



UNIVERSITÀ DI NAPOLI L'ORIENTALE  
DIPARTIMENTO ASIA, AFRICA E MEDITERRANEO  
Saperi condivisi | Shared knowledges 2

# Manuale di geoarcheologia

Un approccio geomorfologico da remoto

Romolo Loreto e Bruno Marcolongo



UniorPress

Saperi condivisi – Shared knowledges

2

*Saperi condivisi* è una collana didattica e di divulgazione scientifica dell'Università di Napoli L'Orientale, pubblicata dal Dipartimento Asia, Africa e Mediterraneo. La collana pubblica monografie e raccolte di saggi nei campi di ricerca tradizionali dell'Orientale, che vanno dallo studio delle lingue e della linguistica alle culture, alle storie, alla geografia, alla storia del pensiero, al patrimonio archeologico e culturale, ai sistemi economici di Asia, Africa e paesi mediterranei e alle loro civiltà. *Saperi condivisi* ha l'obiettivo di presentare le ricerche in un modo rilevante e accessibile sia a docenti che a studentesse e studenti, e di disseminare a un pubblico più ampio gli sviluppi nei vari campi di studio. La pubblicazione open-access rappresenta un efficace strumento per raggiungere questo obiettivo.

*Shared knowledges* is a series of didactic and scientific divulgation of the University of Naples L'Orientale, published by the Department of Asia, Africa and the Mediterranean Studies. The series will publish monographs and edited books in the traditional fields of research of L'Orientale, which range between the study of Languages and Linguistics, Cultures, History, Geography, History of Thought, Archaeological and Artistic Heritage, and Legal and Socio-Economic Systems of Asian, African and Mediterranean countries and civilizations. *Shared knowledges* has the goal to present researches in a way that is relevant and accessible to both researchers and students, and to disseminate to a wider audience the developments in the various fields of study. For this reason, publications will be available in open-access.

UNIVERSITÀ DI NAPOLI L'ORIENTALE

# Manuale di geoarcheologia

Un approccio geomorfologico da remoto

ROMOLO LORETO e BRUNO MARCOLONGO



UniorPress

Napoli 2023

In copertina: *Il 'Sentiero degli Spiriti' sulla sommità della 'Grande Montagna Sacra' nei Gobi Altai in Mongolia, in prossimità del tumulo dell'Età del Bronzo di Puntsag Oboo.* Foto di Bruno Marcolongo.

**Collana:** Saperi condivisi – Shared knowledges  
Dipartimento Asia, Africa e Mediterraneo

**Direttrice:** Anna Maria D'Onofrio

**Comitato Editoriale:** Flavia Aiello, Oriana Capezio, Romolo Loreto, Antonio Manieri

**Comitato Scientifico:** Graziella Acquaviva (Università di Torino), Elena Chiti (Stockholms Universitet), Hilde De Weerd (Universiteit Leiden), Andrea Facchin (Università di Venezia), Derek Kennett (Durham University), Nicola Laneri (Università di Catania), Álvaro Trigo Maldonado (Universidad de Salamanca), Inna Mateiciucová (Masaryk University, Brno), Eliana Mugione (Università di Salerno), Aldin Mutembei (University of Dar es Salaam), Michael Watson (Meiji Gakuin University)

Tutte le pubblicazioni della collana sono sottoposte a una procedura di doppio referaggio anonimo.

*Nell'eventualità che passi antologici, citazioni o illustrazioni di competenza altrui siano riprodotti in questo volume, l'editore è a disposizione degli aventi diritto che non si sono potuti reperire. L'editore porrà inoltre rimedio, in caso di cortese segnalazione, a eventuali non voluti errori e/o omissioni nei riferimenti relativi.*

ISBN 978-88-6719-264-9

Creative Commons Attribution 4.0 International License



UniorPress - Via Nuova Marina 59 - 80133 Napoli

*Dedicato alla memoria di  
Alessandro de Maigret (1943-2011)  
e Mario Mascellani (1944-2015)  
maestri di vita, fraterni amici  
e compagni di avventura e di ricerca*



*La Nature est un temple où de vivants piliers  
Laissent parfois sortir de confuses paroles;  
L'homme y passe à travers des forêts de symboles  
Qui l'observent avec des regards familiers.*

*(‘Correspondances’ in ‘Les Fleurs du Mal’, Charles Baudelaire, 1857)*



## Indice

<b>Presentazione</b> (F. Immordino) .....	13
<b>Prefazione</b> .....	15
<b>1. Introduzione</b> .....	17
1.1 Geomorfologia e telerilevamento nell'era degli <i>Open Access Data</i> .....	17
1.2 Punti di riferimento concettuali e metodologici .....	19
1.2.1 <i>Per un approccio geoarcheologico</i> .....	19
1.2.2 <i>Telerilevare è analizzare e leggere il terreno</i> .....	22
1.3 Geoarcheologia e telerilevamento come strumenti per una archeologia del paesaggio a connotazione integrata. Breve storia degli studi .....	25
1.3.1 <i>Intenti</i> .....	25
1.3.2 <i>Antefatto</i> .....	26
1.3.3 <i>Lo sviluppo dei satelliti e delle metodologie integrate</i> .....	27

### Parte I Metodologie integrate

<b>2. Geomorfologia</b> .....	31
2.1 Teoria e pratica geomorfologica per l'archeologia da remoto .....	31
2.2 Definizioni e principi di base .....	31
2.3 'Ciclo erosivo normale' di W.M. Davis .....	34
2.4 Cause della modellazione geomorfologica della superficie terrestre .....	36
2.4.1 <i>Fattori strumentali</i> .....	37
2.4.2 <i>Agenti del modellamento</i> .....	41
2.4.3 <i>Condizioni climatiche</i> .....	64
2.5 Processi geomorfologici .....	70
2.5.1 <i>Processi fluviali</i> .....	71
2.5.2 <i>Processi marini</i> .....	72
2.5.3 <i>Processi eolici</i> .....	75
<b>3. Telerilevamento</b> .....	79
3.1 Definizione e breve storia del suo sviluppo .....	79
3.2 Telerilevamento in geomorfologia: l'uso delle immagini .....	79
3.2.1 <i>Uso ottimale delle immagini in funzione delle loro caratteristiche geometriche</i> .....	79
3.2.2 <i>Uso ottimale delle immagini in funzione delle loro caratteristiche spettrali</i> .....	81
3.2.3 <i>Uso ottimale delle immagini in funzione delle loro caratteristiche temporali</i> .....	83
3.3 Strumenti e procedimenti di ricerca .....	84
3.4 Applicazione del telerilevamento alle risorse ambientali: stato dell'arte e prospettive .....	85
3.5 Sensori .....	86
3.5.1 <i>Sensori passivi</i> .....	88
3.5.2 <i>Sensori attivi</i> .....	91
3.6 Sistemi (piattaforme e sensori) di telerilevamento .....	93
3.6.1 <i>Sistema terrestre</i> .....	94
3.6.2 <i>Sistema aereo</i> .....	95
3.6.3 <i>Sistema spaziale</i> .....	95

3.7 Oggetto .....	97
3.7.1 Caratteristiche dell'immagine 'oggetto' .....	97
3.7.2 Criteri di identificazione dell'"oggetto" .....	98
3.8 Immagine .....	99
3.8.1 Scala .....	99
3.8.2 Risoluzione geometrica .....	99
3.8.3 Tono .....	99
3.8.4 Tessitura .....	100
3.8.5 Struttura .....	100
3.8.6 Forma .....	100
3.9 Interpretazione .....	100

## Parte II

### Esempi applicativi per lo studio dei contesti geoarcheologici

<b>4. Antiche linee di costa</b> .....	105
4.1 Italia. Il delta del Po, un ambiente in equilibrio dinamico .....	105
4.1.1 Paleoidrografia del Po telerilevata .....	106
4.2 Yemen. Gli ittiofagi del Mar Rosso alla paleo-foce del wādī Surdūd .....	112
4.2.1 Fisiografia e morfologia dello Yemen: la Tihama .....	113
4.2.2 Morfogenesi .....	113
4.2.3 L'analisi telerilevata e i dati dal campo .....	113
4.3 Oman. Contesti funerari nel paese di Magan .....	118
4.3.1 Elementi fisiografici e morfogenetici .....	119
4.3.2 L'analisi telerilevata .....	122
4.4 India. Antico porto di Chaul lungo la costa del Konkan .....	123
4.4.1 Un porto millenario e la sua obliterazione .....	125
4.4.2 Tecnologie radiometriche .....	128
<b>5. Contesti fluviali</b> .....	133
5.1 Egitto e Sudan. Sulle sponde del Nilo .....	134
5.1.1 Geomorfologia della pianura alluvionale del Nilo a monte della terza cataratta, in connessione con i siti archeologici di Kerma e Kadruka (Sudan) .....	134
5.1.2 Il sito di Maadi nel suo contesto geomorfologico (Basso Egitto) .....	141
5.1.3 Delta del Nilo e suo antico braccio 'pelusiaco' .....	144
5.2 Oman. Millenarie oasi urbane sulle sponde del wādī banī Ḥālid .....	150
5.2.1 Dinamiche del popolamento montano tra la Tarda Età del Ferro e l'epoca islamica in Arabia orientale .....	151
5.2.2 Il corso superiore del wādī banī Ḥālid. Dighe, sorgenti e falāj di epoca islamica .....	155
<b>6. Steppe, piane, piane alluvionali e contesti lacustri</b> .....	163
6.1 India. Geoarcheologia della piana gangetica attorno a Kampilya .....	163
6.1.1 Forme mutevoli .....	163
6.1.2 Drupad Kila/Kampilya .....	165
6.2 Mongolia. Sulle orme degli antichi pastori erranti dell'Asia .....	170
6.2.1 Punti cospicui e contesti funerari .....	171
6.3 Italia. Ricostruzione paleo-ambientale della Valle d'Agredo da immagini telerilevate .....	178
6.3.1 Per una definizione dell'unità morfologica in esame .....	178
6.3.2 L'analisi telerilevata .....	180

6.4 Italia. Centuriazione romana e paleo-idrografia della Pianura Friulana .....	184
6.4.1 Individuazione, identificazione, classificazione e deduzione .....	185
6.5 Turchia. Il contesto fisico ambientale dell'area di Malatya ricostruito attraverso l'interpretazione di dati telerilevati e di ricognizioni dirette .....	189
6.5.1 Il contesto geologico della ricognizione geoarcheologica .....	190
6.5.2 Metodologia di indagine .....	193
6.5.3 Produzione della carta della suscettibilità all'erosione .....	206
6.5.4 Considerazioni finali sui rapporti tra modello insediativo e ambiente .....	216
<b>7. Panorami desertici .....</b>	<b>219</b>
7.1 Arabia Saudita .....	220
7.1.1 Paleo-laghi e cacciatori-raccoglitori del Nefūd al-Kabīr .....	220
7.1.2 Pseudo-architetture della fertile Harrat al-Harrāh .....	225
7.1.3 I qanāt, antichi acquedotti d'Arabia .....	233
7.1.4 Suggestioni tra geomorfologia, archeoastronomia e toponomastica .....	238
7.2 Yemen. Paleo-laghi e cacciatori-raccoglitori del Ramlat as-Sab'atayn .....	245
7.2.1 Approcci pionieristici eppure ancora all'avanguardia .....	246
<b>Bibliografia .....</b>	<b>251</b>
<b>Sitografia .....</b>	<b>261</b>
<b>Indice delle figure .....</b>	<b>263</b>
<b>Glossario .....</b>	<b>277</b>



## Presentazione

Negli ultimi anni il processamento delle immagini satellitari ad alta e altissima risoluzione è entrato fortemente negli studi geoarcheologici.

Lo studio 'geoarcheologico' è un approccio di tipo ambientale, in cui l'antica emergenza antropica è posta in relazione alle forme e alla natura del territorio circostante, così da comprendere l'influenza del contesto fisico nella storia del sito medesimo. Disponibilità o meno di determinate risorse naturali (acqua, suolo, vegetazione, minerali ecc.) e una evoluzione più o meno rapida del paesaggio in termini di modificazione della rete idrografica, variazione della linea di costa o mutazioni climatiche (paleo-paesaggi) devono essere sempre investigate per comprendere bene la scelta da parte dell'uomo di determinati luoghi di insediamento e attività economica.

La geoarcheologia assume inoltre un importante ruolo nella 'valutazione del potenziale archeologico', un elemento imprescindibile per orientare le scelte operative in tutti i casi in cui si prevedano interventi di costruzione e/o di trasformazione ambientale.

Ho letto non solo con grande interesse ma anche con molto entusiasmo questo volume, che arricchisce un campo di ricerca così interdisciplinare e avanzato e non posso che dirmi onorato di farne la presentazione.

Emerge dal lavoro un processo di ampia raccolta di informazioni e articolata descrizione delle fasi metodologiche e operative di interpretazione geoarcheologica delle immagini telerilevate, equamente distribuito tra teoria e applicazioni, con una ricca ed esaustiva fonte di esempi in differenti assetti morfologici e contesti temporali.

In particolare, con Bruno Marcolongo avevamo già riconosciuto la potenzialità del *Remote Sensing* in questa tipologia di studi ormai più di 20 anni fa, coniugando l'impiego di specifici *software* di *image processing* (quali Idrisi, PCI, Envi ecc.) con le immagini telerilevate allora più diffuse (Landsat-5ETM e Aster), per arrivare negli anni recenti all'utilizzo dei dati ad altissima definizione ottici multispettrali e radar.

Oggi, le moderne piattaforme satellitari, tra le quali il recente iperspettrale PRISMA dell'Agenzia Spaziale Italiana, aprono nuove avvincenti prospettive di ricerca e soprattutto offrono 'dataset' sempre più ricchi in contenuto informativo anche per la geoarcheologia.

Un percorso temporale affascinante e costruttivo, che arriva al presente lavoro e che trasmetterà sicuramente agli studenti e ai giovani ricercatori entusiasmo e interesse verso questa attività multidisciplinare, parte integrante per una moderna gestione del territorio e del suo patrimonio culturale.

Francesco Immordino  
ENEA - DISPREV, Bologna  
Laboratorio di Telerilevamento



## Prefazione

È apparso sempre più evidente nel corso degli studi degli ultimi decenni che le varie emergenze archeologiche, con particolare riguardo ai siti insediativi, per essere comprese nella loro formazione, successivo sviluppo e finale decadenza e abbandono, devono essere collocate spazialmente in rapporto alle forme del paesaggio e alle risorse naturali coeve, ovvero alle condizioni fisico ambientali del passato che sovente non corrispondono a quelle del presente.

La semplice localizzazione di un sito su di una carta topografica odierna risulta utile solo alla sua facile individuazione spaziale, ma non alla comprensione della influenza che l'acqua, la morfologia del terreno e la disponibilità di suolo o di materie prime hanno avuto su di esso durante periodi più o meno lunghi.

Diversi siti lungo fasce costiere si sono trovati ripetutamente sommersi per via delle oscillazioni del livello marino avutesi durante il medio-tardo Olocene (trasgressione 'flandriana' legata all'*optimum climaticum* verificatosi attorno al 6.000 a.C. e altre oscillazioni più recenti) in congiunzione anche a movimenti verticali della terra ferma (bradisismi), legati da un lato alla compattazione dei sedimenti dall'altro ad assestamenti vulcanici. Valga per tutti il noto esempio delle colonne in marmo cipollino del Tempio di Serapide a Pozzuoli, che portano i fori di un mollusco, il 'dattero di mare' (*Lithodomus lithophagus*), a un livello di ben 6,50 m sopra l'attuale livello medio del mare e testimoniano la massima sommersione del manufatto avvenuta durante una fase medievale (IX secolo). Molti antichi insediamenti portuali, importanti elementi di una rete di comunicazioni commerciali del passato, sono oggi interrati e lontani decine di km dalla linea di costa presente, come Adria etrusca del VI sec. a.C. che si trova ai nostri giorni a oltre una ventina di km dall'Adriatico. Per non parlare di innumerevoli siti archeologici rinvenuti in aree oggi desertiche e prive di alcuna risorsa idrica di superficie, che un tempo erano lambite da corsi fluviali perenni, quali per esempio le centinaia di siti della civiltà harappana posti nel deserto del Thar un tempo solcato dalle impetuose acque del vedico fiume Saraswati, che scendevano dall'Himalaya e fluivano verso il grande Rann di Kutch. Ricostruire soprattutto la paleo-idrografia come pure le antiche linee di costa è un passaggio fondamentale per definire correttamente l'ambito e le fasi di una ricerca sul campo dei siti antichi, cercando di ottimizzare i tempi e le energie necessari.

Pertanto, questo manuale di geoarcheologia, focalizzato in particolare su un approccio geomorfologico sostenuto dall'impiego del telerilevamento, nasce come strumento di lavoro e incentivo per la ricerca per quegli studenti dei corsi di laurea in Archeologia che si affacciano allo studio del contesto archeologico nella sua accezione più ampia, ovvero nella definizione del rapporto sincronico tra un sito archeologico e il suo paleo-ambiente.

Frutto, da un lato, di un'esperienza quarantennale che risale ai primi anni '80, nell'ambito dei pionieristici studi paleo-ambientali nella Penisola arabica e altrove (B. Marcolongo), e dall'altro alla luce delle più recenti Missioni archeologiche condotte in contesti arabi (R. Loreto), questa edizione di un manuale di geoarcheologia intende presentare quelle discipline che applicate all'archeologia determinano il concetto di *landscape archeology* o archeologia del paesaggio, con particolare riferimento alle procedure di ricerca da remoto.

Sulla scia del 'Laboratorio di geomorfologia applicata all'archeologia' condotto nell'ambito dell'insegnamento di Archeologia e storia dell'arte del Vicino Oriente antico presso il Dipartimento di Asia, Africa e Mediterraneo dell'Università di Napoli L'Orientale, questo volume propone gli strumenti base atti a sviluppare una sensibilità pratica e teorica per l'osservazione e la conseguente comprensione di un contesto geoarcheologico da remoto. Di conseguenza, questo manuale intende fornire, *in primis*, i rudimenti della geomorfologia e del telerilevamento, discipline votate all'osservazione, identificazione e descrizione di quegli elementi dell'ambiente

che possano rivelare l'intimo rapporto tra un sito archeologico e le relative risorse ambientali, necessariamente sottese a specifiche variabili morfologiche di un territorio.

A tale riguardo risulta particolarmente utile comprendere le cause morfogenetiche (geologiche e climatiche) che sono responsabili delle modificazioni del territorio, anche per eventuali interventi di salvaguardia e restauro delle emergenze medesime come nel caso di processi di alterazione salina, movimenti di deformazione superficiale, erosione o franamenti e via dicendo. Così questo tipo di approccio geoarcheologico non solo contribuisce alla ricostruzione del passato di un sito, ma altresì fornisce gli elementi decisionali e gestionali per la sua protezione e conservazione nel futuro.

Punto successivo, ma non meno importante, è il fornire agli studenti una serie di casi studio, approfonditi nel corso di una pluridecennale attività di ricerca sul campo, che permettano di osservare, nella pratica, secondo quali approcci e sviluppi tali discipline contribuiscono ad accrescere il potenziale informativo di una regione caratterizzata da manifestazioni culturali peculiari.

Tale potenziale è ulteriormente incrementato dall'inserimento dei vari dati fisico-ambientali e archeologici nei più recenti sistemi informativi geografici (GIS), che attraverso una specifica funzione di interrogazione (*query*) aumentano enormemente la capacità di individuare relazioni topologiche spazio-temporali tra emergenze antiche, morfologie (*landforms*) e risorse naturali.

Questo impulso apre scenari nuovi nella ricerca archeologica di campagna, per cui la ricognizione viene guidata e ottimizzata dalle relazioni topologiche messe in luce preliminarmente, portando ad arricchire il panorama conoscitivo di intere aree male o affatto conosciute.

Romolo Loreto e Bruno Marcolongo  
Napoli - Abano Terme, 5 ottobre 2022

# 1. Introduzione

## 1.1 Geomorfologia e telerilevamento nell'era degli *Open Access Data*

Dai tempi in cui Anassimandro di Mileto, filosofo e geografo presocratico, per primo nel VI sec. a.C. concepì e rappresentò l'intera Terra come un disco piatto, con Europa e Asia separati dal Mare Mediterraneo e circondati dall'Oceano (Figura 1), alle odierne riprese da satellite con elevata risoluzione della superficie del nostro Globo (Figura 2), sono trascorsi molti secoli e in essi è racchiusa tutta l'evoluzione della ricerca fisico-naturalistica che ha sempre attratto l'uomo. Ma un sottile legame unisce questi due momenti apparentemente così lontani della storia, legame rappresentato dal perenne tentativo dell'umanità di rapportarsi alla terra su cui vive, in una continua dinamica di sostentamento, sfruttamento e modificazione delle risorse e delle condizioni ambientali.



Figura 1: Ecumene di Anassimandro di Mileto (VI sec. a.C.). *Viganoni e Galluccio (edd.) 2007.*



Figura 2: Ecumene di Google Earth (XXI sec. d.C.).

Questa è la chiave di lettura per entrare nel tema del presente manuale, che cercherà di mostrare con un linguaggio interdisciplinare come le forme del paesaggio e le risorse ambientali abbiano influenzato o siano state influenzate, nel corso dei millenni, dalle attività e dagli insediamenti umani.

Il concetto di 'paesaggio' ha subito via via una lunga evoluzione a partire dall'idea iniziale nel tardo medioevo di una sua percezione soggettiva in pittura e letteratura, per poi chiarirsi in aspetto scientifico e oggettivo a partire dal primo Ottocento nell'ambito delle discipline geografiche con i lavori di Karl Ritter e Alexander Von Humboldt, che lo definiscono una entità composta di natura e cultura testimonianza della storia dell'uomo. Successivamente, il paesaggio si viene delineando come una complessa combinazione di forme e fenomeni interdipendenti e mutevoli nel tempo, ovvero come espressione geodinamica integrata di numerosi fattori naturali e antropici (Panizza e Piacente 2003).

Il paesaggio che si osserva risulta quindi il prodotto dell'evoluzione nello spazio e nel tempo di variabili fisiche, biologiche e antropiche che si influenzano vicendevolmente. Questo è vero soprattutto nell'Olocene, iniziato convenzionalmente circa 11.700 anni fa, che rappresenta l'intervallo temporale nel quale sono collocabili la quasi totalità delle culture e dei siti pre-protostorici qui considerati. Da allora si sono succedute numerose variazioni climatiche responsabili

di mutazioni anche rilevanti, per esempio dei reticoli di drenaggio e dell'andamento delle linee costiere di molte aree del Vicino e Medio Oriente.

La Geomorfologia, che cerca di spiegare le forme della superficie del terreno risalendo alle cause e ai processi che le hanno generate e ricostruendo la loro evoluzione, è pertanto la scienza fisica che può dare un contributo fondamentale alla comprensione del paesaggio e delle sue trasformazioni ai fini della ricerca geoarcheologica.

Avere poi oggi a disposizione uno strumento di osservazione privilegiato di tali forme come il Telerilevamento da satellite, le cui immagini a partire dai primi anni '70 del secolo scorso vengono riprese con sensori sempre più sofisticati in termini di risoluzione spaziale, spettrale e temporale, rappresenta una opportunità unica di poter espandere gli studi anche in territori di difficile o nullo accesso e di chiarire la collocazione spaziale dei siti e la loro storia insediativa.

A tal proposito, all'indirizzo degli studenti di archeologia, si evidenzia la disponibilità di piattaforme *open data*, quali *Google Earth* (Gorelick *et al.* 2017) o *GloVis* (*Global Visualization Viewer*), che già permettono di affrontare analisi telerilevate o foto-interpretative raffinate che possano confluire in piattaforme GIS *open access* come *Quantum* o *GRASS*. *Google Earth*, un *browser* o *repository* di immagini satellitari consultabili, ma non acquisibili ad alta definizione, già permette di elaborare, ovvero vettorializzare, le emergenze naturali o antropiche del paesaggio, generando prime carte geoarcheologiche telerilevate implementabili su piattaforma GIS (Figura 3).

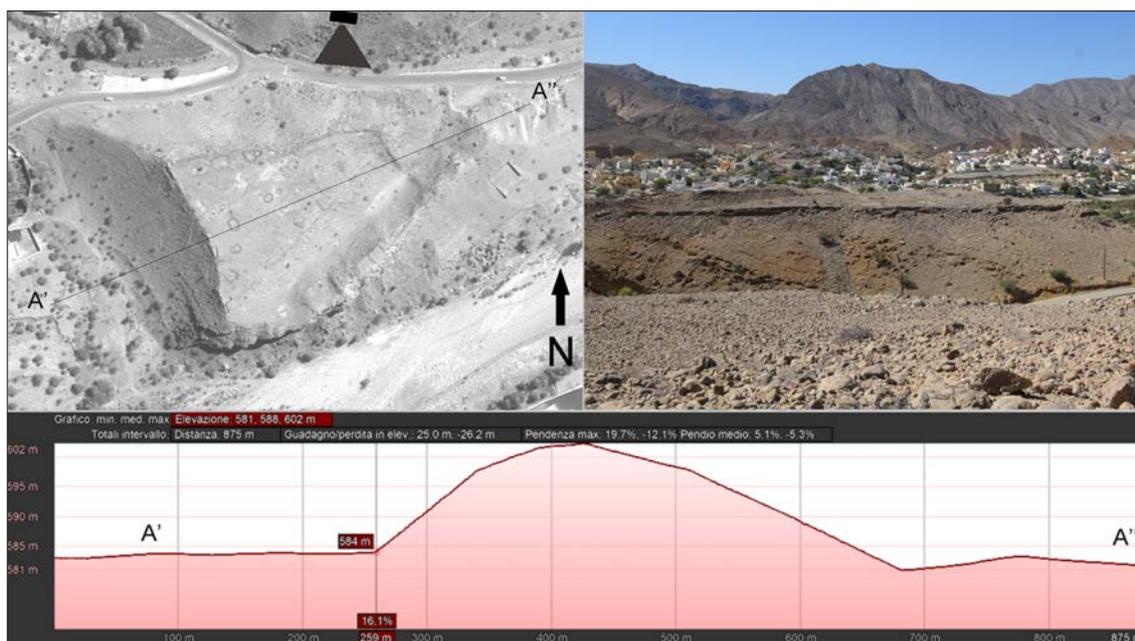


Figura 3: Esempio di combinazione di dati satellitari e da campo. In alto a sinistra, immagine satellitare Pléiades ad alta risoluzione (50 cm di dettaglio) dell'area urbana del sito di wādī banī Ḥālīd (WBK1), Oman, I sec. a.C. - IV sec. d.C.; in basso, il profilo altimetrico del tell di WBK1 ottenuto mediante elaborazione da Google Earth; in alto a destra, vista da nord di WBK1.

GloVis, inoltre, rappresenta un ulteriore motore di ricerca per l'acquisizione di immagini Landsat che, sebbene a bassa risoluzione, risultano particolarmente efficaci per analisi di livello regionale<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Landsat, acronimo per *Land Satellite*, ovvero satellite per l'osservazione della terra, all'inizio chiamato ERTS cioè *Earth Resources Technology Satellite* o satellite tecnologico per le risorse terrestri. I satelliti di tale serie

Soprattutto, essendo queste immagini multispettrali di formato *geotiff* forniscono, sotto forma di gamme a falsi colori, diversi livelli di lettura dei terreni, facilitando la definizione di un contesto paleo-ambientale (Figura 4).

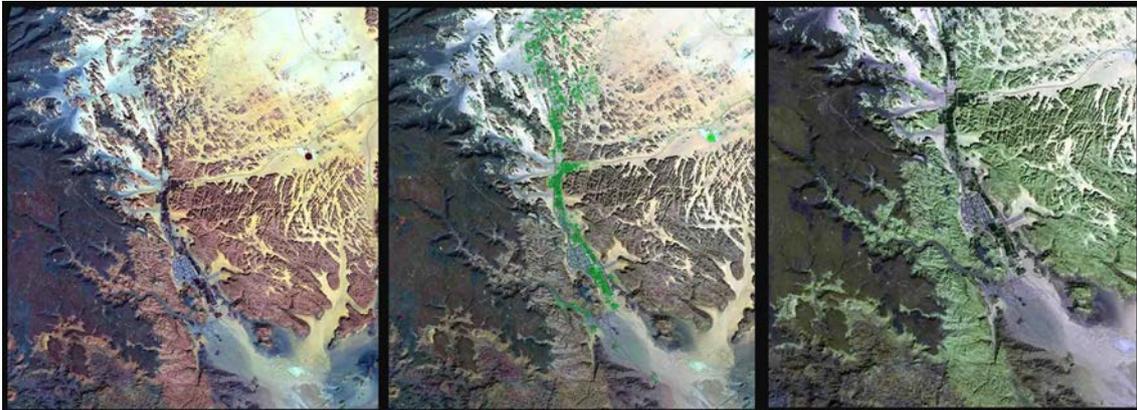


Figura 4: Esempio di tre differenti composizioni a falsi colori delle bande (da sinistra a destra: 1-3-5; 3-5-7; 7-5-3) di una stessa immagine Landsat, realizzate per evidenziare depositi sabbiosi, copertura vegetale e affioramenti di arenarie. Oasi di Dedān, odierna al-ʿUla, Arabia Saudita.

Ancora, particolarmente utili per i contesti Vicino e Medio orientali antichi sono le raccolte *open source* di immagini Corona (Fowler 2013), scatti da piattaforma satellitare a scopi militari declassificati e risalenti all'epoca della Guerra Fredda e che pre-datano di circa mezzo secolo le più recenti attività agricole o i più recenti fenomeni di rapida urbanizzazione o costruzione di dighe, che possano aver obliterato antichi siti archeologici nel loro contesto paleo-ambientale (Casana 2020a, 2020b; Casana e Cothren 2007, 2013).

## 1.2 Punti di riferimento concettuali e metodologici

### 1.2.1 Per un approccio geoarcheologico

La comprensione delle reciproche influenze tra uomo e ambiente nel corso del tempo è l'obiettivo principale di una ricerca geoarcheologica, che non intenda rimanere confinata in un ambito puramente speculativo, ma contribuire alla conoscenza globale del territorio prima di qualsiasi azione progettuale e degli eventuali interventi pianificatori e fattuali (Panizza 2001).

Nel perseguire questa conoscenza, strumento ormai insostituibile e affatto complementare alla ricerca bibliografica e all'indagine diretta svolta con metodi classici è il 'telerilevamento', scienza recente che sfrutta i dati via via più dettagliati e affidabili acquisiti da varie piattaforme (terrestre, aerea e spaziale) con sensori che registrano l'energia riflessa (multispettrale), emessa (termico) e retrodiffusa (*radar*) dalla superficie terrestre.

L'uomo da sempre ha cercato di conquistare punti prospettici privilegiati per osservare e comprendere la realtà, non solo nella sua organizzazione spaziale ma anche nelle sue modificazioni temporali. Poter conseguire una visione di sintesi, ma connotata da sufficiente dettaglio, della terra e del cosmo intero, ha rappresentato e soprattutto rappresenta oggi l'impegno e la

furono lanciati con sequenza triennale dal 1972 al 1978 (Landsat-1, 2, 3 MSS) e in seguito nel 1982 (Landsat-4 MSS e ETM), 1984 (Landsat-5 MSS e ETM), 1993 (Landsat-6 ETM, non funzionante), 1999 (Landsat-7 ETM+), 2013 (Landsat-8 OLI e TIRS). Immagini geo-referenziate e a piena risoluzione si possono scaricare gratuitamente dal sito ufficiale <https://glovis.usgs.gov/>.

sfida principale della comunità culturale, nel tentativo di comprendere i sottili ma tenaci e interdipendenti legami tra uomo e natura (Figura 5).



Figura 5: ‘Sentiero degli Spiriti’ costituito da un allineamento di 54 cairns allungato per 180 m da SE a NO sulla sommità della ‘Grande Montagna Sacra’ nei Gobi Altai in Mongolia, in prossimità del tumulo dell’Età del Bronzo di Puntsag Oboo.

Come è noto e di comune dominio, la disponibilità di immagini riprese da piattaforme spaziali, più o meno prossime alla superficie terrestre (da qualche centinaio a qualche migliaio di km), ha rivoluzionato radicalmente a partire dai primi anni '70 la percezione dei fenomeni ambientali e l'analisi degli insediamenti antropici in relazione alle risorse stesse, anche con pionieristici approcci di tipo ‘spaziale’ (Cliff e Ord 1973) o computazionale (Bevan e Lake 2016), ovvero nella ricerca di ‘modelli di insediamento’, anche attraverso equazioni statistiche spaziali (Negre *et al.* 2018) o DEM *digital elevation model* (Wheatley 1995), che sottendono a trame cognitive legate a una sapiente conoscenza del proprio ambiente e cioè delle risorse che ivi giacciono.

Inizialmente, con il lancio dei primi satelliti della serie Landsat le applicazioni dei dati telerilevati furono di carattere strettamente metodologico, vista la loro ridotta risoluzione geometrica (*pixel*). Poi nel decennio tra gli anni '80 - '90 le immagini si fecero più puntuali e dagli studi su aree desertiche o di scarso insediamento, prive spesso di cartografia topografica di base (non se ne conoscevano con precisione gli assi viari e i tratti fisiografici), si passò a investigare aree densamente

popolate, ricche di risorse tanto naturali che culturali, ma nel contempo pure di problemi ambientali con riserve spesso emunte senza un vero piano organico di sfruttamento e salvaguardia.

Questi ambienti complessi sono tipica espressione delle regioni fortemente industrializzate, sovente con spesse radici storico-culturali, dove sulle strutture antropiche del passato si sovrappongono, ma più giusto è dire che si giustappungono (termine che implica un adeguamento morfologico del recente alle forme più antiche, mentre la sovrapposizione rimanda a una cancellazione delle tracce del passato) numerosi modelli di organizzazione del territorio. Esse, pertanto, richiedono da un lato informazioni di dettaglio e dall'altro raffinate procedure di analisi e rappresentazione.

È quindi soprattutto a partire dalla fine degli anni '80 che la messa a punto e la disponibilità di satelliti con sensori a più elevata risoluzione, come il satellite indiano IRS 1<sup>2</sup> (A, 1988; B, 1991; C, 1995; D, 1997) e poi i satelliti commerciali Spot<sup>3</sup> ed Eros<sup>4</sup>, rendono fattibile e produttiva la sorveglianza dell'ambiente a livello provinciale e comunale con la possibilità di produrre carte tematiche a scale successive di dettaglio tra 1:50.000 a 1:5.000. In questo contesto si inseriscono i dati registrati dal satellite Aster, le cui caratteristiche geometriche e spaziali si prestano bene per studi a scale intermedie tra 1:25.000 e 1:10.000<sup>5</sup>.

Più recentemente, dagli inizi del 2000 il numero di satelliti utili per l'osservazione terrestre è cresciuto esponenzialmente e di pari passo le caratteristiche più significative delle loro immagini, come la risoluzione geometrica a terra e il numero delle bande spettrali registrate o la ripetitività delle riprese stesse, sono enormemente migliorate<sup>6</sup>.

Nel variegato panorama dei dati che si possono utilizzare in una ricerca geoarcheologica emergono le immagini di Ikonos (1 m Pancromatico bianco e nero -B/N- e 4 m Multi Spettrale -MS-, ma con riprese nadirali la risoluzione aumenta fino a 0,8 m nel pancromatico B/N e 3,2 m nel multispettrale a 4 bande); di GeoEye-1 (risoluzione di 0,46 m PAN B/N e 1,8 m MS); e GeoEye-2 (0,31 m PAN B/N e 1,24 m MS); della serie WorldView-1 (0,46 m PAN B/N), 2 (0,46 m PAN B/N e 1,84 m MS), 3 (0,31 m PAN B/N, 1,24 m MS e 3,7 m Short Wave Infrared SWIR); di Pléiades-1A e 1B (0,5 m PAN B/N e 2,0 m MS); QuickBird (0,65 m PAN e 2,62 m MS); TripleSat (0,8 m PAN e 3,2 m MS); Gaofen-2 (0,8 m PAN e 3,2 m MS); Kompsat-3 (0,7 m PAN e 2,8 m MS); Kompsat-3a (0,55 m PAN e 2,2 m MS) e altri ancora operati da varie agenzie spaziali statali e da compagnie commerciali private.

<sup>2</sup> IRS-1 (*Indian Remote Sensing* della *National Remote Sensing Agency*) forniva immagini a risoluzione di 5 m nella banda pancromatica (PAN) e 20 m in quelle multispettrali (MS).

<sup>3</sup> Serie di satelliti Spot (*Satellite for l'Observation de la Terre*), giunta oggi al numero 7, equipaggiati con sensori PAN e MS a risoluzioni via via crescenti dai 10 m PAN e 20 m MS del primo, posto in orbita nel 1986, a 1,5 m PAN e 6 m MS dell'ultimo lanciato nel 2014 e attualmente attivo in coppia con lo Spot-6. L'archivio completo di Spot 6 e 7 è disponibile grazie all'ESA (*European Space Agency*) all'indirizzo <https://earth.esa.int/eogateway/catalog/spot-1-to-7-full-archive-and-tasking-and-spotmaps-2-5-dataset> o <https://www.intelligence-airbusds.com/en/4871-geostore-ordering>.

<sup>4</sup> Eros (*Earth Remote Observation Satellite*) -A (con risoluzione di 2 m PAN) e -B (con risoluzione di 0,70 m PAN).

<sup>5</sup> Aster, acronimo di *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*, è un avanzato sensore multispettrale che orbita a bordo della piattaforma EOS-AM1 Terra, lanciata nel dicembre del 1999, insieme ad altri quattro sensori (MODIS, MISR, CERES E MOPITT). Esso acquisisce dati spettrali quantitativi della radiazione riflessa o emessa dalla superficie della terra, nelle finestre atmosferiche 0.5-2.5 µm o 8-12 µm, con varie risoluzioni geometriche (3 bande VNIR a 15 m; 6 bande SWIR a 30 m; 5 bande TIR a 90 m).

<sup>6</sup> Un eccellente link onnicomprensivo di tutti i satelliti con sensori a elevata risoluzione geometrica a terra compresa tra 0,31 m e 2 m è quello della *Satellite Imaging Corporation* (SIC), società fondata agli inizi degli anni '90 del secolo scorso e divenuta rapidamente *leader* nel campo dei Sistemi Informativi Geografici (GIS) basati su dati satellitari integrati, <https://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/>.

A completamento di questa carrellata di immagini disponibili si aggiungono anche le summenzionate fotografie storiche spaziali declassificate della serie Corona-Argon-Lanyard<sup>7</sup> (risoluzione geometrica a terra compresa tra 2 e 6 m), riprese dagli USA tra il 1960 e il 1972 a scopi militari e rese di dominio pubblico nel 1995 (Philip *et al.* 2002).

Si nota quindi un'evoluzione tecnologica continua del sistema telerilevamento (piattaforme, sensori, raccolta, trasmissione ed elaborazione dei dati) e un'espansione del suo uso in tutti i campi delle scienze dell'ambiente, con specifico riguardo anche alla ricerca archeologica in cui conta soprattutto il dettaglio morfologico piuttosto che quello spettrale delle singole bande.

A seconda delle aree di interesse si può scegliere la copertura ottimale in termini di risoluzione geometrica, ripresa nel periodo migliore dell'anno per la presenza o meno di copertura vegetale e di umidità del terreno, che è ormai risaputo essere, insieme con il micro-rilievo, 'indicatori' fondamentali nell'interpretazione di strutture antropiche sepolte.

### 1.2.2 Telerilevare è analizzare e leggere il terreno

A questo punto è opportuno riprendere sinteticamente alcune riflessioni maturate nel corso degli anni sull'impiego del telerilevamento nel campo delle ricerche geoarcheologiche, sia descrittive sia predittive. Il rapporto tra archeologia e telerilevamento ha cominciato ad articolarsi in forma più precisa e consolidarsi in modo coerente con la comparsa di nuovi sensori installati su piattaforme differenti e complementari da un punto di vista dello spettro registrato rispetto alle convenzionali foto aeree. Le vie di indagine così si ampliano e si assiste anche, contestualmente, a una evoluzione del tipo di interesse culturale verso le testimonianze del passato. In effetti, questo interesse non è più o solamente motivato dalla ricerca dell' 'oggetto' antico (un sito archeologico per esempio), definito nella sua unicità e bellezza e da studiarsi singolarmente, ma piuttosto dalla analisi e comprensione dell'oggetto nel suo contesto fisico e posto in relazione alle condizioni paleo-ambientali sincroniche esistenti. Proprio per tale ragione, si avverte la necessità sempre maggiore in ambito archeologico di spostare l'attenzione sull'ambiente naturale (concepito questo come contenitore di ogni testimonianze storica e dunque paesaggio - *landscape*) e i mutui rapporti con i diversi modelli di insediamento del passato. Questa posizione dell'archeologia spaziale, o perlomeno di alcuni suoi settori quali la preistoria, trova precise risposte operative nel telerilevamento capace di fornire, tanto a livello di acquisizione delle immagini quanto a quello di trattamento e interpretazione dei dati, elementi che permettono la ricostruzione tematica paleo-geografica e la valutazione dei rapporti spazio-temporali tra risorse naturali, elementi del paesaggio e antichi siti antropici.

In questo contesto, va sottolineata con forza la necessità della coerenza temporale tra dati ambientali e dati culturali-archeologici. Ciò implica che si deve sempre riproporre la situazione paleo-ambientale esistente al momento dell'occupazione del sito per comprendere le relazioni reciproche comunità-ambiente. In effetti, la semplice conoscenza degli elementi fisiografici attuali conduce a interpretazioni totalmente errate, soprattutto in presenza di un'evoluzione dinamica relativamente più o meno rapida del contesto fisico, come per esempio in tutte le zone di transizione costiera e lagunare, oppure in numerose pianure fluviali o contesti desertici (Figura 6).

<sup>7</sup> <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-declassified-data-declassified-satellite-imagery-1>. U.S. Geological Survey (2008) - *Declassified intelligence satellite photographs*. U.S.G.S. Fact Sheet 2008.

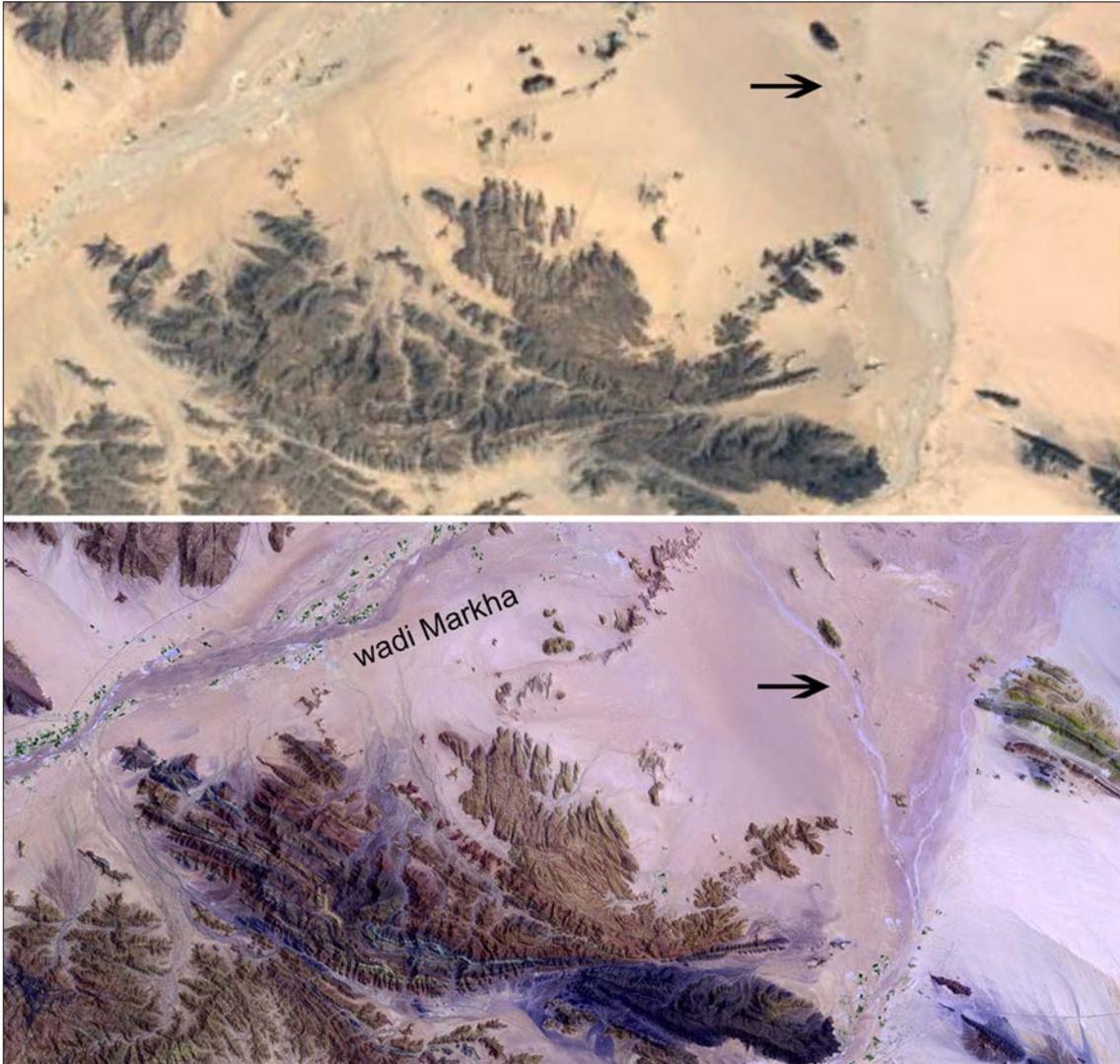


Figura 6: Particolare del deserto interno yemenita, il Ramlat as-Sab'atayn, con un dettaglio dell'area del wādī Markha cuore dell'antico regno di Awsān (VIII-VII sec. a.C.). L'elaborazione Landsat ETM a falsi colori, bande 3-5-7 (in basso), a dispetto dell'apparente paesaggio uniforme percepito a colori naturali su immagine Ikonos da Google Earth (in alto), rivela la reale paleo-idrografia oggi coperta da strati di accumulo sabbioso eolico.

L'elaborazione e l'interpretazione delle informazioni telerilevate contribuisce in larga misura a ricostruire le condizioni paleo-ambientali, attraverso l'identificazione delle forme paleo-idrografiche e più in generale l'analisi dell'evoluzione geomorfologica delle forme del paesaggio (fluviali, lacustri, marine, eoliche).

Sulla scorta di questi concetti teorici fondamentali, le informazioni deducibili dai dati spaziali a fini archeologici si possono riassumere in tre tipologie:

- la prima tipologia si situa al livello descrittivo dei differenti parametri paleo-ambientali, la cui evoluzione nello spazio e nel tempo viene posta in relazione con la tipologia e la distribuzione dei siti archeologici;
- la seconda tipologia si fonda sulla identificazione e descrizione diretta di grandi strutture, anche se parzialmente sepolte, più o meno complesse ed estese, quali i sistemi di cen-

turiazione romana, sistemi di irrigazione o canalizzazione artificiale, i grandi complessi urbani ecc., i quali tutti sono direttamente in funzione del potere risolvete (spaziale e spettrale) dei dati telerilevati medesimi;

- la terza tipologia concerne i modelli di previsione sull'esistenza o meno di emergenze archeologiche in nuove aree, in dipendenza dell'accertato legame tra caratteristiche geomorfologiche, situazioni paleo-ambientali e siti archeologici in aree similari già studiate.

Naturalmente, trattandosi in gran parte di elementi sepolti a profondità variabili, il processo di interpretazione deve essere svolto interamente fino alla sua fase 'deduttiva', fase che si concentra sulle relazioni intercorrenti tra aspetti del paesaggio in senso lato e le eventuali strutture profonde, evidenziate da specifici 'indicatori' quali l'umidità del terreno, la copertura vegetale, la tessitura dei suoli e così via.

A conclusione di tali *landmarks* che introducono alla pratica interpretativa, che si auspica possa essere sviluppata o per meglio dire coltivata nel tempo dal telerilevatore, si anticipano quei passaggi chiave nella fase di osservazione di una immagine satellitare che racchiude ogni potenziale dato relativo al rapporto uomo-ambiente, per una definizione del paesaggio antico.

L'interpretazione di immagini si fonda sullo studio dei parametri spettrali e geometrici (tono, tessitura, struttura e forma), sviluppato attraverso le fasi successive della 'individuazione', 'identificazione', 'classificazione' e 'deduzione'. Essa deve tenere conto contestualmente delle caratteristiche geometriche del tipo di ripresa e del sensore impiegato (per esempio, camera metrica con ripresa verticale od obliqua, oppure camera multibanda con ripresa panoramica ecc.). È importante ricordare la necessità di un confronto tra i dati tematici estratti dall'immagine con il processo interpretativo e quelli rilevati direttamente a terra con varie tecniche per definire una serie di 'chiavi interpretative' valide in generale. Di conseguenza è indispensabile che l'interprete possieda un valido bagaglio culturale e una solida esperienza di campagna, soprattutto nella disciplina in cui rientra il tipo di studio da svolgere.

Le prime due fasi del processo, indicate assieme anche con il termine 'lettura', permettono un'osservazione preliminare dei principali aspetti fisiografico-morfologici e antropici del territorio ripreso. Sono pressoché individuati e identificati subito 'oggetti' come strade, edifici e parcelle agricole, oppure corsi d'acqua, rilievi montuosi, zone paludoso-lacustri, piane alluvionali ecc. (ciò tenendo conto delle loro differenze tonali e morfologiche, che determinano contrasti, tessiture e strutture diverse); mentre altri 'oggetti' più complessi, quali unità morfologiche e litologiche, sono identificabili solo se l'interprete possiede un'adeguata formazione di base.

