Nelson, Z., Munson, J., 2008. Evaluating the use of IKONOS satellite imagery in lowland Maya settlement archaeology, *Journal of Archaeological Science* (35), 2770 – 2777.
- Gianinetto, M., Giussani, A., Lechi, G. M., and Scaioni, M., 2004. Fast mapping from high resolution satellite images: a sustainable approach to provide maps for developing countries”, in XXth ISPRS Congress (Istanbul, 12–23 July 2004).
- Gorny, R.L., 1994. The 1993 Season at Alişar Höyük in Central Turkey, *Anatolica* (20), 65 – 100.
- Gorny, R.L., 1995. The Alişar Regional Project 1994, *Anatolica* (21). 65 – 100.
- Gorny, R.L., 1995. The Hittite Names of Kerkenes Dağ and Kuşakli Höyük, *Anatolian Studies XLV*, 69 – 71.
- Graves, D., 2011. The use of predictive modelling to target Neolithic settlement and occupation activity in mainland Scotland, *Journal of Archaeological Science* (38), 633 – 656.
- Grøn, O., Stylegar, F.-A., Palmer, S., Aase, S., Orlando, P., Esbensen, K., Kucheryavski, S., 2008. Practical use of multispectral satellite

- images in general Norwegian Cultural Heritage Management and focused Viking Age research. Experiences from South-Western Norway. In Lasaponara R., Masini N. (Eds.), *Remote Sensing for Archaeology and Cultural Heritage Management*. Aracne Editrice, Rome, 285-288.
- Grøn, O., Palmér, S., Stylegar, F.A., Esbensen, K., Kucheryavski, S., Asae, S., 2011. Interpretation of archaeological small-scale features in spectral images, *Journal of Archaeological Science* (38), 2024 – 2030.
- Gurney, O.R., 1995. The Hittite Names of Kerkenes Dağ and Kuşaklı Höyük”. *Anatolian Studies* (XLV), 69 – 7.
- Gyucha, A., Parkinson, W.A., Yerkes, R.W., 2009. A Multi-Scalar Approach to Settlement Pattern Analysis: The Transition from the Late Neolithic to the Copper Age on the Great Hungarian Plain. In: Thurston, Tina .L. and Salisbury, Roderick B., (Eds.) 2009. *Reimagining Regional Analyses – the Archaeology of Spatial and Social Dynamics*. Cambridge Scholars Publishing, Newcastle, 100 – 129.
- Gyucha, A., 2010. *The Early Copper Age in the Körös Region*. PhD Dissertation.
- Gyucha, A., Duffy, P.R., Frolking, T.A., 2011. The Körös Basin from the Neolithic to the Hapsburgs: Linking Settlement Distributions with Pre-Regulation Hydrology Through Multiple Data Set Overlay, *Geoarchaeology* (26), 392 – 419.
- Hegedus, K., 1982. Veszto-Magori-domb. In: I. Ecsedy, L. Kovacs, B. Maraz and I. Torma (Eds), *Magyarország Regeszeti Topografija VI. Bekes Megye Regeszeti Topografija: A Szeghalmi Jaras (IV/1)*. Akademiai Kiado, Budapest.
- Hegedus, K & Makkay, J., 1987. Veszto-Magor: a Settlement of the Tisza Culture. In: Raczky, P. (Ed.), *The Late Neolithic of the Tisza Region: A Survey of Recent Excavations and their Findings*. Szolnok County Museums, Budapest-Szolnok.
- Holland, D.A, Boyd, D.S., Marshall, P., 2006. Updating topographic mapping in Great Britain using imagery from high-resolution satellite sensors. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* (60), 212 – 223.

- Horvath, F., 1982. A Survey on the Development of Neolithic Settlement Pattern and House Types in the Tisza Region, In Neolithic of Southeastern Europe and its Near Eastern Connection, *Varia Archaeologica Hungaria* II, 85 – 103.
- Jahjah, M., Olivieri, C., 2010. Automatic archaeological feature extraction from satellite VHR images. *Acta Astronautica* 66, 1302–1310.
- Jankovich, D., Makkay, J., Szoke, B.M., (Eds.). 1989. Magyarország Régészeti Topográfiája VIII. Békés Megye Régészeti Topográfiája: A Szarvasi Járás (IV/2). Budapest: Akadémiai Kiadó.
- Jankovich, D., Medgyesi, P., Nikolin, E., Szatmári, I., & Torma, I. (Eds.). 1998. Magyarország Régészeti Topográfiája X. Békés Megye Régészeti Topográfiája: Békés és Békéscsaba környéke (IV/3). Budapest: Akadémiai Kiadó.
- Jacobsen, K., 2002, "Mapping with IKONOS images", In: T. Benes Geoinformation for European-wide Integration, Prague June 2002, 149 – 156.
- Johnson, G.A., 1977. Aspects of regional analysis in archaeology. *Annual Review of Anthropology* (6), 479 – 508.
- Kantner, J., 2005. Regional analysis in archaeology. In H.D.G. Maschner and C. Chippendale (Eds.) *Handbook of Theories and Methods In Archaeology*, pp. 1179 – 1223. Walnut Creek, CA: Altamira Press.
- Kantner, J., 2008, The Archaeology of Regions: From Discrete Analytical Toolkit to Ubiquitous Spatial Perspective. *Journal of Archaeological Research* (16), 37 – 81.
- Kraus K., 1997. *Photogrammetry. Vol. 1: Fundamentals and Standard Processes ; Vol. 2: Advanced Methods and Applications.* Dümmler Ed., Bonn.
- Kucukkaya, A.G., 2004. Photogrammetry and remote sensing in archaeology, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* (88), 83 - 88.

- Kvamme, K.L., 2006. Integrating Multidimensional Geophysical Data, *Archeological Prospection* (13), 57 – 72.
- Kvamme, K., Ernenwein, E., Hargrave, M., Sever, T., Harmon, D., Limp, F., 2006. New Approaches to the Use and Integration of Multi-Sensor Remote Sensing for Historic Resource Identification and Evaluation, 1 - 65.
- Lambers, K., Eisenbaiss, H., Sauerbier, M., Kupferschmidt, D., Gaisecker, T., Sotoodeh, S., Hanush, T., 2007. Combining photogrammetry and laser scanning for the recording and modeling of the Late Intermediate Period Site of Pinchango Alto, Palpa, Peru, *Journal of Archaeological Science*, 34 (10), 1702 - 12.
- Larsen, S. Ø., Trier, Ø. D., Solberg, R., 2008. Detection of Ring Shaped Structures In Agricultural Land Using High Resolution Satellite Images. *Proceedings of GEOBIA 2008 - Pixels, Objects, Intelligence. GEOgraphic Object Based Image Analysis for the 21st Century. August 5-8, 2008, Calgary, Alberta, Canada*, 48 - 53.
- Lasaponara, R., Masini, N., 2006. Satellite-Based identification of Archaeological Features. 276- 281.
- Lasaponara, R., Masini, N., Scardozzi, G., 2007. Immagini satellitari ad alta risoluzione e ricerca archeologica: applicazioni e casi di studio con riprese panoramiche e multispettrali di Quick Bird, *Archeologia e Calcolatori* (18), 187 – 227
- Lasaponara, R., Masini, N., 2007. Detection of archaeological crop marks by using satellite QuickBird multispectral imagery, *Journal of Archaeological Science* (34), 214 – 221.
- Lasaponara, R. and Masini, N., (Eds.) 2008. Remote sensing for Archaeology and Cultural Heritage Management. *Proc. of the 1st International Workshop (Rome, 30 September–4 October 2008)*, Aracne Editrice, Rome.
- Lasaponara, R., Masini, N., 2009. Full-waveform Airborne Laser Scanning for the detection of medieval archaeological microtopographic relief, *Journal of Cultural Heritage* (10), e78 – e82.