Le due ulteriori fasi della classificazione e deduzione costituiscono lo stadio più avanzato di 'analisi' dell'immagine. Gli 'oggetti' identificati sono classificati secondo categorie funzionali all'obiettivo della ricerca; così si possono distinguere litotipi con variazioni tonali, tessiturali e strutturali molto diverse (calcari, argille, graniti, scisti ecc.), oppure organizzazioni del paesaggio agrario ordinate secondo schemi più o meno omogenei (parcelle isorientate e regolari delle grandi zone di bonifica recente, o di numerose aree pianeggianti con tracce di centuriazione romana; parcelle poligonali e irregolari dei piani alluvionali o dei terreni più marginali e instabili ecc.).

Approfondendo poi i rapporti spaziali tanto tra le varie categorie quanto tra gli 'oggetti' di una stessa categoria, si deducono informazioni sulla natura di strutture sepolte (naturali o antropiche), che influenzano la distribuzione degli indicatori di superficie. Lo studio della distribuzione dei litotipi a diversa permeabilità può far dedurre la presenza o meno di falde idriche, come pure ipotizzare un modello di circolazione sotterranea con zone di ricarica, direttrici di deflusso e aree di accumulo. L'analisi della tipologia e dell'orientamento delle parcelle agrarie permette la deduzione dell'esistenza di paleo-alvei e meandri relitti, anche se si osserva un pa-

esaggio fortemente antropizzato. L'osservazione dell'andamento e della posizione topografica (planimetrica e altimetrica) delle forme di erosione selettiva (cenge, versanti a scalinata ecc.) indica la giacitura delle rocce stratificate a differente litologia e attraverso la classificazione delle forme (*cuesta, hogback, anticlinale* ecc.) si deduce l'assetto geo-strutturale.

1.3 Geoarcheologia e telerilevamento come strumenti per una archeologia del paesaggio a connotazione integrata. Breve storia degli studi

### 1.3.1 Intenti

Alla luce di quanto si è detto, scopo di questo manuale è fornire all'archeologo uno strumento, ma anche un approccio teorico, volto a contribuire alla conoscenza di un fenomeno antropico nel suo contesto, operando attraverso una visione da remoto che preveda determinate azioni e un grado di osservazione che, sebbene sia inevitabilmente soggettivo, si forgia sulla consolidata pratica e sulla verifica sul campo.

A prescindere dalla natura antropica del fenomeno in esame, un'ottica da remoto contribuisce, *in primis*, alla definizione del paesaggio in questione, producendo quella prima banca dati informativa che è una carta archeologica telerilevata basata sulla definizione, attraverso metodi empirici, del paleo-ambiente, non già della topografia storica, moderna o contemporanea. Ci si limita a citare solo alcuni tra i lavori pionieristici o più recenti di chi ha operato in tal senso in aree che vanno dal mondo mediterraneo all'Asia e alle Americhe, come B. Marcolongo e T.J. Wilkinson, che sin dagli anni '70 del secolo scorso hanno contribuito in maniera determinante allo studio dei contesti paleo-ambientali preistorici (olocenici) e protostorici della Penisola araba e non solo (Baggio *et al.* 1983; Barisano e Marcolongo 1987, 1993; Caneva *et al.* 1986, 1995; Cleuziou *et al.* 1992; Dallaporta *et al.* 1996; de Maigret *et al.* 1989; Inizan *et al.* 1998; Marcolongo 1983, 1987, 1988, 1992, 1994, 1996, 1997, 1998, 2002, 2004, 2007; Marcolongo e Barisano 2000; Marcolongo e Morandi-Bonacossi 1997; Marcolongo e Mozzi 1993a-b, 1997, 1998, 2001; Marcolongo e Palmieri 1983, 1988, 1990, 1992; Marcolongo e Surian 1993, 1997a-b; Marcolongo e Tosi 1995; Wilkinson 2003); in Toscana, per la Val di Cecina, N. Terrenato (Terrenato 1992); Panizza e Piacente per i contesti costieri (Panizza e Piacente 2008); P. Arthur e il progetto 'Ager Falernus' per la definizione del contesto agrario romano nella Campania settentrionale (Arthur 1991); Lawrence, Altaweel e Philip per il Vicino Oriente antico (Lawrence *et al.* 2019) e J. Casana per il Levante (Casana 2008); più recentemente, M. Harrower (Harrower 2016) per la definizione dei contesti paleo-idrografici dell'Arabia meridionale; Petraglia e Rose, e Groucutt e Petraglia per i contesti paleolitici della Penisola araba (Petraglia e Rose 2009; Groucutt e Petraglia 2012); o ancora, relativamente a contesti che spaziano dall'Europa alle Americhe, Colin Renfrew e Paul Bahn (Renfrew e Bahn 2019), nonché Maurizio Tosi (Tosi 1975), i quali hanno definito il concetto di analisi di distribuzione spaziale, ovvero il rapporto tra siti (o spazio), risorse e tempo per la definizione delle dinamiche di interazione tra l'uomo e l'ambiente in un dato contesto culturale.

Dunque, si intende per approccio o procedura geomorfologica da remoto uno strumento che partecipi a definire quelle discipline quali la geoarcheologia (Brancucci *et al.* 2011; Cremaschi 2005), ovvero l'archeologia ambientale (Farinetti 2012; Cambi 2011; Cambi e Terrenato 1994), ovvero l'archeologia del paesaggio (*landscape archeology*) (Goldberg e Macphail 2006; Wilkinson 2003), ma anche la topografia antica (Quilici Gigli 2004; Cambi e Terrenato 1994; Bonora *et al.* 2000; Dall'Aglio 2011) o la climatologia (Butzer 2011; Cordova *et al.* 2017), caratterizzate da una comunione d'intenti e da sfaccettature che talvolta sfumano l'una nell'altra, poiché tutte, a prescindere dall'ottica geologica, archeologica, paleo-climatica o storica e toponomastica preferita, hanno come obiettivo la conoscenza di un evento antropico nel suo contesto paleo-ambientale.

D'altronde, e meglio si comprende la natura di tale approccio geomorfologico da remoto, la tendenza a posizionare i reperti archeologici nel loro esatto contesto di rinvenimento, diacronico e spaziale, è alla base della concezione dell'archeologia come una disciplina scientifica.

Oggi, ogni progetto archeologico che si interroghi sul rapporto reciproco, nel tempo, uomo-ambiente utilizza piattaforme GIS in grado di convogliare, all'interno di un sistema di elaborazione dati, informazioni di natura culturale, ambientale e spaziale (Wheatley e Gillings 2002). La capacità, dunque, di documentare in senso stratigrafico e spaziale un reperto, che sia di natura antropica o sedimentologica, botanica, zoologica ecc. va di pari passo con lo sviluppo di sistemi informatici e si è affinata a tal punto da formulare il concetto di *digital humanities* (umanesimo digitale), cioè il sistematico impiego di risorse digitali a supporto delle scienze umanistiche, per la loro comprensione, conservazione, valorizzazione e fruizione.

Eppure, la capacità o sensibilità del rilevatore, da remoto o sul campo, di porsi quelle domande che inneschino il processo interpretativo non è conseguente all'applicazione digitale, ma ne è alla base. Pertanto, la consapevolezza della necessità di registrare le informazioni di natura antropica nel loro esatto contesto stratigrafico-temporale e spaziale è alla base dello sviluppo di un pensiero archeologico.

### 1.3.2 Antefatto

Questa consapevolezza di registrare le informazioni nella loro esatta cornice spaziale risale al lavoro pionieristico del Generale Pitt-Rivers che, a partire dal 1880 circa, operò nel sud-est dell'Inghilterra, tra Dorset e Wiltshire, nel sito tardo romano di Bokerly. Pitt-Rivers, che non si limitò a porre l'accento sui pezzi più spettacolari, produsse un'accurata documentazione, diremmo oggi di tipo tridimensionale, composta da carte e sezioni che illustrassero con esattezza il luogo di rinvenimento di ogni manufatto emerso, poiché tutti, era sua opinione, avrebbero concorso alla comprensione di quel dato fenomeno (Thompson 1977).

Ancor più suggestivo sarebbe accostare il tentativo di Heinrich Schliemann, riuscito nel 1872, di identificare l'antica Ilio con l'attuale Hissarlik e non, come si credeva, con Burnabashi, essenzialmente sulla base di una lettura paesaggistica dell'Iliade, ovvero ricercando quelle fonti d'acqua citate nel testo omerico: equivale a dire mettere in campo un approccio geomorfologico o topografico *ante litteram*.

Pure l'archeologia marxista ha contribuito a determinare un pensiero critico che contempi, oltre a quegli oggetti preziosi propri di una sovrastruttura elitaria, le tracce di una storia nascosta, appartenuta a quegli oggetti poveri e silenziosi e ai condizionamenti ambientali ai quali i complessi socio-economici potevano soggiacere (Capogrossi *et al.* 1978).

Sta di fatto che è con *Archaeology and Society* (1957) che Graham Clarke pose decisamente l'accento sul rapporto funzionale tra le evidenze antropiche e l'ambiente (*environment*) in cui queste erano calate, riservando un ruolo forse eccessivamente deterministico ai sistemi ecologici che indirizzavano il comportamento umano (Clarke 1957).

D'altro canto, l'inizio della storia del telerilevamento si può porre nel 1839, quando fu scattata la prima immagine fotografica a opera di Daguerre e Niepce. E così, nel 1840 Argo, direttore dell'Osservatorio di Parigi, utilizzò fotografie a uso cartografico, mentre G.F. Tournachon nel 1858 compilò carte topografiche da fotografie prese da un pallone innalzato ad alcune centinaia di metri sopra Parigi (Ceraudo 2013). Un ulteriore passo in avanti avvenne nel 1860, quando J.W. Black e S. King, a bordo del pallone *Queen of the air*, fotografarono parte della città di Boston. A partire da questo momento il rilievo aereo divenne uno strumento imprescindibile non solo per la produzione di carte topografiche, ma anche per analisi meteorologiche, indagini sulla fisica dell'atmosfera e osservazioni militari in genere. E di fatti, esso fu impiegato anche in archeologia, per la prima volta da F. Stoltze, nel 1879, per documentare lo stato dei lavori degli scavi

tedeschi a Persepoli, o da G. Boni a Roma, tra il 1899 e il 1906, per documentare il foro romano (Brivio *et al.* 1992).

Tuttavia, fu solo nel 1920 che si cominciarono a utilizzare foto da aereo per studi strettamente riguardanti le Scienze della Terra, prima di tutto la ricerca petrolifera e in seguito l'analisi geomorfologica, la ricerca di risorse idriche sotterranee e la produzione agricola.

In ambito archeologico, i primi esempi di impiego su larga scala della fotografia aerea interessarono in particolare il Vicino Oriente antico, tra Turchia, Siria, Iraq ed Egitto: Wiegand nel 1917, Beazley nel 1919, Breasted nel 1933 e poi Van Liere e Lauffray tra il 1954 e il 1955, fornirono le prime riprese sistematiche degli antichi *tell* Vicino orientali calati in un paesaggio che ancora conservava le tracce delle antiche reti viarie (Hritz 2010, 2014). Nel frattempo, le tecniche di ripresa fotografica andarono sempre più sviluppandosi con l'utilizzo di pellicole sensibili a una porzione più ampia dello spettro elettromagnetico e quando, nel 1935, la Kodak introdusse sul mercato la prima pellicola per immagini a colori.

Un ulteriore balzo tecnologico seguì gli sciagurati eventi della seconda guerra mondiale, con la necessità di individuare 'oggetti' mimetizzati a livello del terreno o nascosti nel sottosuolo, il che portò a ricercare nuove tecniche nell'ambito del telerilevamento; risalgono infatti a quegli anni le prime riprese all'infrarosso fotografico, lo sviluppo del sensore a scansione, il rilievo all'infrarosso termico e la messa a punto del sistema *radar* (Lillesand e Kiefer 1994; Marcolongo e Mantovani 1997). Fu in particolare l'ufficiale della Royal Air Force britannica J.S.P. Bradford a contribuire alla scoperta, da remoto, di preziosi dettagli sulle necropoli di Cerveteri e Tarquinia, sui villaggi neolitici della Puglia o a mostrare, da un punto di vista privilegiato, le tracce della centuriazione romana di Padova e dell'Istria (Bradford 1957; Quilici Gigli 2004).

### 1.3.3 Lo sviluppo dei satelliti e delle metodologie integrate

Un notevole impulso allo sviluppo e alla diffusione del telerilevamento venne dato dall'inizio dell'attività spaziale negli anni sessanta. Il primo satellite meteorologico (Tiros), lanciato dagli Stati Uniti nel 1960, utilizzava infatti un sensore sensibile alle bande dell'infrarosso. Ancora un passo avanti venne fatto con la messa in orbita dei satelliti della serie Landsat, lanciati con sequenza triennale dal 1972 al 1978 e in seguito nel 1982 e 1984, quest'ultimi dotati di un sofisticato sensore denominato *Thematic Mapper*. I satelliti francesi della serie Spot, posti in orbita nel 1986, 1990 e 1992, quelli indiani della serie IRS, lanciati nel 1988, 1991 e 1996, sono stati via via affiancati da molte altre e più sofisticate piattaforme spaziali, poste in orbita con una rapida successione che ancor oggi continua (per esempio il satellite PRISMA<sup>8</sup> dell'Agenzia Spaziale Italiana ASI) i cui dati sono utilizzati principalmente per lo studio delle risorse terrestri (vedi 1.2.1).

Tale disponibilità di 'viste' privilegiate, che sia un satellite, un aereo o elicottero, o un drone, hanno contribuito a sviluppare diversi approcci metodologici e scuole di pensiero che dagli anni '60 del '900 hanno altresì contribuito ad animare il dibattito sull'archeologia come disciplina scientifica, quando differenti branche hanno sviluppato concetti teorici o modelli interpretativi.

Per primo l'approccio storico-culturale o di storia del paesaggio, basato anche sulla consultazione di testi e valido soprattutto per le epoche medievali e post-medievali (Tosco 2009). L'approccio processuale o positivista (o *New Archaeology*) (Clarke 1973; Trigger 2014), basato su studi di tipo quantitativo e rigorosamente scientifici, che separa da un lato l'archeologia del paesag-

<sup>8</sup> PRISMA (PRecursoro IperSpettrale della Missione Applicativa), un sistema di osservazione della Terra all'avanguardia, dotato di strumenti elettro-ottici, che integra un sensore iperspettrale con una macchina fotografica a media risoluzione sensibile a tutti i colori (pancromatica).

gio come disciplina legata a un aspetto storico e dall'altro quelle discipline scientifiche di tipo geologico ed ecologico più rigorose, poiché attinenti a dati fisici. Infine l'approccio post-processuale, che contempla l'aspetto più propriamente cognitivo/simbolico del paesaggio e considera elementi parimenti determinanti nella comprensione di un contesto lo studio delle trasformazioni fisiche dell'ambiente attraverso discipline geologiche ed ecologiche, le trasformazioni culturali operate dall'uomo, e i processi di formazione sociale e i fattori politici ed economici insiti in una società antica.

Pertanto, l'approccio teorico su cui si basa questo manuale è quello di una *landscape archaeology* o archeologia del paesaggio integrata, ovvero che contenga e contempli sia gli aspetti storico-culturali sia quelli fisici, geologici o ecologici quali attori che concorrono alla comprensione di un contesto archeologico (Wilkinson 2003: 4).

Parte I  
METODOLOGIE INTEGRATE



## 2. Geomorfologia

### 2.1 Teoria e pratica geomorfologica per l'archeologia da remoto

Questo manuale, che si rivolge all'archeologo e in particolare alla ricerca da remoto, non intende e non può affrontare in ogni suo aspetto una disciplina, qual è la geomorfologia, il cui campo di azione è tanto vasto quanto il globo terrestre, crogiuolo senza fine di geodiversità e geostorie. Inoltre, non si intende approfondire aspetti della ricerca geomorfologica che mirano alla definizione del contesto archeologico nella sua accezione più particolare, ovvero sul campo o a livello stratigrafico, attraverso l'impiego di discipline quali la geofisica (Boschi 2020; Boschi 2016; Giorgi 2009), la sedimentologia, la pedologia o la botanica (Ayala *et al.* 2007; Goldberg e Macphail 2006; Cremaschi 2005; Cremaschi e Rodolfi 1991). Al contrario, l'analisi da remoto interviene su paesaggi più o meno ampi che permettono di definire un approccio geomorfologico culturale che contempra, su ampia scala, le relazioni spazio-temporali tra l'uomo e l'ambiente (Panizza e Piacente 2003: 1-3).

Pertanto, l'obiettivo che questo capitolo si pone è di fornire quei concetti di base, di natura puramente geomorfologica, che aiutino la lettura dell'ambiente attraverso il riconoscimento di fenomeni di morfogenesi, ovvero di tutte quelle cause di generazione o modificazione naturale dell'ambiente visibili da remoto. Il ruolo antropico nella modifica dell'ambiente, invece, sarà volta per volta riscontrato negli esempi regionali esposti nella seconda parte di questo volume.

Quelli che seguono sono dunque definizioni, principi, pratiche e modelli interpretativi che forniscano al lettore degli strumenti validi, da remoto, per giungere a una prima comprensione dell'ambiente naturale in cui l'uomo ha ordito paesaggi propri.

### 2.2 Definizioni e principi di base

La *Geomorfologia*, dal greco *geo* (Terra), *morphé* (forma), *logos* (studio), è la scienza che si propone di studiare e interpretare le varie forme del rilievo terrestre e in particolare le cause della loro origine (morfogenesi) ed evoluzione (morfodinamica). Gli strumenti propri di un geomorfologo comprendono un'analisi foto-interpretativa, la redazione di carte tematiche, il rilevamento sul campo e l'applicazione di processi statistici in grado di definire sintesi e letture sia pratiche, riscontrando uno specifico dato, sia teoretiche, proponendo modelli predittivi (Brancucci *et al.* 2011: 63).

I *processi geomorfologici* intervengono sulla superficie di contatto tra la litosfera da una parte e l'atmosfera/idrosfera dall'altra. Tali processi coinvolgono tutta una serie di forze, che possono essere classificate in due categorie principali: le forze *endogene* (orogenesi e movimenti tettonici, vulcani, terremoti); e le forze *esogene* (gravità, pioggia, ruscellamento, temperatura, vento ecc.).

Il primo gruppo di forze (o 'interne') si genera nel corpo terrestre e crea modificazioni della litosfera. Si tratta di fenomeni diastrofici di deformazione della crosta terrestre (orogenesi di catene montuose, apertura di *graben* crostali profondi come il Mar Rosso ecc.), con manifestazioni vulcaniche e il lento trasferimento alla superficie del calore interno della terra.

Il secondo gruppo di forze (o 'esterne') trae origine dal sistema solare e agisce modificando la superficie della litosfera. Si tratta essenzialmente della forza di gravità e dell'energia solare, entrambe determinanti i movimenti (vettoriali, convettivi, tangenziali) di porzioni di masse solide, liquide e aeriformi in prossimità dell'interfaccia suddetta.

Seguendo questo schema di suddivisione, ne deriva la separazione tra morfologie e processi dovuti alle geodinamiche interne, dette endogene e quelle connesse alla geodinamica esterna, dette esogene. Pertanto, la morfologia della terra è il risultato di una complessa interazione di entrambe le forze, con l'eventuale prevalenza dell'una o dell'altra nello spazio e nel tempo.

A volte i fenomeni vulcanici e tettonici segnano gli aspetti più rilevanti della superficie terrestre, prevalendo sui processi esterni di demolizione e accumulo. In altri casi la modellazione esterna copre o annulla rilievi e depressioni di origine endogena. Ad esempio, il paesaggio della regione vulcanica di Mārib, in Yemen, mostra un'evidente componente geodinamica interna con numerosi coni di cenere molto recenti di età quaternaria, la cui distribuzione spaziale è guidata da sistemi di faglie grossomodo orientate SO-NE (Figura 7).



Figura 7: Coni vulcanici di ceneri del Quaternario in un'area posta a una decina di km a NO di Mārib, Yemen.

Anche molti luoghi del paesaggio dello Yemen interno sono essenzialmente improntati dalla dinamica endogena, come quella che ha creato gli espandimenti lavici dei *traps* cenozoici o terziari (Figure 8-9).

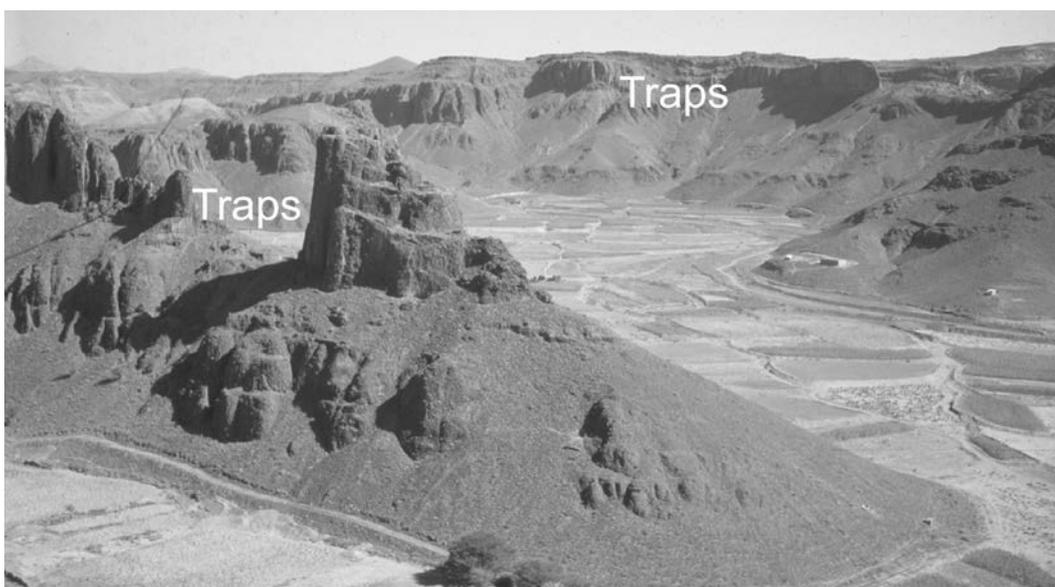


Figura 8: Tipico paesaggio 'trappico' nello Yemen centrale in prossimità di Madīnat Al-Ahjūr.

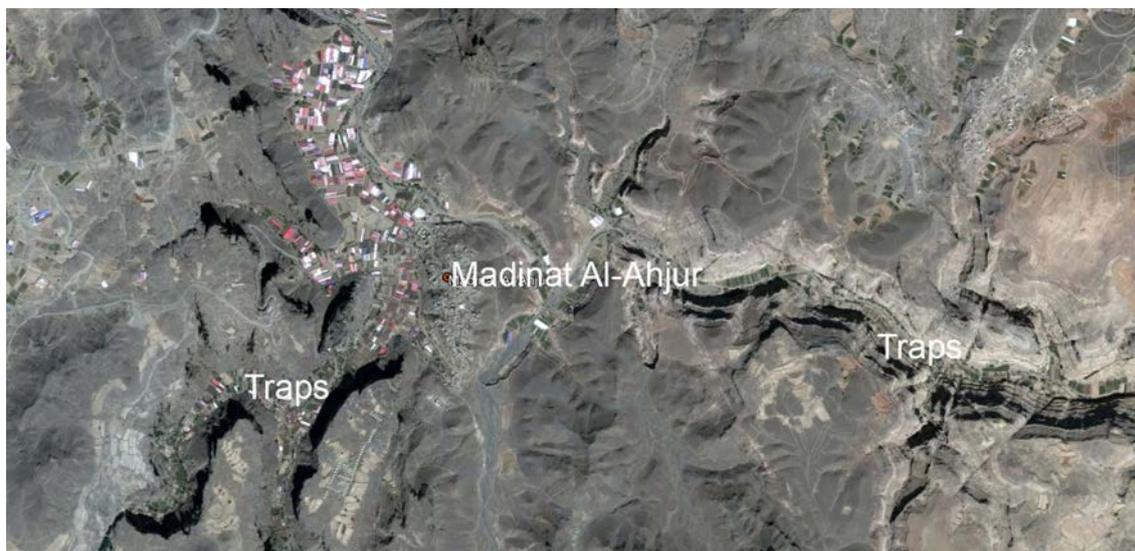


Figura 9: Paesaggio 'trappico' nello Yemen centrale, in prossimità di Madīnat Al-Ahūr, osservato da satellite.

Il paesaggio della parte centrale del deserto del Ramlāt as Sab‘atayn è invece segnato da forze e processi esogeni, quali quelli eolici che formano complessi di dune longitudinali e campi di dune mobili ('barcane') o quelli fluviali durante periodi più umidi con la testimonianza di importanti paleo-alvei, come quello del Jawf-Ḥaḍramawt (Figura 10) (Inizan *et al.* 1998; Marcolongo 2007).



Figura 10: Paesaggio della parte centrale del Ramlāt as Sab‘atayn osservato da satellite con chiare evidenze dei depositi eolici (dune longitudinali) e tracce del paleo-alveo Jawf-Ḥaḍramawt.

Questi esempi introducono il concetto di scala spaziale/temporale in geomorfologia, concetto che verrà ripreso ampiamente da un punto di vista teorico nel prossimo Cap. 3 sul 'Telerilevamento in Geomorfologia', paragrafi 3.2.1 e 3.2.3. Schematicamente, le morfologie generate da componente endogena prevalente sono di norma anche le più estese e antiche, mentre quelle

dovute a una componente esogena sono più piccole e di solito più recenti. A tale concetto si riferiscono alcune delle maggiori 'suddivisioni tassonomiche', tra cui quella di Tricart e Cailleux (1956) e quella proposta da Gerasimov e Meshcheryakov (1967).

Le unità di rilievo più generali sono le grandi regioni strutturali delle terre emerse ('mega strutture' o 'geotessiture' da Gerasimov e Meshcheryakov), come gli scudi continentali, le piattaforme, le fasce orogenetiche ecc. Tutte queste hanno origine endogena legata ad antichi eventi tettonici, con tempi di persistenza morfologica dell'ordine di grandezza di decine di milioni di anni.

Le unità di rilievo più particolari, come una montagna, una valle, un terrazzo fluviale, una colata lavica basaltica ecc., possono essere suddivise in 'morfostrutture', se prevale la componente endogena, e 'morfosculture' se appaiono originate o modificate da più o meno recenti fenomeni esogeni. I tempi di persistenza morfologica sono generalmente compresi tra alcune decine di milioni di anni per il primo gruppo e un milione di anni per il secondo.

Solo questo secondo gruppo di morfologie può interagire strettamente con l'uomo influenzandone le attività e i modelli di insediamento. Con lo studio dell'evoluzione delle 'morfosculture' e del loro rapporto con la distribuzione e tipologia dei siti antichi si apre una branca peculiare della Geomorfologia dall'ampio campo di interesse, che qui può essere chiamata Geomorfologia Culturale, ovvero la Geomorfologia applicata all'Archeologia rientrando nel più ampio campo della Geoarcheologia.

### 2.3 'Ciclo erosivo normale' di W.M. Davis

Tra le diverse Scuole di pensiero sulla interpretazione e spiegazione della morfologia terrestre, alcune hanno privilegiato come agenti dinamici le componenti endogene, altre quelle esogene. La visione endogena privilegia le azioni della tettonica, così da ritenere l'analisi morfostrutturale lo strumento di ricerca prevalente. Questo tipo di approccio ha fornito buoni risultati in regioni caratterizzate da dinamica crostale recente, come varie aree lungo il corrugamento alpino-himalayano, iniziatosi nel Mesozoico circa 230 milioni di anni fa ma proseguito durante tutto l'Eocene fino all'Oligocene inferiore (Rupeliano) circa 30 milioni di anni fa.

La visione climatica invece considera come principale causa della degradazione delle rocce la relazione tra morfologie e il tipo di clima presente in una certa area del globo. Secondo questa teoria ogni litologia presenta una evoluzione diversa in dipendenza del regime climatico medio locale, che governa modalità e intensità dei processi (Figura 11).



Figura 11: Campo di yardangs nel Dunhuang Yardang National Geopark (Provincia di Gansu, Cina).

La prima importante teoria della morfogenesi su basi climatiche è quella detta ‘ciclo di erosione normale’ elaborata dal geografo statunitense William Morris Davis attorno agli inizi del secolo XX (Davis 1899, 1922).

L’assunto alla base della teoria sta nel principio secondo cui le stesse forme elementari di una data massa strutturale sono riferite sistematicamente le une alle altre, a ogni stadio della sua evoluzione fisiografica. Di conseguenza esiste uno stretto legame tra le forme che costituiscono un paesaggio e le forze (endogene ed esogene) in equilibrio che agiscono su di esso. L’evoluzione morfologica è vista come il risultato del continuo aggiustamento di tale equilibrio.

Il modello di evoluzione del rilievo di Davis si basa su 6 principi fondamentali:

- le forme di rilievo sono il prodotto delle interazioni tra forze endogene e forze esogene;
- l’evoluzione del rilievo è regolata secondo una sistematica successione di forme;
- i corsi d’acqua si erodono rapidamente in senso verticale fino a raggiungere un profilo piatto, quindi iniziano con l’erosione laterale;
- i versanti si stanno progressivamente levigando dalla fascia pedemontana verso la sommità, con angoli di pendenza dipendenti dalla struttura e dalla dimensione dei granuli del terreno;
- non vengono introdotti cambiamenti climatici;
- dal punto di vista tettonico, il modello ideale prevede un rapido sollevamento e quindi un lungo periodo di quiete (stasi).

Pertanto, in questa continua evoluzione del rilievo legata a un ‘livello base’, si possono distinguere le tre diverse fasi di ‘giovinezza’, ‘maturità’ e ‘vecchiaia’, caratterizzate da differenti versanti di forma e profilo longitudinale dei corsi d’acqua.

Il processo prevede che si verifichi prima un movimento orogenetico, che produce il sollevamento di una regione. Successivamente, i corsi d’acqua iniziano a tagliare le valli con un alto tasso di erosione e degrado dei versanti, si compie così la fase ‘giovinezza’.

In seconda istanza, il reticolo di drenaggio diventa più organizzato e regolare e le pendenze diventano più dolci, determinando la fase di ‘maturità’.

Alla fine, i fiumi non erodono più e presentano un profilo longitudinale pressoché piatto con una copertura uniforme di depositi alluvionali. I versanti hanno pendii molto dolci e gli spartiacque stanno scomparendo, innescando la fase di ‘vecchiaia’.

Il risultato finale di questo ‘ciclo di erosione normale’ (Figure 12-13) è una ‘peneplano’, cioè una superficie quasi piana, senza alcun processo sensibile di erosione, trasporto e accumulo dovuto all’acqua e alla gravità.

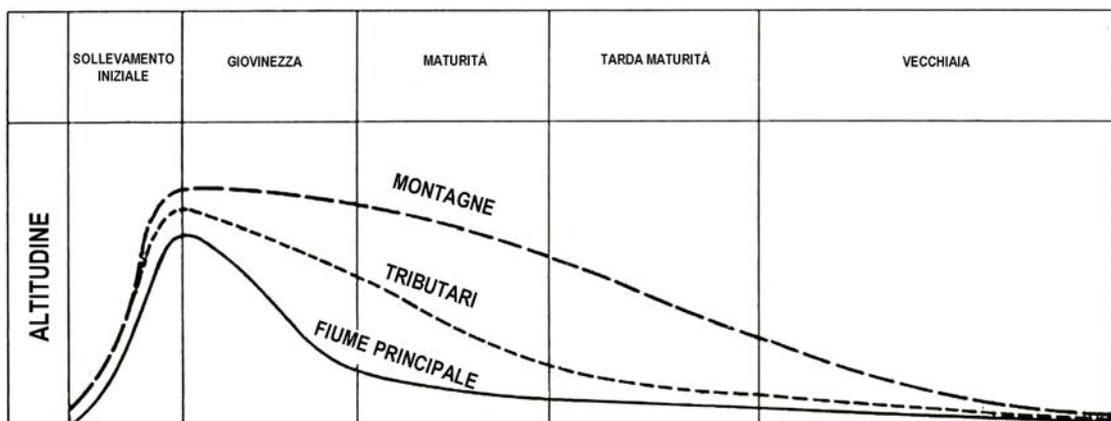


Figura 12: ‘Ciclo erosivo normale’ di W.M. Davis.

L'approccio di Davis, che non considera la presenza di attività tettonica (forze endogene) durante l'intero sviluppo del ciclo erosivo, è stato come si può ben immaginare contestato più o meno fortemente da altri studiosi, che non accettavano l'ipotesi iniziale di un sollevamento isolato e pressoché istantaneo e uniforme seguito poi da una lunga fase di modellamento delle forme dovute essenzialmente ai corsi d'acqua e alla gravità. Inoltre, le caratteristiche erosive sono considerate costanti durante le tre successive fasi con regime climatico costante.

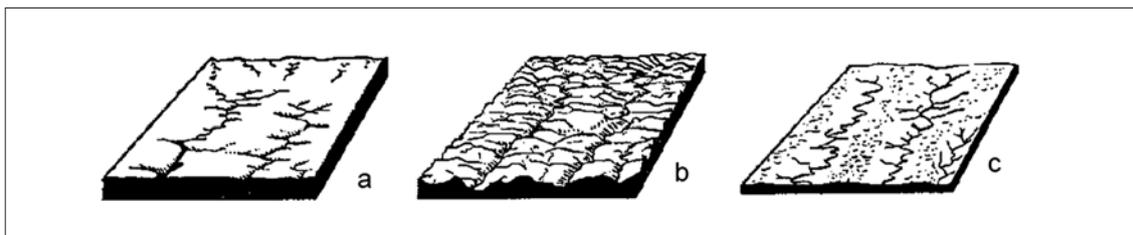


Figura 13: Evoluzione di un reticolo idrografico, dopo un fenomeno di sollevamento generalizzato e uniforme, negli stadi evolutivi di: a) 'giovinezza', b) 'maturità', c) 'senescenza', secondo Davis modificato da Scheidegger.

Tra i principali critici di tale modello di 'ciclo erosivo normale' va ricordato il geologo tedesco W. Penck, che privilegiava l'influenza della componente endogena (tettonica), ripetutamente e variamente attiva nel corso dell'intero ciclo di modellamento, per cui sollevamento ed erosione sono contestuali e concatenati (Bowman 1926).

Successivamente, sono stati elaborati diversi modelli evolutivi, introducendo i ruoli svolti dal 'clima' (De Martonne 1951; Büdel 1981) e anche dalla 'struttura geologica' sulla genesi del rilievo.

#### 2.4 Cause della modellazione geomorfologica della superficie terrestre

Solo le mega strutture (geotessiture) della Terra (Figura 14) sembrano legate a forze endogene, mentre le altre strutture più piccole sono influenzate da forze esogene.

Più in dettaglio, tutti i processi genetici e i tipi di modellazione di ogni morfologia dipendono da tre gruppi di cause:

- fattori strutturali, quali la tettonica, intesa sia come dinamica che come statica e la litologia, costituente invece le caratteristiche fisico-chimiche che condizionano la resistenza delle rocce all'erosione;
- agenti del modellamento, quali gli elementi delle forze esogene (forza di gravità, acqua, vento e uomo);
- condizioni climatiche, che possono essere dirette con le precipitazioni e la temperatura o indirette attraverso la presenza e il tipo di vegetazione, a cui sono connessi anche i processi pedogenetici.

La Geomorfologia, quindi, può essere considerata come un sistema con tre variabili e una buona metodologia di studio è quella di mettere in evidenza solo una di queste variabili, detta 'interna', per cui schematicamente si riconosce la seguente suddivisione: la Geomorfologia strutturale, che studia le relazioni tra fattori geologici ed evoluzione/aspetto del paesaggio; la Geomorfologia climatica, che indaga i processi e le forme dei rilievi prodotti in particolari condizioni climatiche (aride, temperate, glaciali ecc.); e la Geomorfologia dinamica, che studia i processi esogeni e le relative forme dei rilievi non prodotti in un determinato clima, ma generalmente diffusi in tutto il mondo (come una frana, una scarpata ecc.).

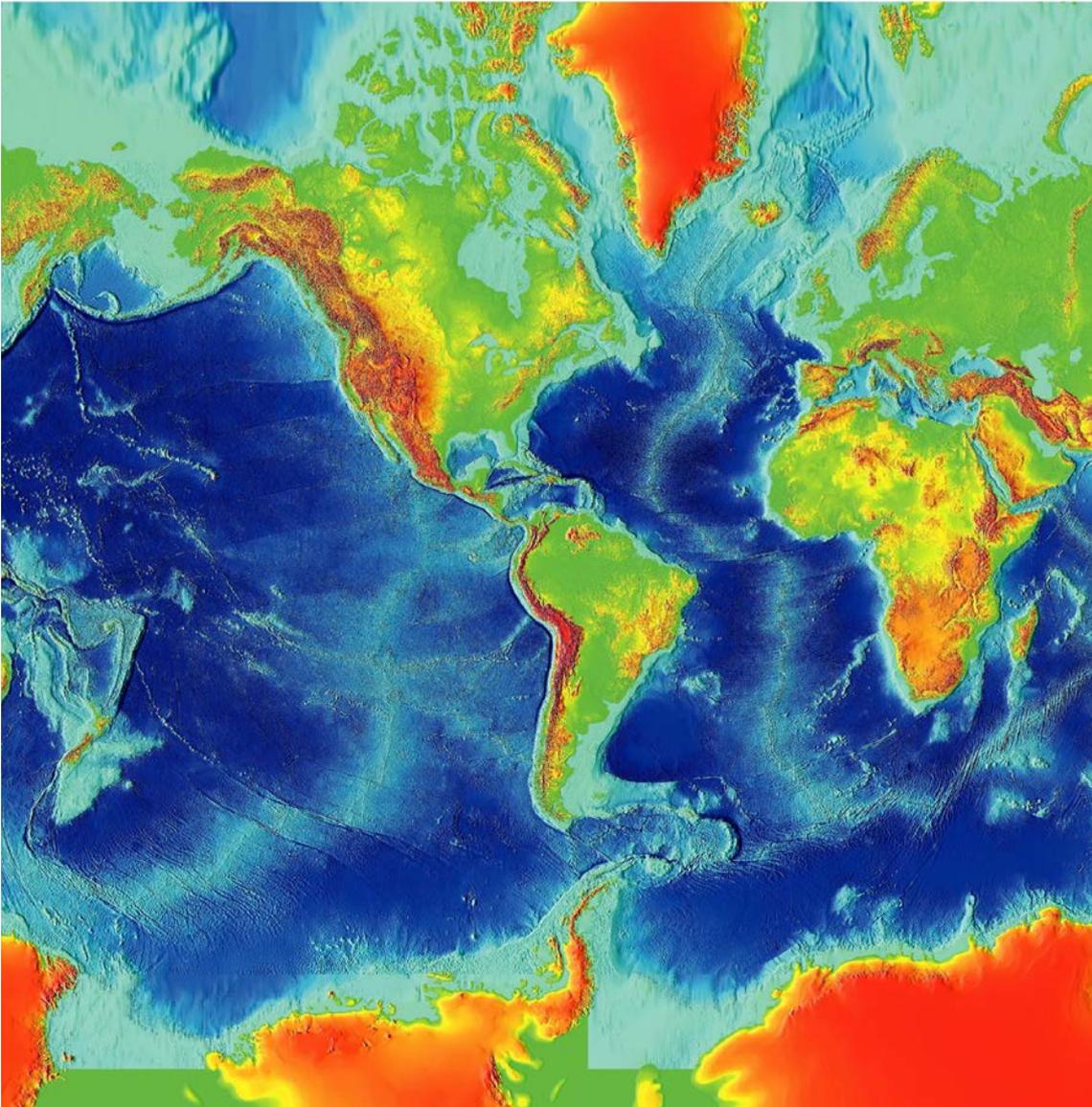


Figura 14: Superficie della Terra con le principali 'geotessiture'. Immagine su proiezione cilindrica di Mercatore, prodotta nel 2000 dal World Data Center for Marine Geology and Geophysics partendo da una base digitale di dati di elevazione acquisiti prima dalla Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Nella fascia di latitudini centrali sono evidenziate le grandi catene orogenetiche in varie tonalità di rosso (quali le Montagne Rocciose-Cordigliera delle Ande, le Alpi-Dinaridi-Himalaya), le aree di 'cratone' (cratone del Kaapvaal in Sudafrica), le dorsali oceaniche in verde-mare (atlantica e pacifica).

#### 2.4.1 Fattori strutturali

La tettonica è il processo fisico che controlla la struttura dell'intera crosta terrestre e ne determina l'evoluzione nel corso delle ere geologiche. In particolare, l'orogenesi, ovvero la formazione delle grandi catene montuose come quella alpino-himalayana o 'alpidica', rappresenta l'azione tettonica per eccellenza che crea le forme a elevata energia come le catene montuose a pieghe e ricoprimenti. La litologia poi delle varie formazioni rocciose che le compongono gioca anch'essa un ruolo primario nella evoluzione delle morfologie.

Vi sono alcune tipiche forme legate a questi due fattori strutturali di base, quali gli *hogback* (Figure 15-16), le *cuestas* (scarpate) e le *mesa* (elevazioni piatte) (Figure 17-18), i rilievi anticlinali (Figura 19-20) e le vallate sinclinali (Figura 21).



Figura 15: The Grand Hogback (Colorado, USA) ripreso su immagine Ikonos di Google Earth. Esso è costituito da una cresta rocciosa lunga più di 140 km della Mesaverde formation a circa 230 km a occidente di Denver.



Figura 16: The Grand Hogback ripreso da foto aerea obliqua da SE a NO. Si noti la 'pendenza posteriore' del dorso, formata dalla superficie di uno strato arenaceo resistente all'erosione, mentre la 'pendenza anteriore' opposta, detta anche scarpata, è costituita da un pendio che incide l'intero pacchetto di strati alternati arenaceo-calcarei (più duri) e argilloso-marnosi (più teneri).

Tutte le forme strutturali sostenute dalla tettonica e dalla litologia vengono quindi modellate dagli elementi delle forze esogene, che possono agire contestualmente con un grado maggiore o minore di prevalenza, oppure isolatamente a seconda della fascia climatica e del periodo di tempo considerati.

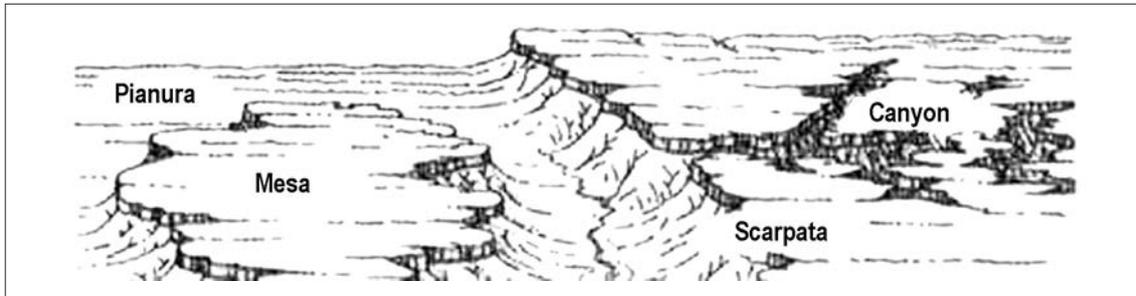


Figura 17: Schema descrittivo di un paesaggio tabulare con strutture a mesa, cuestas (scarpata) e profonde incisioni a canyon.



Figura 18: Tipico paesaggio tabulare a mesa e cuestas nell'altopiano interno dell'Etiopia, vicino ad Amba Alagi, ripreso da Google Earth.

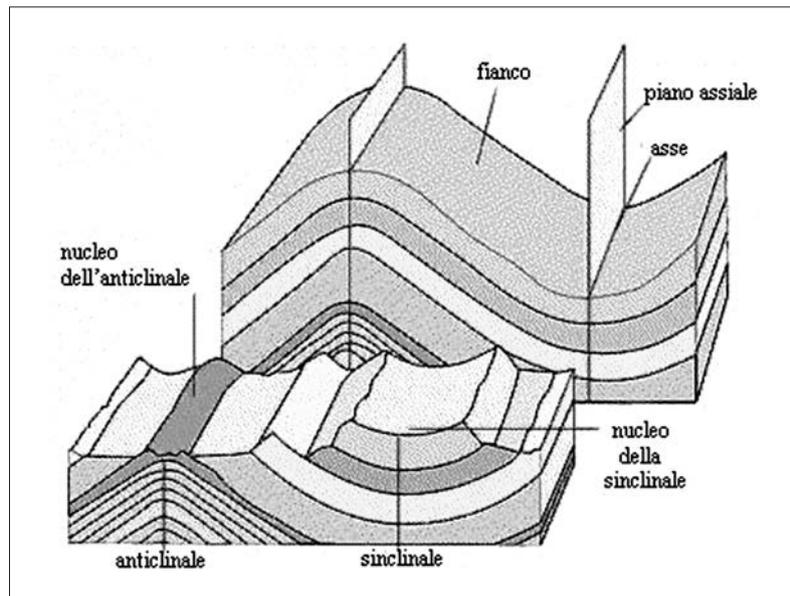


Figura 19: Schema di pieghe anticlinali e sinclinali.

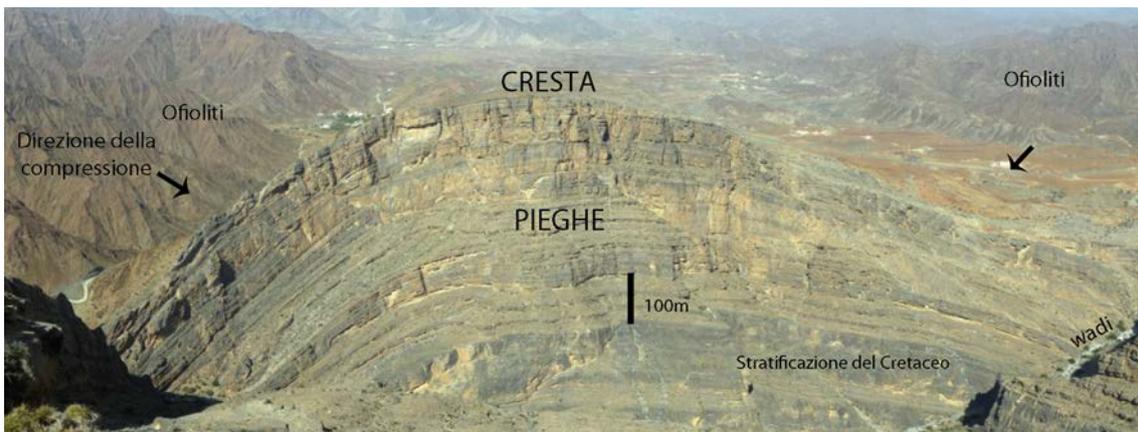


Figura 20: Rilievo anticlinale di Murri (Oman centrale), costituito da strati calcareo-arenacei del Cretaceo.

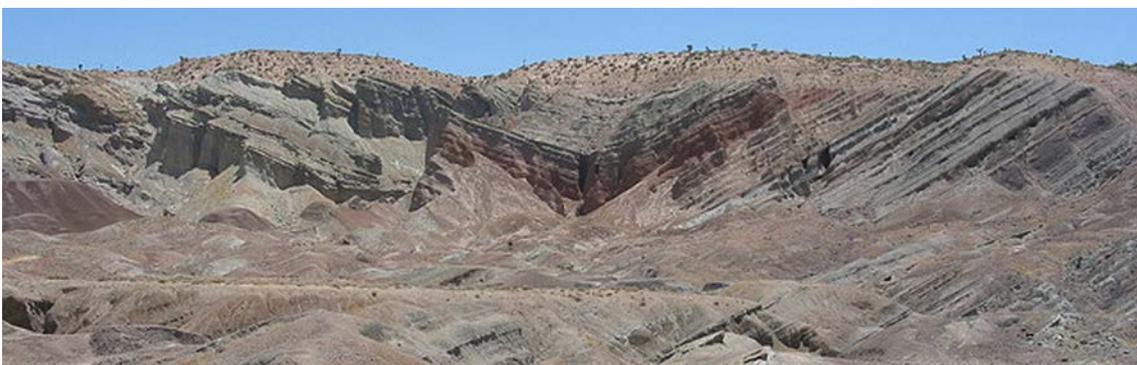


Figura 21: Vallata sinclinale nella Contea di San Bernardino in California, con alternanza di strati arenacei, argilloso-marnosi e tufacei.

### 2.4.2 Agenti del modellamento

La gravità è la forza che aggredisce qualsiasi elemento e forma del paesaggio in posizione elevata rispetto al livello di base del processo erosivo, con una azione lenta e continua, o talora improvvisa e catastrofica come nel caso delle frane di crollo. La sua azione viene amplificata dalla concomitante presenza di acqua corrente, sia incanalata in corsi d'acqua sia diffusa sotto forma di ruscellamento laminare.

L'organizzazione del reticolo orografico che ne consegue è molto varia e dipende da numerosi fattori, tra i quali principalmente la giacitura e la litologia delle masse rocciose assieme all'intensità-durata delle piogge.

Si può schematicamente riconoscere tutta una serie di modelli che a livello interpretativo sono di grande aiuto per dedurre dalle immagini telerilevate le caratteristiche fisico-geologiche dell'area di studio.

Il modello dendritico è il più comunemente sviluppato in natura, con angoli di confluenza acuti dei singoli rami, simile per analogia alla rigogliosa chioma di un albero (Figure 22-24).

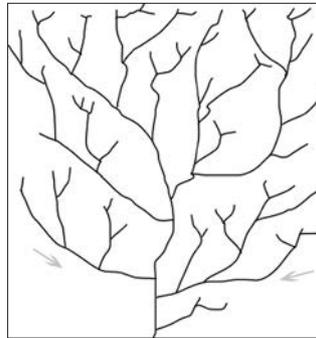


Figura 22: Modello di reticolo dendritico.



Figura 23: Reticolo di drenaggio dendritico del wādī Ḥaḍramawt (Yemen), sviluppato sull'omonimo plateau calcareo-arenaceo del Mesozoico.



Figura 24: Alto bacino idrografico dendritico di un corso d'acqua himalayano (montagne del Ladakh).

Il reticolo parallelo e sub-parallelo presenta i vari rami che confluiscono con angoli estremamente acuti e si isorientano lungo la stessa direzione di deflusso (Figure 25-26).