- Lasaponara, R., Masini, N., 2011. Satellite Remote Sensing in Archaeology: past, present and future perspectives, *Journal of Archaeological Science* (38), 1995–2002.
- Lasaponara, R., Masini, N., 2012. (Eds.) *Satellite Remote Sensing: A New Tool for Archaeology*, Springer.
- Lillesand, T.M., Kiefer, R.W. and Chipman, J.W., 2004. *Remote Sensing And Image Interpretation*. John Wiley & Sons, New York.
- Llobera, M., Fabreaga-Alvarez, P., Pacero-Oubiña, C., 2011. Order in movement: a GIS approach to accessibility, *Journal of Archaeological Science* (38), 843 – 851.
- Lock, G., Stančič, Z., (Eds.) 1995. *Archaeology and Geographical Information System: a European perspective*. London: Taylor & Francis.
- Lock, G., Molyneaux, B.L., 2006. *Confronting Scale in Archaeology: Issues of Theory and Practice*. New York: Springer.
- Lubos, C.C.M., Dreibrodt, S., Nelle, O., Klamm, M., Friederich, S., Meller, H., Nadeau, M.J., Fuchs, M., Bork H.-R., 2011. A multi-layered prehistoric settlement structure (tell?) at Niederröblingen, Germany and its implications, *Journal Of Archaeological Science* (38), 1101 – 1110.
- Masini, N., Lasaponara, R., 2006. Investigating the spectral capability of QuickBird data to detect archaeological remains buried under vegetated and not vegetated areas, *Journal of Cultural Heritage*, 8 (1), 53 – 60.
- Masini, N., Lasaponara, R., 2007. Satellite-based recognition of landscape archaeological features related to ancient human transformation, *Journal of Geophysics and Engineering* (3), 230 – 5.
- Masini, N., Lasaponara, R., Orefici, G., 2009. Addressing the challenge of detecting archaeological adobe structures in Southern Perù using QuickBird imagery, *Journal of Cultural Heritage* (10), e3–e9.

- Mazzoni, S., D'Agostino, A., Orsi, V., 2010a. Survey of the Archaeological Landscape of Usakli / Kusakli Höyük (Yozgat). *Anatolica* (36), 111 – 163.
- Menze, B.H., Ur, J.A., Sherratt, A.G., 2005. Tell spotting - surveying near eastern settlement mounds from space, *Proceedings of the CIPA International Symposium*.
- Menze, B.H., Ur, J.A., Sherratt, A.G., 2006. Detection of ancient settlement mounds - Archaeological survey based on the SRTM terrain model, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* (3), 321 – 327.
- Menze, B.H., Mühl, S., Sherratt, A.G., 2007. Virtual Survey on North Mesopotamian Tell Sites by Means of Satellite Remote Sensing. In: B. Ooghe and G. Verhoeven (Eds.), *Broadening Horizons: Multidisciplinary Approaches to Landscape Stud*, Cambridge University Press, Cambridge, 5 - 29.
- Meriggi, P., 1971. Ottavo e ultimo viaggio anatolico, *Oriens Antiquus* (10), 57 - 60.
- Mike, K., 1991. Magyarország ősvízrajza és felszíni vizeinek története. Budapest: Aqua Kiadó
- NA Leica™ Geosystem (2003): Il sistema GPS, applicazioni e sviluppi nel rilievo del territorio. Maggioli Editore.
- Nador, A., Thamo-Boszo, E., Magyari, A., Babinszki E., 2007. Fluvial responses to tectonics and climate change during the lateWeichselian in the eastern part of the Pannonian Basin (Hungary), *Sedimentary Geology*, 202, 174 – 192.
- Neubauer, W., 2004. GIS in Archaeology – the Interface between Prospection and Excavation, *Archaeological Prospection* (11), 159 – 166.
- Oltean, I.A., Abell L.L., 2012. High-Resolution Satellite Imagery and the Detection of Buried Archaeological Features in Ploughed Landscapes, 291-305. In: Lasaponara, R., Masini, N. (Eds.), *Satellite Remote Sensing. A New Tool for Archaeology*. Springer.
- Parcak, S., 2009. *Satellite Remote Sensing for Archaeology*. Routledge, Abingdon & New York.