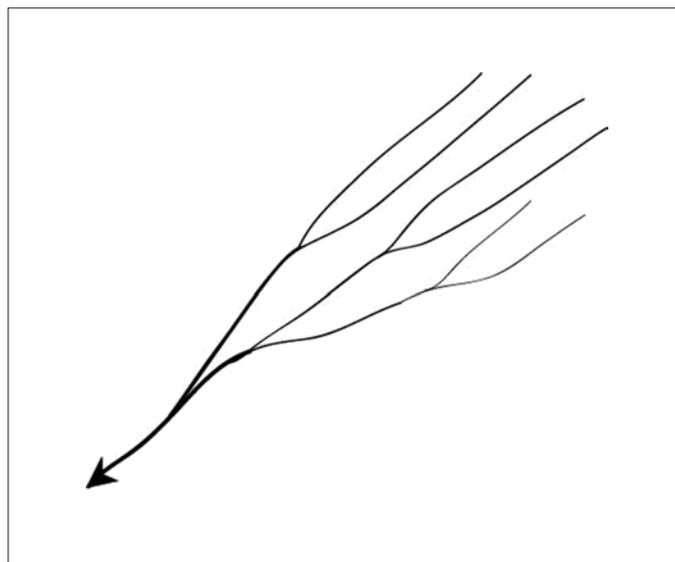


Figura 25: Modello di reticolo parallelo e sub-parallelo.



Figura 26: Reticolo di drenaggio sub-parallelo su sedimenti del Paleogene nel Dofār, al confine tra Yemen e Oman.

Il reticolo a traliccio (*trellis*) si sviluppa secondo incisioni lunghe e parallele, unite tra di loro da tratti perpendicolari (Figure 27-28). Esso è influenzato fortemente dalla tettonica e dalla litologia, formandosi in genere su alternanze di strati monoclinicali più e meno competenti (duri e teneri).

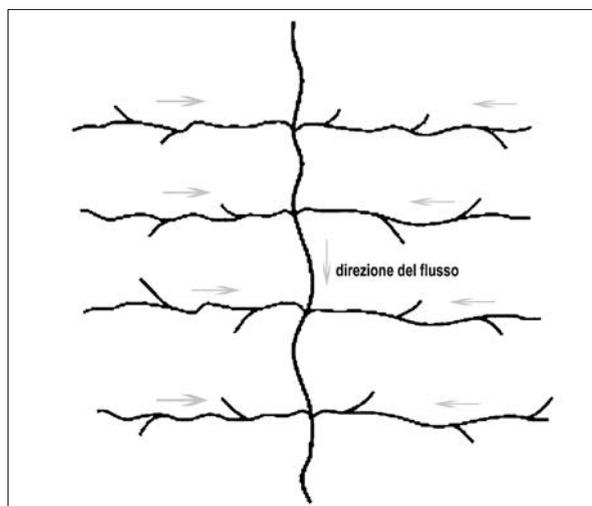


Figura 27: Modello di reticolo a traliccio (*trellis*).



Figura 28: Reticolo di drenaggio a traliccio sviluppato negli strati calcarei del Triassico della Bay of Fundy (Nuova Scotia, Canada).

Il reticolo radiale si costituisce quando i corsi d'acqua scendono lungo i fianchi di un rilievo grossomodo circolare e possono convergere verso una depressione centrale o irraggiarsi radialmente verso l'esterno (Figura 29). Tipici reticoli radiali, sia centrifughi sia centripeti, sono quelli collegati a edifici vulcanici più o meno complessi o a grandi strutture circolari (impatto?) (Figure 30-31).

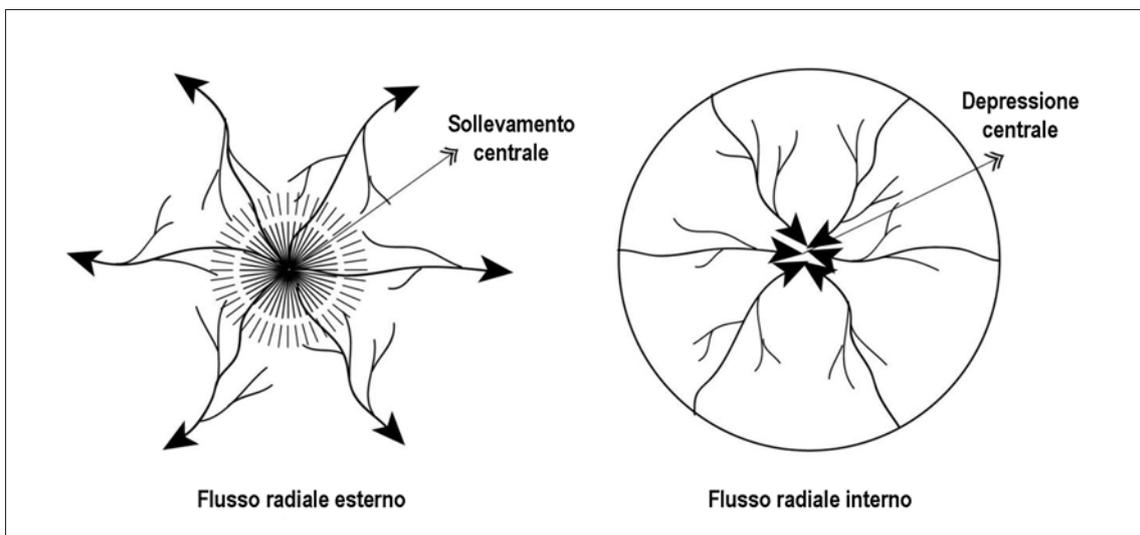


Figura 29: Modelli radiali centrifugo e centripeto.



Figura 30: Grande struttura circolare (da impatto?) con diametro di oltre una decina di km, a circa 13 km a nord-ovest di Mabar (Yemen) nella serie vulcanica 'trappica' del Cenozoico. Le incisioni dei corsi d'acqua partendo dall'orlo sommitale scendono sia verso la depressione centrale coltivata (centripeti) sia verso la base esterna del rilievo (centrifughi).



Figura 31: Caldere nella Harrat al-Harrah (Arabia Saudita) con vistosi reticoli radiali centrifughi e minori reticoli centripeti.

Il modello di reticolo anulare è una forma di drenaggio complessa caratterizzata da corsi d'acqua ad andamento curvilineo, fortemente influenzati dalle caratteristiche geologiche (tettonica e litologia) (Figure 32-33).

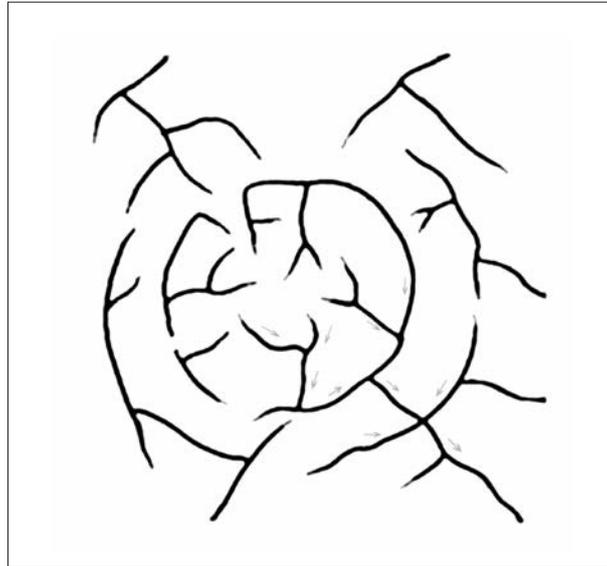


Figura 32: Modello di reticolo anulare.

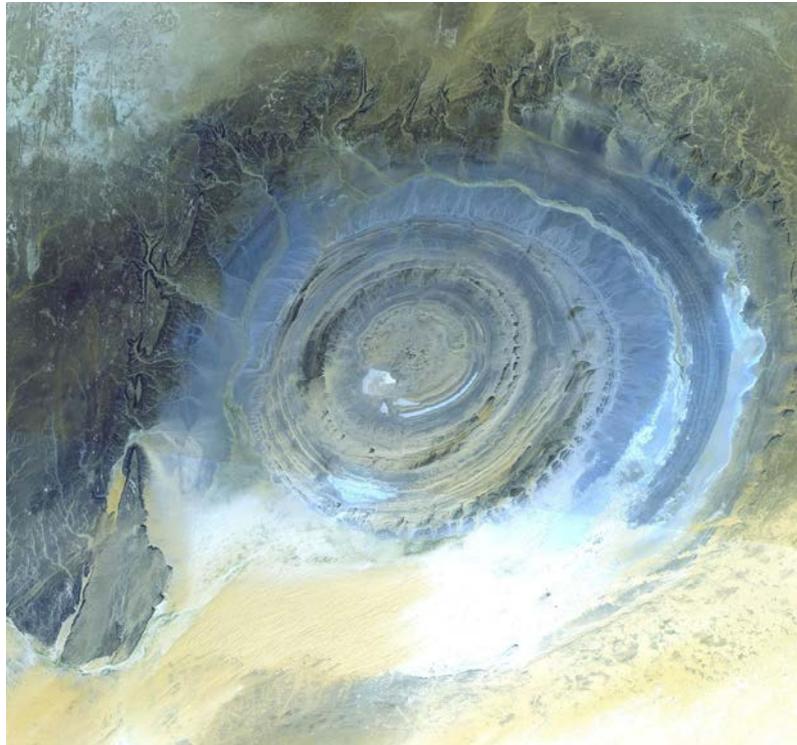


Figura 33: La Richat Structure di Oudane (Mauritania, 20,9° lat. nord, 11,6° long. ovest), da immagine Landsat ETM a falsi colori, con reticolo chiaramente anulare. Questa imponente struttura geologica circolare che affiora nel deserto del Sahara è una anticlinale circolare decapata dal diametro di almeno 50 km. Quarziti del Paleozoico costituiscono gli strati resistenti che delimitano tutto attorno la struttura stessa.

Il reticolo strutturale rettangolare è formato da corsi d'acqua tributari e principali che si sviluppano perpendicolarmente tra di loro, con brusche deviazioni ortogonali. Esso è fondamentale guidato da sistemi perpendicolari di faglia e frattura (Figure 34-35).

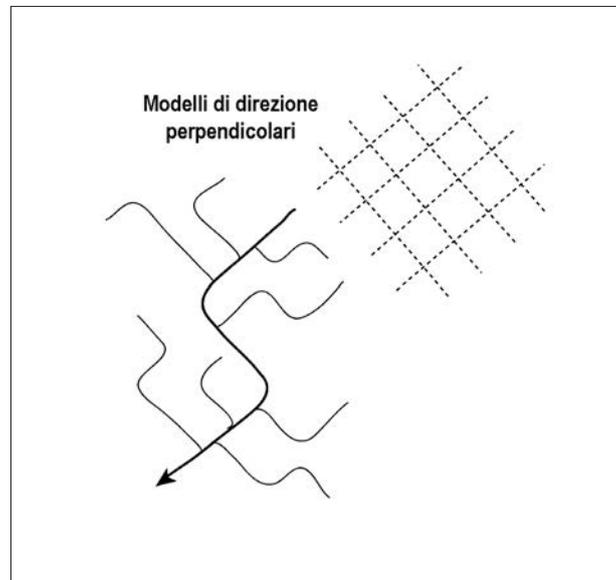


Figura 34: Modello di reticolo strutturale rettangolare.

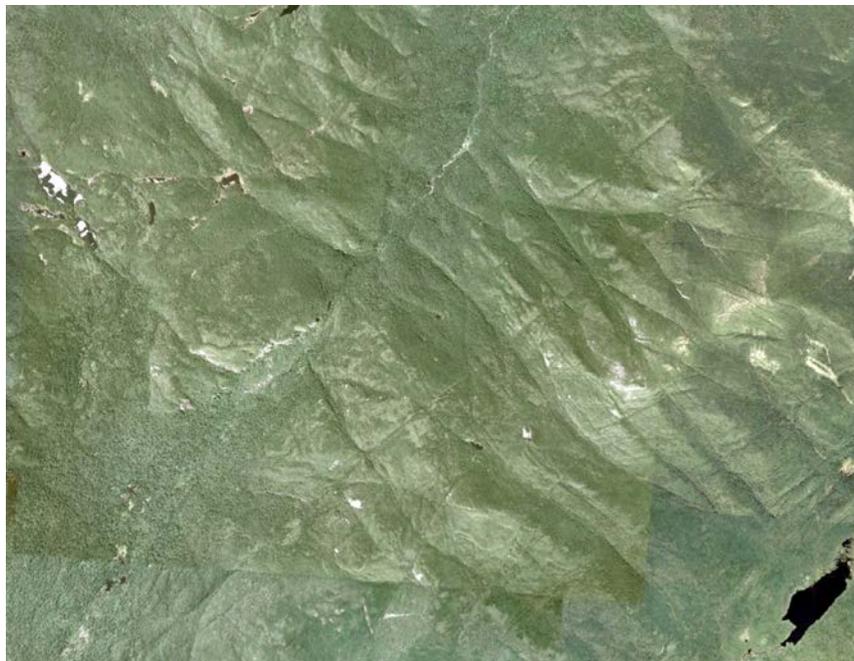


Figura 35: Adirondack Mountains da Google Earth mostrano un reticolo di drenaggio strutturale, impostato lungo linee di faglia e frattura più erodibili, tra di loro perpendicolari.

I corsi d'acqua organizzati nei vari modelli di reticolo di drenaggio sin qui illustrati possono venire gerarchizzati secondo un sistema di ordinamento, proposto per la prima volta da Robert E.

Horton e successivamente ripreso da Arthur N. Strahler nel 1952. La loro analisi geomorfologica quantitativa si basa fondamentalmente su 5 semplici assunzioni (Figura 36):

- ‘canali di primo ordine’ sono i tratti che hanno origine dalle sorgenti;
- l’unione di due rami di ordine ‘n’ genera un ramo di ordine ‘n+1’;
- all’unione di due rami di ordine diverso il confluyente con ordine maggiore continuerà nel tratto di canale immediatamente a valle;
- la successione di due o più rami, caratterizzati dal medesimo ordine ‘n’, costituisce canali del loro stesso ordine;
- il canale che ha raggiunto l’ordine più elevato ‘N’ definisce l’ordine stesso del bacino.

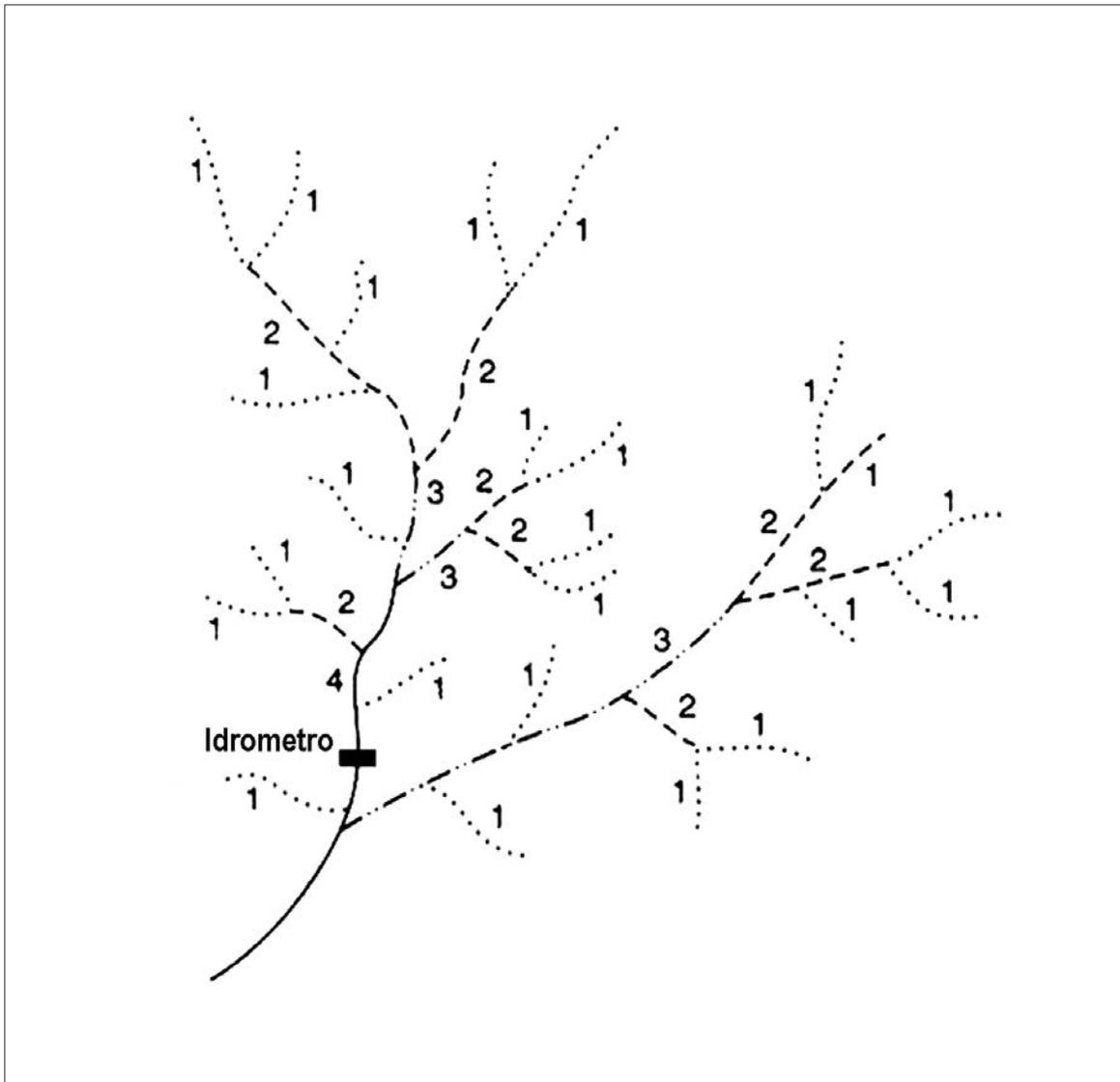


Figura 36: Esempio di reticolo di drenaggio (in questo caso dendritico) di 4° ordine, che illustra la classificazione gerarchica dei singoli rami secondo il sistema di ordinamento di Horton-Strahler.

Va comunque ricordato che Shreve ha proposto nel 1967 un altro ordinamento classificatorio, che attribuisce una variazione di ordine gerarchico a ogni giunzione di rami. Egli fornisce in-

formazioni idrologiche maggiori per alcuni aspetti (numero totale di sorgenti a monte di uno specifico ramo e numero di rami che afferiscono a un generico ramo), secondo lo schema qui sotto riportato (Figura 37).

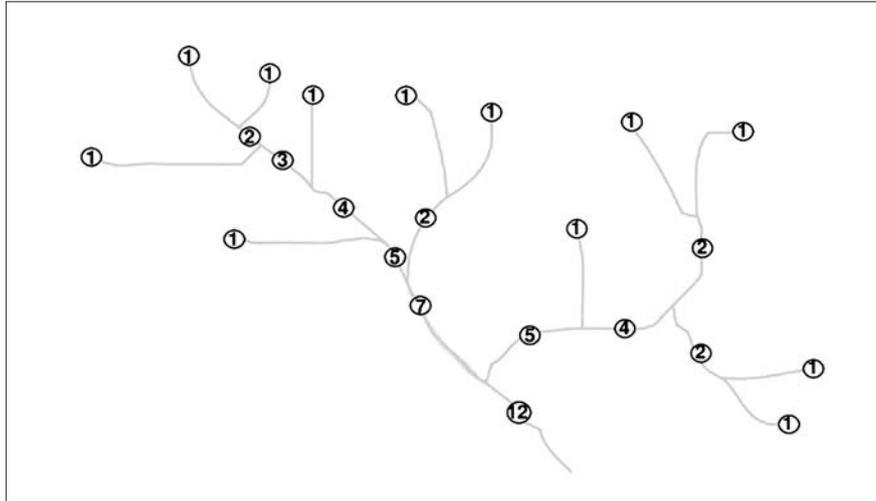


Figura 37: Esempio di reticolo di drenaggio (in questo caso dendritico) di 12° ordine, che illustra la classificazione gerarchica dei singoli rami secondo il sistema di ordinamento di Shreve.

L'azione dell'acqua si esplica anche nel modellamento delle forme costiere, attraverso la concomitante dinamica delle correnti marine, delle maree e del moto ondoso che spagliano e ridistribuiscono i sedimenti sversati in mare dai corsi d'acqua, rielaborano i depositi sciolti costieri ed erodono le formazioni rocciose presenti.

In particolare, l'ambiente deltizio o di transizione risulta dall'interazione tra fiume e mare e la tipologia di delta dipende dall'intensità dei processi fluviali e marini in atto.

Lo schema qui sotto sintetizza le varie forme di modellamento deltizio più comuni (Figura 38), illustrate poi singolarmente da immagini di Google Earth (Figure 39-44).

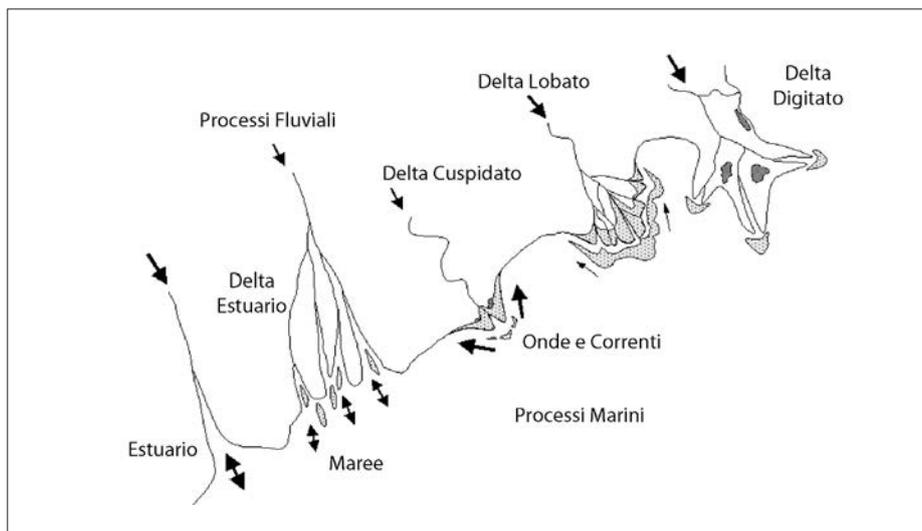


Figura 38: Tipi di delta evoluti in presenza di azione crescente delle correnti tidali (costiere) e dei processi di trasporto fluviali, tra di loro contrastanti.



Figura 39: Delta digitato complesso (anche detto 'a piede d'uccello') del Mississippi (Louisiana, USA) attualmente attivo, su composizione a falsi colori di immagine Landsat ETM. Molto evidente il materiale in sospensione sversato in mare dai vari bracci del fiume (in colore bianco-celeste più o meno marcato).

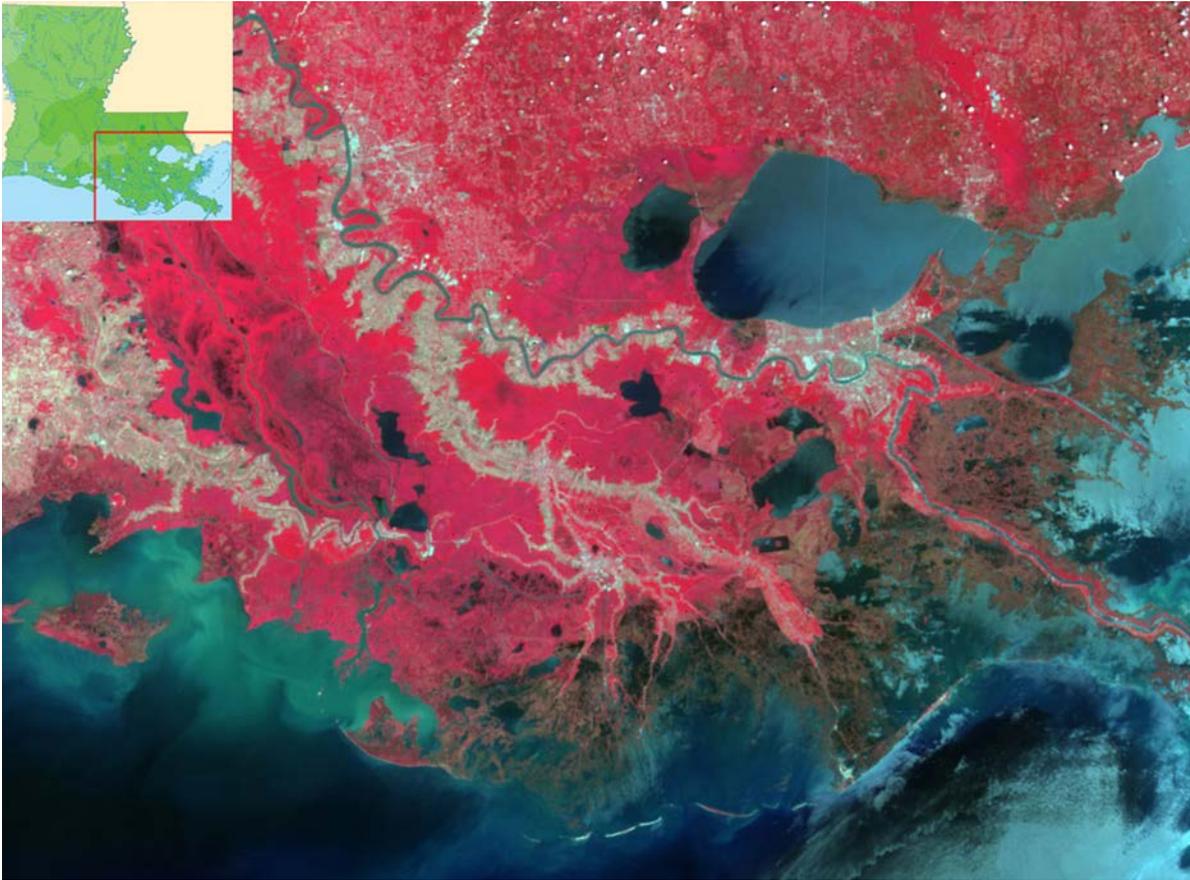


Figura 40: Il vecchio apparato deltizio Quaternario inattivo del Mississippi (in rosso verso terra) è un tipico esempio di delta lobato nonché di processo avulsivo, ovvero di costante modifica di un ambiente deltizio.

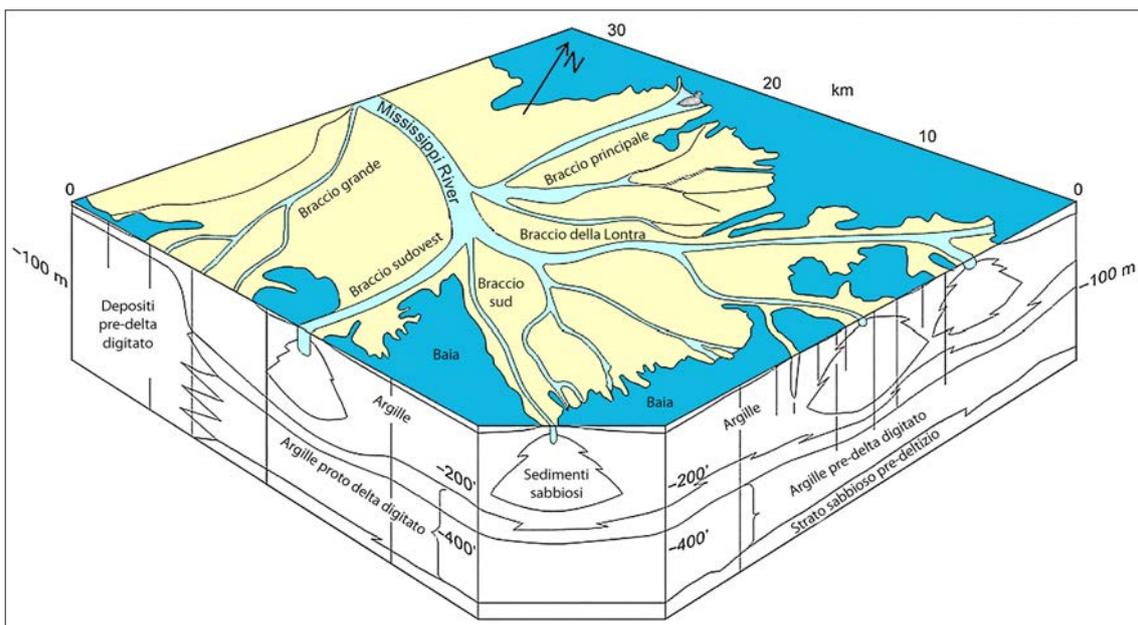


Figura 41: Schema della struttura geologica del delta complesso Quaternario antico e attuale del Mississippi.



Figura 42: Delta cuspidato del Po attualmente attivo, con notevole materiale fine in sospensione portato dai vari rami e riversato in mare. Le correnti tidali (costiere) hanno una direzione rotatoria in senso antiorario.



Figura 43: Delta-estuario del Gange-Bramaputra con apporto di enormi quantità di materiale fluviale in sospensione ed elevata attività di accrescimento.



Figura 44: Estuario asimmetrico del Fiume Congo, con chiaro accrescimento del lobo di sinistra (meridionale) a causa di persistenti correnti tidali con andamento antiorario.

Frequentemente, in fasce costiere di ambiente marino marginale come quelle presenti lungo vari tratti della Penisola arabica si formano delle *sabkha* con depositi evaporitici (Figura 45), che favoriscono attorno lo sviluppo di una vegetazione alofita (mangrovie, salicornia) e che hanno attratto nel tempo insediamenti più o meno temporanei di interesse geoarcheologico (*shell midden sites*) (Figure 46-47).

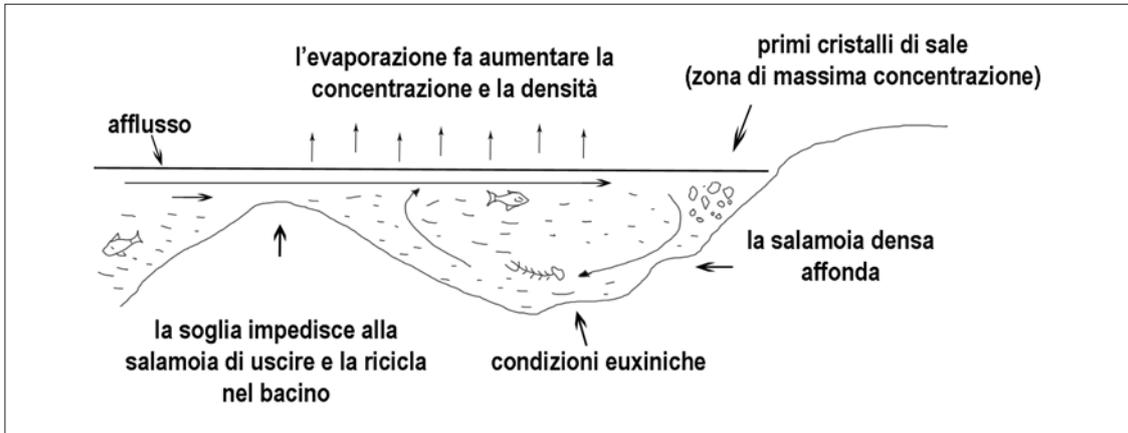


Figura 45: Processo di formazione di una sabkha costiera.



Figura 46: Tipico esempio di sabkha costiera alla radice di Ras al-Hamra, Oman.

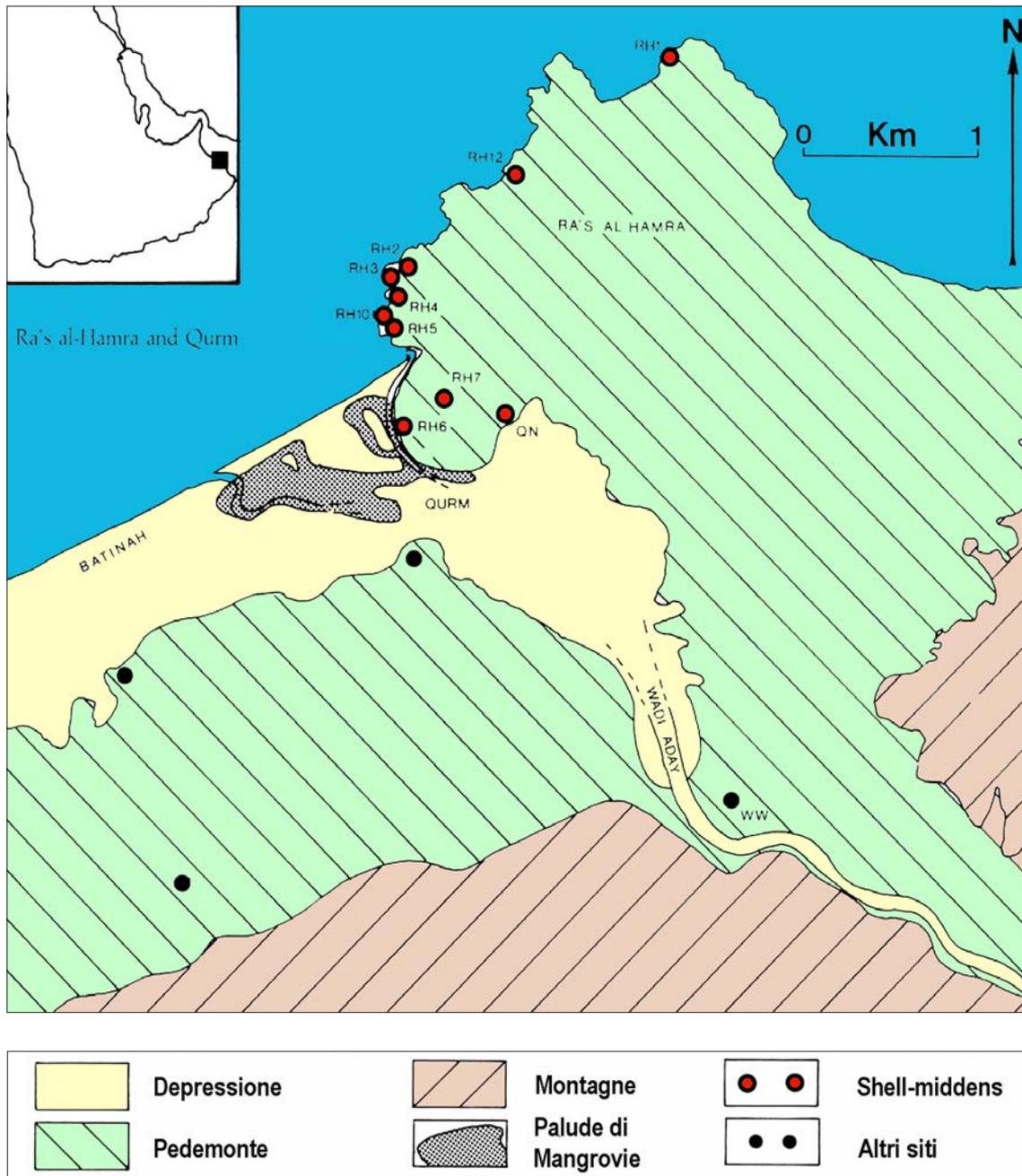


Figura 47: Shell midden sites in relazione alla sabkha di Ras al-Hamra (Oman).

Nelle zone aride e semiaride, in cui la copertura vegetale è ridotta o praticamente assente come nei deserti, è il vento l'agente principe del modellamento terrestre, con la triplice azione di erosione (corrasione), trasporto (deflazione per saltazione e sospensione) e accumulo (dune).

Molte aree del Vicino Oriente e in particolare della Penisola arabica, del subcontinente indiano e del centro Asia ospitano vasti deserti per lo più sabbiosi (*erg*) (Figure 48-49), che a differenza di quelli petrosi (*serir*) o rocciosi (*hamāda*) presentano una grande varietà di forme dunari dalle più semplici alle più complesse.

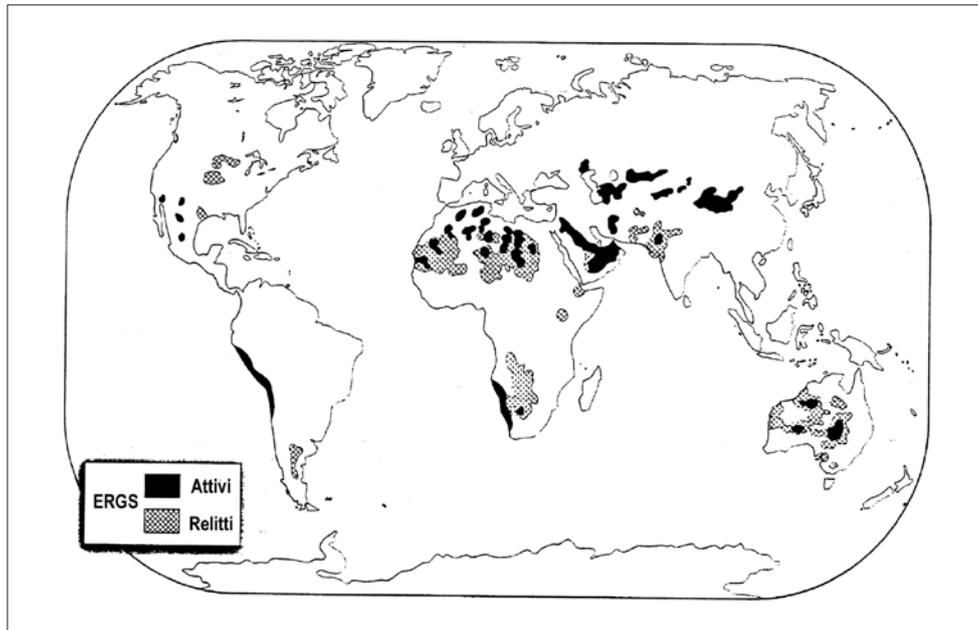


Figura 48: Localizzazione dei maggiori ergs attualmente attivi e relitti (massimo dell'ultimo glaciale Würmiano 18.000 anni fa).

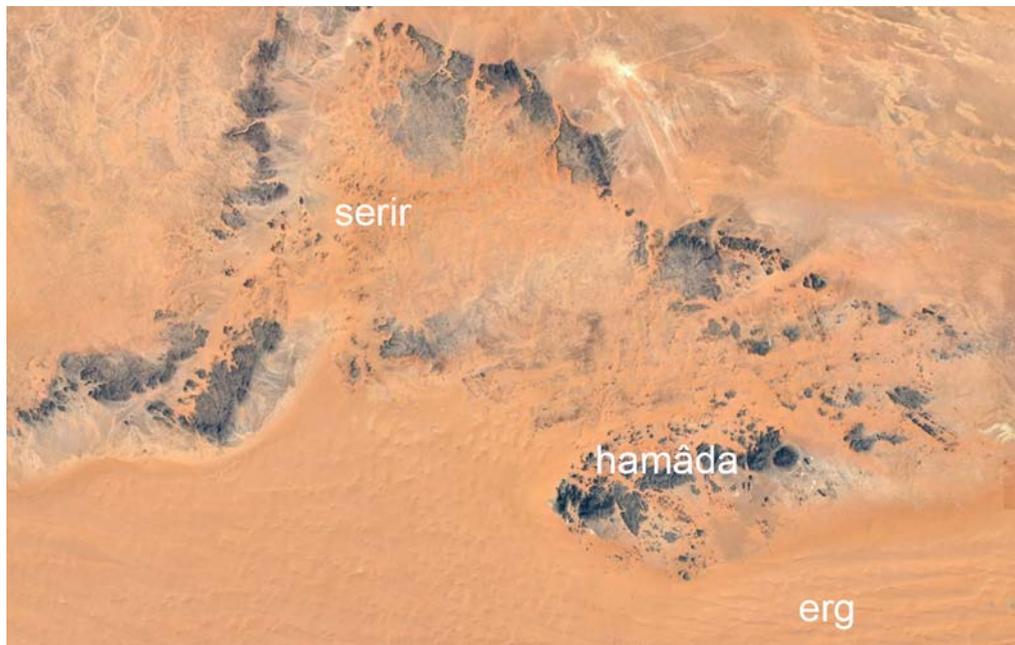


Figura 49: Le tre tipologie di deserto (sabbioso-erg, petroso-ciottoloso-serir, roccioso-hamāda) che si incontrano collegate al Jebel Nejma, posto a una sessantina di km a sud-ovest di Dūmat al-Jandal (Arabia Saudita). Il litotipo prevalente del rilievo è costituito da arenarie grossolane continentali del Devoniano a stratificazione incrociata, di colore marrone-rossiccio e grigio-scuro, appartenenti al 'Ghuwar Member' della 'Tawil Formation'. È utile sottolineare come gli affioramenti arenacei siano coperti da uno straterello alterato di 'vernice del deserto' che li fa apparire di colore grigio-scuro o quasi nero come gli espandimenti di lava basaltica della Harrat al-Harrah. Sotto il profilo dell'interpretazione di immagini questo fenomeno è ben conosciuto come 'convergenza tonale' di superfici o masse rocciose aventi diversa natura.

Il seguente schema triangolare sintetizza i campi di formazione ed esistenza dei vari tipi di dune in funzione dell'intensità del vento, della presenza o meno di copertura vegetale e ovviamente non ultimo della disponibilità di sabbia (Figura 50).

Se poi, nell'ipotesi di aree prive totalmente di vegetazione, si tiene presente la costanza o meno della direzione del vento (unimodale o variabile-complessa) con intensità via via maggiori che possono trasportare sempre più sabbia, allora la casistica si arricchisce con dune stellate e complesse (Figure 51-54).

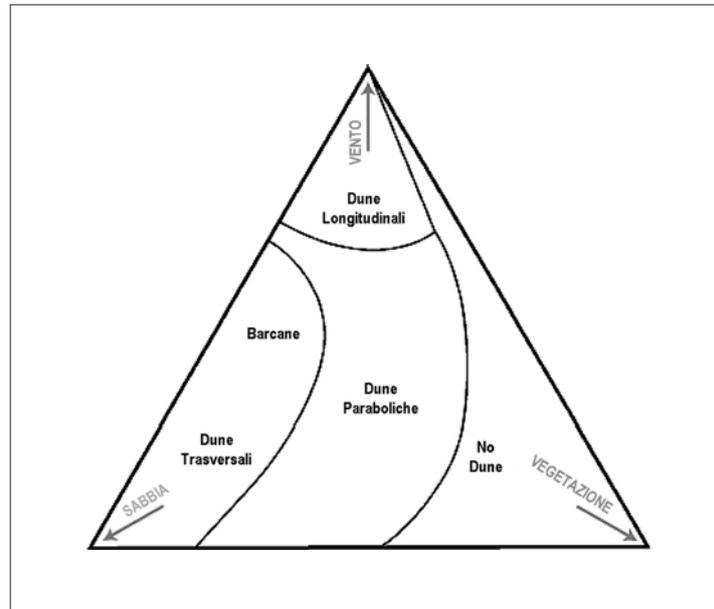


Figura 50: Diagramma triangolare con i campi di esistenza dei singoli tipi di dune.

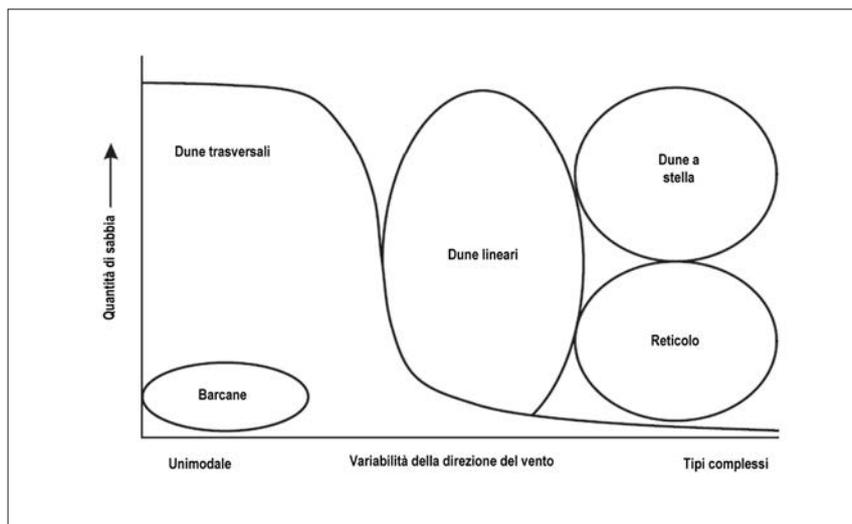


Figura 51: Formazione dei vari sistemi di dune semplici e complessi in presenza della sola azione eolica (deflazione e accumulo) e della disponibilità di sabbia. Si noti che le dune complesse a forma stellata prevedono la concomitante presenza di molto materiale e di venti sufficientemente violenti da direzioni variabili, mentre le 'barcane', le dune mobili più comuni e tipiche delle aree desertiche, sono formate da venti unidirezionali anche con limitato apporto costante di granelli sabbiosi.

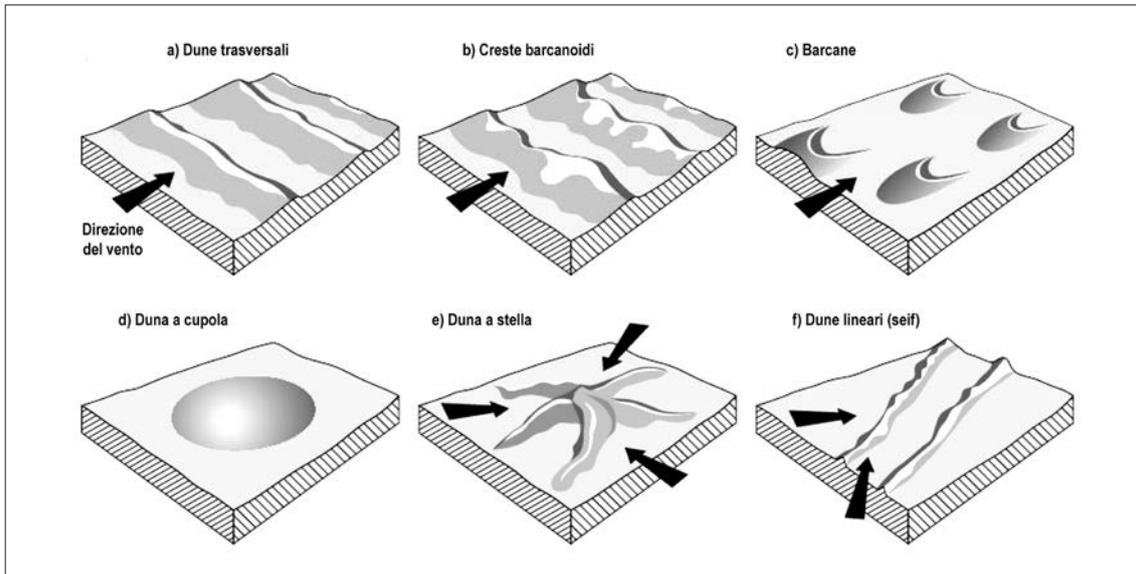


Figura 52: Principali tipologie dunari.

Le barcane hanno una elevata mobilità e rappresentano una delle le forme più caratteristiche degli *erg* attivi al giorno d'oggi (Figure 53-54).

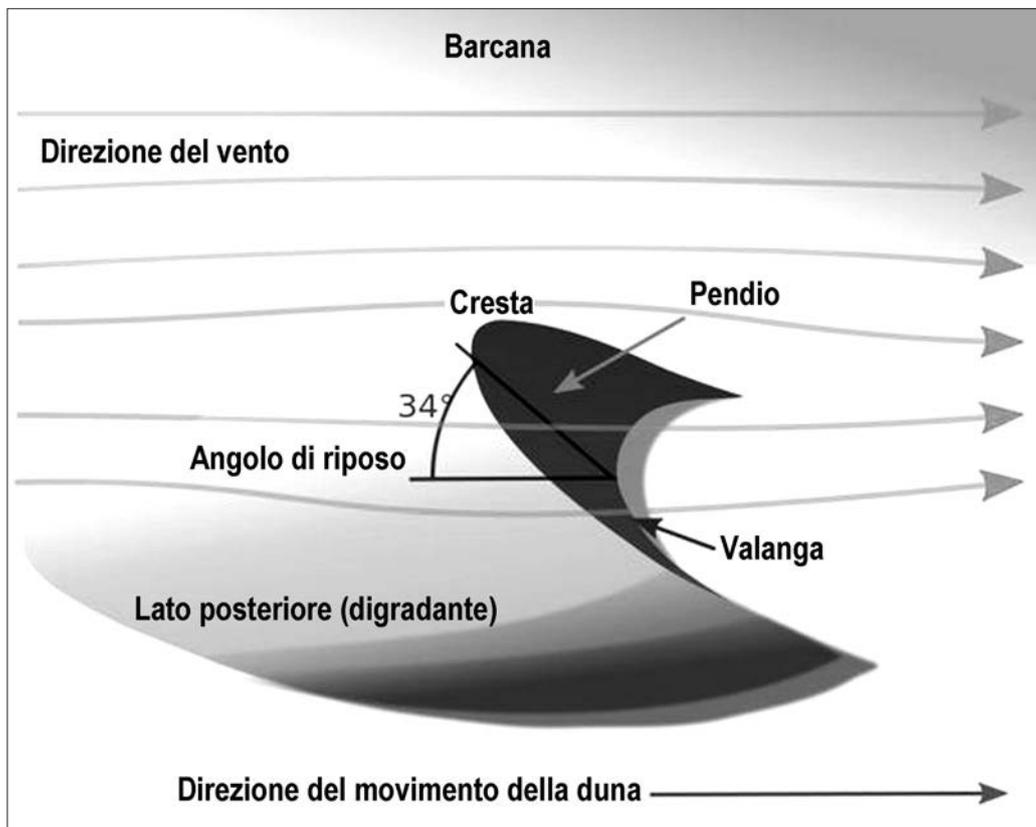


Figura 53: Schema strutturale di una barcana.



Figura 54: Barcane mobili nella Valley of Lakes ai piedi della 'Grande Montagna Sacra' (Ikh Bogd Uul) in Mongolia, riprese da Google Earth. Evidente la direzione del vento prevalente da NO (alto a sinistra) verso SE (basso a destra).

Edifici eolici più estesi a livello regionale sono caratterizzati da sistemi di dune longitudinali (Figura 55), talora allungate per decine di km, e in subordine da dune trasversali (Figura 56).



Figura 55: Enormi dune longitudinali nel deserto di Ramlat as-Sab'atayn (Yemen), lunghe diverse decine di km. Il loro profilo trasversale NO-SE mostra che si elevano fino a una cinquantina di metri sul letto interdunale.



Figura 56: Dune trasversali della lunghezza di 1-2 km, con creste elevate di qualche metro rispetto alla base. Il loro profilo trasversale da NO verso SE mostra chiaramente la successione ravvicinata delle creste che si ergono di qualche metro sulla base topografica pendente dolcemente verso SE.

Sotto l'azione di venti variabili in rotazione si possono formare anche dune 'stellate' o complesse, come quelle che si incontrano nel deserto del Rub' al-Ḥālī saudita vicino al confine con l'Oman, grossomodo a 20°18' di lat. nord e 54°53' di long. est (Figura 57).



Figura 57: Dune a forma stellata e complessa di cospicua altezza al centro (circa una cinquantina di metri) rispetto alla lunghezza complessiva dei bracci (qualche centinaio di metri).

Da ultimo, agli agenti del modellamento considerati finora va aggiunta l'azione dell'uomo, che risulta tanto più rilevante quanto più prolungata e intensa è stata la sua presenza insediativa e produttiva in una determinata area. Un classico esempio è dato dalla riorganizzazione spaziale del territorio agricolo, con gli antichi sistemi irrigui e le suddivisioni particellari sia storiche che attuali.

Tra i primi si possono citare il noto e vasto sistema irriguo a valle della antica diga di Mārib (Yemen), sviluppatosi tra la seconda metà del II millennio a.C. e attivo grossomodo fino al VI secolo d.C., per poi essere ripreso con la costruzione della recente nuova diga sul wādī Dānah nel 1986 (Figura 58).



Figura 58: Sistemi irrigui antichi e attuali a monte della città di Mārib (Yemen), che hanno improntato le forme del paesaggio con una fitta serie di canali adacquatori principali e secondari, delimitanti la parcellizzazione agraria, ripresi da immagine di Google Earth.

Tra le seconde, la centuriazione romana su ampie zone di pianura è l'esempio più tipico di un intervento antropico che ha lasciato una impronta duratura sul territorio attraverso i secoli, tale da trasformarne in modo indelebile la fisionomia.

Le forme e le dimensioni delle parcelle agricole dell'intera pianura veneto-friulana (Figure 59-60), come pure il reticolo viario e quello delle canalizzazioni collegate al sistema idrografico principale, sono stati modellati o influenzati da questo primigenio intervento pianificatorio romano.

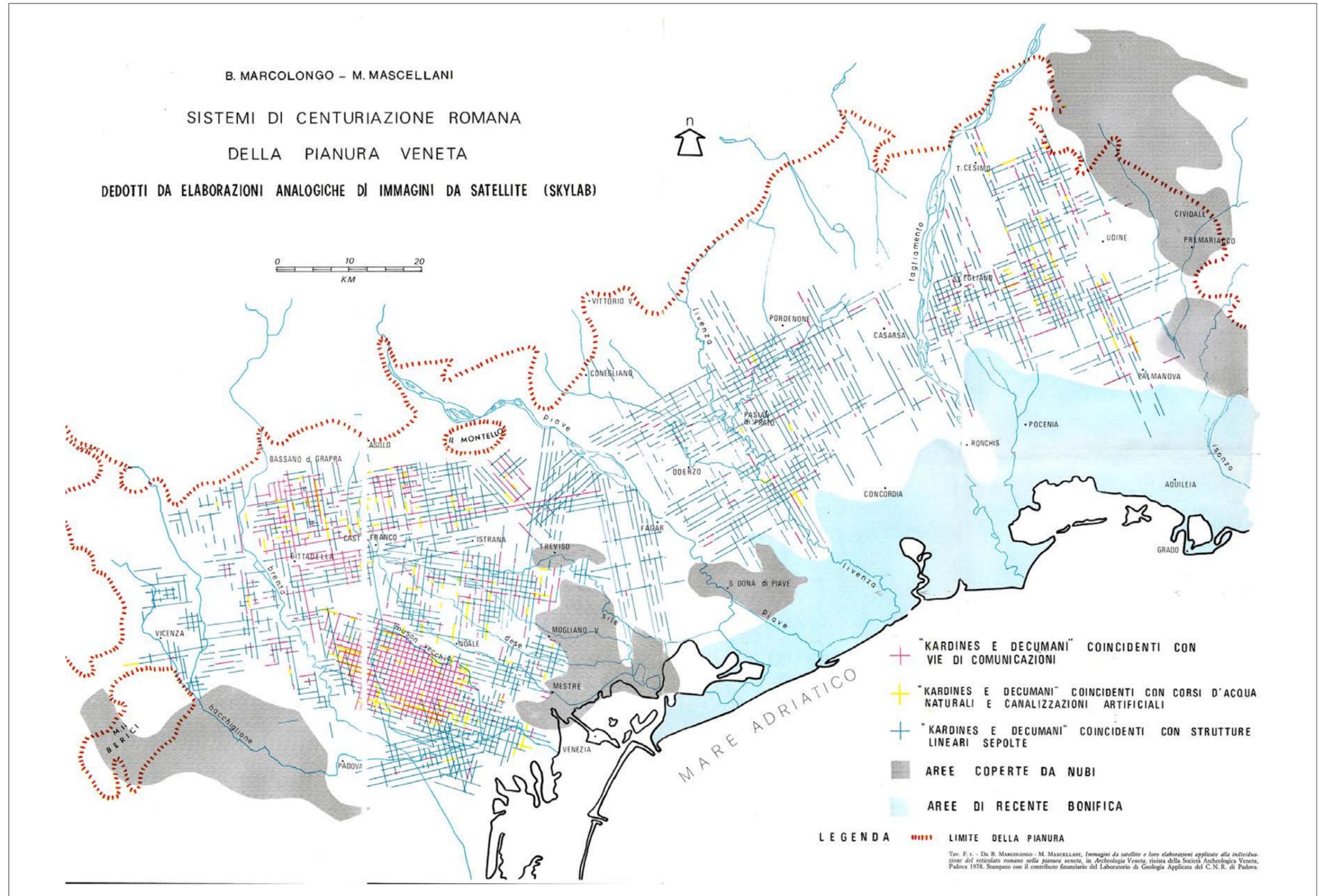


Figura 59: I vari sistemi di centuriazione romana che coprono l'intera pianura veneto-friulana hanno guidato tutti i successivi sviluppi agrari, viari e insediativi (Marcolongo e Mascellani 1978).



Figura 60: Stralcio di immagine Landsat ETM sulla pianura a est del F. Brenta, elaborata per evidenziare il regolare e fitto sistema del 'graticolato romano' ancor oggi esistente (Marcolongo e Mascellani 1978).

Tutti questi numerosi esempi non sono certamente esaustivi dell'ampia gamma di forme risultanti dall'azione morfogenetica dovuta alle forze esogene di gravità, acqua, vento e uomo, ma in ogni caso illustrano a grandi linee le morfologie che il ricercatore incontra nella sua indagine interpretativa preliminare condotta sulle più diffuse immagini disponibili.

L'immagine sottostante ripresa da *Google Earth* sull'Oman centrale (Figura 61) contiene una sintesi delle forme del rilievo sin qui viste, dapprima improntate dalla tettonica e successivamente modellate dalla gravità, dall'acqua di ruscellamento e dal vento in un clima particolarmente arido.

Il reticolo idrografico dendritico è molto denso e sviluppato nella copertura di rocce carbonatiche neogeniche (C), meno denso e talora disarticolato, ma con imponenti conoidi alluvionali anche coalescenti, nelle 'ofioliti' del Cretaceo (O). Nella porzione centro-meridionale si estende un edificio eolico caratterizzato da un sistema di imponenti dune longitudinali, che fa parte del deserto omanita della Šarqiyyah.

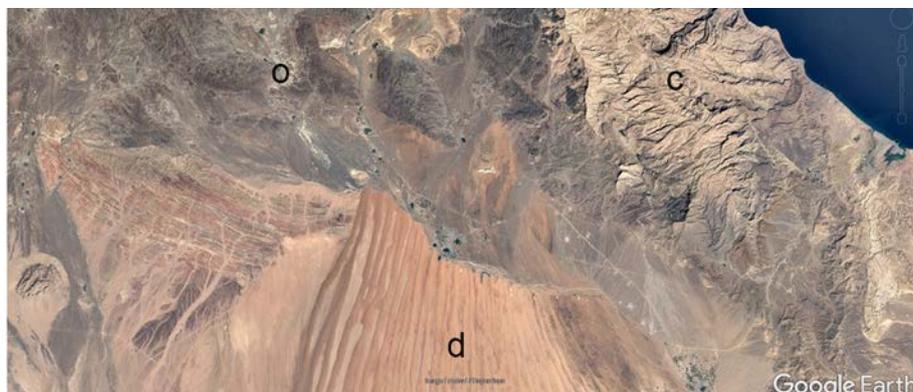


Figura 61: Paesaggio dell'Oman centrale osservato da piattaforma satellitare (immagine Ikonos). Ofioliti cretacee 'O' (Samaïl ophiolite nappe) poco riflettenti, rocce carbonatiche neogeniche 'C' altamente riflettenti e complesso dunare 'D' mediamente riflettente.

### 2.4.3 Condizioni climatiche

Il clima influisce in modo determinante nei processi morfogenetici a prevalente componente esogena, quali lo sviluppo della rete idrografica, l'evoluzione delle fasce costiere, o il modellamento eolico in zone desertiche.

Come accennato alla fine del paragrafo 2.3, storicamente fu il geomorfologo tedesco Julius Büdel (1903-1983) che pose l'accento sull'importanza del clima nella formazione del paesaggio e delle sue forme, sottolineando in particolare la presenza di morfologie ereditate dal passato riconoscibili nel contesto attuale e frutto di condizioni climatiche differenti. Tali forme sarebbero quindi il risultato di una combinazione di processi che per la quasi totalità delle regioni di media latitudine, come l'intera area mediterranea, sono classificati 'relitti' climatici. Di conseguenza lo studio delle morfologie relitte permette di inferire il clima di epoche precedenti e l'intero globo può essere suddiviso in 'zone morfoclimatiche' utili per inquadrare a scala regionale i processi che vi si incontrano (Figure 62-63).

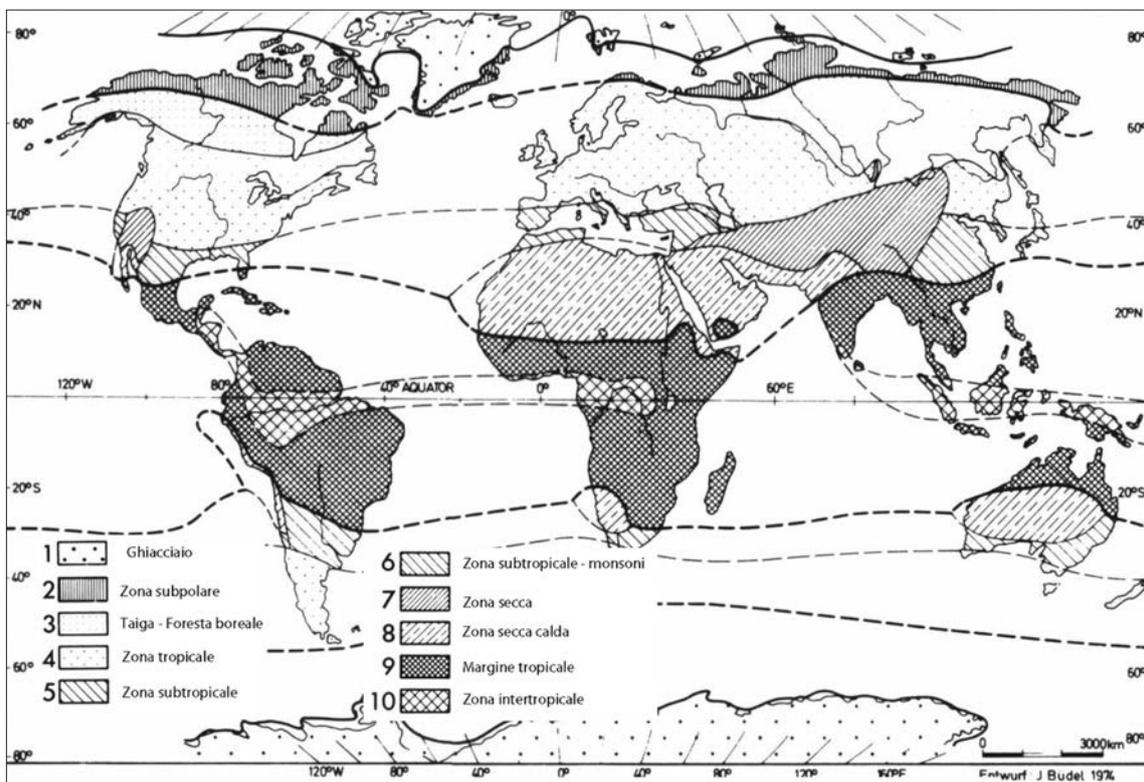


Figura 62: 'Zone morfoclimatiche' attuali: 1-zona glaciale; 2-zona subpolare di dissezione intensa (elevata incisione valliva); 3-zona di taiga di dissezione in ambiente di 'permafrost'; 4-zona extratropicale di dissezione debole; 5-zona subtropicale di morfogenesi mista (ambiente di tipo mediterraneo); 6-zona subtropicale di morfogenesi mista (regione dei monsoni); 7-zona arida a inverni freddi con alterazione superficiale ed evoluzione verso glacies e pediments; 8-zona arida calda di conservazione delle superfici planiziali antiche e di proseguo dei processi di spianamento per azione di spandimento fluvio-eolico; 9-zona peritropicale di spianamento intenso; 10-zona intertropicale di spianamento parziale.

La definizione e la ripartizione di zone geomorfologiche climatiche sono state ampiamente rivedute in seguito da L. Beyer che propone un sistema di classificazione climatico utile a scopi geomorfologici (Beyer 1981). Egli riconosce sei zone di diversa attività morfodinamica recente

con forme e processi tipici, i cui limiti areali sono definiti in accordo a precisi valori meteorologici di soglia (Figura 64).

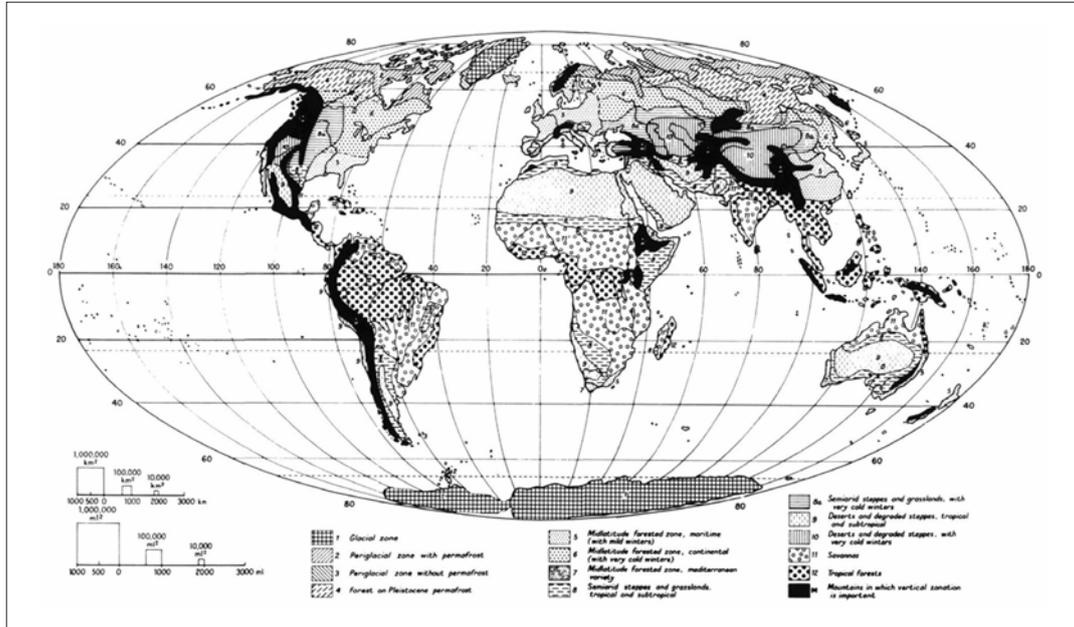


Figura 63: Zone morfoclimatiche della Terra basate sulla presenza o meno di vegetazione e sui suoi effetti geomorfologici.

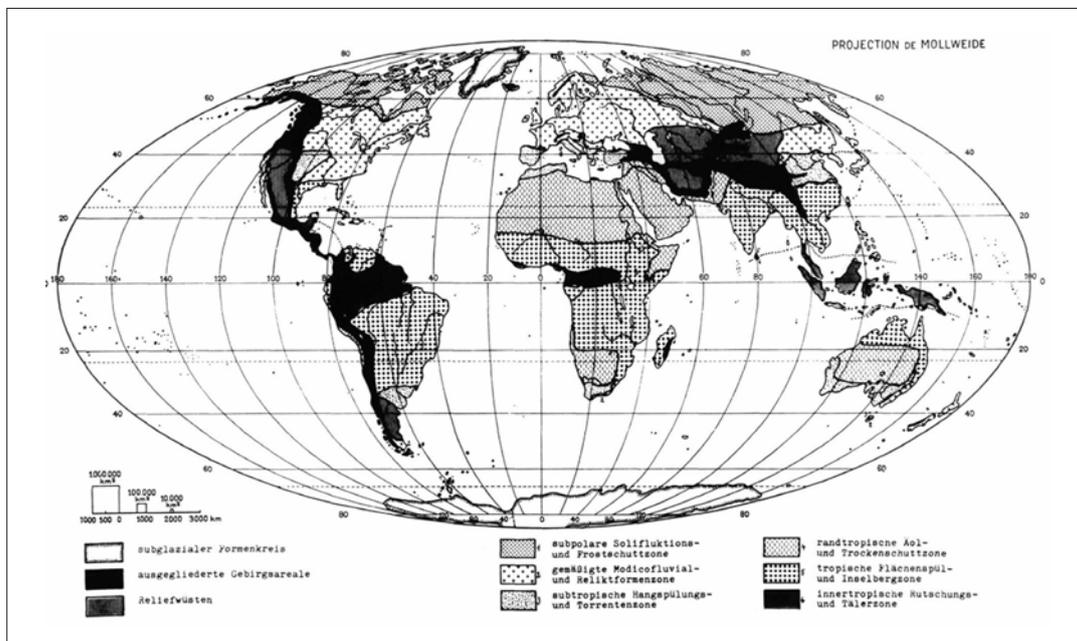


Figura 64: Classificazione climatica a scopi geomorfologici proposta da L. Beyer: 1-zona subpolare di soliflusso e di frantumazione della roccia a causa del ghiaccio ('debris' crioclastico); 2-zona temperata di azione modico-fluviale e di forme relitte; 3-zona subtropicale di ruscellamento diffuso e di corsi d'acqua stagionali (wadi); 4-zona paratropicale di azione eolica e 'reg'; 5-zona tropicale di dilavamento laminare e 'inselbergs'; 6-zona equatoriale di scivolamento franoso e di vallate.

A titolo esemplificativo si riportano alcuni esempi dei processi e delle forme tipici delle 'zone morfoclimatiche' di Beyer (Figure 65-73).



Figura 65: Lobi di soliflusso in condizioni di saturazione dello strato superficiale, che scivola sul basamento roccioso impermeabile, Garry Island, Northwest Territories, Canada.

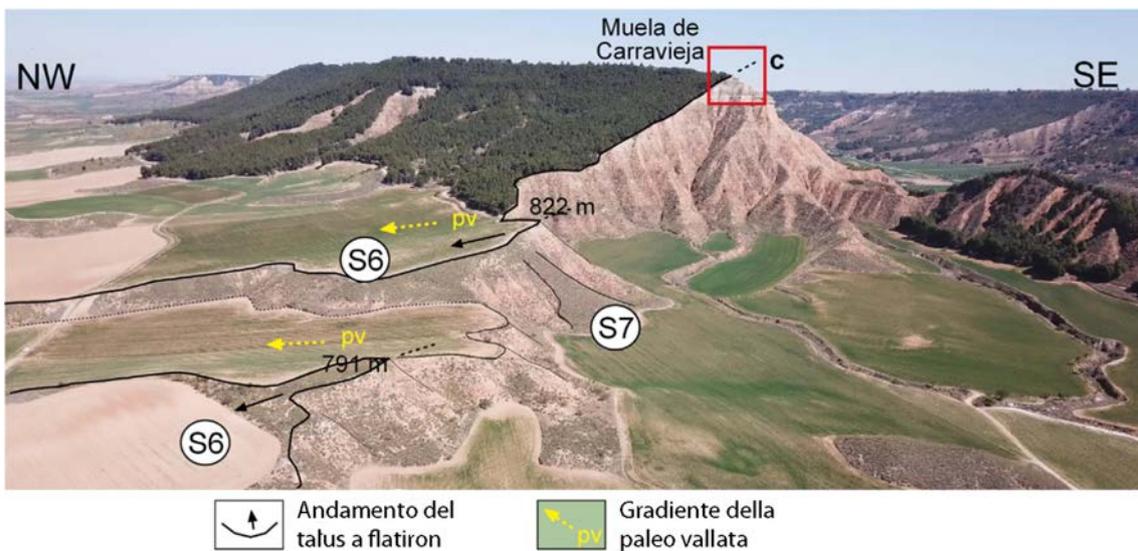


Figura 66: Foto della Muela de Carravieja nell'area di Taracena-Guadalajara (Spagna centrale), che mostra la presenza di pendii relitti e paleo-valli quaternarie in zona temperata, prodotto di una situazione climatica precedente all'attuale.

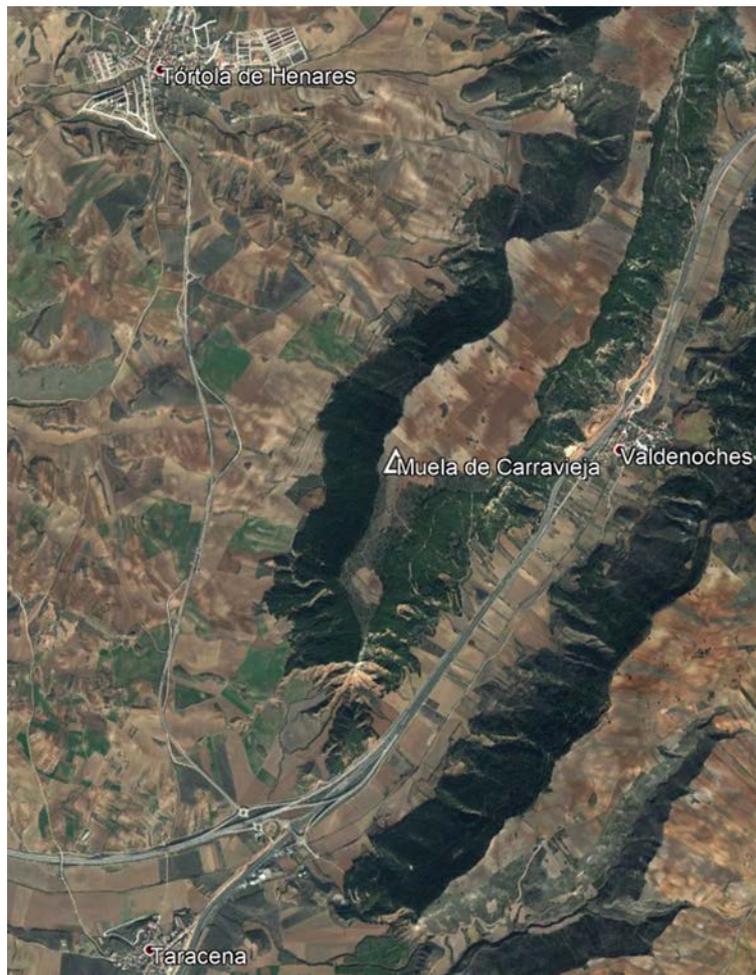


Figura 67: La Muela de Carraveja su immagine Ikonos di Google Earth.



Figura 68: Tipico paesaggio in zona subtropicale con ruscellamento diffuso (sheet runoff) e locali wadi e profonde incisioni di ruscellamento concentrato (gullies) vicino a Tirunelveli nel Tamil Nadu (India del sud). Sullo sfondo si erge la catena montuosa di Agasthyamalai, che fa parte dei Ghat occidentali e rappresenta un ostacolo per la penetrazione del monzone proveniente dal Kerala (sullo sfondo) nel Tamil Nadu (davanti).



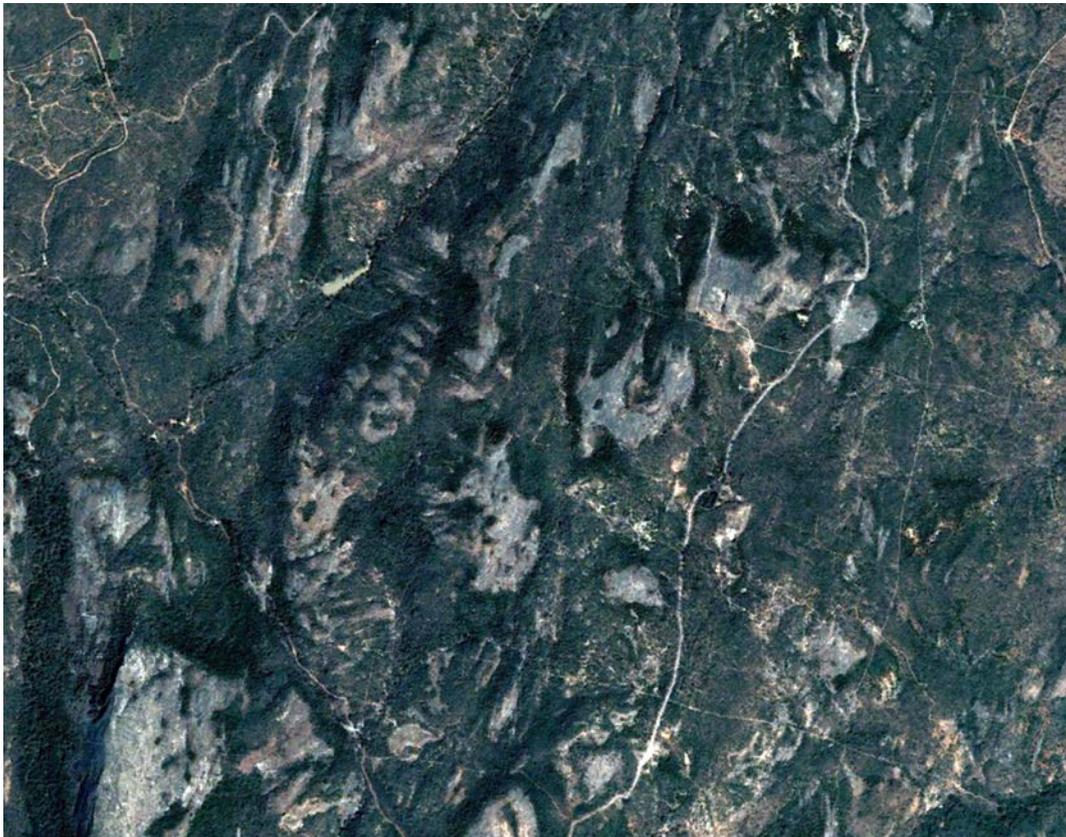
Figura 69: Foto di reg (serir) nell'Adrar, zona paratropicale con prevalente azione eolica in Mauritania.



Figura 70: La stessa zona di reg nell'Adrar ripresa da piattaforma satellitare in Google Earth.



*Figura 71: Inselbergs granitici in zona tropicale nelle vicinanze di Bangalore (Karnataka, India).*



*Figura 72: Inselbergs granitici (forme tondeggianti verde chiaro) in un'area di densa vegetazione tropicale poco a sud di Bangalore.*

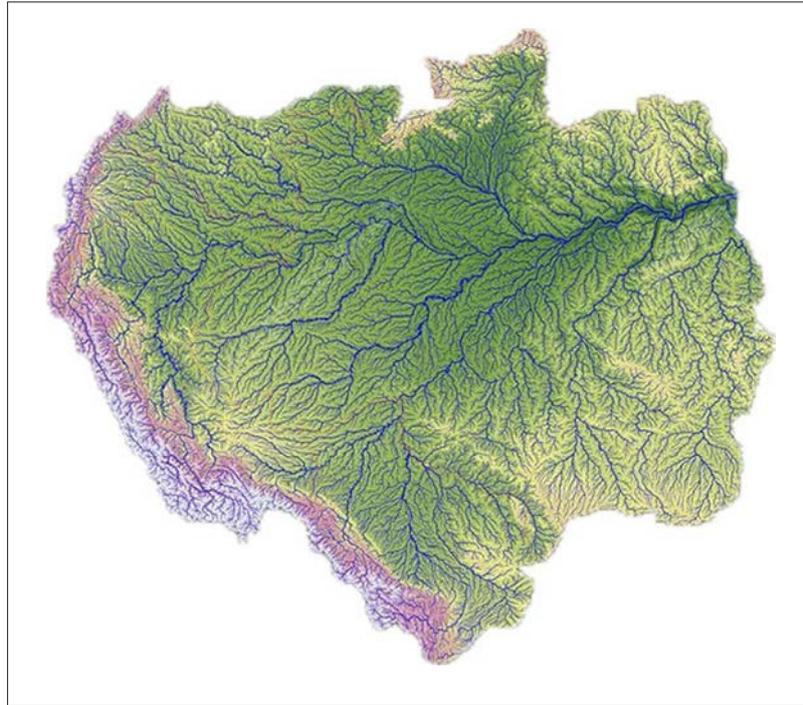


Figura 73: Zona equatoriale con il vasto bacino idrografico dendritico (oltre 7.000.000 kmq) del Rio delle Amazzoni.

## 2.5 Processi geomorfologici

Tutte le forme della superficie terrestre, una volta create da agenti endogeni quali i fenomeni tettonici (orogenesi, pieghe, faglie, bradisismi), sismici e vulcanici, che tendono a costruire strutture di rilievo primarie, vengono poi modellate da processi esogeni, che demoliscono, trasportano e ridepongono il materiale.

Uno schema di sintesi di queste due grandi categorie opposte illustra bene tutti i tipi di processi che continuamente plasmano il paesaggio in cui viviamo (Figura 74).

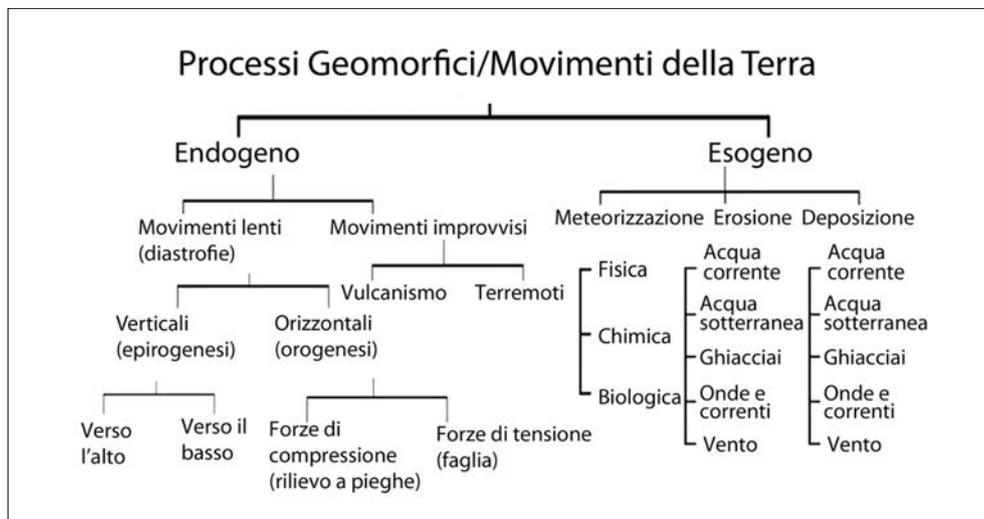


Figura 74: Processi geomorfologici endogeni ('costruttori') ed esogeni ('distruttori'), tra di loro in continua competizione.

I processi legati alla dinamica esogena della modellazione geomorfologica sono di tre tipi (Figure 75-76): erosione; trasporto; e deposizione.

Esempi di processi di erosione sono l'alterazione e la disgregazione delle rocce dovute al quotidiano alternarsi di riscaldamento e raffreddamento, o al deflusso laminare dell'acqua di ruscellamento, o all'azione delle onde marine lungo le coste. Esempi di processi di trasporto sono le colate di fango, il trasporto glaciale che crea morene, il trasporto del vento che forma le dune. Esempi di processi di deposizione sono depositi costieri, fluviali e carsici.

### 2.5.1 Processi fluviali

Tutti i corsi d'acqua seguono un processo evolutivo, per il quale la pendenza del profilo longitudinale del corso d'acqua tende a diminuire nel corso degli anni, attraverso l'erosione che spiana le zone a monte ('degradazione') e il deposito a valle dei materiali trasportati ('accumulo').

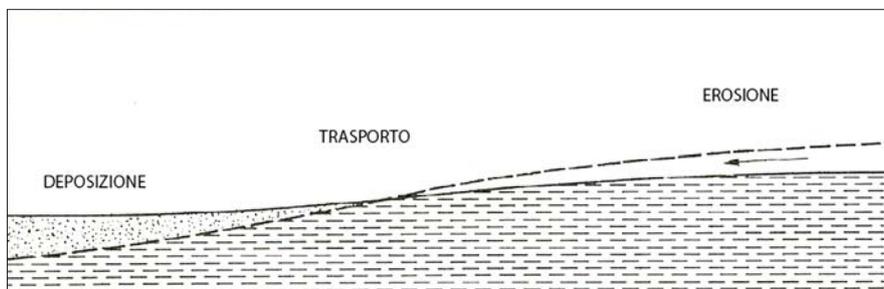


Figura 75: Schema del processo di erosione-trasporto-deposizione da monte a valle di un corso d'acqua.

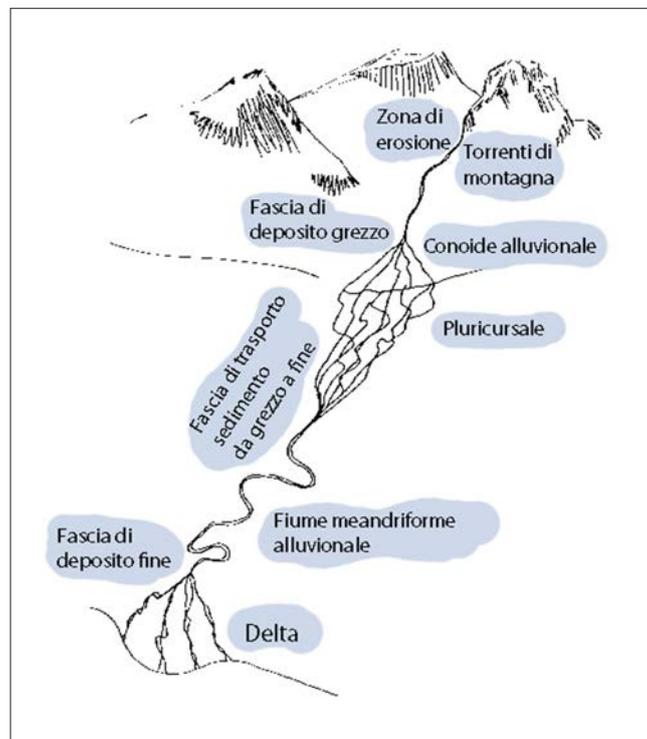


Figura 76: Tipico profilo longitudinale di un corso d'acqua.

Nello stralcio dell'immagine da *Google Earth* (Figura 77) gli affioramenti della formazione Tc (rocce carbonatiche del Terziario), assieme alle ofioliti che si intravedono nell'angolo di sud-ovest (basso a sinistra) sono le formazioni rocciose aggredite dall'erosione dovuta all'acqua (ruscellamento), i cui detriti più o meno fini sono trascinati per rotolamento e sospensione dagli wadi e poi rideposti sotto forma di alluvioni antiche Olal (nel passato) o come alluvioni attuali Ral.

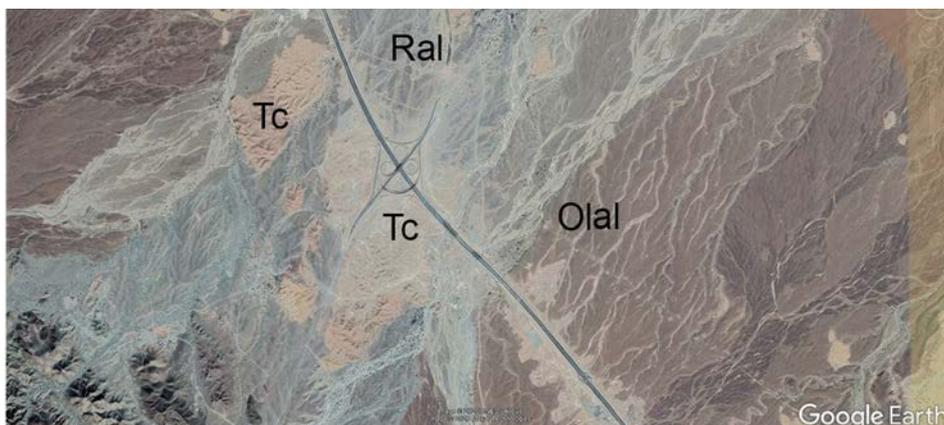


Figura 77: Paesaggio della regione della Batinah nord osservato da piattaforma satellitare (immagini Ikonos). Tc (rocce carbonatiche del Terziario), Olal (alluvioni antiche), Ral (alluvioni recenti).

### 2.5.2 Processi marini

Nel caso di processi marini l'erosione, generata dal moto ondoso, dalle correnti tidali, dalle maree e dai movimenti eustatici, si sviluppa sia su coste rocciose, per esempio scavando solchi alla base delle falesie (pareti verticali) e provocandone l'arretramento per crollo (Figura 78), sia su coste sabbiose asportando il materiale sciolto della spiaggia (Figura 79).

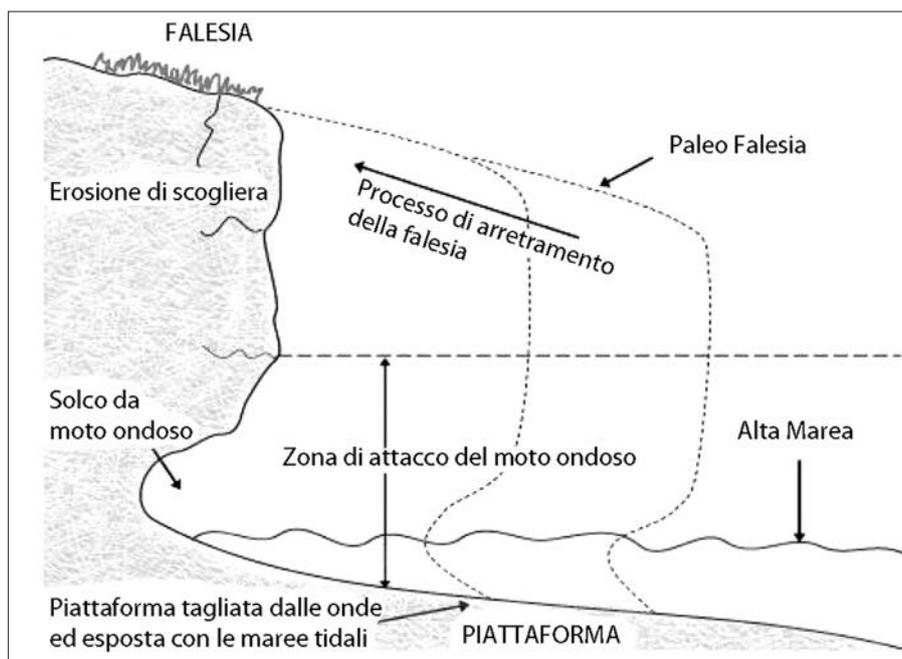


Figura 78: Erosione di costa rocciosa con falesia in arretramento.



Figura 79: Sulle sponde del 'Fiume Oceano'. Insediamento protostorico lungo la scogliera di Bimah, Oman settentrionale, con esposizione tidale della piattaforma erosa.

Il trasporto del sedimento sciolto fine lungo la costa è dovuto alla presenza della componente parallela alla costa stessa della corrente (Figura 80).

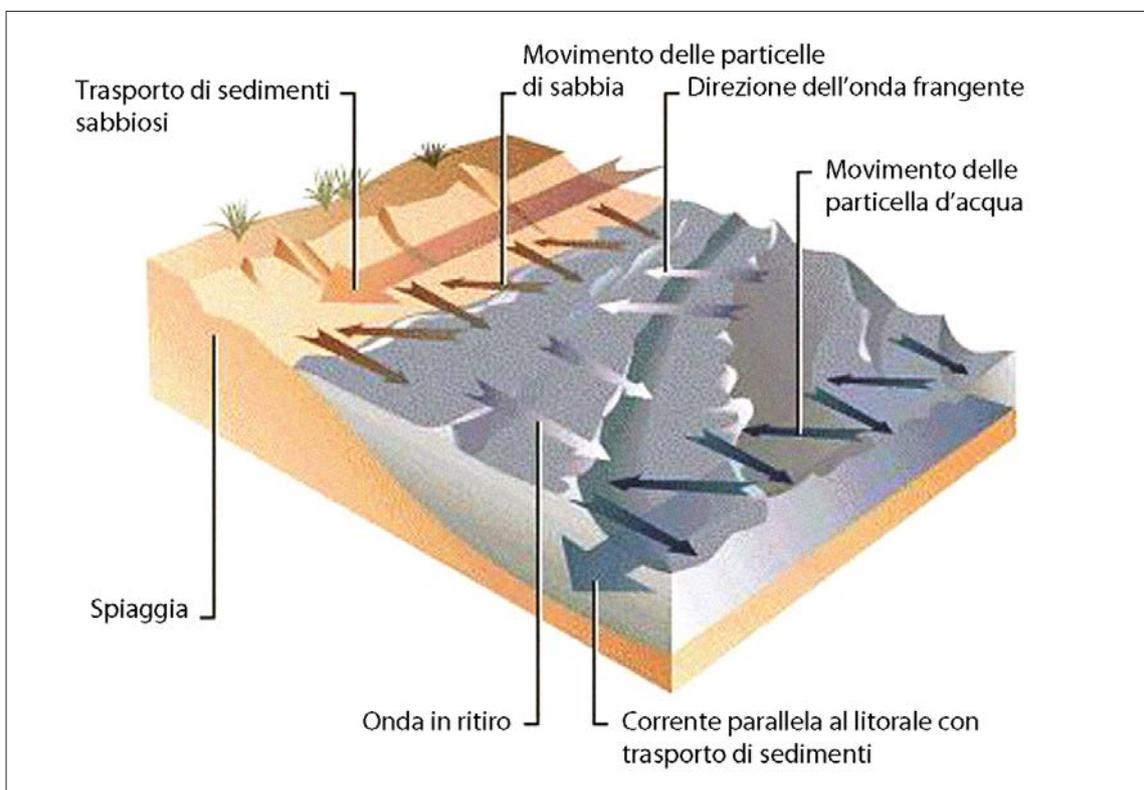


Figura 80: Deriva litorale ('longshore drift').

Tale fenomeno di trasporto fornisce il materiale per la creazione di varie forme di accumulo, come le 'frecce litoranee', le 'barriere' e i 'tomboli' sabbiosi (Figure 81-82).



Figura 81: Tipologia delle principali forme di accumulo di materiale fine sabbioso lungo la costa.

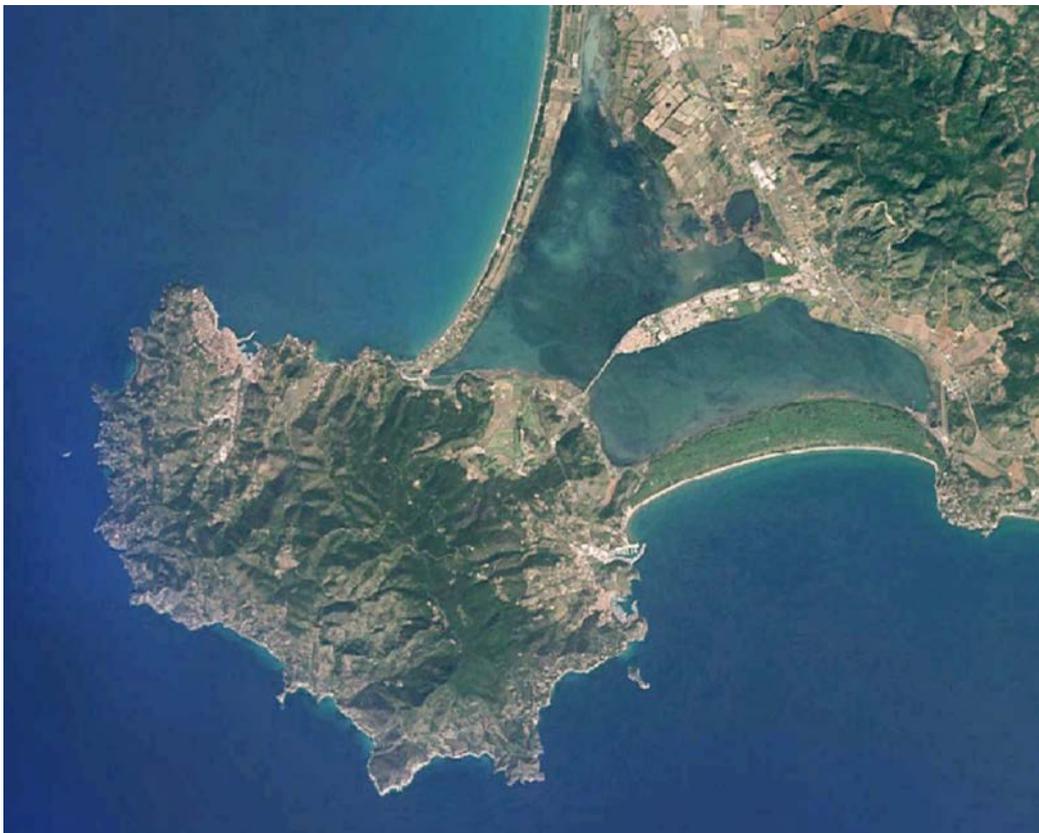


Figura 82: Classico esempio di 'tombolo' doppio che unisce il M. Argentario alla terraferma, delimitando una laguna al cui centro sorge la città di Orbetello.

### 2.5.3 Processi eolici

Da ultimo, il processo eolico si manifesta con tutta la sua intensità in estese aree del globo per lo più desertiche e a clima estremamente arido. L'erosione del vento può essere molto aggressiva, producendo talvolta forme veramente spettacolari, come gli 'yardang', i 'tafoni' e i 'funghi' (Figure 83-84).



Figura 83: Spettacolare 'fungo' da corrosione eolica nel deserto del Salar de Uyuni (Bolivia).

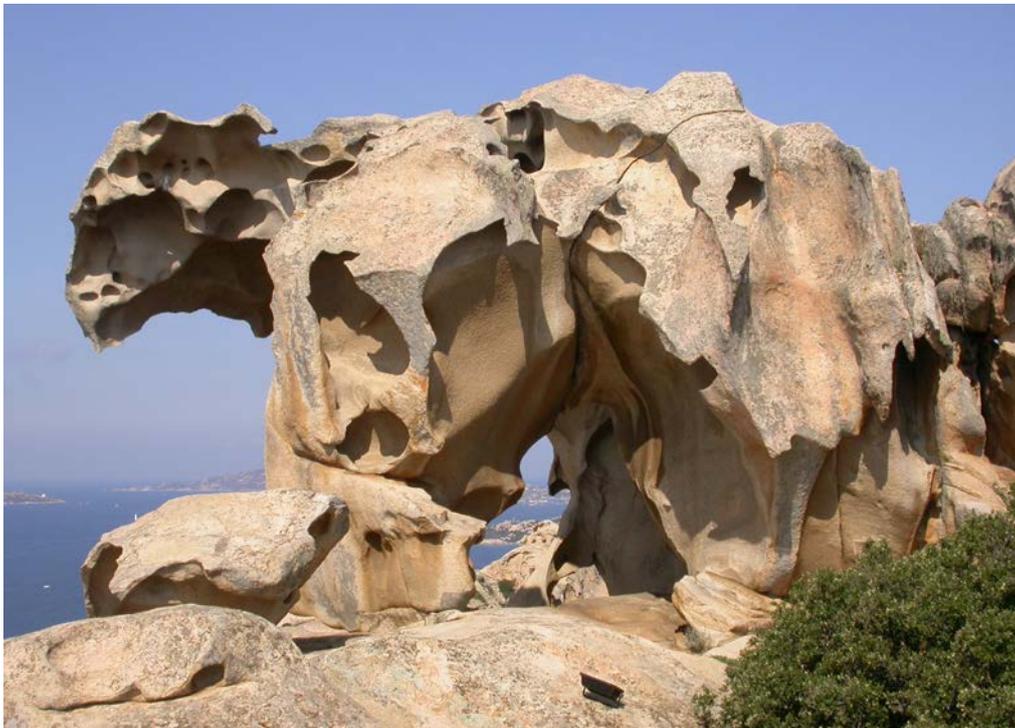


Figura 84: 'Tafone' di Capo d'Orso (Palau, Sardegna).

Il trasporto eolico avviene per ‘saltazione’ su distanze anche notevoli, se la forza del vento rimane sostenuta, oppure per sospensione nel caso di particelle di sabbia pulverulenta e solo in casi eccezionali per rotolamento sulla superficie del terreno di elementi più grossolani (Figura 85).