- Parkinson, W.A., Gyucha, A., Yerkes, R.W., Sarris, A., Hardy, M., Morris, M., 2004. Settlement Reorganization at the End of the Neolithic in Central Europe: Recent Research in the Körös River Valley, Southeastern Hungary, *Journal of Eurasian Prehistory* 2(2), 57 – 73.
- Parkinson, W.A., 2006. Tribal boundaries: Stylistic variability and social boundary maintenance during the transition to the Copper Age on the Great Hungarian Plain, *Journal of Anthropological Archaeology* (25), 33 – 58.
- Parkinson, W.A., 2007. Fortifications and Enclosures in European Prehistory: A Cross-Cultural Perspective, *Journal of Archaeological Research* (37), 97 – 141.
- Parkinson, W.A., Yerkes, R.W., Gyucha, A., Sarris, A., Morris, M., Salisbury, R.B., 2010. Early Copper Age Settlements in the Körös Region of the Great Hungarian Plain, *Journal of Field Archaeology* (35), 164 – 183.
- Pascucci, S., Cavalli, R. M., Palombo, A., Pignatti, S., 2010. Suitability of CASI and ATM airborne remote sensing data for archaeological subsurface structure detection under different land cover: the Arpi case study (Italy), *Journal Of Geophysics and Engineering* (7), 183 – 189.
- Pearsall, Deborah M. (ed.) 2008 *Encyclopedia of Archaeology*. Academic Press, San Diego and Oxford, UK.
- Peña-Barragán, J.M., Ngugi, M.K., Plant, R.E., Six, J., 2011. Object-based crop identification using multiple vegetation indices, textural features and crop phenology, *Remote Sensing of Environment* (115), 1302 – 1316.
- Piccareta, F., Ceraudo, G., *Manuale di aerofotografia archeologica. Metodologia, tecniche e applicazioni*, Edipuglia, Bari 2000.
- Premo, L.S., 2004. Local spatial autocorrelation statistics quantify multi-scale patterns in distributional data: an example from the Maya Lowlands, *Journal of Archaeological Science* (31), 855 – 866.
- Raczky, P., Meier-Arendt, W., Kurukz, K., Hajdu, Z., Szikora, A., 1994. Polgár-Csőszhalom: A Late Neolithic settlement in the Upper

Tisza region and its cultural connections (Preliminary report),
Jósa András Múzeum Évkönyve, 231 – 240.

Raczky, P., Meier-Arendt, W., Anders, A., Haidu, Z., Nagi, E., Kurucz, K., Domboroczki, L., Sebok, K., Sumegi, P., Magyar, E., Szanto, Z., Gulyas, S., Dobo, K., Bacsky, E., Biro, K.T., Schwarz, C., 2002. Polgar-Csoszhalom (1989 – 2000): summary of the Hungarian-German excavation on a Neolithic settlement in eastern Hungary, Mauerischan: Festschrift für Manfred Korfmann, 833 – 860.

Raczky, P., Anders, A., 2008. Late Neolithic spatial differentiation at Polgar-Csoszhalom, eastern Hungary, Living Well Together: Settlement and Materiality in the Neolithic of South-East and Central Europe (c. 5), 35 – 53.

Riley, D.N., 1987. Air Photography and Archaeology, London.

Ross, S.A., Sobotkova, A., Burgers, G.J., 2009. Remote Sensing and Archaeological Prospection in Apulia, Italy, Journal of Field Archaeology (34), 423 – 435.

Rowlands, A., Sarris, A., 2007. Detection of exposed and subsurface archaeological remains using multi-sensor remote sensing, Journal of Archaeological Science (34), 795 – 803.

Salisbury, R.B., 2010. Settlements, sediments and space: A practice approach to community organization in the Late Neolithic of the Great Hungarian Plain. PhD Dissertation.

Salvini R., Bonaccini F. e Salvi M.C., 2008. Utilizzo di stereocoppie IKONOS II per la realizzazione della carta topografica del sito archeologico di Melka Kunture (Etiopia). 12° Conferenza Nazionale ASITA, 21 - 24 ottobre 2008, L'Aquila. pp. II:1773-1778.

Salvini, R., Salvi, M.C., Bonaccini, F., Kozciak, S., Gruppioni, G., Gallotti, R., Piperno, M., in press. Safeguard of archaeological heritage in Ethiopia: satellite photogrammetry for the archaeological map of Melka Kunture Palaeolithic site. Acta of the 36th Annual Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology. Budapest, 2-6 April 2008.

Salvini R., Salvi M.C., Cartocci A., Magnani E. and Mazzoni S. 2010b. Utilizzo di una stereocoppia GeoEye-1 per la realizzazione della cartografia geologica e topografica del sito archeologico di

Kuşaklı Höyük (Yozgat-Turchia). 14° Conferenza Nazionale ASITA, 9-12 Novembre 2010, Brescia, 1555-1560.