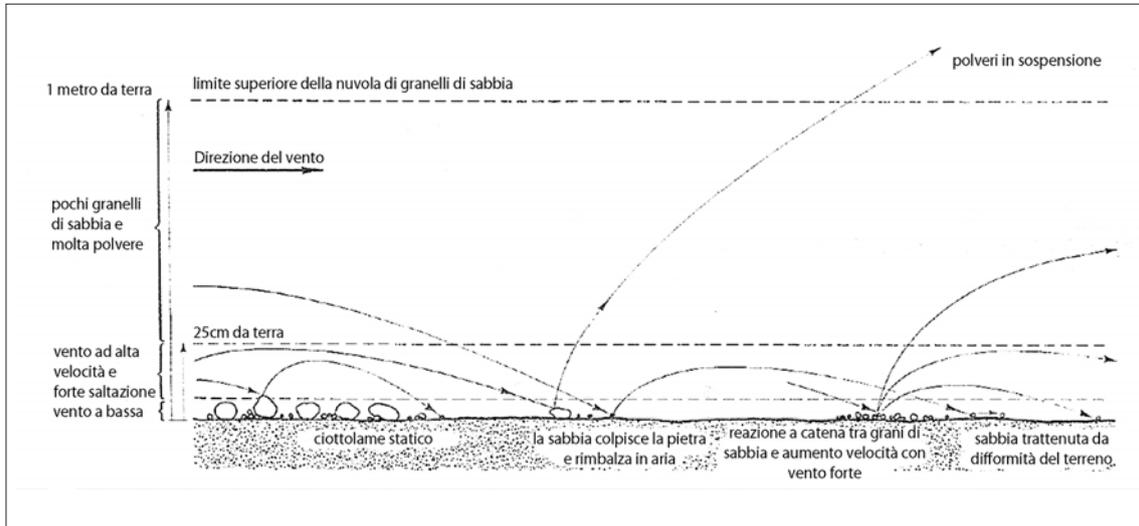


Figura 85: Modello di trasporto eolico di particelle più o meno fini e di elementi più grossolani.

Il risultato finale di tale processo è l’accumulo del materiale sabbioso nelle numerose forme dunari già presentate nel precedente paragrafo.

Qui si ricorda il ‘loess’, che è un sedimento eolico fine (0,01-0,05 mm), spesso diagenizzato e diffuso in molte regioni della Terra (Figura 86). Il luogo dove esso ha la massima estensione (640.000 km<sup>2</sup>) e potenza è il cosiddetto Altopiano del Loess nella provincia di Shanxi (Figure 87-88).

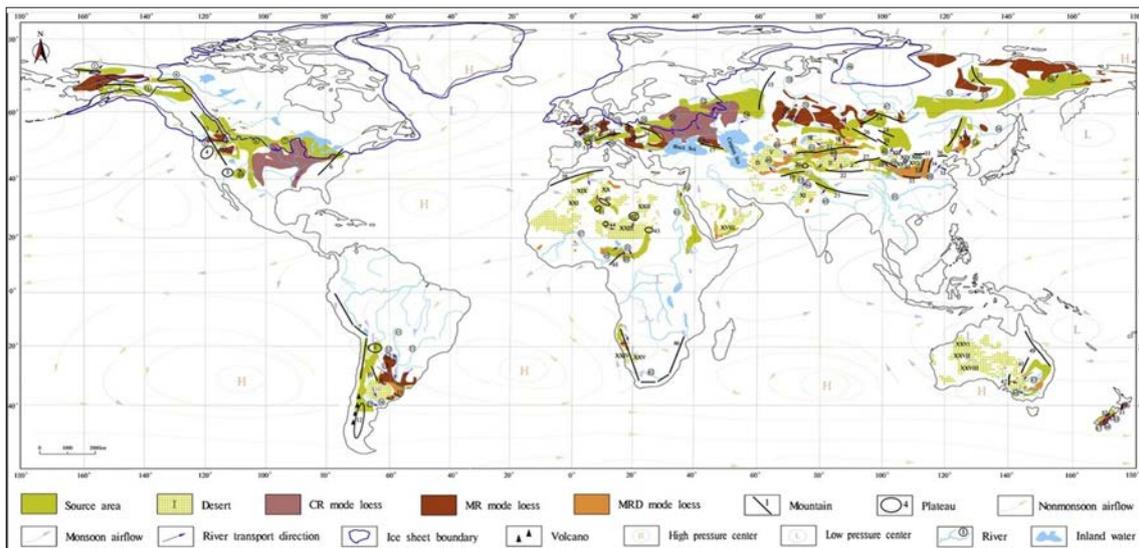


Figura 86: Distribuzione mondiale dei depositi di ‘loess’ distinti per modalità genetiche in ‘CR mode’ (provenienza da area glaciale continentale), ‘MR mode’ (provenienza da area montuosa) e ‘MRD mode’ (provenienza da area desertica).



Figura 87: Paesaggio con loess nei pressi di Hunyuan, Datong (Provincia di Shanxi, Cina).



Figura 88: Potente coltre di depositi di 'loess' attorno a Hunyuan.



### 3. Il telerilevamento

#### 3.1 Definizione e breve storia del suo sviluppo

Il telerilevamento è definibile, nella sua accezione più lata, come l'insieme di tecniche e metodi che permettono l'analisi di 'oggetti' o di 'fenomeni' ambientali (fisico-biologici), attraverso misure radiometriche registrate a distanza da sensori installati su piattaforme terrestri (treppiede, elevatore), aeree (pallone, aeroplano, drone) o spaziali (satellite, navetta).

Esso è considerato dai più come disciplina relativamente giovane, sviluppatasi contestualmente alla comparsa delle prime immagini riprese dallo spazio agli inizi degli anni Sessanta del secolo scorso e ricollegabile soprattutto alla classificazione delle 'firme spettrali' in campo agricolo.

Il significato etimologico del termine, tuttavia, rimanda a un ambito molto più ampio, costituito da tecniche di ripresa e da metodi di elaborazione e interpretazione delle immagini, le cui origini risalgono alla metà del XIX secolo e il cui sviluppo continua ininterrotto sino al presente. In particolare l'approfondimento concettuale del 'processo interpretativo', compiuto via via dagli studiosi con il superamento della semplice fase di 'lettura' (identificazione dei soli oggetti di superficie) e lo svolgimento della fase 'deduttiva' (riconoscimento della presenza di strutture obliterate o sepolte), ha permesso di applicare con successo fin dagli anni Trenta del '900 il telerilevamento alle Scienze della Terra e in seguito allo studio del paesaggio, sovente molto antropizzato e ricco di emergenze archeologiche.

Il telerilevamento quindi, sotto questo aspetto, rappresenta uno strumento 'integrato' di indagine che si articola in fasi connesse tra loro a cascata, quali l' 'acquisizione' dei dati, la loro 'elaborazione' sia analogica sia digitale, la 'raccolta' degli elementi di campagna per stabilire la cosiddetta 'verità-terreno' o *ground truth* (termine di riferimento essenziale durante il successivo stadio di analisi), l' 'interpretazione' delle 'immagini' e da ultimo il 'controllo' diretto delle chiavi interpretative.

Esso riveste inoltre un carattere spiccatamente interdisciplinare, poiché offre elementi di speculazione che possono essere approfonditi collegialmente da diverse scienze o discipline (geologia, geomorfologia e archeologia per esempio), interessate a valutare le varie componenti di una tematica complessa come i mutui rapporti tra uomo e risorse naturali nel tempo.

#### 3.2 Telerilevamento in geomorfologia: l'uso delle immagini

Qui si intende proporre alcune considerazioni di natura teorica che individuano possibili legami tra aree specifiche della geomorfologia e ben definiti sistemi di telerilevamento, ovvero insiemi di sensori e piattaforme anch'essi più avanti introdotti.

##### 3.2.1 *Uso ottimale delle immagini in funzione delle loro caratteristiche geometriche*

Qualsiasi tipo di ripresa è definito da caratteristiche geometriche (scala, risoluzione, eventuale stereoscopia), spettrali (bande elettromagnetiche registrate) e temporali (ora del giorno, periodo dell'anno, ripetitività nel tempo).

Non vi è dubbio che l'elemento geometrico influenzi per primo e in modo significativo l'ambito geomorfologico d'applicazione dell'immagine stessa. Ad esempio (Figura 89), riferendoci alle classificazioni tassonomiche più consolidate, le grandi unità morfologiche del rilievo terrestre, quali le Geotessiture (scudi e piattaforme continentali, cordigliere, bacini) (Tricart e Cailleux 1956; Gerasimov e Meshcheryako 1967), sono analizzabili nella loro completezza solo sulle immagini di satelliti geostazionari posti a grande altezza (serie Meteosat in orbita a 36.000 Km, con risoluzione lineare a terra di 2,5 Km nel visibile e vicino infrarosso e 5 Km nell'infrarosso termico).

Lo studio di morfostrutture di importanza regionale (catene montuose, *horst* e *graben*, altopiani ecc.) richiede invece l'impiego di riprese spaziali a quote inferiori (classiche quelle storiche MSS dei Landsat-1, 2 e 3, posti a circa 900 Km di altezza, con risoluzione geometrica lineare a terra di circa 80 m).

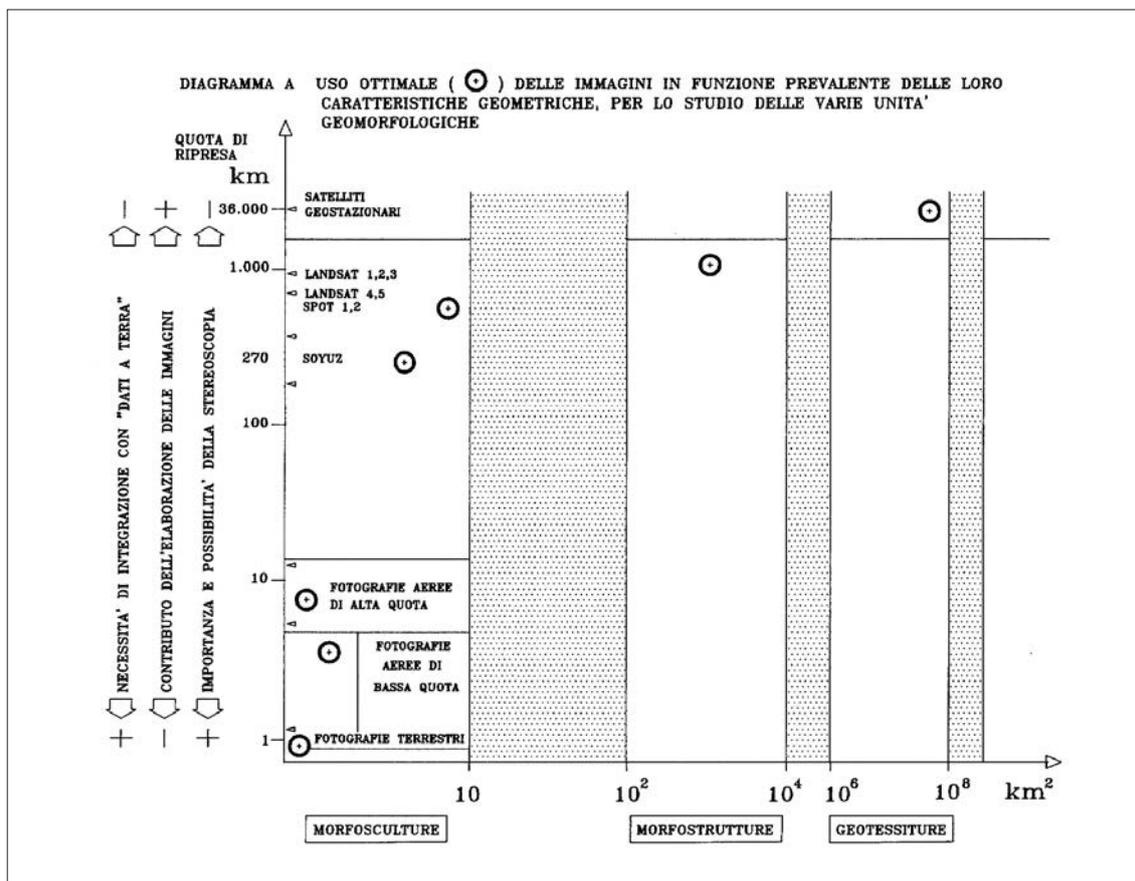


Figura 89: Sintesi per l'uso ottimale di determinate immagini in funzione delle caratteristiche dell'unità geomorfologica (Mantovani e Marcolongo 1995).

Lo studio di morfosculture particolari (dai singoli elementi tettonici come piccole anticlinali e sinclinali alle forme specifiche quali terrazzi, circhi glaciali, archi morenici, coni di deiezione, conoidi alluvionali e via via alle microforme come calanchi e lobi di soliflusso) implica invece non solo l'uso di immagini spaziali a più elevata risoluzione (per esempio serie Landsat, in orbita a circa 700 Km di altezza, di cui gli ultimi 7 ETM+ e 8 OLI con risoluzione lineare di 15-30 m esclusa la banda termica di 100-120 m; serie Spot da circa 700 Km di altezza, di cui gli ultimi 6 e 7 con risoluzione di 1,5 m PAN e 6m MS; Soyuz Kate 200, KFA 1000 e MK4 riprese tutte tra 180 e 450 km di altezza, con risoluzioni rispettivamente di 15-20 m, 5 m, 6-8 m), ma anche quello di riprese da piattaforma aerea (alta e bassa quota con scale variabili tra 1:70.000 e 1:8.000) e al limite l'uso di riprese da piattaforma terrestre o da droni per le microforme (corrosione, levigatura, piani di fratturazione ecc.). È interessante notare come la necessità, ma anche la possibilità della 'stereoscopia' per una completa classificazione delle forme, appartenenti alle varie unità geomorfologiche, sia direttamente proporzionale all'aumentare della scala e della risoluzione delle immagini stesse.

Vi è inoltre da aggiungere che le caratteristiche geometriche delle immagini (Figura 93. Diagramma D) assumono massima rilevanza nell'indirizzo Geomorfologico quantitativo, tanto morfografico che morfometrico, con particolare riguardo a tutti i problemi della rete idrografica attuale e relitta.

### 3.2.2 Uso ottimale delle immagini in funzione delle loro caratteristiche spettrali

Se si prende in considerazione l'elemento spettrale (Figura 90), possiamo riconoscere il suo maggiore contributo nel campo della Geomorfologia climatica, ove si individuano zone della superficie terrestre caratterizzate da situazioni di biostasia (copertura vegetale durevole e densa, prevalenza dei processi di alterazione biochimica con conseguente sviluppo della pedogenesi), oppure di resistasia, in cui lo scarso o assente manto vegetale favorisce l'erosione e il predominio dei processi meccanici di degradazione.

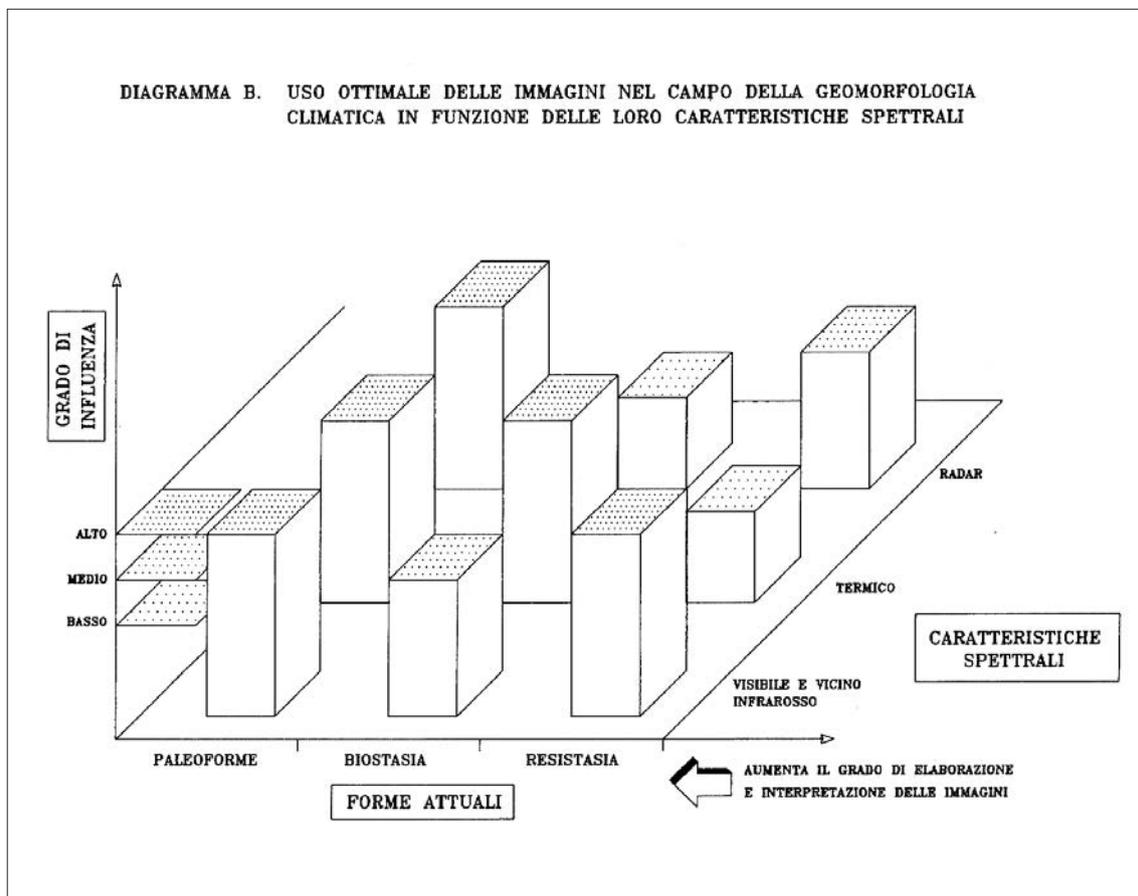


Figura 90: Sintesi per l'uso ottimale di determinate immagini in funzione delle loro caratteristiche spettrali nel campo della geomorfologia climatica (Mantovani e Marcolongo 1995).

Nel primo caso (regioni dei climi umidi sia caldi che temperati) il riconoscimento di forme attuali è agevolato dall'uso contestuale di riprese eseguite in varie bande dello spettro, particolarmente quelle multispettrali associate a quelle radar e solo in subordine a quelle termiche. Anche l'elaborazione delle immagini, sia analogica che digitale, acquista maggiore importanza come fase propedeutica alla interpretazione; in particolare questa ultima deve essere sviluppata in

modo completo ed esaustivo attraverso le sue quattro fasi, o livelli logici di analisi, a cui si è già accennato in precedenza:

- ‘individuazione’ (processo di discriminazione tonale che distingue la forma di un oggetto da quelli circostanti);
- ‘identificazione’ (attribuzione di una identità all’oggetto prima individuato sull’immagine, in base alla propria esperienza e a chiavi interpretative già definite);
- ‘classificazione’ (riunione in classi omogenee degli oggetti che mostrano caratteri comuni, quali per esempio terreni a simile litologia, copertura vegetale, densità e struttura del drenaggio ecc.);
- ‘deduzione’ (corrispondenza fra particolari *pattern* spettrali e strutturali di superficie e oggetti sepolti, o comunque non direttamente percepibili sulle immagini, come nel caso di strutture archeologiche e di paleo-alvei, la cui presenza è dedotta spesso da anomalie della copertura vegetale, dell’umidità del suolo, del microrilievo e dalla geometria e tipologia della parcellizzazione agraria).

Nel caso di regioni a dominante fisica invece (quelle dei climi freddi come le zone subpolari e di alta montagna o dei climi subaridi e aridi) trovano impiego ottimale le riprese multitemporali con sensori a scansione termici, che riflettono l’inerzia dei vari litotipi e della copertura del materiale detritico di norma ampiamente presente, associate a riprese pancromatiche e in sordine a quelle multispettrali e *radar*.

Se si tratta al contrario di analizzare paleo-forme attribuibili a sistemi morfoclimatici del passato (periodi di resistasia con intensa morfogenesi alternati a periodi di biostasia con maggiore stabilità, o viceversa), la scelta del tipo di immagine più confacente deve essere fatta in funzione delle attuali condizioni di copertura vegetale e dei processi morfodinamici in atto. È interessante ricordare come nell’ottobre 1984 un SAR (acronimo di *Synthetic Aperture Radar*), denominato *Shuttle Imaging Radar - SIR B* (banda L di 25 cm, immagini di 50 Km di larghezza con risoluzione a terra di 40 m e angolo incidente variabile tra 15° e 60°), montato a bordo dello *Space Shuttle Columbia*, forniva splendide riprese del deserto egiziano su cui compariva in dettaglio un reticolo di drenaggio fossile, sepolto oggi da vari metri di depositi eolici, riferibile a una fase pluviale precedente (Figura 91).

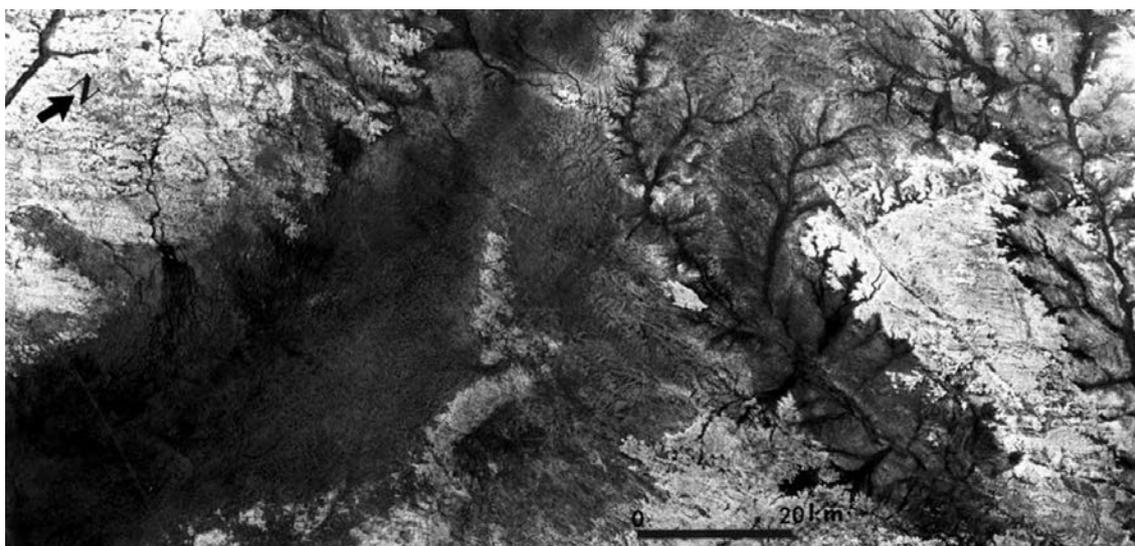


Figura 91: Immagini radar SIR B sul deserto occidentale egiziano, con un articolato reticolo di paleo-drenaggio (‘radar rivers’ in grigio scuro) oggi sepolto sotto vari metri di sabbie eoliche.

Questo reticolo è il retaggio della intensa morfogenesi fluviale avvenuta successivamente alla regressione della Tetide (Mar Mediterraneo) nel Messiniano (Miocene superiore). Lungo il corso di questi 'radar rivers' è stato possibile individuare numerosi siti preistorici (McHugh *et al.* 1988).

### 3.2.3 Uso ottimale delle immagini in funzione delle loro caratteristiche temporali

Infine, l'elemento temporale (Figura 92) delle riprese (ora del giorno, periodo dell'anno, ripetitività) acquista grande importanza negli studi finalizzati a comprendere anche i processi responsabili delle forme in precedenza identificate e classificate.

Da un lato l'elaborazione delle immagini deve essere notevolmente spinta attraverso la fase della deduzione. L'indirizzo ottimale dell'applicazione di varie riprese multitemporali è quello della Geomorfologia dinamica, in cui si cerca di analizzare il grado di correlazione che intercorre fra processi e forme, e quello della Geomorfologia applicata (tanto alla Pianificazione Territoriale, quanto alla Valutazione dell'Impatto Ambientale). Sotto questo profilo le immagini riprese da piattaforme spaziali presentano dei requisiti di ripetitività molto superiori a quelli offerti da coperture eseguite da piattaforme aeree (non sono ben classificabili sotto questo profilo le riprese da postazioni fisse a terra, che possono essere anche di tipo continuo); d'altro canto la risoluzione delle prime è spesso mediocre o al di sotto del grado di dettaglio della ricerca. Attualmente si hanno a disposizione coperture da piattaforma spaziale sempre più frequenti, riprese con una definizione molto elevata, grazie all'elevato numero di satelliti per le risorse terrestri ormai in orbita.

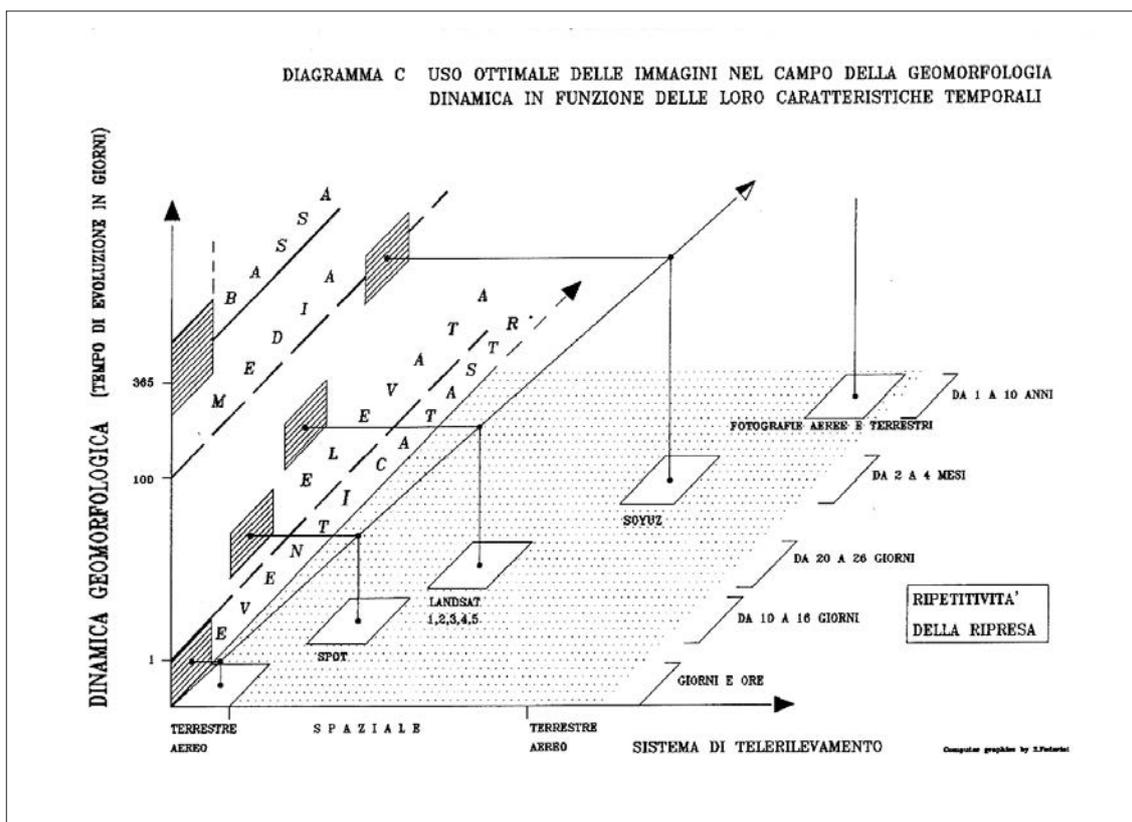


Figura 92: Sintesi per l'uso ottimale di determinate immagini in funzione delle loro caratteristiche temporali nel campo della geomorfologia dinamica (Mantovani e Marcolongo 1995).

Quale sintesi finale (Figura 93), è possibile definire gli ambiti ottimali di applicazione nei diversi indirizzi geomorfologici (descrittivo, climatico, applicato) in funzione delle caratteristiche delle immagini telerilevate (geometria, spettralità, temporalità). Si tratta di una gerarchizzazione teorica, in quanto spesso ci si trova a operare con i dati che sono disponibili a costi contenuti, se non gratuiti, di cui comunque l'interprete deve correttamente sempre tener conto quando avvia e sviluppa un approccio geomorfologico in una ricerca geoarcheologica.

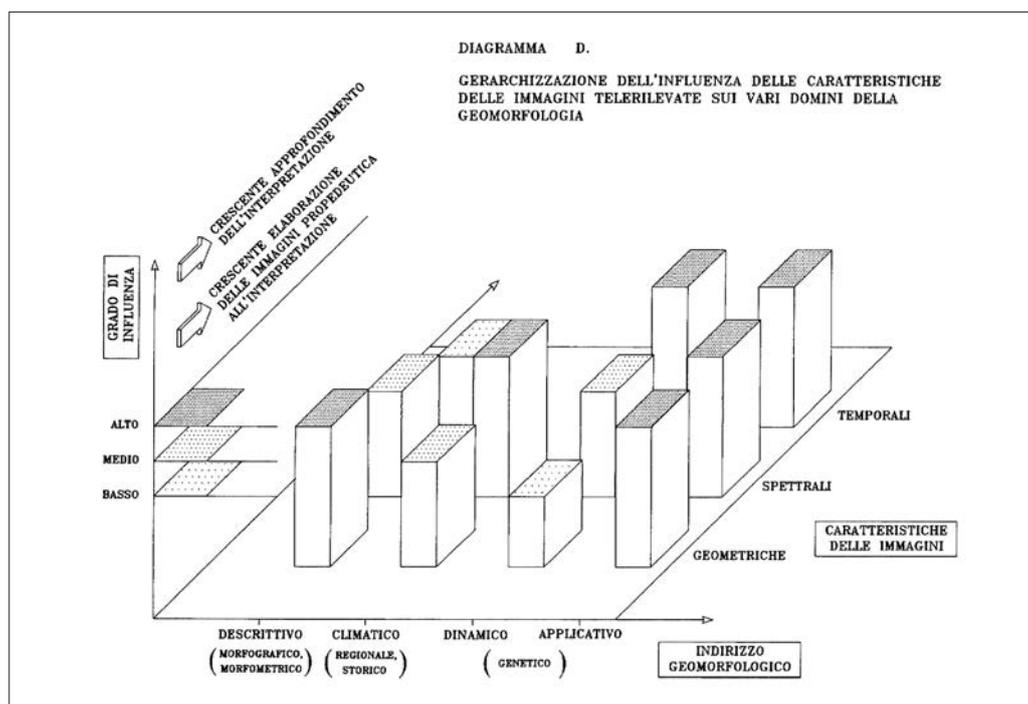


Figura 93: Ambiti ottimali di applicazione nei diversi indirizzi geomorfologici (Mantovani e Marcolongo 1995).

### 3.3 Strumenti e procedimenti di ricerca

Il telerilevamento si fonda sullo studio delle proprietà spettrali degli 'oggetti' qui riconosciuti come 'entità' con caratteristiche morfologico-spettrali unitarie in un quadro 'visivo' complesso e differenziato. Per individuare tali proprietà si utilizzano 'sensori' e cioè apparecchiature capaci di registrare onde elettromagnetiche riflesse o emesse da punti oggetto. I sensori possono essere 'passivi' come apparecchiature fotografiche e scanner o 'attivi' come il *radar*.

Il supporto fisico su cui vengono posizionati uno o più sensori è rappresentato dalla 'piattaforma di ripresa'. L'insieme di sensore e piattaforma costituisce il 'sistema' di telerilevamento, che può quindi essere terrestre, aereo e spaziale.

Lo studio del riconoscimento delle forme e delle firme spettrali degli 'oggetti' avviene sia per via analogica (fotografica, ottica, elettronica) che numerica (digitalizzazione, analisi statistica, trattamento informatizzato di immagini).

Il primo metodo, detto analogico, riguarda l'analisi spaziale delle forme e delle strutture, mentre il secondo, quello numerico, concentra essenzialmente l'interesse sull'analisi delle risposte spettrali e cioè sul comportamento energetico di una qualsiasi superficie.

In particolare, per quanto riguarda l'individuazione e la descrizione delle strutture sepolte naturali e antropiche, tra cui di primario rilievo quelle archeologiche, è soprattutto il primo approccio a fornire il risultato più significativo, essenzialmente attraverso l'interpretazione

morfologica e morfometrica degli 'indicatori di superficie' (umidità dei suoli, vegetazione, microrilievo) che sono spesso il riflesso epidermico di 'strutture profonde'.

La fase conclusiva del processo conoscitivo è l'interpretazione delle immagini in senso stretto, intendendo con 'immagine' un qualsiasi supporto visivo risultante dall'interazione fra energia elettromagnetica proveniente da una generica superficie e un sistema di registrazione sia fotosensibile (immagine fotografica) sia non fotografico (immagine termica, radar ecc.)

L'interpretazione completa ed esaustiva di un qualsiasi documento telerilevato si sviluppa attraverso quattro stadi: *individuazione*, *identificazione*, *classificazione* e *deduzione*. Tra questi quattro stadi logici di analisi è necessario privilegiare, per i motivi sopra accennati, la fase 'deduttiva' legata alla corrispondenza biunivoca tra 'apparenze' degli oggetti di superficie e 'anomalie' strutturali profonde.

### 3.4 Applicazione del Telerilevamento alle risorse ambientali: stato dell'arte e prospettive

Sono passati 50 anni dal lancio il 23 luglio 1972 del primo satellite per lo studio delle risorse naturali, allora chiamato ERTS (*Earth Resources Technology Satellite*), pioniere della ben conosciuta serie Landsat, oggi arrivata alla nona generazione con il lancio del settembre del 2021 del Landsat-9.

Tutto il decennio degli anni '70 e gli inizi degli '80 trascorse come periodo essenzialmente dedicato a studi metodologici applicati in vari settori delle scienze della terra (sono di quei tempi le scene dei Landsat-1, 2 e 3 registrate con il sensore MSS che aveva una risoluzione geometrica lineare del 'pixel', l'elemento più piccolo risolto o, per così dire, rilevato individualmente sull'immagine, della dimensione di 80 x 80 m<sup>2</sup>). In questa fase si valutò la potenzialità della integrazione del dato spaziale con le misure dirette a terra, soprattutto in campo agricolo, forestale, geologico-strutturale (per esempio nella ricerca petrolifera e mineraria) e geologico-applicato (geomorfologia e idrogeologia).

Successivamente, nel periodo tra la metà degli anni '80 e quella degli anni '90, una nuova generazione di sensori, tra cui si ricorda il TM (*Thematic Mapper*) montato a bordo dei Landsat-4 e 5, o quello dello Spot<sup>9</sup> (*Satellite Probatoire pour l'Observation Terrestre*), permisero di acquisire immagini con una risoluzione geometrica del 'pixel' molto più elevata, dell'ordine di 30, 20 e 10 m, utile per sviluppare tutta una serie di applicazioni tematiche a scala regionale (scale di 1:50.000, 1:100.000 e 1:250.000), fondamentale per la stima delle risorse naturali, la loro gestione e la pianificazione degli interventi di risanamento.

A partire dal '94/'95, una nuova serie di satelliti e sensori (dall'IRS-1B e 1C, ai più recenti Landsat-7ETM<sup>10</sup> e Landsat-8OLI<sup>11</sup>, agli ultimissimi satelliti commerciali Ikonos ed Eros, agli ambiziosi programmi spaziali TERRA americano ed Envisat europeo, al nuovo satellite SAC-C della *Comision Nacional de Actividades Espaciales* argentina (Co.N.A.E.) che entra a far parte della *Constelacion Internacional Matu-*

<sup>9</sup> Spot è una serie di satelliti ora giunta al numero 7 (lanciato il 30 giugno 2014), con caratteristiche via via migliorate. Gli attuali Spot 6 e 7 tuttora in attività formano una costellazione che provvede la continuità di registrazione di dati a elevata risoluzione geometrica (1,5 m al nadir nel pancromatico e 6 m nelle 4 bande del multispettrale).

<sup>10</sup> ETM (*Enhanced Thematic Mapper*) è un sensore portato a bordo del Landsat-7 con una risoluzione geometrica spaziale migliorata (risoluzione di 15 m nel pancromatico, 30 metri nel multispettrale e vicino infrarosso, 60 m nell'infrarosso termico) rispetto al TM (*Thematic Mapper*) dei Landsat-4 e 5 (N.B. il Landsat-6 non ha mai funzionato poiché il suo lancio fallì).

<sup>11</sup> OLI (*Operational Land Imager*) è un sensore di migliorata precisione radiometrica, che registra l'energia riflessa ed emessa dalla superficie terrestre in 9 bande spettrali, di cui 4 nel visibile, 1 nel vicino infrarosso, 2 nel medio infrarosso, 1 specifica per l'individuazione di cirri d'alta quota composti di cristalli di ghiaccio, tutte con una risoluzione geometrica a terra di 30 m, e infine 1 pancromatica con risoluzione di 15 m.

Da ricordare che il Landsat-8 monta anche il sensore TIRS (*Thermal Infrared Sensor*), specifico per misurare l'energia emessa nell'infrarosso lontano, con risoluzione piuttosto bassa di 100 m, ma ottimo per studi regionali sulla umidità del terreno e la copertura vegetale, spesso fortemente influenzate entrambe da strutture sepolte.

tina para la Observacion de la Tierra), rilancia in modo esponenziale la validità del punto di osservazione spaziale, come elemento di integrazione e generalizzazione negli studi sull'ambiente e, in particolare, sul rischio idrogeologico anche a scala locale e comunale di gran dettaglio.

Basti dire che il satellite indiano IRS 1B e 1C è in grado di produrre immagini con 5 m di risoluzione nella banda pancromatica e 20 m in quella multispettrale, mentre Ikonos ed Eros scendono a una risoluzione di 1 m nel modo pancromatico e circa 4 m in quello multispettrale.

Infine, dopo il 2000 tutta una serie di satelliti a scopo commerciale, ma non solo, sono stati posti in orbite eliosincrone sub-polari con una risoluzione molto elevata di alcune decine di cm. Al di là del costo delle singole immagini e della ridotta porzione di terreno coperta da ciascuna di esse, tutte le riprese a elevata ed elevatissima risoluzione offerte sul mercato (vedi l'elenco riportato nel paragrafo 1.2.1<sup>12</sup>) offrono un eccellente strumento di indagine per ricerche geoarcheologiche puntuali e su singole evidenze anche di ridotte dimensioni areali.

È indubbio che la tendenza evolutiva di nuovi sensori sempre più perfezionati, con una frequenza di ritorno sopra la medesima area quasi giornaliera, sarà in grado di soddisfare a breve qualsiasi tipo di analisi preliminare da remoto di aree potenzialmente ricettive di emergenze archeologiche in qualsiasi parte del pianeta.

### 3.5 Sensori

Con il termine 'sensore' si indica una particolare apparecchiatura, di tipo meccanico o elettronico, che è capace di registrare onde elettromagnetiche riflesse o emesse da 'punti oggetto' (superfici di varia natura) e, attraverso una serie più o meno complessa di elaborazioni, riproporne le relative caratteristiche in 'punti immagine'.

Esistono due tipi fondamentali di sensori: quelli passivi e quelli attivi. Ai primi spetta come unica funzione la registrazione di onde in arrivo dall'oggetto, ai secondi il duplice compito di fornire l'energia necessaria e di registrarne al ritorno le variazioni subite. Sono sensori passivi le 'apparecchiature fotografiche' e gli 'scanner'<sup>13</sup> (Figura 94); sono sensori attivi i 'radar'<sup>14</sup> (Figura 95) e i 'lidar'<sup>15</sup> (Figura 96). Le apparecchiature fotografiche traducono le informazioni energetiche ricevute dall'oggetto in immagini fotografiche, mentre gli scanner e i radar in immagini digitali.

<sup>12</sup> GeoEye 1 (risoluzione di 0,46 m PAN B/N e 1,8 m MS); e GeoEye 2 (0,31 PAN B/N e 1,24 MS); della serie WorldView 1 (0,46 m PAN B/N), 2 (0,46 m PAN B/N e 1,84 m MS), 3 (0,31 PAN B/N, 1,24 m MS e 3,7 m Short Wave Infrared SWIR); di Pléiades 1A e 1B (0,5 m PAN B/N e 2,0 m MS); QuickBird (0,65 m PAN e 2,62 m MS); TripleSat (0,8 m PAN e 3,2 m MS); Gaofen 2 (0,8 m PAN e 3,2 m MS); Komsat 3 (0,7 m PAN e 2,8 m MS); Komsat 3a (0,55 m PAN e 2,2 m MS) e altri ancora operati da varie agenzie spaziali statali e da compagnie commerciali private.

<sup>13</sup> Scanner è un qualsiasi strumento elettronico capace di registrare da remoto dati attraverso un sistema a scansione, che impiega un sensore con uno stretto angolo di vista (IFOV, *Instantaneous Field of View*, angolo solido al cui interno il rivelatore è sensibile alla radiazione elettromagnetica proveniente dal terreno), in modo da produrre una immagine bidimensionale della superficie. Gli *across-track* scanner scandiscono la Terra con una serie di linee parallele tra di loro di larghezza pari alla risoluzione geometrica della cella elementare propria del sistema.

<sup>14</sup> RADAR (*Radio Detection and Ranging*) è un sistema di rilevamento che usa onde radio per determinare la distanza (range), l'angolo oppure la velocità di oggetti in movimento. Nell'ambito del Remote Sensing si utilizzano degli *Imaging RADA*' capaci di ricostruire, in base all'intensità dell'onda retrodiffusa dalla superficie terrestre, una pseudo-immagine bidimensionale. Un tipo particolare di RADAR è il SAR (*Synthetic-aperture radar*) montato a bordo dei satelliti, che deriva da una evoluzione del *Side Looking Airborne Radar* (SLAR).

<sup>15</sup> LiDAR (acronimo di *Light Detection and Ranging*) sta diventando sempre di più un potente mezzo per l'analisi dei processi geomorfologici della superficie terrestre. I moderni strumenti LiDAR possono inviare impulsi decine di migliaia di volte al secondo, producendo così una 'nuvola' di milioni di punti georeferenziati individualmente in x-y-z. Tali strumenti vengono montati su piattaforme sia terrestri che aeree.

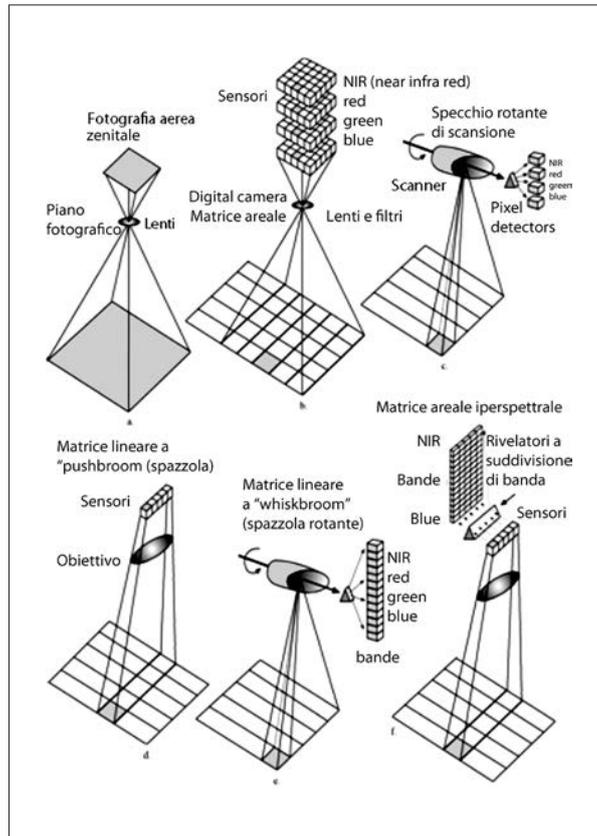


Figura 94: Tipi di sensori passivi.

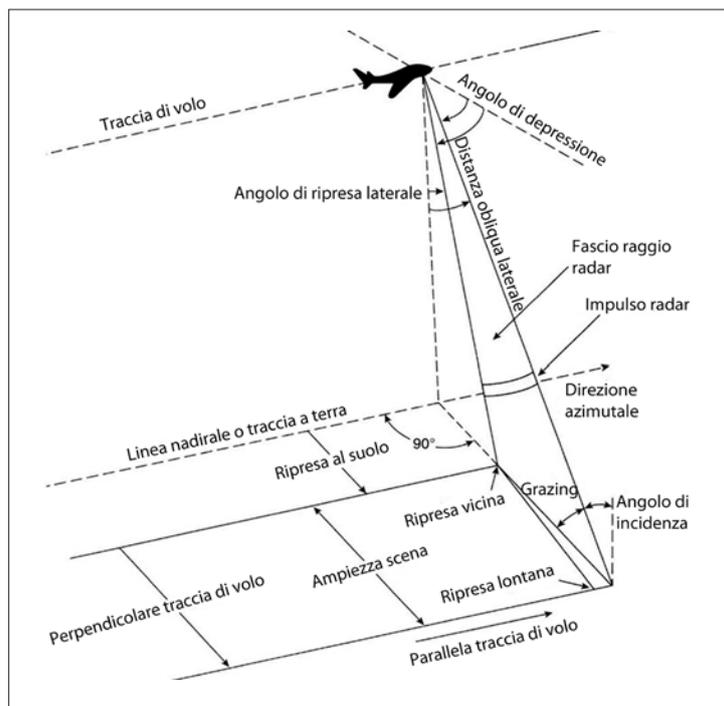


Figura 95: Imaging Radar.

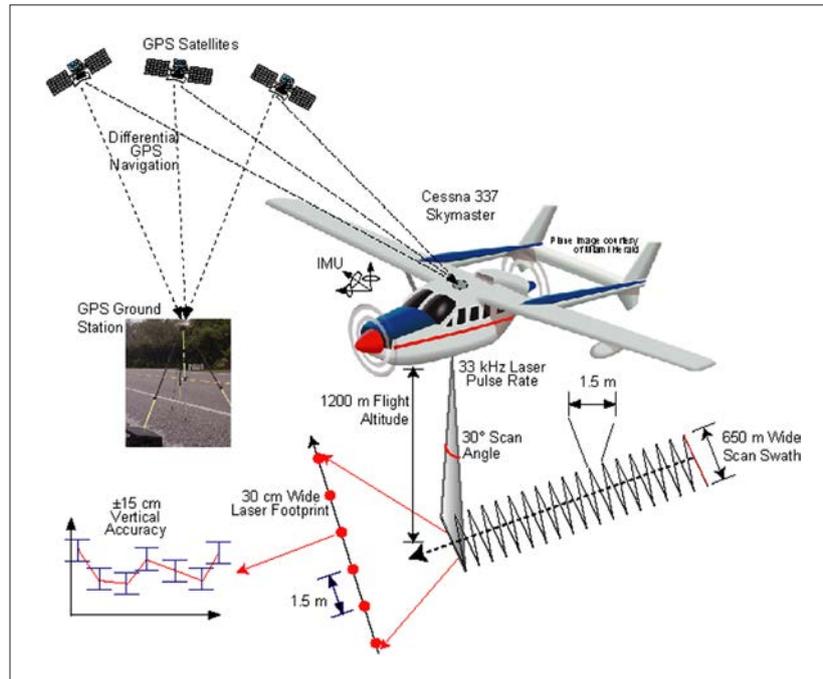


Figura 96: LiDAR.

### 3.5.1 Sensori passivi

#### Apparecchiature fotografiche

Le apparecchiature fotografiche registrano su pellicola fotosensibile informazioni energetiche nell'intervallo di lunghezza d'onda compreso tra 0.4 e 0.9  $\mu\text{m}$ , corrispondente alle onde riflesse nel campo del visibile e dell'infrarosso fotografico. Esse forniscono immagini di vario tipo, sia per singoli fotogrammi che in strisce continue, grazie a particolari combinazioni di pellicole, obbiettivi e filtri.

Queste apparecchiature, prime a essere state utilizzate nella storia del telerilevamento e ancor oggi ampiamente in uso tanto per scopi topografico-cartografici (creazione e aggiornamento di carte topografiche) quanto per analisi di natura tematica (uso del suolo, riconoscimento litologico, dinamica dei versanti e dissesti, rete idrografia ecc.), vengono indifferentemente posizionate su piattaforme terrestri, aeree e spaziali. Di seguito ne vengono elencati i tipi principali maggiormente operativi:

- fototeodolite (macchina a fotogrammi per il rilievo terrestre);
- macchina a fotogrammi per il rilievo aereo (*Mapping frame camera*, *Metric camera*, *Cartographic camera*);
- macchina a fotogrammi per il rilievo spaziale (*Reconnaissance frame camera*, *Metric camera special*);
- macchina a immagine continua per il rilievo aereo (*Strip camera*);
- macchina panoramica per rilievi aerei e spaziali (*Panoramic camera*);
- macchina multibanda per rilievi aerei e spaziali (*Multiband camera*).

#### Scanner

Lo 'scanner' (sensore a scansione o sensore analizzatore) è relativamente semplice dal punto di vista sia costruttivo che operativo. La configurazione più diffusa, tra quelli aerotrasportati o posti su piattaforme spaziali (come nel caso dei satelliti della serie Landsat), è composta da un sistema di ricezione costituito da uno specchio rotante, che riceve l'energia riflessa o emessa

dalla superficie del terreno e la trasmette a un elaboratore. Qui le sue variazioni vengono trasformate in immagine o registrate su di un nastro magnetico; successivamente tali dati possono essere elaborati in vario modo per specifiche interpretazioni tematiche.

Ultimamente si stanno affermando ‘scanner’ di tipo lineare (LISS, *Linear Imaging Self-scanning Sensor*) che impiegano ‘dispositivi ad accoppiamento di carica’ (CCD, *Charge Coupled Devices*) disposti affiancati in modo da rilevare la superficie terrestre secondo fasce parallele al movimento della piattaforma. Questo metodo rende massimo il tempo di esposizione per ciascun punto a terra, assicurando una migliore qualità radiometrica e fedeltà geometrica dell’immagine stessa (come per i satelliti francesi Spot e per quelli indiani della serie IRS).