- Samadzadegan, F., Mahmondi, F.T., Schenk, T., 2011. Information fusion of Lidar range and intensity data for automatic building recognition, *International Journal of Image and Data Fusion* (2), 37 – 60.
- Sarris, A., Jones, B., 2000. Geophysical and related techniques applied to archaeological survey in the Mediterranean: a review, *Journal of Mediterranean Archaeology*, 13 (1), 3 – 75.
- Sarris, A., Topouzi, S., Chatziordanou, E., Liu, J., Xu, L., 2002. Space technologies in archaeological research and CRM of semi-arid and desertification affected regions: examples from China and Greece. In: B. Warmbein (Ed.) *Proceedings of the Conference Space Application for Heritage Conservation*, European Space Agency, Strasbourg.
- Sarris, A., 2006. Geophysical Prospection Survey at Vésztő-Mágor (Vésztő 15) and Okány 16 –Futas, Visztu, Hungary (2006), Technical Report, Laboratory of Geophysical-Satellite Remote Sensing & Archaeo-environment, Institute for Mediterranean Studies - Foundation of Research & Technology (F.O.R.T.H.), Rethymno, Crete, September 10.
- Sarris, A., Papadopoulos, N., 2010. Technical Report: Geophysical Investigation ad Szeghalom-Kovacshalom, Visztu, Hungary (KRAP 2010).
- Sarris, A., Papadopoulos, N., 2011. Geophysical Investigations at Szeghalom - Kovácshalom, Visztu, Hungary (KRAP 2011), unpublished Technical Report, IMSFORTH.
- Saturno, W., Sever, T.L., Irwin, D.E., Howell, B.F., Garrison, T.G., 2007. Putting Us on the Map: Remote Sensing Investigation of the Ancient Maya Landscape. In: J. Wiseman and F. El-BAz (Eds.) *Remote Sensing in Archaeology, Interdisciplinary Contributions to Archaeology* book series. Springer, New York.
- Schmidt, A., 2001. *Geophysical Data in Archeology: a Guide to Good Praticce*. Oxbow Books, London.

- Showengerdt, R.A., 2006. Remote Sensing - Models and Methods for Image Processing. 3rd ed. Academic Press, New York.
- Siart, C., Bubenzer, O., Eitel, B., 2009. Combining digital elevation data (SRTM/ASTER), high resolution satellite imagery (Quickbird) and GIS for geomorphological mapping: A multi-component case study on Mediterranean karst in Central Crete, *Geomorphology* (112), 106 – 121.
- Siart, C., Eitel, B., Panagiotopoulos, D., 2008. Investigation of past archaeological landscapes using remote sensing and GIS: a multi-method case study from Mount Ida, Crete, *Journal of Archaeological Science* (35), 2918 – 2926.
- Siart, C., Hecht, S., Holzauer, I., Altherr, R., Meyer, H.P., Schukraft, G., Eitel, B., Bubenzer, O., Panagiotopoulos, D., 2010. Karst depressions as geoarchaeological archives: The palaeoenvironmental reconstruction of Zominthos (Central Crete), based on geophysical prospection, sedimentological investigations and GIS, *Quaternary International* (216). 75 – 92.
- Slocum, Terry A., McMaster, R.B., Kessler, F.C., Howard, H.H., 2005, *Thematic Cartography and Geographic Visualization*, 2nd edition, Pearson Prentice Hall. pp. 201-212.
- Sperti, M., Galanti, R., 2006, “Su una procedura di restituzione a partire da una stereocoppia IKONOS 2”, *Bollettino di Geodesia e Scienze Affini* (4), 229-243.
- Summers M.E.F., Summers, G.D., Ahmet K., 1995. The Regional Survey at Kerkenes Dağ: An Interim Report on the Seasons of 1993 and 1994, *Anatolian Studies* (45), 43 – 68.
- Summers, G.D., M.E.F., Summers, 2006. Aspects of Urban Design at the Iron Age City on the Kerkenes Dag as Revealed by Geophysical Survey, *Anatolia Antiqua* (15), 71 - 88.
- Summers, G.D., Summers, F., Branting, S., 2007. The Kerkenes Project.
- Thurston, Tina, L. Salisbury, Roderick B., (Eds.) 2009. *Reimagining Regional Analyses – the Archaeology of Spatial and Social Dynamics*. Cambridge Scholars Publishing, Newcastle.