Esistono anche ‘scanner’ denominati ‘stazionari’, concepiti per acquisire immagini da postazioni fisse, che hanno una struttura diversa. Il loro impiego per riprese ambientali è tuttavia molto limitato e ancora sperimentale, mentre è consolidato in ambito medico (termogrammi corporei ecc.) o fisico-ingegneristico (tensioni e fratture di strutture in cemento o metalliche ecc.).

Bande, intervalli di lunghezza d’onda e risoluzioni spaziali di alcuni importanti satelliti per le risorse terrestri sono elencati di seguito:

Landsat-8 (OLI e TIRS) (Figura 97).

Banda	Descrizione	Lunghezza d’onda	Risoluzione
Band 1	Coastal / Aerosol	0.433 — 0.453 $\mu\text{m}$	30 m
Band 2	Visible blue	0.450 — 0.515 $\mu\text{m}$	30 m
Band 3	Visible green	0.525 — 0.600 $\mu\text{m}$	30 m
Band 4	Visible red	0.630 — 0.680 $\mu\text{m}$	30 m
Band 5	Near-infrared	0.845 — 0.885 $\mu\text{m}$	30 m
Band 6	Short wavelength infrared	1.56 — 1.66 $\mu\text{m}$	30 m
Band 7	Short wavelength infrared	2.10 — 2.30 $\mu\text{m}$	30 m
Band 8	Panchromatic	0.50 — 0.68 $\mu\text{m}$	30 m
Band 9	Cirrus	1.36 — 1.39 $\mu\text{m}$	30 m
Band 10	Long wavelength infrared	10.3 — 11.3 $\mu\text{m}$	30 m
Band 11	Long wavelength infrared	11.5 — 12.5 $\mu\text{m}$	30 m

Figura 97: Bande spettrali del Landsat-8 nel visibile e nel vicino-medio infrarosso (sensore OLI, bande da 1 a 9) e nel lontano infrarosso (sensore TIRS, bande 10-11) con le relative risoluzioni geometriche a terra. Da ricordare che le immagini Landsat-8 sono open source.

Spot-7 (Figura 98).

Data di lancio	30 giugno, 2014
Veicolo	PSLV
Sito di lancio	Satish Dhawan Space Center (India)
Bande (4) multispettrali	Blue (0.455 $\mu\text{m}$ – 0.525 $\mu\text{m}$ )
	Green (0.530 $\mu\text{m}$ – 0.590 $\mu\text{m}$ )
	Red (0.625 $\mu\text{m}$ – 0.695 $\mu\text{m}$ )
	Near-Infrared (0.760 $\mu\text{m}$ – 0.890 $\mu\text{m}$ )
Risoluzione (GSD)	Pancromatico - 1,5m Multispettrale - 6,0m (B, G, R, NIR)

Figura 98: Bande spettrali dello Spot-7 nel visibile e nell’infrarosso vicino con relative risoluzioni geometriche a terra. È interessante notare che la banda ‘pancromatica’ ha una risoluzione spinta di 1,5 m, che si presenta molto interessante per studi locali di geoarcheologia su aree ridotte.

IRS-R2 (ResourceSat-2) con il *Linear Imaging Self-Scanning Sensor-IV* (LISS-4) (Figura 99).

Strumento/parametro	LISS-4
Risoluzione spaziale (IFOV, Instantaneous Field of View)	≤ 5.8 m
Bande spettrali (micron)	B2: 0.52-0.59, (green) B3: 0.62-0.68, (red) B4: 0.77-0.86 (NIR) B3-default band (mono)
Ampiezza banda	70 Km in Mono Mode, 23.9 km in MX Mode

Figura 99: Bande spettrali di IRS-R2, che porta a bordo il sensore avanzato LISS-4 (due bande nel visibile e una nell'infrarosso vicino, con buona risoluzione geometrica a terra ricampionata a 5 m, ottimale per uno studio sul contesto fisico-ambientale di un sito archeologico).

IRS-Cartosat-3, satellite avanzato di 3<sup>a</sup> generazione con la risoluzione geometrica a terra più alta al momento (0,25 m) (Figure 100-101).

Metodo di ripresa	Pancromatico	Multispettrale	Iperspettrale	MWIR
	0,5-0,75	0,45 - 0,52 0,52 - 0,59	-	3-5
Intervalli spettrali (micron)		0,62 - 0,68 0,77 - 0,86		
Risoluzione spettrale (in Nadir), (metro)	0,25	1,14	12	5,7
Lunghezza banda scatto (km)	16			

Figura 100: Bande spettrali di IRS-Cartosat-4, lanciato il 27 novembre 2019 da ISRO (Indian Space Research Organisation).

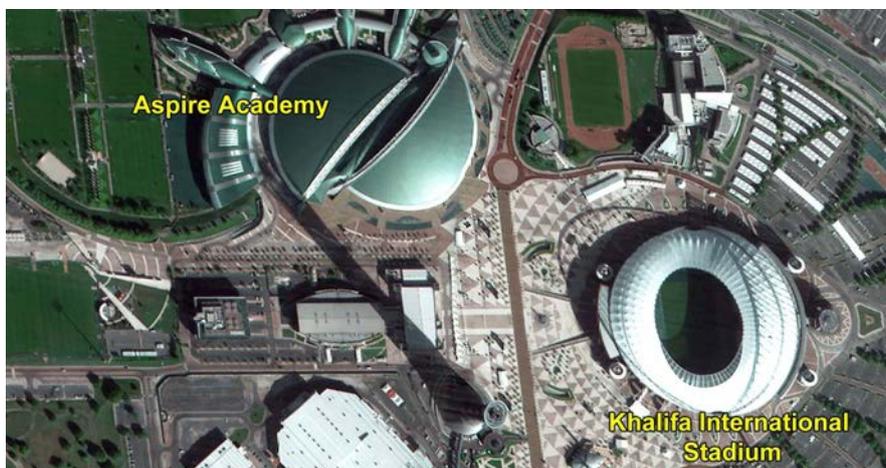


Figura 101: Immagine Cartosat-3 a elevatissima risoluzione (0,25 m) sull'area del Khalifa International Stadium, Qatar.

## 3.5.2 Sensori Attivi

## Radar

Il 'radar' (acronimo di *Radio Detection and Ranging*) è un sensore attivo, poiché emette e contemporaneamente registra energia. Onde elettromagnetiche vengono inviate a colpire la superficie degli oggetti e ritornano al sensore per essere captate e registrate. Per questa sua caratteristica le riprese possono avvenire sia di giorno sia di notte e anche in presenza di copertura nuvolosa, che non riesce a bloccare le onde stesse.

I radar oggi generalmente utilizzati per il telerilevamento delle risorse terrestri impiegano lunghezze d'onda che vanno da 0.8 cm fino al metro, con una capacità di penetrazione al di sotto della superficie via via maggiore. Le relative immagini sono una rappresentazione su pellicola in bianco e nero a striscia continua dei valori di riflessione della superficie investigata colpita dal fascio di onde inviato dall'antenna (*backscattering* o retrodiffusione). Esse possono avere caratteristiche stereoscopiche se riprese in modo particolare, cioè per esempio da differenti altezze di volo o con opposte direzioni di osservazione dell'antenna medesima.

Finora sono stati posti in orbite eliosincrone molti satelliti con strumentazione radar (SAR, *Synthetic Aperture Radar*) (Figure 102-104), le cui immagini contribuiscono a dettagliare meglio le condizioni fisiche del suolo e del sottosuolo della terra. In particolare, la banda di frequenza C (lunghezza d'onda  $\lambda = 6$  cm) viene usata soprattutto per lo studio della umidità dei terreni e quello della copertura vegetale, mentre la banda L ( $\lambda = 25$  cm) serve per indagini geologiche (litologia e tettonica, stato di alterazione delle formazioni rocciose, coperture detritiche, movimenti franosi, paleo-corsi e paleo-dune ecc.). La loro applicazione a fini archeologici, sebbene potenzialmente molto produttiva, trova un ostacolo nella relativamente bassa risoluzione a terra delle riprese fatte da piattaforma satellitare.

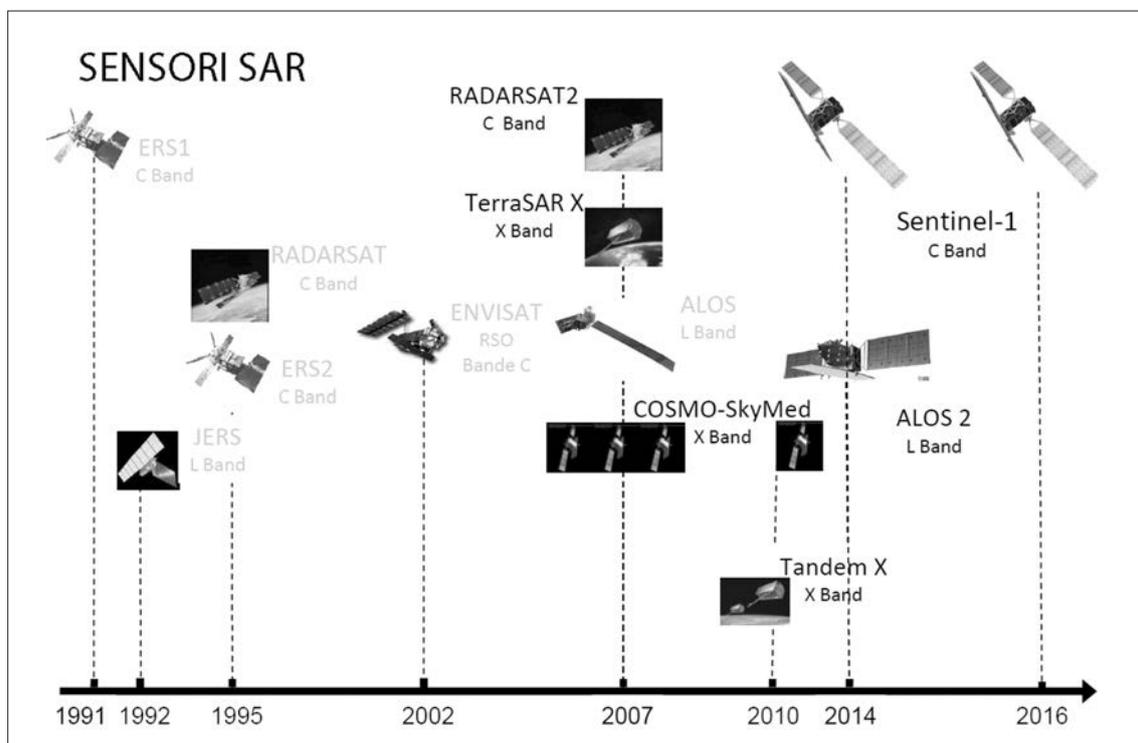


Figura 102: Satelliti posti in orbita eliosincrona con sensori SAR, Synthetic Aperture Radar per lo studio delle risorse terrestri (etichette in grigio per satelliti non più attivi).

<b>Sensore</b>	<b>Periodo di acquisizione</b>	<b>Frequenza della banda</b>	<b>Modo di polarizzazione</b>	<b>Risoluzione spaziale (m)</b>	<b>Intervallo di ripassaggio (giorni)</b>	<b>Copertura della scena (km)</b>
<i>ERS-1 / 2</i>	91 - 11	C	VV	20	35	185x185
<i>JERS</i>	92 - 98	L	HH	20	44	75 x 75
<i>Radarsat</i>	95 - 13	C	HH	10-100	24	35 x 500
<i>ASAR</i>	01-13	C	1 o 2 pol HH/HV/VV	30-1000	pochi-35	100x500
<i>PALSAR</i>	07-11	L	Polarimetrico HH/HV/VV	10-100	pochi-24	100-500
<i>Radarsat-2</i>	2007 -	C	Polarimetrico HH/HV/VV	1-15	5 - 10	NA
<i>TerraSAR-X</i>	2007 -	X	1 o 2 pol HH/HV/VV	1-20	pochi-11	5-100
<i>Cosmo-SkyMed</i>	2007 -	X	1 o 2 pol HH/HV/VV	1-100	12 ore	10-200
<i>SAOCOM</i>	2015	L	Polarimetrico HH/HV/VV	7-100	pochi-16	60-320
<i>Sentinel 1</i>	2015	C	1 o 2 pol HH/HV/VV	5 - 100m	pochi-12	80-400
<i>ALOS-2</i>	2015	L	Polarimetrico HH/HV/VV	3-100	pochi-14	25-350

Figura 103: Lunghezze d'onda (bande di frequenza) e risoluzione spaziale dei vari sensori SAR.

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

FREQUENZA - LUNGHEZZA D'ONDA

<b>Bande X</b>	$\lambda \sim 3 \text{ cm}$	<b>f ~ 10 GHz</b>
<b>Bande C</b>	$\lambda \sim 6 \text{ cm}$	<b>f ~ 5 GHz</b>
<b>Bande L</b>	$\lambda \sim 25 \text{ cm}$	<b>f ~ 1,2 GHz</b>
<b>Bande P</b>	$\lambda \sim 70 \text{ cm}$	<b>f ~ 400 MHz</b>

Figura 104: Bande SAR. La banda L con  $\lambda = 25 \text{ cm}$ , risulta particolarmente adatta a ricerche di carattere geoarcheologico.

#### LiDAR

Il 'lidar' (acronimo di *Light Detection and Ranging*) ha visto nell'ultimo decennio una sempre più frequente e vasta applicazione per studi di osservazione della Terra da remoto. In particolare, il sensore 'lidar' può essere montato su piattaforma aerea (*Airborne Lidar*, denominato anche *Airborne Laser Scanner*, ALS) in connessione con una misura continua delle coordinate 3D dell'aeromobile stesso mediante GPS. Il trend naturale di questa applicazione è stata l'istallazione di

‘lidar’ su veicoli aerei privi di pilota (UAV, *Unmanned Aerial Vehicles* o ‘droni’) con esponenziale allargamento delle osservazioni anche su zone di particolare difficile accesso. *Airborne lidar* (Figura 105) è un sistema multi-sensore attivo (raggio laser trasmesso in impulsi, registrati da un sensore una volta riflessi indietro dalla superficie del terreno) che include una unità di navigazione (GNSS, *Global satellite navigation system*<sup>16</sup>).

La sua applicazione in geoarcheologia, sebbene onerosa per i costi e l’organizzazione, è sicuramente molto promettente soprattutto se viene rivolta ad aree prescelte perché contenitrici di emergenze di particolare importanza.

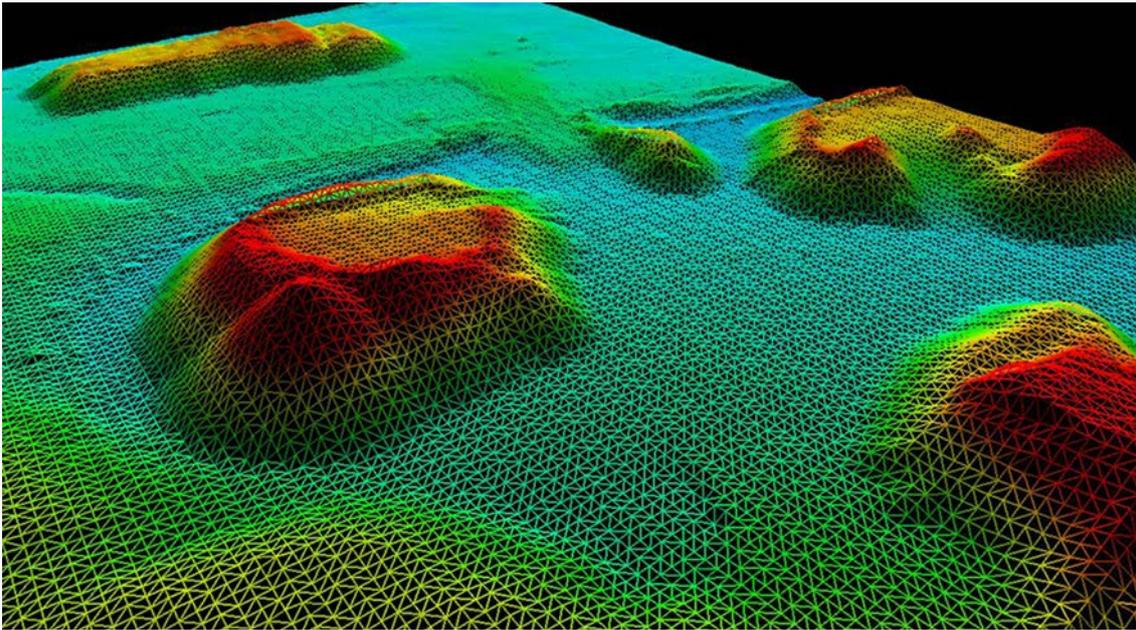


Figura 105: DTM (Digital Terrain Model) ricostruito mediante ‘nuvola di punti’ con Airborne Lidar. La scala cromatica blu-verde-giallo-rosso corrispondente a una energia del rilievo progressiva.

### 3.6 Sistemi (piattaforme e sensori) di telerilevamento

La ‘piattaforma di ripresa’ rappresenta il supporto fisico su cui vengono posizionati uno o più sensori, sia dello stesso tipo (varie macchine fotografiche) che di categorie diverse (associazione di sensori multispettrali e sensori termici). Relativamente alla superficie da rilevare, la piattaforma è definita da una distanza ‘d’ oppure da una quota ‘h’, potendo essere dotata o meno di velocità relativa rispetto al terreno. Si riconoscono pertanto tre categorie di piattaforme, ovvero le terrestri, le aeree e le spaziali (Figura 106).

L’insieme di sensore e di piattaforma compone il ‘sistema’ di telerilevamento, che può essere quindi similmente terrestre, aereo e spaziale. Ogni singolo sistema possiede una ‘configurazione’ peculiare data dalla natura dei sensori e dal loro modo di installazione. La capacità più o meno elevata di registrare le caratteristiche spettrali e geometriche degli oggetti definisce il ‘potere risolvante’ del sistema.

<sup>16</sup> GNSS è un sistema di geo-localizzazione e navigazione, terrestre, marittima o aerea, che utilizza una rete di satelliti artificiali in orbita geostazionaria per la triangolazione.

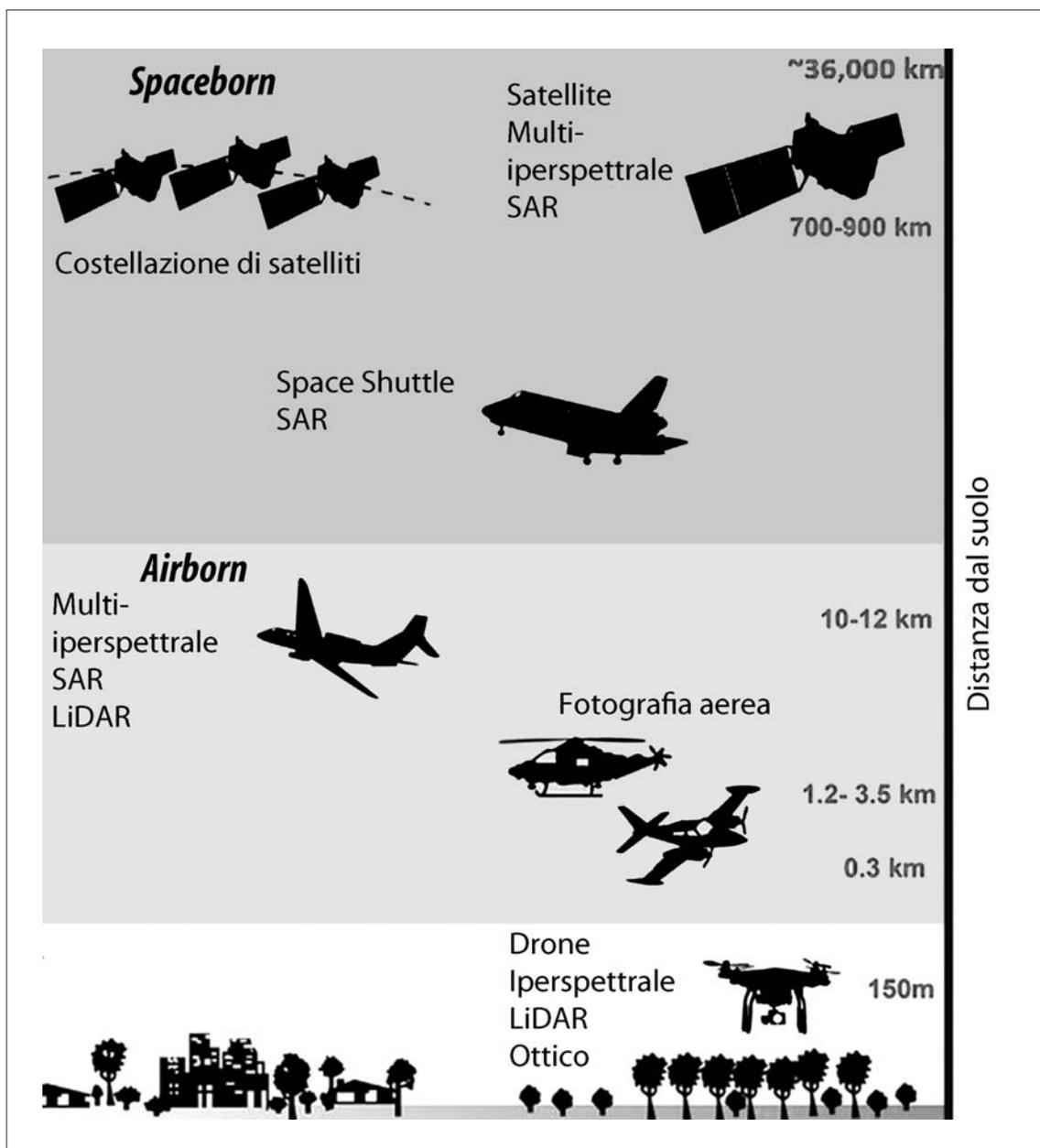


Figura 106: Piattaforme e sensori.

### 3.6.1 Sistema terrestre

Il sistema terrestre fornisce principalmente, nelle due omologhe configurazioni, immagini fotografiche e termiche. È da ricordare, per inciso, anche l'esistenza di una 'configurazione radar', detta 'georadar', che tuttavia non produce immagini ma profili quantitativi dell'energia di ritorno riflessa dai primi strati del sottosuolo, lungo la direzione di prospezione.

La 'configurazione fotografica' è prevalentemente costituita da una camera fotogrammetrica (sensore) posta su un teodolite (piattaforma) qualora le immagini siano finalizzate a scopi cartografici, o da una semplice macchina fotografica su cavalletto nel caso invece di studi tematici. Per scopi particolari (come il rilievo architettonico o quello di emergenze archeologiche)

si usano anche coppie di macchine sia fotogrammetriche che semplici, fissate all'estremità di un'asta, sostenuta a sua volta da un treppiede ('camere stereometriche').

Si è diffusa negli ultimi tempi la procedura dell'acquisizione di molte foto sotto varie angolature e successive posizioni di una stessa emergenza archeologica (scavo, struttura ecc.), che poi vengono elaborate con opportuno software (tra quelli *open-source photogrammetry software* vi sono Agisoft PhotoScan, Multi-View Environment, Regard3D ecc.) per ricostruire un modello 3D dell'oggetto investigato (metodologia Visual SFM, *Structure from Motion*<sup>17</sup>).

La 'configurazione termica' si compone invece di un sensore a scansione stazionario installato su treppiede o altra base orientabile.

Il 'laser scanner terrestre' (TLS, *Terrestrial Laser Scanner*) è anch'esso un sensore attivo che in coppia con un GPS differenziale viene impiegato per rilievi di emergenze archeologiche e la ricostruzione tridimensionale dello scenario in modo rapido e dettagliato.

### 3.6.2 Sistema aereo

Il sistema aereo è quello tradizionalmente più utilizzato per acquisire immagini pancromatiche, termiche e *radar* da impiegarsi in ricerche o studi sull'ambiente naturale e antropico in senso lato. Questa sua diffusione è dovuta in larga misura all'uso contestuale che si può fare delle immagini stesse, applicabili tanto al settore cartografico di dettaglio, quanto a quello tematico geologico, geoarcheologico, agricolo-forestale, ingegneristico-territoriale e urbanistico. La necessità di allargarne sempre più il campo operativo ha portato a ideare per le riprese aeree varie configurazioni fotografiche (camera fotogrammetrica con dorso motore), a scansione (lo storico sensore multispettrale Daedalus a 2 o 10 canali; più recentemente sensori iperspettrali CASI<sup>18</sup> e MIVIS<sup>19</sup>) e infine *radar* (SLAR) e *lidar* (*Airborne Lidar*).

### 3.6.3 Sistema spaziale

Il sistema spaziale di telerilevamento sembra via via sostituire quello aereo a causa sia del continuo miglioramento della qualità dell'immagine (caratteristiche geometriche e radiometriche) e dell'incremento complessivo della frequenza di ripresa sia dei costi relativamente bassi di acquisizione per unità di superficie coperta (Figura 107). Frequentemente la stessa piattaforma alloggia sensori di vario tipo, per cui di norma si hanno configurazioni miste. Ad esempio, il Landsat-8, il più recente della serie, porta due evoluti sensori, OLI con (*Operational Land Imager*) accoppiato con TIRS (*Thermal Infrared Sensor*); lo Spot-7 monta a bordo due identici strumenti NAOMI (*New Astrosat Optical Modular Instrument*) che possono operare singolarmente o simultaneamente in 5 bande, assieme a un sensore specifico per la vegetazione che cattura la luce riflessa in 4 bande (blu, rosso, vicino e medio infrarosso); il satellite indiano IRS-R2 (*Resource*

<sup>17</sup> 'SfM' è una tecnica che utilizza una serie più o meno numerosa di immagini bidimensionali per ricostruire una struttura 3D della scena ripresa, secondo i classici principi di triangolazione della fotogrammetria stereoscopica. Le foto, scattate anche con una comune camera fotografica da differenti angoli prospettici, devono avere una buona sovrapposizione e la loro elaborazione genera una 'nuvola di punti' le cui coordinate spaziali tridimensionali servono quale griglia per drappeggiare l'immagine visiva.

<sup>18</sup> CASI, prodotto da Itres Research Ltd. è un sensore iperspettrale 'pushbroom', in grado di acquisire fino a 288 bande spettrali nell'intervallo dal visibile all' infrarosso vicino, in particolare da 380 nm a 1050 nm, raggiungendo una altissima risoluzione spettrale (fino a 2,4 nm, con risoluzione spaziale di 1,3 m).

<sup>19</sup> MIVIS (*Multispectral Infrared and Visible Imaging Spectrometer*), progettato e realizzato dal CNR verso la fine del secolo scorso, è un sistema a scansione modulare di nuova generazione, costituito da 4 spettrometri in grado di realizzare un campionamento spettrale in 102 canali, nell'intervallo compreso tra 0.433  $\mu\text{m}$  e 12.70  $\mu\text{m}$ , con risoluzione spaziale di 2,4 m.

Sat-2) porta un insieme di strumenti ('payload') costituito da una camera multispettrale (LISS-4, *Linear Imaging and Self Scanning Sensor* a 4 bande e una seconda camera multispettrale (AWiFS-*Advanced Wide Field Sensor*) a 4 bande.

Piattaforma	Vantaggi	Svantaggi e Limitazioni
Satellite	estesa copertura areale basso costo	ridotta risoluzione spaziale (da 40 cm a pochi metri) risoluzione temporale dipendente dal periodo di rivisitazione dipendenza dalle condizioni atmosferiche (copertura nuvolosa), in particolare per sensori ottici passivi
Aereo	elevata risoluzione spaziale (alcuni cm); elevata efficienza di acquisizione dei dati punto di vista nadirale e obliquo	necessità di un piano di volo richiesta di una velocità e altezza di volo minime difficoltà di volare lungo traiettorie curve e/o corridoi spesso costo elevato (mobilitazione) durata di volo limitata (riposo dell'equipaggio) impossibilità di volo in caso di condizioni meteo pericolose
Elicottero	punto di vista ravvicinato sulla scena di interesse possibilità di volare a bassa quota e velocità possibilità di volare lungo traiettorie curve e/o corridoi buona manovrabilità e flessibilità accesso in spazi aerei congestionati	minore copertura areale per unità di tempo costo elevato durata di volo limitata (riposo dell'equipaggio) impossibilità di volo in caso di condizioni meteo pericolose
UAV	elevata flessibilità e manovrabilità elevata risoluzione spaziale (alcuni mm) possibilità di volare a quote diverse accesso ad ambienti remoti e pericolosi punto di vista nadirale e obliquo	capacità di carico limitata autonomia limitata copertura areale limitata

Figura 107: Piattaforme + sensori più diffusi: vantaggi e svantaggi.

### 3.7 Oggetto

L'oggetto, in un'accezione specifica propria al campo dell'interpretazione di immagini, è definibile come una entità con caratteristiche morfologico-spettrali unitarie in un quadro 'visivo' più complesso e differenziato.

Questa formulazione implica una certa dimensione superficiale dell'oggetto stesso, strettamente legata all'angolo di vista e agli altri parametri geometrici della ripresa. Infatti nella fase iniziale di 'individuazione' un oggetto viene percepito singolarmente solo se occupa una certa parte dell'immagine, né troppo estesa (poiché a questo punto l'attenzione verrebbe distolta dall'unità verso le sue parti costituenti) né troppo piccola (perché di contro il singolo oggetto diverrebbe elemento componente un insieme più complesso, come, per esempio, un albero e un gruppo di alberi o un bosco).

All'oggetto, così individuato, viene poi attribuita nella fase della 'identificazione' una determinata natura, tenendo conto delle correlazioni tra 'parvenze' sull'immagine (tonalità, struttura, tessitura, morfologia) e proprietà fisiche caratterizzanti l'oggetto stesso.

Accanto all'insieme degli 'oggetti' esposti sulla superficie del terreno e quindi direttamente percepibili, vi è anche il gruppo degli 'oggetti' non direttamente percepibili; nella fase 'deduttiva' infatti, analizzando i rapporti biunivoci esistenti tra l'oggetto e i suoi indicatori di superficie (microrilievo e anomalie nelle curve di livello, zone più umide e anomalie termiche ecc.) si possono ritrovare strutture sepolte sia naturali (faglie, corpi mineralizzati ecc.) sia antropiche (rete di canali irrigui, antiche strade e suddivisioni particellari, resti archeologici ecc.). In questo caso si sviluppa un processo logico basato sulla conoscenza di rapporti di 'causa ed effetto' e di particolari corrispondenze morfologiche; sotto il profilo semantico la formulazione di queste correlazioni rappresenta lo stadio più evoluto dell'interpretazione.

#### 3.7.1 Caratteristiche dell'immagine 'oggetto'

Le principali caratteristiche o proprietà dell'immagine 'oggetto' possono schematicamente essere così elencate:

- 'forma', definita dal contorno o 'silhouette' dell'oggetto stesso, dipende molto dal punto prospettico della ripresa;
- 'grandezza', considerata sempre in modo relativo, cioè in rapporto alle dimensioni degli oggetti contermini;
- 'struttura', intesa come organizzazione spaziale dell'oggetto, cioè il modo in cui le varie parti si aggregano tra di loro per formare l'unità. Da ricordare che il numero di parti costituenti l'insieme deve essere piccolo, altrimenti l'interprete sarà condotto a raggruppare parecchie di queste parti per costituire un sotto insieme più ampio;
- 'tessitura' (o trama del tessuto fisico dell'oggetto), definita dal ritmo ordinato a piccolo periodo dei vari elementi singoli (ordine di grandezza vicino alla soglia di percezione). Struttura e tessitura, l'una più astratta e l'altra più concreta, non sono proprietà invarianti di un oggetto, ma solo dell'oggetto ripreso a una certa distanza con uno specifico sensore;
- 'tonalità' e 'colore', definiti come il prodotto dell'interazione tra le proprietà spettrali dell'oggetto con le varie sorgenti di energia elettromagnetica (luminosa, termica, *radar*) captata dai diversi sensori. Ai fini interpretativi risulta sempre più importante la variazione relativa di colore o di tono di un oggetto, piuttosto che il loro valore assoluto (per esempio il tetto bruno di una piccola costruzione in un bosco è molto più identificabile durante l'estate, quando le foglie sono verdi, che in autunno con le foglie rossastre).

### 3.7.2 Criteri di identificazione dell'oggetto

I criteri per identificare un 'oggetto' sull'immagine sono raggruppabili in due grandi categorie:

- criteri diretti, che utilizzano le caratteristiche proprie dell'oggetto medesimo, ovvero forma, dimensione e risposta spettrale (tono e colore), detta anche 'firma spettrale';
- criteri indiretti, che riportano allo studio dell'ambiente circostante e a quello dei rapporti tra esso e l'oggetto.

#### *Criteri diretti*

Tra i primi in particolare è ancor oggi molto seguito il 'criterio di analisi delle forme', soprattutto quando sono disponibili foto aeree o immagini da satellite di tipo stereoscopico; in questo caso allo studio della forma orizzontale (proiezione del contorno dell'oggetto sul piano di formazione dell'immagine) si aggiunge quello della forma verticale. L'analisi delle 'ombre portate' aumenta inoltre la possibilità di identificazione dei vari oggetti.

Segue poi il 'criterio di analisi delle dimensioni', tanto orizzontali che in rilievo (la soglia di individuazione di un dettaglio e dell'ordine di 1/30 mm per un punto circolare con contrasto tonale sufficiente in rapporto al fondo immagine); per riconoscerli sicuramente una forma e necessaria una dimensione almeno quadrupla di 0,3 mm<sup>2</sup> (alla scala 1:50.000 un albero deve avere più di 10 m di diametro per essere distinto singolarmente).

Vi è quindi il 'criterio di analisi della struttura', uno dei più potenti soprattutto per l'interprete con esperienza che ha raggiunto, grazie a una lunga familiarità con gli 'oggetti' che interessano, un alto grado di concettualizzazione della specie a partire dai numerosi individui incontrati (per esempio un reticolo di drenaggio è riconosciuto come tale al primo colpo d'occhio in base alla sua struttura dendritica, oppure il criterio determinante per l'identificazione di un villaggio è la percezione della struttura dell'abitato e non l'analisi dei singoli edifici che lo compongono).

Il 'criterio dell'analisi della tessitura' si basa su una percezione globale e relativa di questa proprietà, difficile da analizzare nei suoi elementi singoli. La tessitura viene designata con termini qualitativi (granulare, vellutata, rugosa ecc.), oppure può essere espressa quantitativamente dall'insieme delle proprietà delle varie componenti dell'oggetto (distribuzione spaziale, forma, grandezza, orientazione, densità, contrasto, contorno ecc.).

Il 'criterio dell'analisi della tonalità' deve essere utilizzato con molta precauzione, poiché la 'firma spettrale' di un oggetto dipende tanto da condizioni ambientali (caratteristiche dell'illuminazione e quindi ora e stagione della ripresa, esposizione e pendenza della superficie, altezza e posizione spaziale della piattaforma, stadio fenologico di sviluppo della copertura vegetale, condizioni meteorologiche e idrologiche pregresse ecc.), quanto dalla natura intrinseca dell'oggetto in rapporto alla sorgente di irradiazione dell'energia e infine dal tipo di sensore. In generale si osserva che più diminuisce la taglia degli oggetti, ovvero la scala delle immagini, maggiore diviene il potere discriminante del criterio tonale in rapporto a quello della forma e delle dimensioni. L'uso di riprese complementari nelle varie bande dello spettro elettromagnetico (foto in b/n e IR falsi colori, immagini multibanda ecc.) favorisce, attraverso un processo di intersezione dei dati, l'identificazione di un oggetto sulla base del solo criterio tonale; tuttavia è piuttosto raro possedere riprese di varia natura della stessa superficie, per cui in genere questo tipo di analisi è quasi sempre associato a quello della forma.

#### *Criteri indiretti*

Tra i criteri di riconoscimento indiretto degli oggetti, va in particolare ricordato il 'criterio di analisi dell'ambiente circostante', che risulta tanto più efficace quanto maggiore è l'esperienza

dell'interprete; il processo logico seguito in questo caso consiste nel collegare l'oggetto a due categorie di insiemi:

- un 'insieme topografico', caratterizzato da fattori puntuali (per esempio sommità di rilievi montuosi), lineari (*talwegs*), o di superficie (pendenza ed esposizione di un versante);
- un 'insieme di relazioni' o 'funzioni' tra l'oggetto stesso e il suo ambiente (la presenza di una faglia è identificata sulla base della particolare orientazione di elementi lineari, o *talwegs*, anomala nell'ambito della struttura di un certo reticolo di drenaggio).

Va comunque sottolineata l'importanza dell'uso simultaneo di vari criteri di analisi, in modo da restringere il campo di indecisione e convergere su una identità univoca dell'oggetto indagato.

### 3.8 Immagine

Il termine 'immagine' nel telerilevamento ha un significato onnicomprensivo piuttosto ampio; viene infatti impiegato per definire un qualsiasi supporto visivo risultante dall'interazione fra l'energia elettromagnetica che proviene da una generica superficie e un sistema di registrazione sia fotosensibile (immagine fotografica) sia non fotografico (immagine termica, radar ecc.).

L'immagine contiene solo quelle caratteristiche elettromagnetiche che ricadono nell'intervallo di operatività del sensore. Così oggetti uguali, o addirittura lo stesso oggetto, possono presentare una diversa immagine se diversa è per esempio la sensibilità della pellicola impiegata con più sensori fotografici oppure cambia il canale utilizzato in una registrazione termica o ancora, la lunghezza d'onda degli impulsi inviati da un *radar*.

Tutte le immagini sono descrivibili in termini di proprietà tanto geometriche, quali scala e risoluzione, quanto spettrali come tono, colore, tessitura, struttura e forma.

#### 3.8.1 Scala

La scala di una immagine è definita dal rapporto tra distanze misurate sull'immagine e corrispondenti distanze dei punti omologhi ritrovati sul terreno. È questa una caratteristica legata alla fase di ripresa e dipende dalla lontananza dell'oggetto dalla piattaforma e dalle configurazioni ottico-meccaniche del sensore (classiche scale dei prodotti fotografici ricavati dalle riprese Landsat ETM o da quelle IRS sono 1:250.000, 1:500.000 e 1:1.000.000 per l'intera scena e 1:50.000, 1:100.000 per un quadrante di scena. La scala dei prodotti Spot varia di norma tra 1:25.000 e 1:250.000).

#### 3.8.2 Risoluzione geometrica

La risoluzione geometrica di una immagine, ovvero la capacità di discriminare oggetti a differente contrasto tonale (diverse proprietà radiometriche), è data da un valore numerico che indica la distanza minima al di sotto della quale due distinti elementi puntiformi appaiono come un unico oggetto. Se il valore di risoluzione dell'immagine viene moltiplicato per il fattore di scala, si ottiene la risoluzione a terra del sistema utilizzato.

#### 3.8.3 Tono

Il tono (o tonalità) esprime la luminosità (energia riflessa, emessa o retrodiffusa) delle varie superfici registrata sull'immagine attraverso continue gradazioni di grigio (termini estremi il bianco e il nero, corrispondenti rispettivamente ai livelli 255 e 0 nelle consuete immagini digitali a 8 bits).

Il tono è influenzato dalla natura e rugosità delle superfici nelle immagini fotografiche, multispettrali e *radar*; in quelle termiche esso varia invece in funzione della temperatura e della emissività. Per l'interpretazione sono più significative elevate differenze di tonalità (alti contrasti) che alti valori assoluti dello stesso parametro.

#### 3.8.4 Tessitura

La tessitura è definita come la variazione dei vari elementi tonali nello spazio dell'immagine. Risulta alla fine essere un aggregato di elementi a diversa tonalità troppo piccoli per essere descritti singolarmente. È un parametro qualitativo nella descrizione delle caratteristiche degli oggetti fissati sull'immagine, che va sempre confrontato con altre tessiture campione all'interno di un unico tipo di immagini riprese alla stessa scala. Il medesimo oggetto può mostrare infatti tessiture distinte secondo i sensori utilizzati, le condizioni atmosferiche incontrate e la scala di rappresentazione dei dati.

#### 3.8.5 Struttura

La struttura è data dalla distribuzione spaziale più o meno ordinata di tono, tessitura e contrasto in sequenze ripetute, che definiscono così un preciso schema spaziale. Essa può essere descritta in termini geometrici (struttura radiale, concentrica, parallela ecc.), morfologici (struttura a pieghe, a dossi, a meandri ecc.) e genetici (geo-strutturale, idrodinamica ecc.).

#### 3.8.6 Forma

Il concetto di forma è di natura ambivalente, poiché può essere legato alla struttura in modo dipendente (effetto) o al contrario prevalente (causa). Una particolare struttura infatti genera una forma, oppure una o più forme definiscono una struttura. In ogni caso la forma è elemento essenziale nel processo di identificazione degli oggetti (esistono forme caratteristiche di tipo sinuoso nei mosaici di parcellizzazione agraria delle piane alluvionali che indicano tracce di paleo-alvei, o forme lineari geometriche nella rete irrigua e viaria che tradiscono i resti di un disegno di centuriazione del territorio).

### 3.9 Interpretazione

L'interpretazione delle immagini è la fase finale di un processo di indagine da remoto che, partito dall'acquisizione del dato telerilevato, passa poi alla sua restituzione ed elaborazione analogica o digitale, e offre infine allo studioso materia per le successive fasi di approfondimento della ricerca, con la produzione finale di carte tematiche predittive sulla possibile presenza di emergenze archeologiche e sui rapporti con il loro contesto ambientale.

Nel paragrafo 1.2 si sono già riportate le 4 fasi concettuali in cui si articola l'interpretazione e qui si vuole solo ricordare che soprattutto le ultime due ('classificazione' e 'deduzione') permettono di sfruttare al massimo l'informazione contenuta nell'immagine, superando anche il limite fisico del telerilevamento passivo, che registra solo l'energia riflessa dalla superficie terrestre senza penetrare al di sotto della stessa, come avviene con il sensore attivo del *radar*. Infatti, alcuni 'indicatori di superficie', come la copertura vegetale, l'umidità del suolo, il grado di alterazione delle masse rocciose riflettono molto spesso il controllo di strutture sepolte, che possono in molti casi essere di origine antropica. La classificazione di questi indicatori in 'categorie' fisiche e la deduzione dalla loro estensione e forma (regolare o irregolare, ripetuta o casuale ecc.) porta a riconoscere il controllo che strutture archeologiche interrate esercitano su di essi.

A titolo esemplificativo si riporta uno schema che mostra chiaramente come l'indicatore 'copertura vegetale' è influenzato da una struttura archeologica sepolta (Figura 108).

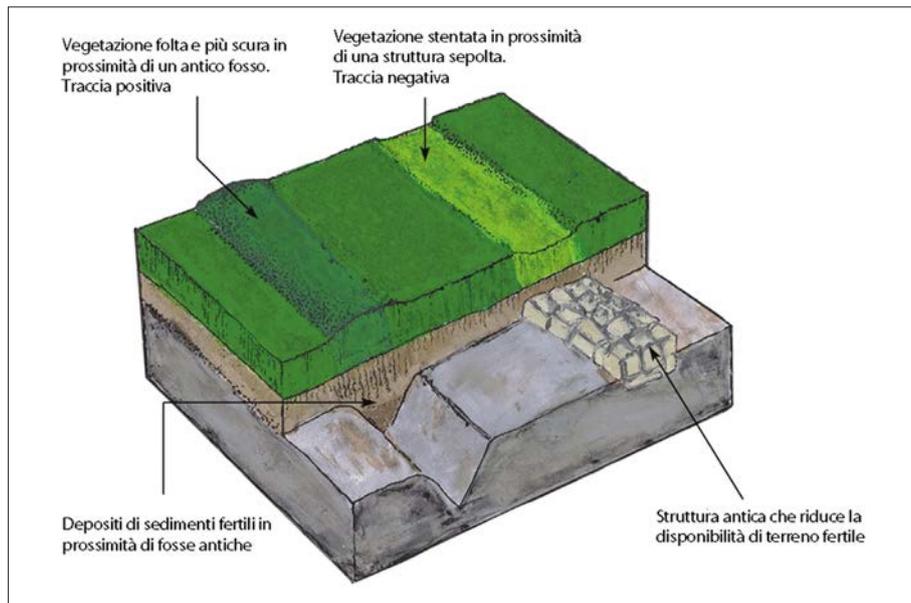


Figura 108: Fase deduttiva di collegamento tra 'indicatori di superficie' (in questo caso 'crop marks') e strutture archeologiche sepolte.

Una ricerca di carattere geoarcheologico svolta sull'antico porto di Tharros (Marcolongo, Vangelista e Verga 1999) ha applicato l'approccio interpretativo sviluppato fino alla fase deduttiva, partendo da immagini multispettrali da satellite Aster e da foto aeree zenitali in B/N, con significativi risultati in quanto a riscoprire le antiche forme del paesaggio (Figure 109-110), che è quello che ci si propone ora di affrontare, più nel dettaglio, nella seconda parte di questo manuale.



Figura 109: Porzione di immagine Aster a falsi colori (bande 3-2-1) (Marcolongo, Vangelista e Verga 1999).

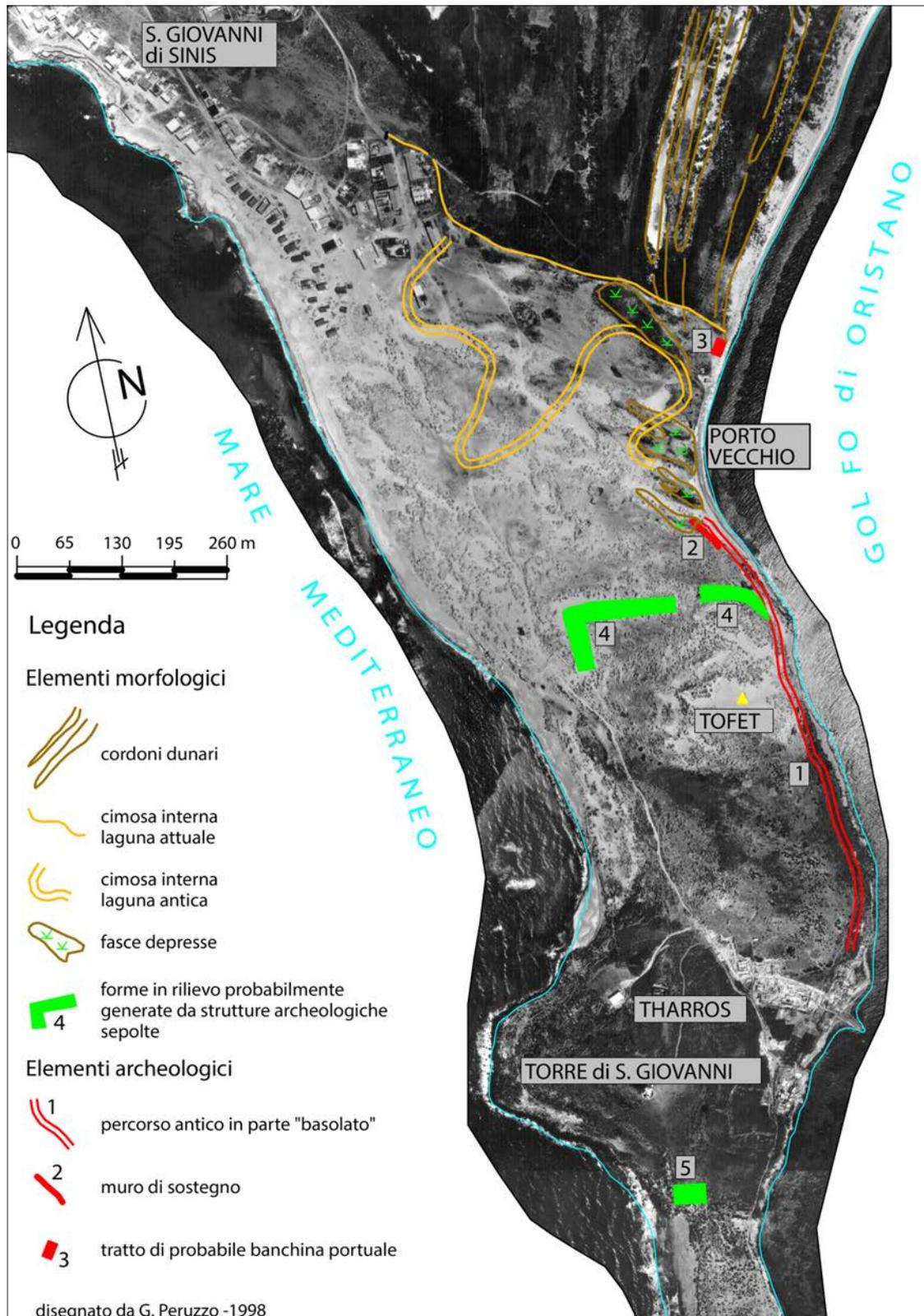


Figura 110: Interpretazione spinta fino alle fasi di 'classificazione' (categorie di 'Elementi morfologici' ed 'Elementi archeologici') e 'deduzione' ('Strutture archeologiche sepolte' e 'Cimosa interna laguna antica') sull'area dell'antico porto di Tharros (Marcolongo, Vangelista e Verga 1999).

Parte II  
ESEMPI APPLICATIVI PER LO STUDIO DEI CONTESTI GEOARCHEOLOGICI



## 4. Antiche linee di costa

*...foedera naturae rupit  
concordia pugnax*  
...una concordia di elementi contrari  
ha rotto le leggi della natura  
(Magno Felice Ennodio, V-VI sec. d.C.)

Questo verso, che chiude un componimento poetico di una epistola di Magno Felice Ennodio (CCXXIV, epist. 5, 8) sulle acque termali del bacino Aponense, è un ottimo *incipit* per un capitolo che riguarda degli ambienti in un equilibrio dinamico paradigmatico. Coste e aree deltizie, infatti, uniscono concordemente e armoniosamente elementi opposti come acqua e terra in un sottile e fragile bilanciamento, che la pressione e l'azione dell'uomo hanno più volte rotto nel corso dei secoli.

Infatti, è anche vero che gli elementi del paesaggio discussi in questo capitolo, le coste e le foci fluviali, pertengono a quei contesti antropici in cui il rapporto con il panorama costiero si è caratterizzato per una duplice direttiva, ovvero, sia in termini di sfruttamento delle risorse sia di rischi. Da un lato, le risorse alimentari garantite dal mare, come pure il suo ruolo di elemento di passaggio piuttosto che di barriera ambientale, hanno determinato e determinano ancora oggi un forte elemento attrattivo. D'altro canto, in termini di rischi, i fenomeni delle mareggiate, erosioni, sedimentazioni o arretramenti delle spiagge che possano obliterare o cancellare porti hanno costituito fattori di abbandono degli insediamenti.

Dalle epoche più recenti alla preistoria olocenica (periodo postglaciale), fatte salve le variabilità locali, equilibri o disequilibri hanno lasciato una traccia, o una firma, sotto forma di antiche linee di costa, *shell middens*, antiche reti idrografiche o antichi depositi alluvionali in cui i contesti archeologici trovano posto solo in una lettura sincronica tra elemento antropico e contesto naturale.

### 4.1 Italia. Il delta del Po, un ambiente in equilibrio dinamico

Il Delta del Po, area per eccellenza di transizione tra la terraferma e il mare, in cui la dinamica geomorfologica è particolarmente accelerata e le tracce della presenza dell'uomo fin dall'antichità punteggiano i suoi numerosi bracci fluviali, ha subito nel corso di tutto l'Olocene modificazioni morfologiche rilevanti e ancor oggi è soggetto a continui cambiamenti della linea di costa (Figure 111-112). Non solo la sua estensione superficiale è variata ampiamente, ma anche i percorsi dei rami del Po che ne formano l'ossatura, assieme alle condizioni di alimentazione delle falde con quella freatica *in primis*, risultano mutevoli nei rapporti sia con l'ambiente marino sia con il modello insediativo dell'uomo e le sue varie attività produttive.

Così, di conseguenza, il cuneo salino che risale verso l'entroterra, i sedimenti in sospensione che si sversano alla foce dei vari canali deltizi, la propagazione di eventuali inquinamenti lungo alcune direttrici preferenziali di trasporto idrico sotterraneo e non da ultimo la pressione degli agglomerati abitativi e dell'uso del suolo hanno generato situazioni molto complesse e tra di loro spesso contrastanti, che necessitano di un approccio di studio integrato ed esteso su un largo arco temporale (Marcolongo e Zaffanella 1987).

In questo esempio si da conto degli studi di natura idrogeologica, geomorfologica e geoarcheologica condotti in loco con l'impiego tra l'altro di numerose immagini telerilevate e che permettono ora di proporre alcune suggestioni sulle reciproche influenze tra uomo e risorse

ambientali, partendo da situazioni del passato pre-protostorico e storico e mostrando come la loro conoscenza può aiutare, tra l'altro, nella pianificazione di interventi di protezione e conservazione auspicabili.



Figura 111: Delta del Po. Esempio di sovrapposizione di stralcio della Carta su immagine Ikonos a elevata risoluzione da Google Earth (immagine Ikonos del dicembre 2017). L'interpretazione della struttura e della tessitura del fitto mosaico di particelle agrarie (dimensioni, orientamento e tonalità) permette di riconoscere le antiche linee di costa, i vecchi bracci fluviali e più in generale lo sviluppo della paleo-idrografia tardoquaternaria del Po (Marcolongo e Zaffanella 1987).

#### 4.1.1 Paleoidrografia del Po telerilevata

Dato il livello regionale del fenomeno, la ricostruzione della paleo-idrografia della bassa pianura padana tardo-quaternaria e dell'intera cuspidia deltizia a essa afferente si è basata essenzialmente sull'interpretazione di immagini telerilevate da piattaforma satellitare (Landsat-3 e 5 ETM multispettrali e multitemporali), affiancate da foto aeree pancromatiche zenitali solo per alcuni approfondimenti locali.

È interessante notare tra l'altro, in tale contesto morfologico altamente dinamico, la localizzazione di vari siti rivieraschi a ridosso di antiche linee di costa, sebbene oggi si trovino a molte decine di km dal mare.

Questo è il caso del sito etrusco di San Basilio che aveva una importante attività portuale, ubicato alle spalle di una paleo-duna attiva fino al VII-VI secolo a.C. (Figure 112-113). San Basilio, infatti, è un sito datato al VII secolo a.C., ubicato lungo la via costiera Popilia, che partendo da Rimini andava verso Aquileia, passando per la ben più importante Adria, anch'essa prossima

al mare (Salzani e Vitali 2002). Oggi, e ciò ben lo rende un caso esemplificativo, San Basilio si trova a quasi 30 km nel retroterra.



Figura 112: Sito portuale etrusco di San Basilio su immagine Ikonos a elevata risoluzione di Google Earth, a ridosso di una antica linea di costa (fascia di particelle agrarie ad andamento NNE-SSW) attiva fino al VII-VI a.C.

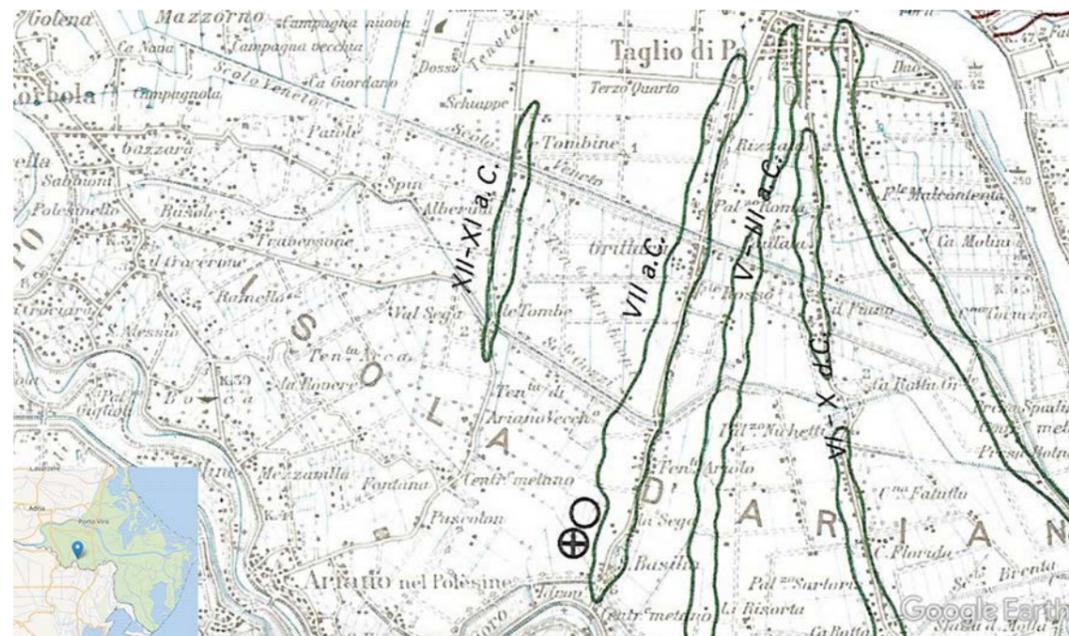


Figura 113: Area dell'immagine precedente con il contesto paleo-ambientale del sito portuale etrusco di San Basilio (posto al centro del margine inferiore). È evidenziato lo spostamento della linea di costa verso est dal XII secolo a.C. all'alto medioevo attraverso la cartografia delle successive linee di costa corrispondenti a fasce sabbiose dunari più o meno erose (Marcolongo e Zaffanella 1987).

L'interpretazione sviluppata attraverso le quattro fasi di individuazione delle anomalie del mosaico di parcelle agrarie (elemento del paesaggio peculiare, che copre l'intera area di studio), di identificazione della loro espressione morfogenetica (paleo-corsi e antiche linee di costa), di classificazione spazio-temporale e di deduzione dei processi evolutivi di accrescimento deltizio ha portato a stendere la carta di cui è mostrato uno stralcio proprio sulla zona deltizia (Figure 113-116).



Figura 114: Stralcio della porzione meridionale della Carta della Paleoidrografia tardo-quadernaria della Pianura Veneta e Delta del Po, settore est, ricostruita con l'impiego di immagini telerilevate (Landsat-5ETM, foto aeree) (Marcolongo e Zaffanella 1987).

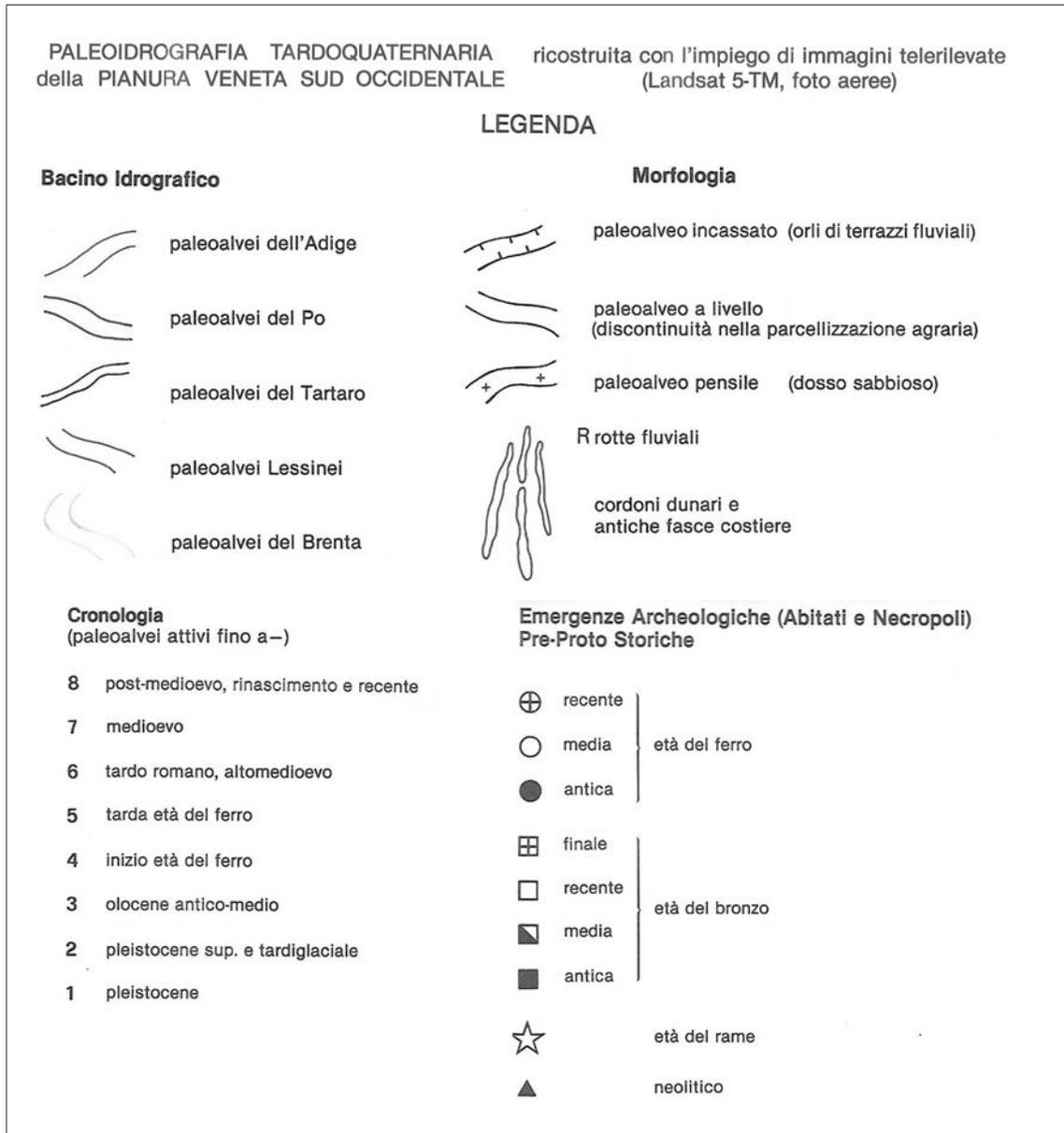


Figura 115: *Legenda della carta tematica 'Paleoidrografia Tardoquaternaria della Pianura Veneta sud Occidentale' (Figure 113-116), ricostruita con l'impiego di immagini telerilevate (Landsat 5 ETM, foto aeree) (Marcolongo e Zaffanella 1987).*

La relativa legenda (Figura 115) riporta la suddivisione dei paleo-corsi in funzione della loro appartenenza al Po o all'Adige, i due principali fiumi che hanno improntato l'evoluzione della bassa pianura veneto-padana durante l'ultimo periodo post-glaciale olocenico, i cui sedimenti trasportati e deposti sono stati rielaborati dalle correnti costiere dell'Adriatico formando l'accrescimento deltizio e tutta una serie di paleo-dune e antiche linee di costa molto articolata.

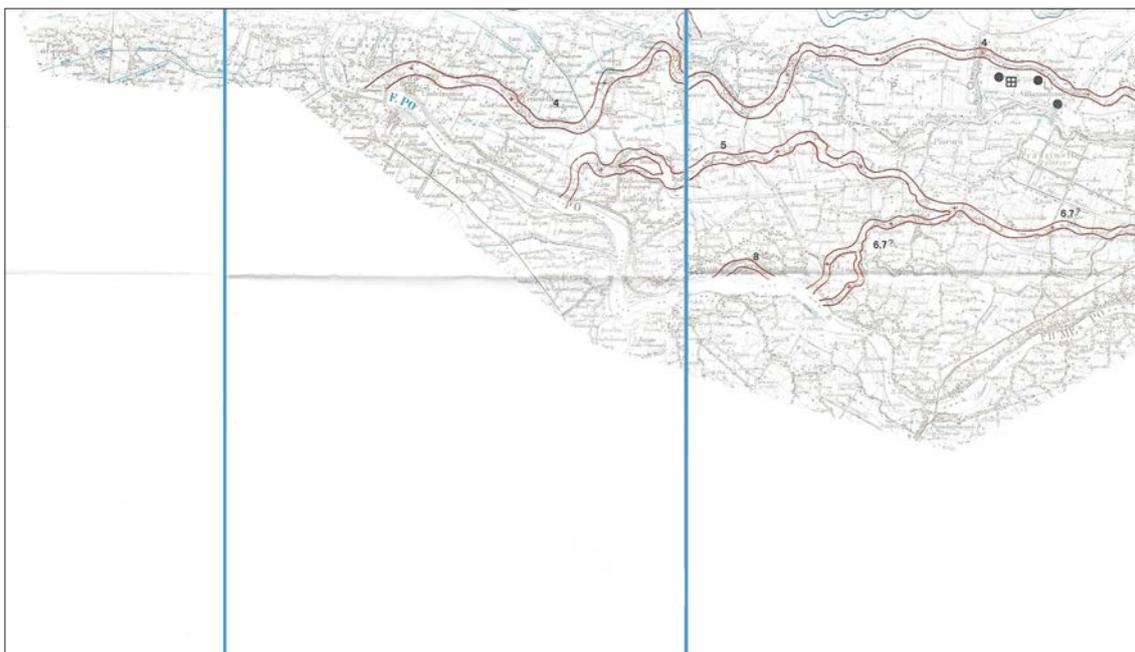


Figura 116: Stralcio della porzione meridionale della Carta della Paleoidrografia tardo-quadernaria della Pianura Veneta e Delta del Po, settore ovest, ricostruita con l'impiego di immagini telerilevate (Landsat-5ETM, foto aeree) (Marcolongo e Zaffanella 1987).

Da un punto di vista geoarcheologico è particolarmente interessante notare lo stretto rapporto tra dislocazione dei numerosi siti pre-protostorici individuati e in gran parte scavati in questa zona di bassa pianura costiera e le morfologie messe in luce. In particolare, è molto significativa la posizione del sito di San Basilio (Figure 112-113), giusto a ridosso di una linea di costa attiva fino al VII-VI secolo a.C., all'epoca dunque in posizione prospiciente il mare e quindi collegato a importanti traffici marittimi lungo l'Adriatico in connessione con la Grecia.

A completamento dell'esempio si riporta la copertura aerea storica utilizzata, contestualmente alle immagini satellitari, per lo studio di dettaglio, fornita dall'archivio della Regione Veneta e la relativa foto aerea pancromatica zenitale in bianco e nero ad alta risoluzione (IGM 1949) (Figura 117).

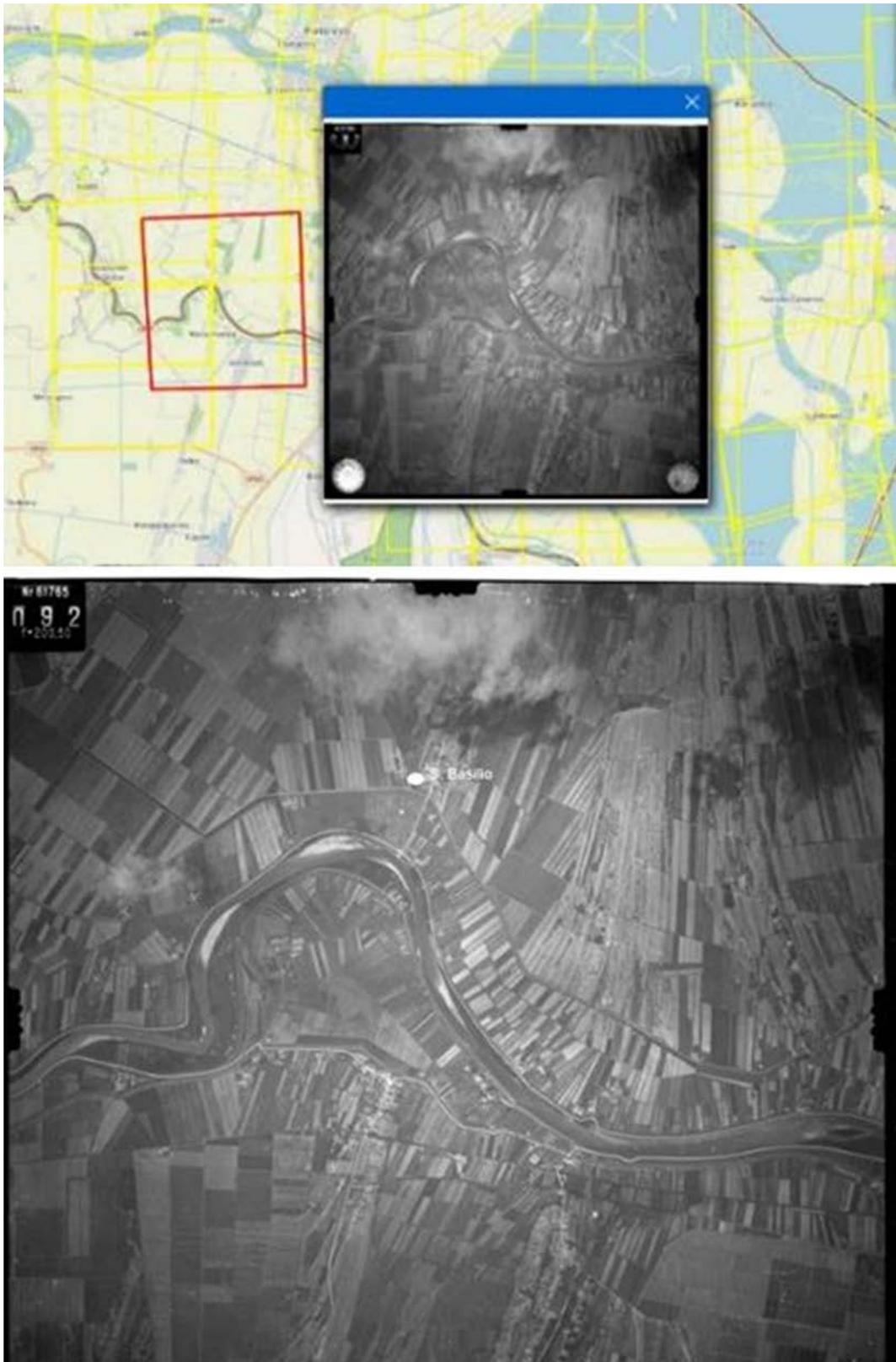


Figura 117: Copertura aerofotogrammetrica, Istituto Geografico Militare IGM del 1949 e relativa foto aerea pancromatica zenitale in bianco e nero.

#### 4.2 Yemen. Gli ittiofagi del Mar Rosso alla paleo-foce del wādī Surdūd

Lo studio del popolamento costiero di quelle regioni arabiche che gli autori greco-romani definirono come le sponde del Fiume Oceano prima, e del Mare Eritreo poi, popolate da ittiofagi (mangiatori di pesce) o chelonofagi (mangiatori di tartarughe), ha rivelato come l'occupazione antropica di questi contesti costieri risalga sino all'epoca neolitica, a partire dal VII millennio a.C. (Loreto 2018b: 20-23).

Le ricerche volte allo studio del paesaggio costiero arabico e delle relative economie di sussistenza risalgono agli anni '70-'80 del secolo scorso, quando Alessandro de Maigret, in Yemen, e Maurizio Tosi, in Yemen e Oman, definirono, sulla scorta di una preliminare ricognizione paleo-ambientale, le dinamiche insediative degli antenati preistorici degli ittiofagi di cui riferiscono Nearco, Plinio il Vecchio o Claudio Tolomeo, solo per citarne alcuni (de Maigret 1996: 119).

In questo caso studio si analizzerà, in particolare, il contesto della costa occidentale dello Yemen, la Tihama, e il comprensorio territoriale pertinente alla foce del wādī Surdūd (Figura 118). Questa regione, infatti, si caratterizza per l'aver subito, in tempi relativamente brevi, profondi cambiamenti morfologici, legati soprattutto al processo di erosione, trasporto e deposizione dei sedimenti che dalle valli fluviali, attraverso le montagne, hanno fatto avanzare la linea di costa nascondendo l'antico panorama costiero solcato da lagune di mangrovie, ovvero delle nicchie ecologiche in grado di attirare l'uomo grazie a un felice equilibrio tra risorse marine e risorse terrestri.

A rendere esemplificativo questo caso studio è quindi il fatto che i siti neolitici di queste comunità costiere non sono localizzati in prossimità dell'attuale linea di costa, ma della paleo-fascia costiera, oggi nascosta da sedimenti alluvionali e ancor più recenti accumuli sabbiosi eolici.

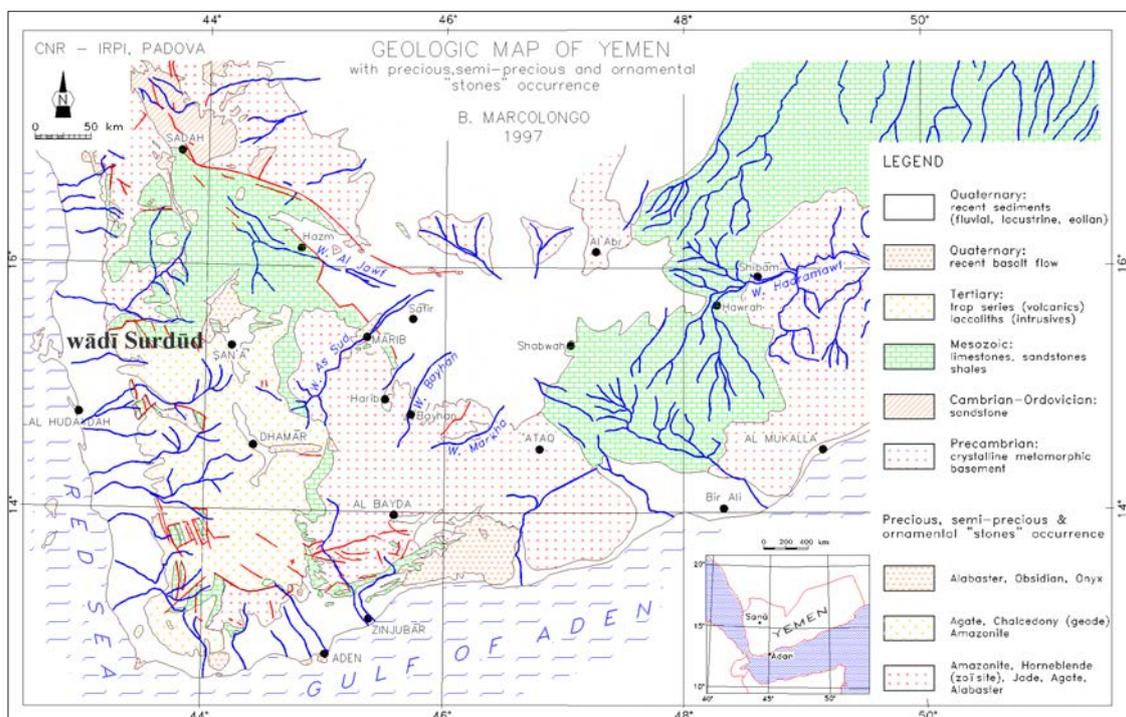


Figura 118: Il wādī Surdūd nell'ambito del generale sistema idrografico e geologico dello Yemen (Marcolongo 2007).

#### 4.2.1 Fisiografia e morfologia dello Yemen: la Tihama

Lo Yemen, l'*Arabia Felix* degli autori romani, occupa l'estremità sud-occidentale della Penisola arabica, in prossimità della faglia (*rift*) composta dal Mar Rosso e dal Golfo di Aden. Da un punto di vista fisiografico, la regione è suddivisa in una fascia costiera (Tihama), una articolata fascia montuosa che culmina negli altipiani interni, a circa 2000 m di quota, e una fascia desertica interna che degrada a poco meno di 1000 m di quota. Tale conformazione eterogenea si è determinata dal distacco della Placca arabica dallo Scudo africano (a partire da circa 30 milioni di anni fa), dando vita a morfologie e ambienti di varia natura.

La Tihama è dunque una fascia orientata in senso nord-sud estesa tra i 25 ai 45 km, e geo-strutturalmente parlando rappresenta il margine o *graben* orientale del Mar Rosso. Si tratta di una piattaforma di margine, oggi dal clima semi-arido, che raggiunge i 350 m di quota ai piedi delle montagne ed è composta da una fascia più antica, prospiciente il mare, di rocce terziarie e quaternarie coperte dai recenti accumuli di sedimenti eolici, e da una fascia più interna composta da spessi depositi di sedimenti alluvionali provenienti dalle valli fluviali che solcano le montagne (Figura 118). Particolarmente significativa è la presenza di numerose sorgenti naturali lungo il margine tra queste due unità morfologiche.

Per comprendere la distribuzione dei siti neolitici, genericamente definiti *shell middens* (accumuli di conchiglie) poiché caratterizzati da ingenti accumuli di scarti di conchiglie il cui uso era legato all'alimentazione o alla produzione di monili, è stato determinante ricostruire l'antico panorama costiero sulla base di osservazioni telerilevate e verifiche sedimentologiche che determinassero l'articolazione dell'antico ambiente a cavallo tra il Pleistocene finale e l'Olocene, cioè a partire da circa 14.000-12.000 anni fa.

#### 4.2.2 Morfogenesi

La storia ambientale della Tihama è caratterizzata da un processo paleo-climatico complesso e a volte contraddittorio, risultato da modifiche eustatiche e tettoniche chiaramente osservabili anche nell'Olocene, ovvero un'epoca a noi molto vicina, in termini geologici.

Diversi fattori morfogenetici hanno contribuito a modellare l'ambiente attuale, nascondendo quello più antico, in un costante rapporto, come si diceva, di moti contraddittori. Innanzitutto, i numerosi *widiyan* (sing. *wādi*), potenti corsi d'acqua stagionali risultanti dalle piogge monsoniche che bagnano l'entroterra montuoso, hanno innescato fenomeni di diversione, straripamento, lascito di paleo-alvei e dissezioni che come una fitta trama di lame solcano la linea costiera trasportando sedimenti da est verso ovest, tendendo a estendere la linea di costa verso il mare. Il Mar Rosso, dal canto suo, durante l'ultima 'trasgressione Flandriana' (6.000-4.500 anni fa) si è innalzato di circa 2-3 m, sommergendo ampi tratti costieri (Zarins e al-Badr 1986). Infine, e ancora una volta in senso contrario, la costante azione eolica determinata dai forti e tesi venti monsonici non ha mai cessato di apportare continui sedimenti eolici che hanno contribuito all'avanzamento della linea di costa.

Queste modifiche eustatiche sono inoltre intervallate dall'attività neo-tettonica, che ha dato vita a dinamiche endogene che seguono il costante moto del *rift*, ovvero del costante allontanamento della Placca arabica dallo Scudo africano, determinando fenomeni di subduzione dei più 'soffici' depositi costieri.

#### 4.2.3 L'analisi telerilevata e i dati dal campo

Mediante l'impiego congiunto di foto aeree pancromatiche B/N scattate dalla *British Royal Air Force* nel 1973 (scala media 1:65.000) e immagini satellitari Landsat-5ETM multispettrali (Figura 119) fu prodotta, a inizi anni '90, una mappa geomorfologica del *wādi* Surdūd basata

su fogli topografici in scala 1:50.000 forniti dal servizio cartografico della Repubblica Araba dello Yemen.



Figura 119: Dettaglio della parte nord della Tihama, con l'area del wādī Surdūd oggetto dell'indagine. Landsat-5ETM multispettrale impiegata nelle analisi telerilevate dei primi anni '90.

Tali supporti permisero la definizione, con grande dettaglio, delle forme paleo-ambientali relative alla foce del wādī Surdūd e alla linea di costa relativa, evidenziando i processi morfogenetici propri delle morfostrutture fluviali, lacustri e marine coinvolte nell'areale in questione. In particolare, l'analisi telerilevata mostrò con chiarezza la presenza di una antica grande *sabkha* (pl. *sibākh*, bacini lacustri privi di un perenne sbocco nel mare) e una insenatura, ovvero laguna, che riflettono un andamento della linea di costa più arretrato di quello attuale e attorno a cui si dispiegavano i siti neolitici caratterizzati da accumuli di materiale malacologico (Figura 120).

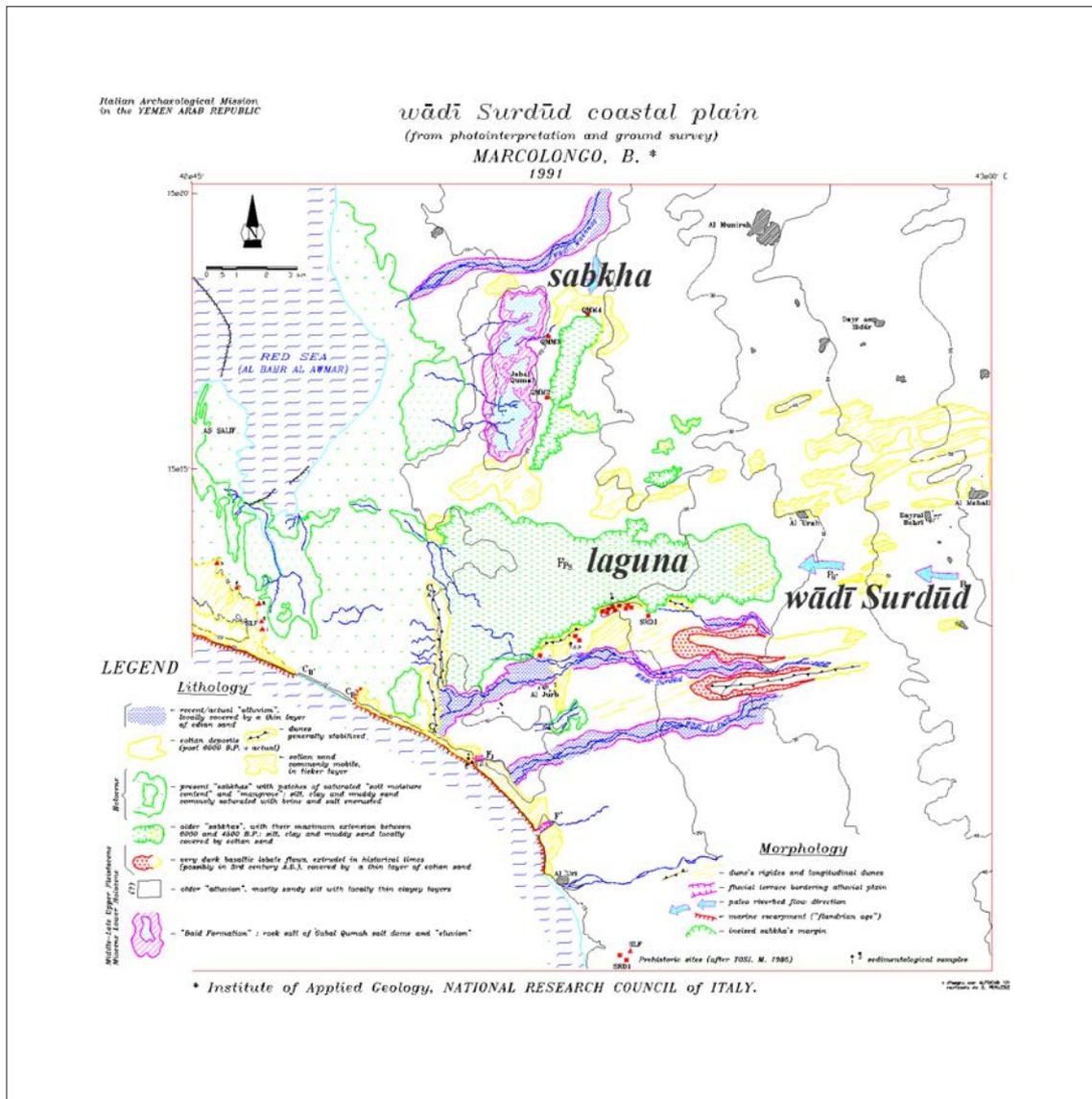


Figura 120: Carta telerilevata del panorama paleo-costiero della foce del wādī Surdūd. I puntini in rosso identificano la distribuzione dei siti archeologici in prossimità di *sabkha* e laguna (Marcolongo e Palmieri 1992).

Oggi, risulta particolarmente interessante osservare come con le nuove riprese satellitari disponibili (Landsat-7ETM) e la possibilità di elaborate immagini a falsi colori che evidenzino la diversa composizione dei suoli e dunque la loro morfologia con più accuratezza, i rilievi eseguiti sulla base di supporti oggi datati risultino eccezionalmente corrispondenti alla realtà, dimo-

strandando quanto la capacità di lettura del fotointerprete possa fornire risultati accurati a prescindere dall'apporto delle *digital humanities* (Figure 121-122).

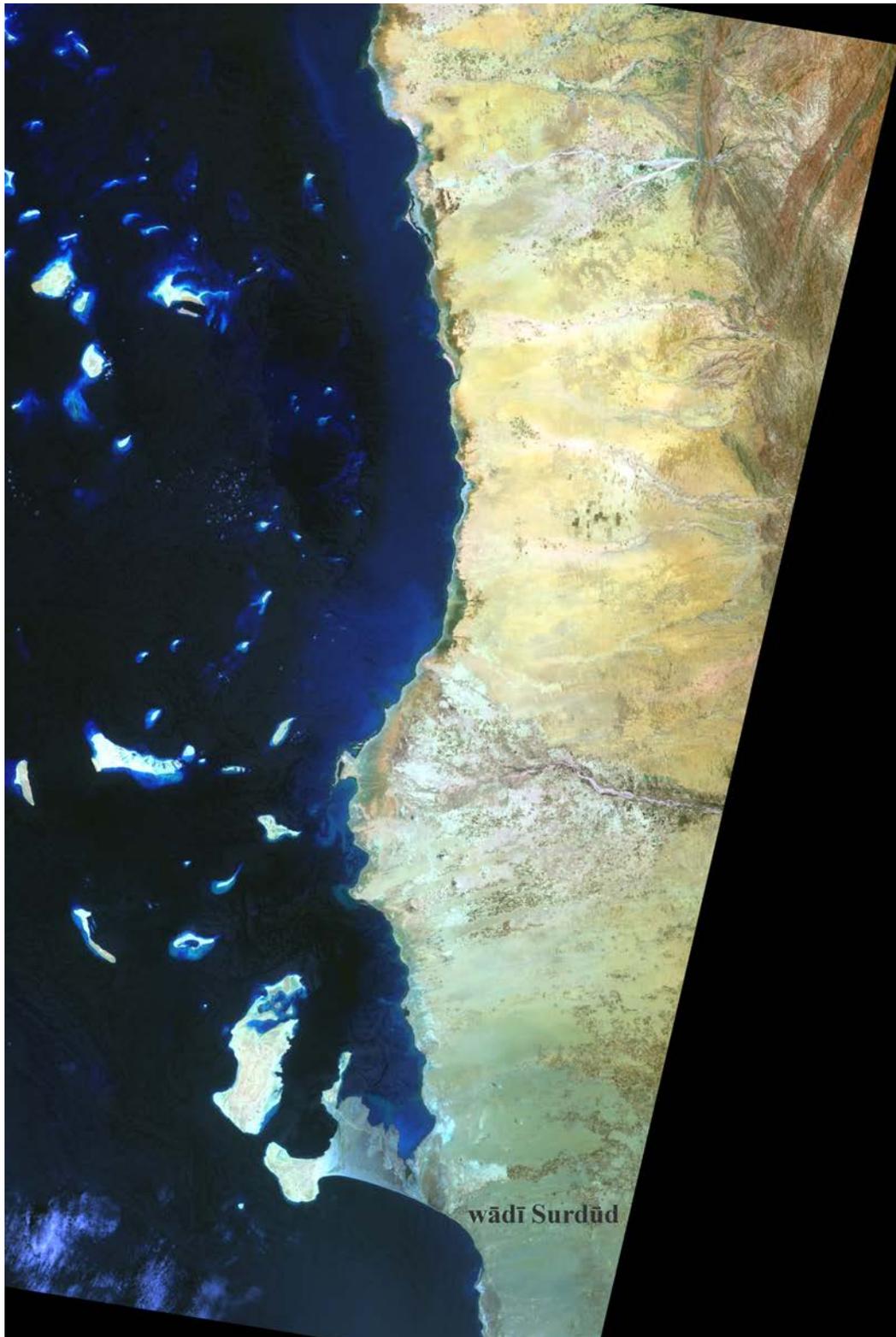


Figura 121: Il wādī Surdūd e la costa nord della Tihama in una Landsat-7ETM elaborata a falsi colori (bande 1, 3, 7).

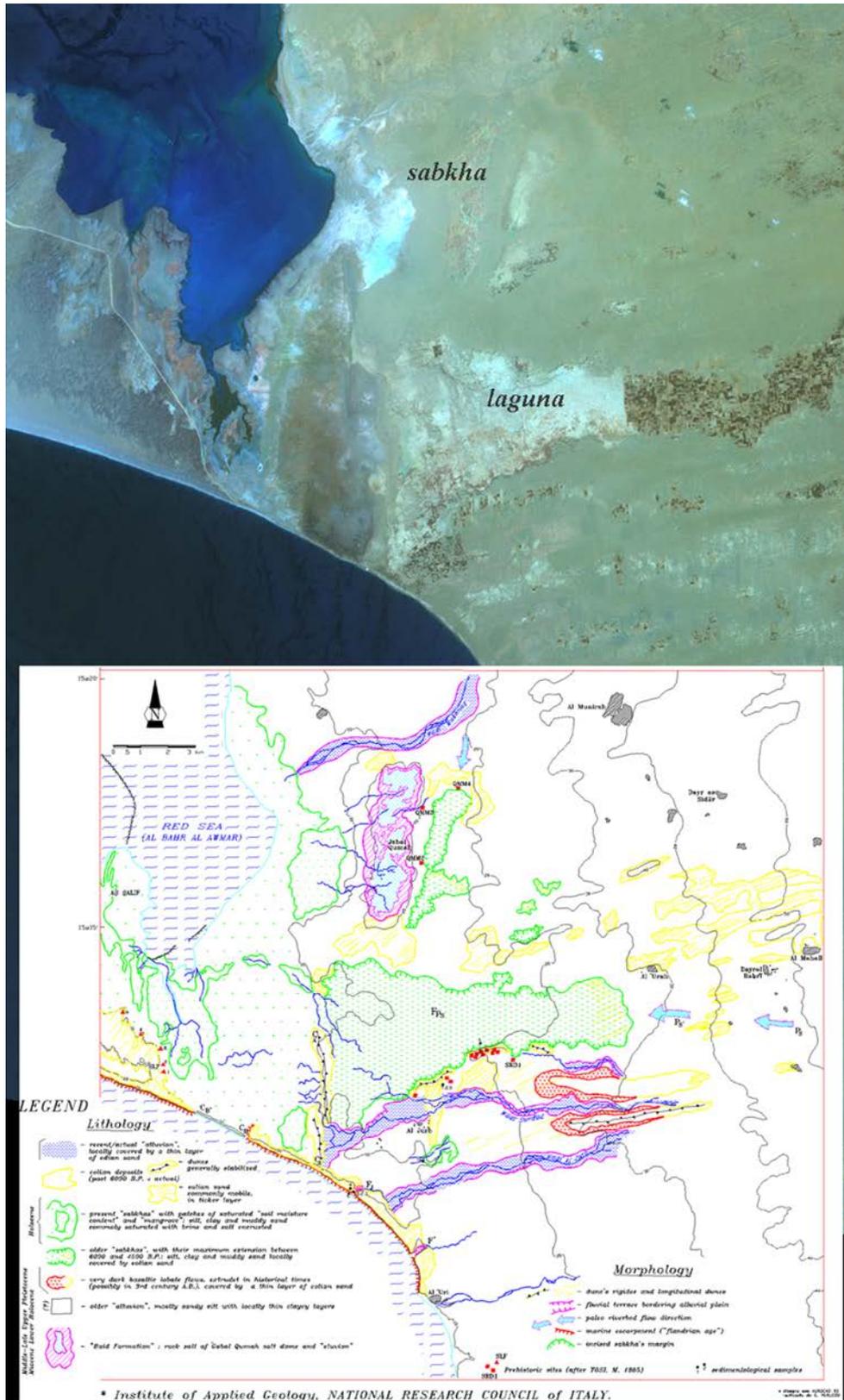


Figura 122: Corrispondenza tra una odierna Landsat-7ETM a falsi colori e il rilievo di dettaglio del 1991 (Marcolongo e Palmieri 1992).

La conferma di tale lettura paleo-ambientale proviene, come è noto, dal campo. Infatti, al di là delle chiare tracce morfologiche di un ambiente costiero in trasformazione, i repertori malacologici non lasciano dubbi sulla natura di questi ambienti costieri scanditi da bacini lacustri e lagune. In particolare, la *Terebralia palustris*, un mollusco che vive in simbiosi con ambienti lagunare la cui vegetazione è essenzialmente composta di mangrovie, rappresenta il fossile guida per il riconoscimento di tali morfosculture (Figura 123).

Non solo la *Terebralia palustris*, anche strumenti litici, buche di palo, ceramica e pietre dure lavorate testimoniano di comunità semi-stanziali che sfruttavano l'ambiente costiero, non trascurando, infine, la caccia all'asino selvatico, agli uri e alle gazzelle, ovvero a quella fauna attratta dall'acqua dolce portata dal wādī Surdūd.

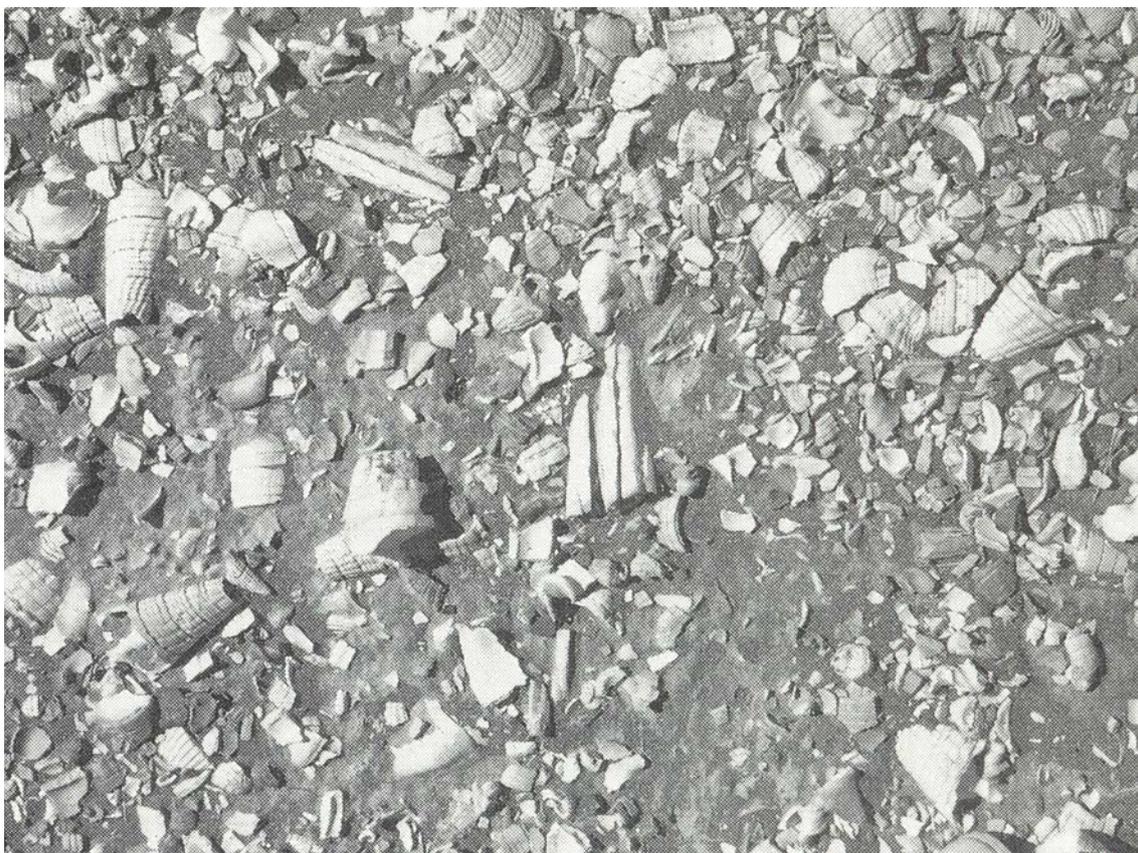


Figura 123: Shell midden dominato da un'abbondanza di campioni di *Terebralia palustris* (Marcolongo e Palmieri 1992).

#### 4.3 Oman. Contesti funerari nel paese di Magan

Noto come paese di Magan durante l'Età del Bronzo (III-II millennio a.C.), o Maka in epoca achemenide (V-IV sec. a.C.), nonché paese degli ittiofagi nelle fonti greco-romane, l'Oman settentrionale conserva le ricche evidenze funerarie delle culture che si sono succedute dal VI millennio a.C. fino all'epoca islamica. Se in alcuni casi (Neolitico) queste evidenze funerarie si compongono di tombe a fossa, nell'ambito delle cosiddette culture Hafit (3.200-2.600 a.C.), Umm an-Nār (2.600-2.000 a.C.) e wādī Suq (2.000-1.300 a.C.) gli edifici funerari constano di monumentali tombe a torretta a camera singola o multipla e con un diametro medio di circa 3 m che le rende particolarmente ben visibili da remoto (Figura 124).



Figura 124: Tombe a torretta da al-Ayn, Oman (III millennio a.C.).

Queste tombe, unite tra loro a costituire estese necropoli, rappresentavano dei *markers* culturali che segnalavano l'appartenenza di un territorio a un particolare raggruppamento tribale. Quindi, l'identificazione di tali monumenti da remoto costituisce un caso studio privilegiato per comprendere quale sia la funzione di un approccio geomorfologico da remoto alla definizione di un antico panorama archeologico.

Questi veri e propri campi di necropoli, che in apparenza si dispiegano casualmente lungo tutto l'arco montuoso e costiero dell'Oman settentrionale, in realtà rispondono, come detto, a bisogni di natura simbolica e territoriale, ma rispecchiano anche l'intima conoscenza degli antichi della morfologia della regione.

La ricerca da remoto di tali monumenti, infatti, non può prescindere da un attento studio della morfologia dei contesti orografici e costieri, poiché il luogo di erezione delle tombe deve necessariamente rispondere a una esigenza statica, e dunque garantire la preservazione della tomba nel tempo, nonché alla sua visibilità come punto cospicuo di matrice culturale.

#### 4.3.1 Elementi fisiografici e morfogenetici

Esemplare è il caso dell'entroterra di Saham, moderno villaggio della costa settentrionale della Batinah (Figura 125), un'area caratterizzata da potenti coltri alluvionali che scendono dalla catena del al-Ḥajār verso il mare (*alluvial fan 1-4*) (Figura 126).



Figura 125: Parte settentrionale della costa della Batinah (Landsat).

Gli estesi depositi ghiaiosi terrazzati antichi (*ancient gravel terraces 1-6*) sono incisi da numerosi wādī che hanno spagliato alluvioni più recenti ghiaiose, sabbiose e ciottolose lungo i loro ampi corsi anastomici (*recent alluvium 1-2*) (Figura 127).

Nella fascia più alta del versante affiorano alcuni lembi più consistenti e consolidati di conglomerati fluvio-alluvionali, sabbie e marne (Maastrichtiano o Cretaceo superiore, Tc 1-13), mentre in una fascia centrale a quota più bassa affiorano delle colline allungate, da nordovest verso sudest, di calcari marini fossiliferi (Maastrichtiano o Cretaceo superiore – Eocene, Tl 1-4) (Figure 126-127).

L'intera area è soggetta a una intensa morfogenesi fluviale con elevata azione di erosione, trasporto e accumulo di sedimenti sciolti. L'insediamento dell'uomo, pertanto, sia nel passato che attualmente, è circoscritto alle zone più stabili e protette.