- Traviglia, A., Cottica, D., 2010. Remote sensing applications and archaeological research in the Northern Lagoon of Venice: the case of the lost settlement of Constanciacus, *Journal of Archaeological Science* (38), 2040 - 2050.
- Trier, Ø. D., Larsen S. Ø., Soldberg, R., 2009. Automatic Detection of Circular Structures in High-resolution Satellite Images of Agricultural Land, *Archaeological Prospection* (16), 1 – 15.
- Trier, Ø. D., Lieng, E., 2010. Validation Of a semi-automated classification approach for urban green structure (38), 596 – 601.
- Ucko, P.J., Layton, R., (Eds.) 1999. *The Archaeology and Anthropology of Landscapes: Shaping Your Landscape*. London: Routledge.
- Ullah, I.I.T., 2011. A GIS method for assessing the zone of human-environmental impact around archaeological sites: a test case from the Late Neolithic of Wadi Ziqlâb, Jordan, *Journal of Archaeological Science* (38), 623 – 632.
- Vaughn, S., Crawford, T., 2009. A predictive model of archaeological potential: An example from northwestern Belize, *Applied Geography*, (29), 542 – 555.
- Vega, M.B., Nathan, C., 2011. Ground Truthing of Remotely Identified fortification of the Central Coast of Peru, *Journal of Archaeological Science* (38), 1680 – 1689.
- Verhagen, P., Whitley, T.G., 2012. Integrating Archaeological Theory and Predictive Modeling: a Live Report from the Scene, *Journal of Archaeological Method Theory* (19), 49 – 100.
- Verhoeven, G.J.J., 2009. Providing an Archaeological Bird's-eye View - an Overall Picture of Ground – based Means to Execute Low-altitude Aerial Photography (LAAP) in Archaeology, *Archaeological Prospection* (16), 233 – 249.
- Verhoven, G.J., 2012. Near-Infrared Aerial Crop Mark Archaeology: From its Historical Use to Current Digital Implementations, *Journal of Archaeological Method Theory* (19), 132 – 160.
- Vogel, S., Märker, M., 2010. Reconstructing the Roman topography and environmental features of the Sarno River Plain (Italy) before the

- AD 79 eruption of Somma–Vesuvius, *Geomorphology* (115), 67 – 77.
- Von der Osten, H.H. 1929. Explorations in Hittite Asia Minor 1927-1928, (Oriental Institute Publications VI), Chicago.
- Von der Osten, H.H., 1937. The Alishar Höyük: Seasons of 1930-32, Part II, (Oriental Institute Publications XXIX), University of Chicago Press, Chicago.
- Wheatley, D., Gillings, M., 2002. Spatial technology and archaeology: the archaeological application of GIS. London/New York: Taylor & Francis.
- Wheatley, D.W., Garcia Sanjuan, L., Murieta Flores, P.A., Marquez Perez, J., 2010. Approaching The Landscape Dimension Of The Megalithic Phenomenon In Southern Spain, *Oxford Journal of Archaeology* (29), 387 – 405.
- White, K., El Asmar, H.M., 1999. Monitoring changing position of coastlines using Thematic Mapper imagery, an example from the Nile Delta, *Geomorphology* (29), 93 - 105.
- Wilkinson, K.N., Beck, A.R., Philip, G., 2006. Satellite Imagery as a Resource in the Prospection for Archaeological Sites in Central Syria, *Geoarchaeology: An International Journal* (21), 735 – 750.
- Wilson, D.R., 1982. *Air photo interpretation* for archaeologists. St Martin's Press, London.
- Wiseman, J.R., El-Baz, F., 2007. Remote Sensing in Archaeology. Springer Press, New York.
- Witten, A.J., 2005. Handbook of Geophysics and Archaeology. Equinox Publishing, London.
- Yerkes, R.W., Sarris, A., Frolking, T., Parkinson, W.A., Gyucha, A., Hardi, M., Catanoso, L., 2007. Geophysical and Geochemical Investigations at Two Early Copper Age Settlements in the Körös River Valley, Southeastern Hungary, *Geoarchaeology: An International Journal* (22), 845 – 871.

Zubrow, E.B.W., 2007. Remote Sensing, Fractals, and Cultural Landscapes: An Ethnographic Prolegomenon Using U2 Imagery (c.6), 219 – 235.