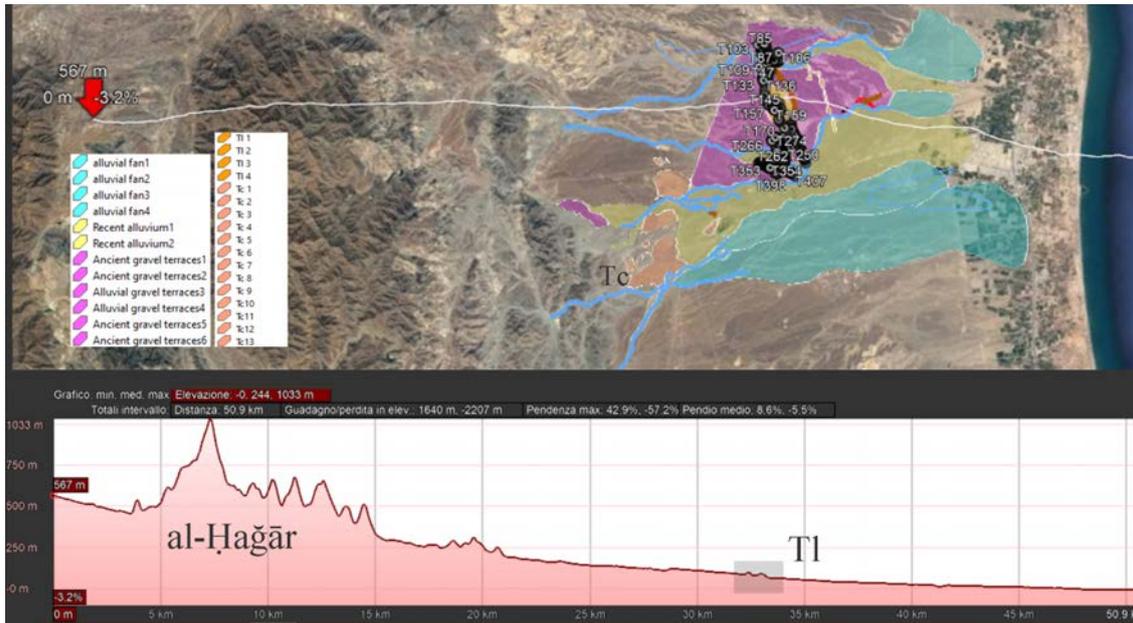


Figura 126: Dettaglio della lettura geomorfologica da remoto dell'area in questione eseguita su una ripresa Kompsat 3a a elevata risoluzione (50 cm di dettaglio) e relativo profilo altimetrico.

Tutte le emergenze archeologiche funerarie identificate dalle immagini a elevata risoluzione Kompsat 3a si localizzano infatti in corrispondenza dei modesti rilievi di calcari marini fossiliferi T1 o in posizione protetta sulle alluvioni antiche ghiaiose terrazzate sovrastanti le alluvioni recenti mobili degli wādī. In particolare, tre grandi insiemi di tombe si concentrano sugli affioramenti di T1, mentre un quarto, quello più meridionale, è distribuito sul bordo delle alluvioni ghiaiose antiche terrazzate, sovrastanti l'ampia piana alluvionale recente (Figura 127).

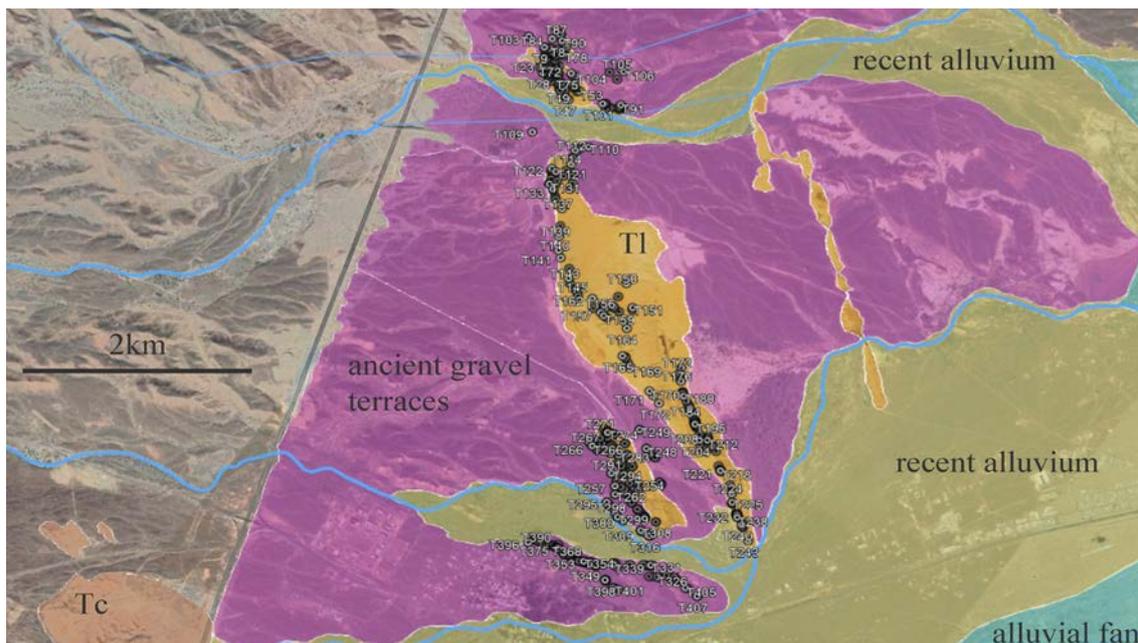


Figura 127: Dettaglio degli affioramenti T1 e delle emergenze archeologiche.

#### 4.3.2 L'analisi telerilevata

Per la verifica empirica della natura antropica degli elementi identificati, se si esclude una prospezione sul campo, ci si avvale della lettura delle riprese satellitari a infrarosso (CIR, *color infra red*). A tal proposito, un dettaglio della quarta necropoli (Figura 128), quella più meridionale, analizzato su immagini ad alta definizione (Pleiades a 50cm di risoluzione) sia a colori reali (RGB, bande *red*, *green* e *blue*) sia CIR permette infatti di escludere che le forme geometriche delle tombe possano essere alcun altro elemento naturale del paesaggio, fornendo appunto, da remoto, un elemento di verifica della natura archeologica dell'emergenza individuata.

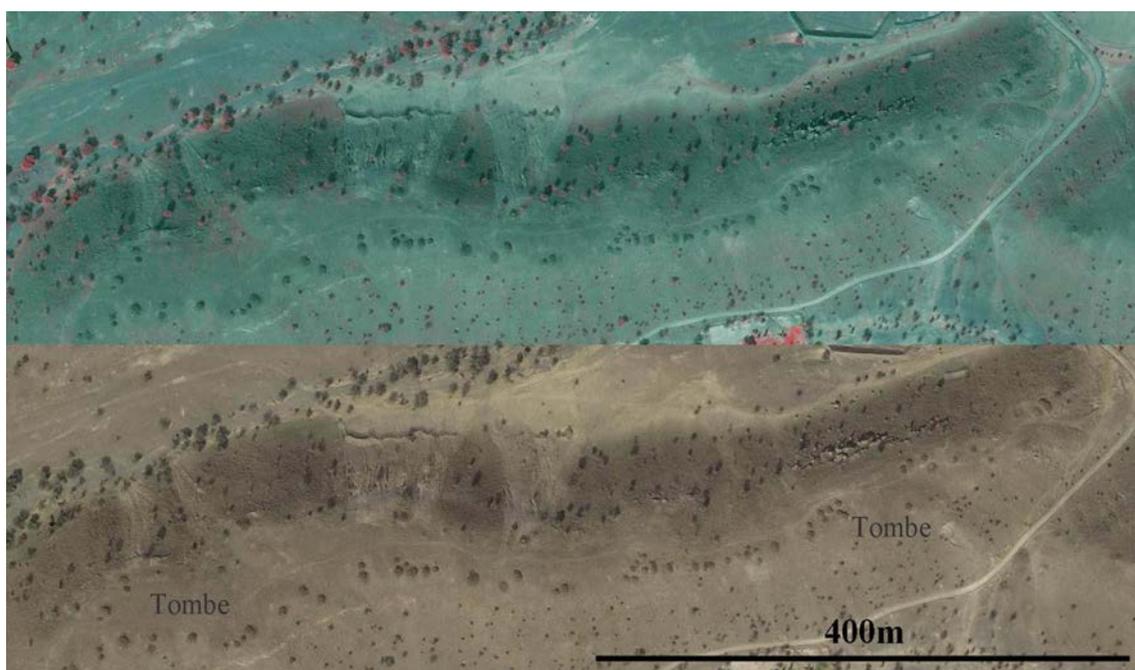


Figura 128: Dettaglio della necropoli 4, la più meridionale, dove si distinguono circa 70 tombe. In basso, RGB di parte delle alluvioni ghiaiose antiche terrazzate, in alto il suo corrispettivo CIR.

A tal fine, le immagini CIR identificano ogni forma vegetale grazie alla possibilità di evidenziare la clorofilla e dunque ben distinguono le forme antropiche (le tombe) dalle forme vegetali, come l'acacia, che se viste dall'alto producono la medesima ombra portata di una tomba, potendo dunque indurre in errore il telerilevatore.

Per quanto riguarda l'altra emergenza archeologica costituita dai forti, dagli insediamenti di epoca pre-islamica (età del ferro I millennio a.C. – VII sec. d.C.) e islamica e l'antica rete sotterranea dei *qanāt* (Figura 129) (al-Jahwari *et al.* 2018), si nota chiaramente che tutti gli elementi individuati si localizzano quasi sul bordo delle antiche alluvioni terrazzate prospicienti il corso del maggiore wādī della zona, a controllare da una posizione più elevata e stabile una possibile via di comunicazione tra l'interno della catena montuosa e la fascia costiera lungo la piana alluvionale sottostante.

I *qanāt*, in particolare, sono ben posizionati con una direzione grossomodo perpendicolare a quella del deflusso idrico sotterraneo, che si può ipotizzare dall'andamento della pendenza dei versanti, ovvero da ovest verso est, al fine di intercettare la falda sottostante e trasportare l'acqua verso gli insediamenti o le aree agricole.

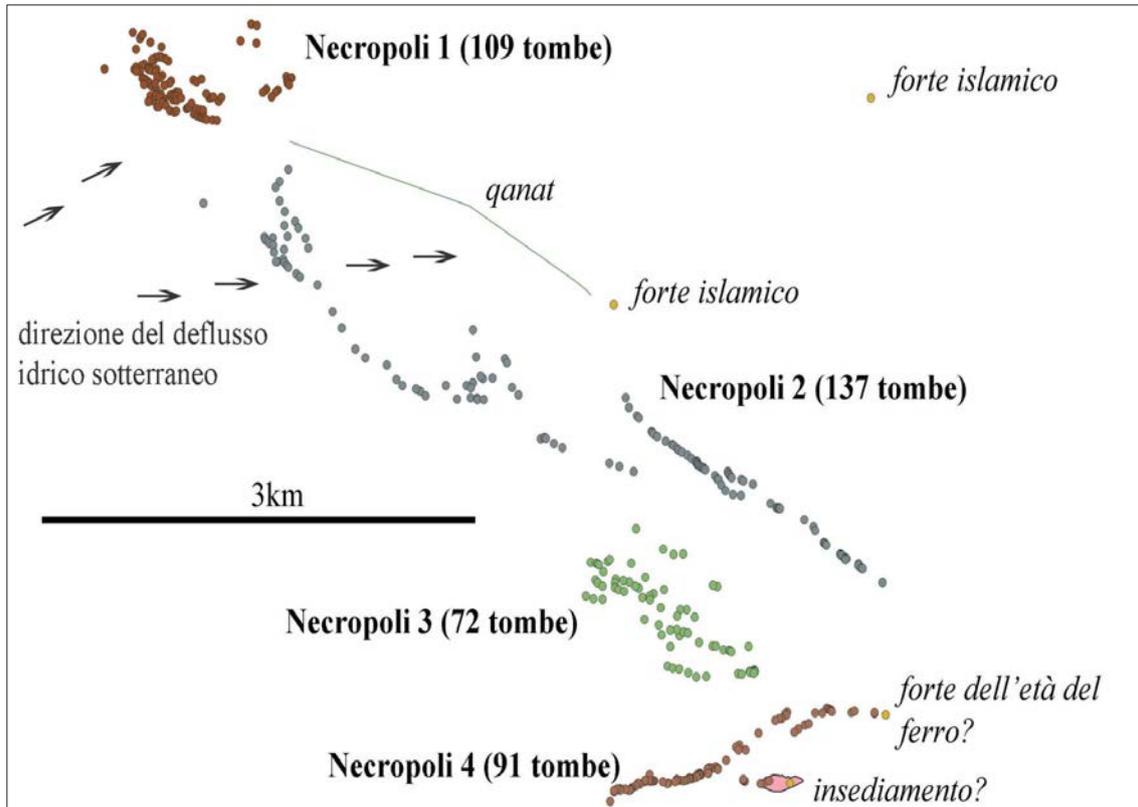


Figura 129: Carta archeologica, da QuantumGIS, con indicazione delle evidenze di diversa natura telerilevate.

In sintesi si può dire che l'interpretazione e la mappatura delle varie formazioni geologiche fatte a partire da varie immagini (pancromatico, CIR e multispettrale), unitamente all'analisi della idrografia, fornisce un quadro di riferimento importante per comprendere la dislocazione delle varie emergenze archeologiche e ne giustifica quasi sempre la presenza.

Ultimo risvolto, ma non meno importante, è che questa analisi di tipo geoarcheologico su una parte della Batinah, condotta da remoto con l'impiego di immagini satellitari a elevata risoluzione, può guidare senz'altro la ricognizione sul terreno, ottimizzando costi, tempi e risultati, poiché si possono escludere dalla ricerca ampie zone instabili soggette a intensa attività erosiva e concentrare l'attenzione sugli elementi del paesaggio più stabili e prominenti, come per esempio i terrazzamenti antichi o le dorsali calcaree.

#### 4.4 India. Antico porto di Chaul lungo la costa del Konkan

La costa del Konkan, negli stati del Maharashtra e Karnataka in India, si sviluppa tra le città di Mumbai a nord e Goa a sud.

Fin dai tempi più antichi questa fascia di terra lambita dalle acque del Mare Arabico ha ospitato numerosi insediamenti portuali, punti di riferimento di traffici marittimi e poi di collegamento commerciale con le aree interne del sub continente indiano.

Nel *Periplus Maris Erythraei* (Figura 130), redatto da un mercante greco probabilmente nella metà del I sec. d.C., che può essere considerato come un portolano *ante litteram*, compaiono indicate tra l'altro le località costiere del Konkan tra cui l'attuale porto di Chaul, nel passato chiamato *Semulla* con diverse varianti (*Chemula*, *Timulla*, *Symulla*, *Chimolo*, *Sibor*, *Saimur*, *Cheul*) (Figura 131).

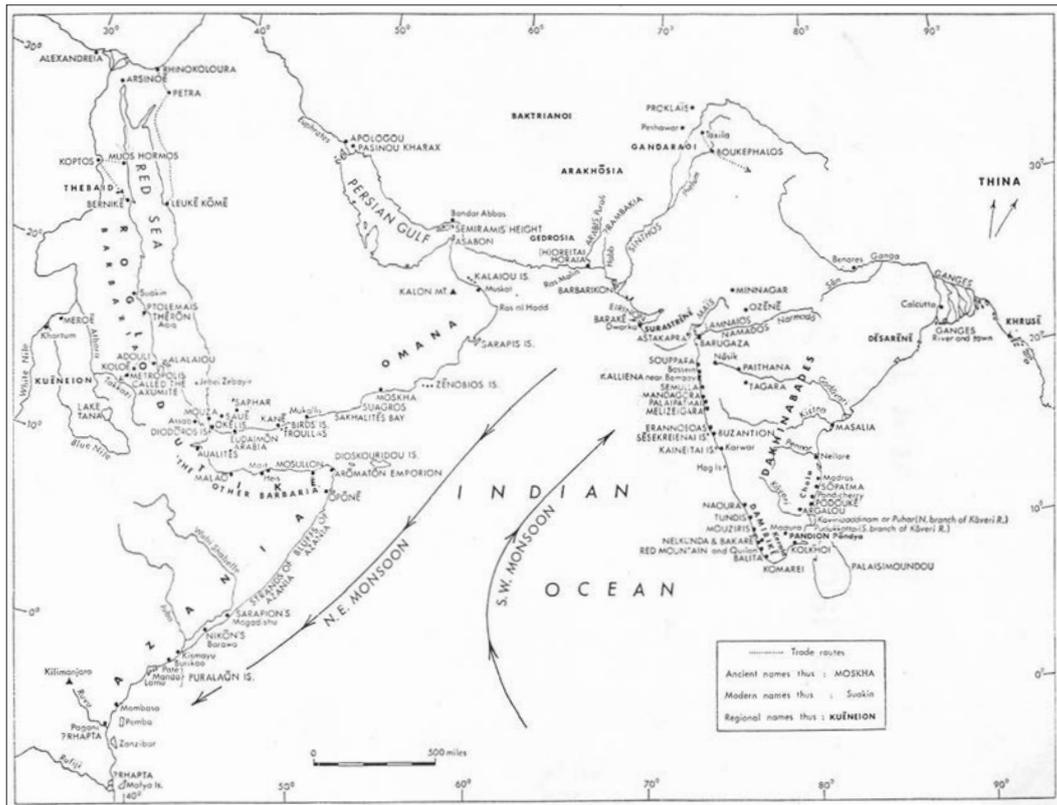


Figura 130: Antichi porti citati nel Periplus Maris Erythraei (Marcolongo e Gogte 2005).

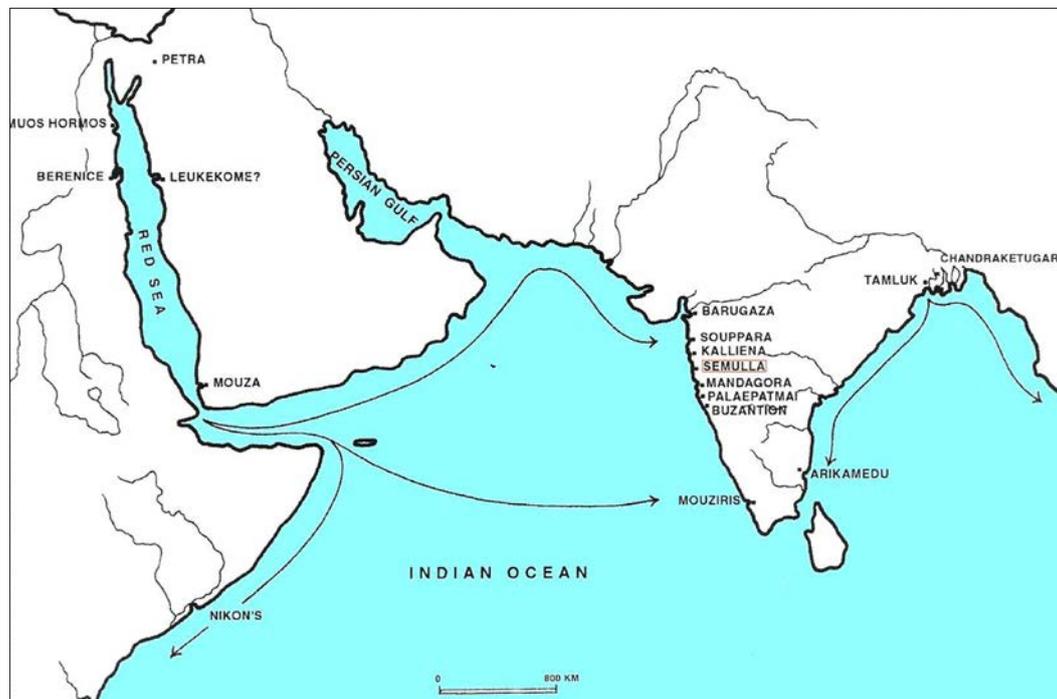


Figura 131: Principali porti del Konkan agli inizi del periodo storico tra cui spicca Semulla (attuale Chaul) (Marcolongo e Gogte 2005).

#### 4.4.1 Un porto millenario e la sua obliterazione

L'antichità e l'importanza storica di Chaul è attestata anche dalla sua menzione nel poema epico del Mahabharata come *Campavati* o *Revatikshetra*. Nel corso del tempo questo porto viene ricordato nelle iscrizioni delle grotte di Kanheri sull'isola di Salsette di fronte a Mumbai (130 d.C.), da Claudio Tolomeo (150 d.C.), dal famoso pellegrino cinese Hiuen Tsang (642 d.C.), dal re Anantdev della dinastia Silahara (1094 d.C.), dai viaggiatori arabi al-Masudi (915 d.C.), Muhalhil (941 d.C.), al-Istakhri (950 d.C.), Ibn Haukal (976 d.C.), al-Biruni (1030 d.C.) e al-Idrisi (1130 d.C.) e infine dai viaggiatori europei Nikitin (1470), Barbosa (1514), Fitch (1584) (Gogte 2003; Malekandathil 2010).

A partire dalla fine del XVI secolo tuttavia tale importante scalo marittimo si interra e il sito di Chaul viene progressivamente abbandonato. Scavi condotti da Wishwas D. Gogte (Dept. of Archaeology/Deccan College of Pune) con la sua equipe, negli anni 2000, all'interno di un denso palmeto hanno individuato alcune strutture murarie dell'antico porto (Figure 132-134), lontano oggi alcune centinaia di metri dalla foce del fiume Kundalika (Gogte 2003; Marathe 2004-2005).



Figura 132: Muro fortificato lungo l'antica riva del fiume Kundalika, oggi spostatosi di alcune centinaia di metri più a sud (Marcolongo e Gogte 2005).



Figura 133: Il muro fortificato si estende per più di 500 m attraverso la fitta vegetazione (Marcolongo e Gogte 2005).



Figura 134: Banchina portuale (Marcolongo e Gogte 2005).

Molti sono anche i reperti recuperati che dimostrano la ricchezza e la varietà dei contatti commerciali con la Cina (Figura 135) e con i centri buddisti del retroterra (Figure 136-138).



Figura 135: Porcellana cinese blue on white (Marcolongo e Gogte 2005).

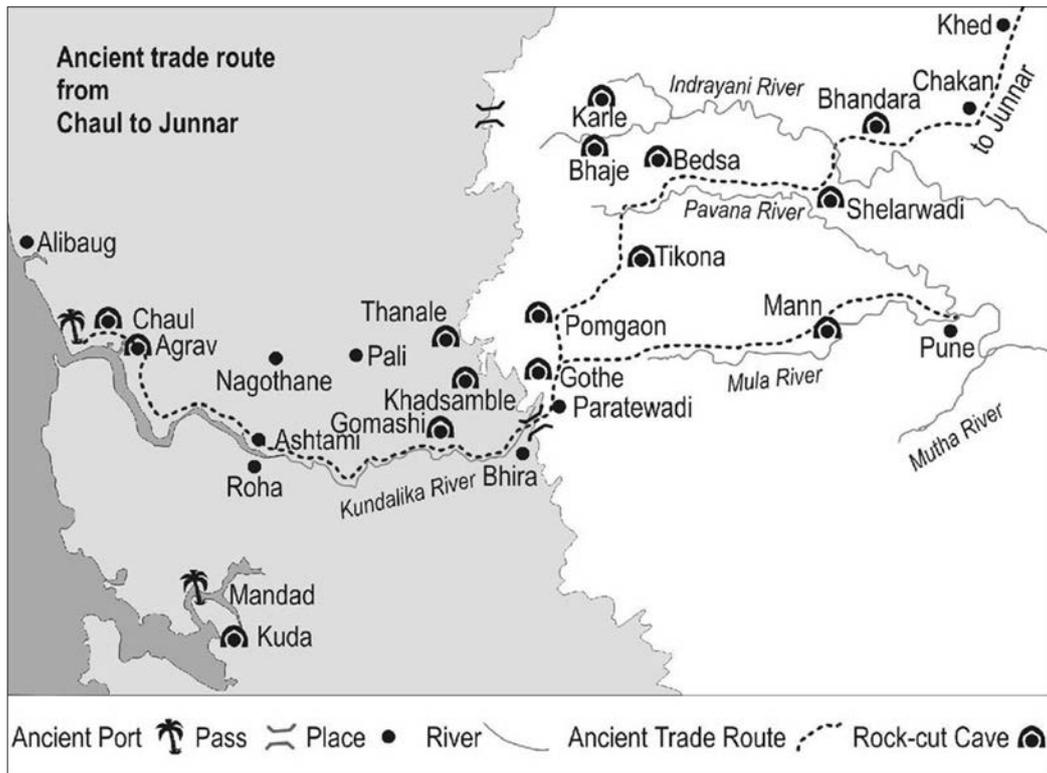


Figura 136: Antichi collegamenti viari del porto di Chaul con i siti buddisti dell'entroterra (Marcolongo e Gogte 2005).



Figura 137: Grotta buddista con rilievo di stupa ad Agrav, nell'entroterra di Chaul (Marcolongo e Gogte 2005).

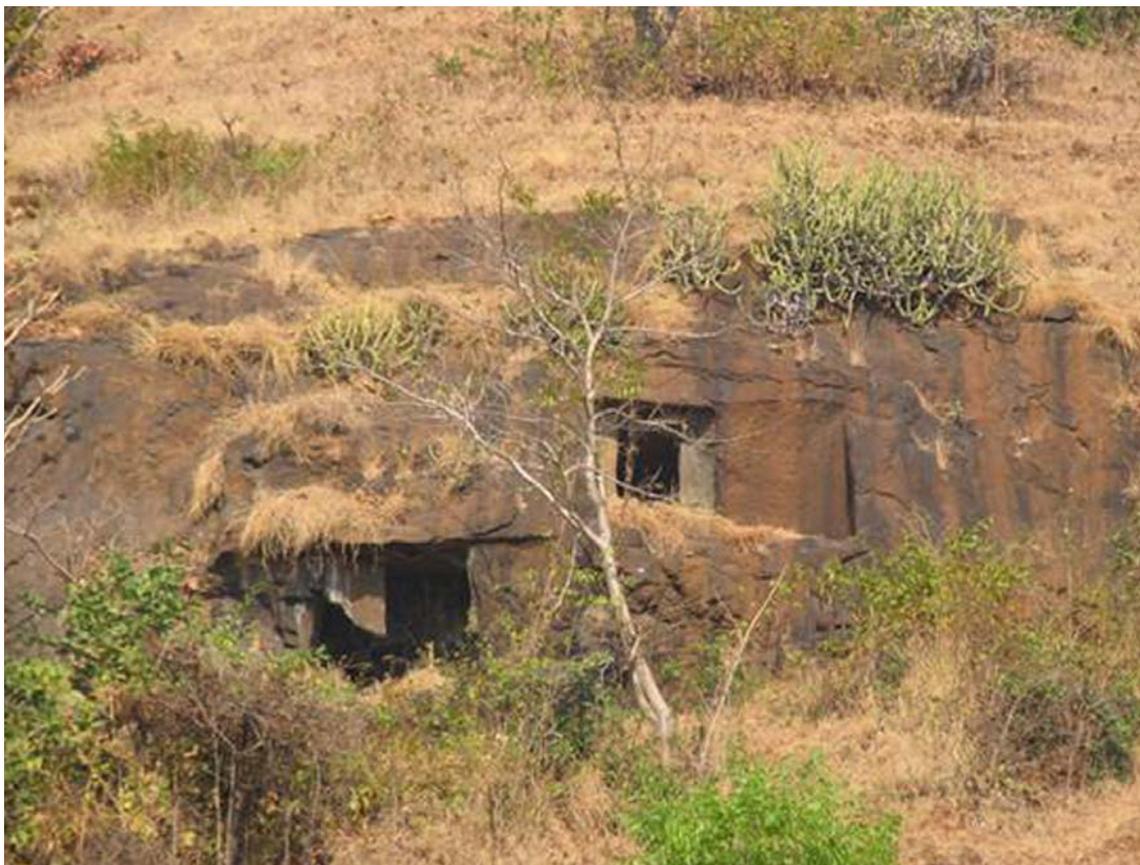


Figura 138: Grotta buddista di Agrav nell'entroterra di Chaul (Marcolongo e Gogte 2005).

#### 4.4.2 Tecnologie radiometriche

Allo scopo di individuare e ricostruire l'ultimo tratto del fiume Kundalika ormai obliterato sotto vari stati alluvionali e coperto da fitta vegetazione, che permetteva il collegamento del vecchio porto di Chaul con il mare, si è pensato di acquisire delle immagini Aster (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*)<sup>20</sup> adatte a una ricerca richiedente una media risoluzione spaziale (*pixel* di 15 m), ma con una elevata risoluzione radiometrica (14 differenti bande elettromagnetiche registrate).

L'area su cui si è focalizzata l'analisi geomorfologica copre l'estuario del fiume Kundalika e il tratto di costa sabbiosa interessato dalla sua evoluzione (Figure 139-140).

<sup>20</sup> Sensore installato a bordo del satellite TERRA, posto in orbita nel dicembre 1999 e frutto di cooperazione tra NASA e METI (Japan's Ministry of Economy, Trade and Industry).

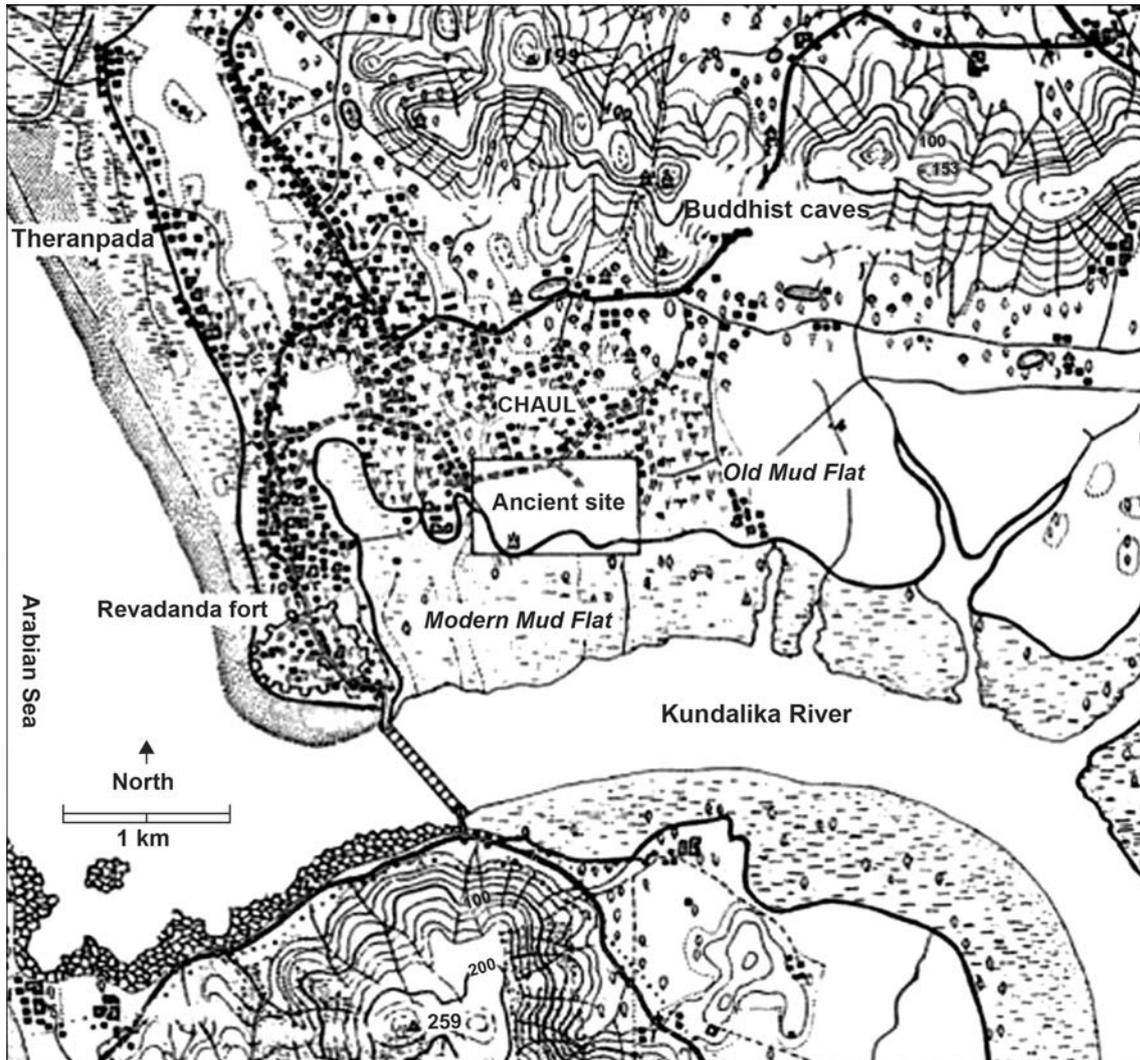


Figura 139: Carta topografica di dettaglio alla scala 1:50.000 dell'area di studio, con il sito dell'antico porto di Chaul, oggi interrato e lontano oltre 1 km dalla sponda destra del fiume Kundalika (Marcolongo e Gogte 2005).

Il porto attuale di Chaul è stato spostato in località Revadanda, 2 km a SO del sito in prossimità del ponte che unisce le due sponde opposte del Kundalika (Figure 139-140).

L'immagine Aster è stata dapprima elaborata realizzando una composizione a falsi colori di tre bande (banda verde 0,52-0,60  $\mu\text{m}$ , banda rosso 0,63-0,69  $\mu\text{m}$ , banda infrarosso fotografico 0,78-0,86  $\mu\text{m}$ ), ottimale per l'interpretazione in un contesto densamente vegetato. Successivamente è stata georeferenziata e ritagliata per l'analisi di dettaglio (Figura 141).



Figura 140: Lavori di costruzione di una banchina d'attracco del porto nuovo di Chaul. L'antico sito di Chaul si trova ubicato nella piantagione di palme da cocco, che si delinea sullo sfondo ai piedi delle colline con le grotte buddiste di Agrav (Marcolongo e Gogte 2005).

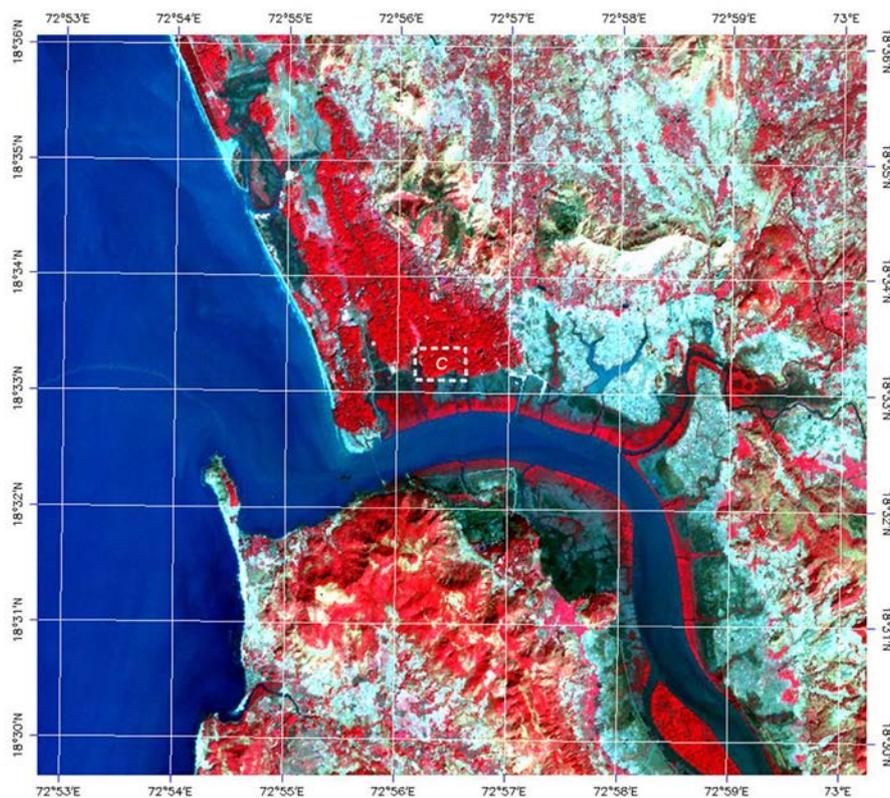


Figura 141: Immagine a fasi colori Aster georeferenziata e ritagliata sopra l'area di studio. In rosso le superfici a densa copertura vegetale, mentre nelle varie tonalità di celeste sono rappresentate principalmente zone umide a maggiore (scure) o minore (chiare) imbibizione e zone collinari con scarsa vegetazione (Marcolongo e Gogte 2005).

I dati tematici di Aster sono stati poi integrati con quelli altimetrici offerti da SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) attraverso il software ArcGis, producendo tutta una serie di elaborati

molto interessanti. Essi, infatti, alla fine hanno permesso l'identificazione di un paleo-canale di accesso al mare che partiva dal sito antico di Chaul, testimoniato oggi da una fascia depressa di direzione SSE-NNO parallela alla linea di costa chiaramente identificabile (Figure 142-145).

Questo risultato permette di comprendere l'evoluzione fluvio-costiera del contesto ambientale del porto antico di Chaul, dando giustificazione della importanza del sito e poi del suo progressivo declino fino al suo abbandono e al suo totale oblio.

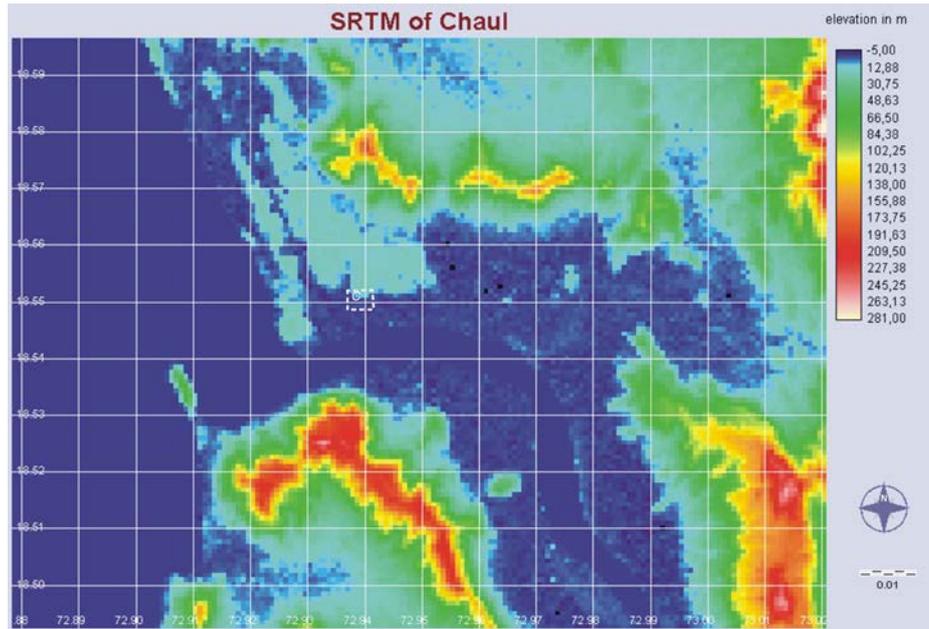


Figura 142: Valori altimetrici dell'area investigata ricavati da dati SRTM (scala cromatica dell'elevazione in m) (Marcolongo e Gogte 2005).



Figura 143: Rappresentazione prospettica obliqua dell'immagine Aster drappeggiata sopra il rilievo (Marcolongo e Gogte 2005).

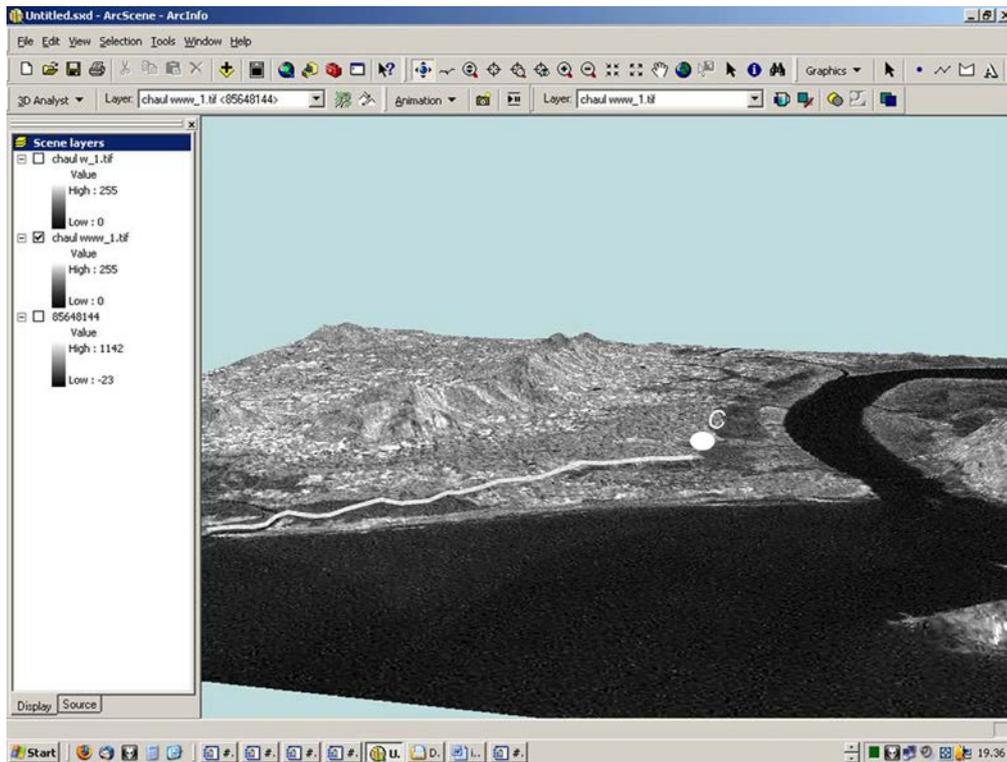


Figura 144: Elaborazione 3D con ArcGis che mette in evidenza la fascia depressa (paleo-canale) grossomodo parallela alla costa con direzione SSE-NNO tra l'antico porto di Chaul e il mare (Marcolongo e Gogte 2005).

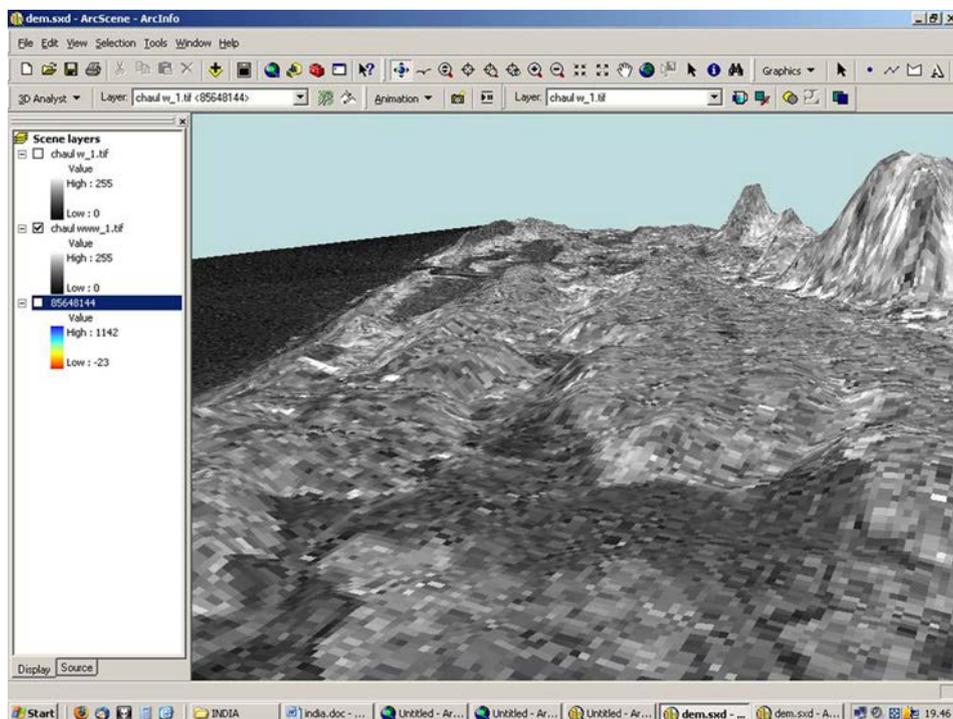


Figura 145: La fascia depressa al centro della ricostruzione 3D con ArcGis, attuale testimonianza del paleo-canale che costituisce lo sbocco a mare dell'antico porto di Chaul. La vista prospettica è ripresa da SSE verso NNO (Marcolongo e Gogte 2005).

## 5. Contesti fluviali

Salute a te, o Nilo che sei uscito dalla terra,  
che sei venuto per far vivere l'Egitto!  
[...] Lodato dai suoi seguaci:  
è lui che irriga i campi, che è creato da Ra per far vivere tutto il bestiame;  
che disseta il deserto, lontano dall'acqua [...].  
Se è pigro, i nasi sono otturati e tutti sono poveri,  
si diminuiscono i pani degli dèi e periscono milioni di uomini.  
Se è crudele, tutta la terra inorridisce, grandi e piccoli gridano.  
Sono ricompensati gli uomini quando si avvicina [...].  
Quando (il Nilo) comincia ad alzare, il paese è in giubilo, tutti sono in gioia.  
Ogni mascella prende a ridere, tutti i denti sono scoperti (nel riso).  
Portatore di nutrimento, ricco di alimenti, creatore di ogni cosa buona,  
signore di riverenza, dal dolce odore, benigno quando viene;  
è lui che fa nascere le erbe per il bestiame e dà vittime a ogni dio.  
(E. Bresciani, Letteratura e poesia dell'antico Egitto, Einaudi Tascabili, Torino 1999)

Un fiume è l'espressione più tangibile della dinamica della superficie terrestre, in altre parole si potrebbe dire della mobilità del 'dominio minerale', che erroneamente è vista dalla maggior parte delle persone come il regno della statica e della permanenza. La superficie terrestre dapprima sollevata da forze endogene (tettoniche, orogenetiche, sismiche) viene poi tagliata ed erosa dagli agenti atmosferici e dalla forza di gravità per essere nuovamente livellata, colmando pianure e pianure a scapito dei rilievi collinari (Davis 1922). In questo modo i grandi fiumi, i 'fiumi sacri' della tradizione simbolica di varie culture e in particolare il Nilo (ma anche Tigri, Eufrate, Indo, Gange, Saraswati ecc.), costituiscono fisicamente l'anello centrale di un ciclo infinito dell'acqua, collegando cielo e terra attraverso movimenti discendenti (pioggia, ruscellamento superficiale, infiltrazione del suolo) e ascendenti (salita capillare, evapotraspirazione, evaporazione e sublimazione). Il rapporto tra insediamenti umani, corsi d'acqua e più in generale corpi idrici è davvero molto stretto. Le maggiori e più antiche civiltà del passato, come quella egiziana, sono 'potamiche'<sup>21</sup> e tanti siti archeologici, oggi riscoperti in aree per lo più desertiche e aride, giacciono lungo le sponde dei paleo-fiumi o nelle loro vicinanze, essendo questi antichi corsi d'acqua al momento dell'occupazione e della fioritura dei siti stessi una risorsa indispensabile di sostentamento insieme con un percorso naturale per convogliare merci, idee e non da ultimo potere politico e militare. Inoltre, a livello culturale, i paleo-fiumi erano contestualmente associati a un universo sacro, di cui erano espressione attraverso manifestazioni alterne di benevolenza (abbondante scarico e deposizione di limo fertile nella vicina pianura alluvionale) o punizione (inondazioni travolgenti e distruttive).

Il semplice e quasi ovvio concetto metodologico che i siti archeologici debbano essere inseriti nel loro contesto ambientale sincronico (ovvero devono essere collocati su carte tematiche che mostrino il reticolo idrografico coevo al periodo di occupazione studiato) non è stato sempre applicato negli ultimi decenni. Solo negli ultimi anni un corretto approccio geoarcheologico di ricostruzione paleo-ambientale e di analisi delle relazioni tra vecchi modelli insediativi e risorse naturali è stato accettato e ampiamente applicato.

<sup>21</sup> In *Land und Meer* Carl Schmitt ricorda *Philosophische oder vergleichende allgemeine Erdkunde* di Ernst Knapp. Nel 1845 questo geologo e filosofo tedesco classificò le grandi civiltà del mondo assumendo l'acqua come criterio fondamentale della sua tassonomia, distinguendo quindi i tre principali tipi di potamica, talassica e oceanica. Secondo Knapp la storia del mondo inizia con la civiltà potamica, cioè le civiltà fluviali degli egizi lungo il Nilo e degli assiro-babilonesi tra il Tigri e l'Eufrate.

### 5.1. Egitto e Sudan. Sulle sponde del Nilo

Il Nilo, fiume che con il suo respiro ritmico di piena e di ritiro delle acque nella pianura alluvionale del basso Egitto corrisponde al respiro profondo annuo della natura e al regolare moto degli astri, ha assunto una connotazione sacra fin dall'epoca protostorica e tra tutte le culture cresciute lungo il suo asse da monte fino al delta. Tale ritmo si riflette, altresì, nella natura mutevole di un corso d'acqua, in costante flusso di corrente ma anche in perpetuo mutare nel suo proprio alveo, come è chiaro sia avvenuto nel caso del Nilo, dove si riconoscono paleo-alvei pertinenti alle fasi più antiche di vita, pleistocenica e olocenica (Figura 146). Alla luce di tale variabilità morfostrutturale, si presentano esempi di rilievo morfologico frutto di ricognizione geoarcheologica relativi a vari tratti del corso del Nilo (a monte della 3<sup>a</sup> Cataratta di Kerma; a valle nei pressi di Maadi; e nella porzione orientale del delta), per discutere le procedure integrate di raccolta e analisi dei dati.

#### *5.1.1 Geomorfologia della pianura alluvionale del Nilo a monte della terza cataratta, in connessione con i siti archeologici di Kerma e Kadruka (Sudan)*

La cultura Kerma è una delle prime civiltà che fiorì circa dal 2.500 a.C. al 1.500 a.C. in Nubia, con centro a Kerma. Sembra che sia stato uno dei numerosi stati sudanesi durante il periodo del Medio Regno dell'Antico Egitto. Nella sua ultima fase, tra il 1700 e il 1500 a.C., ha assorbito il regno sudanese di Sai e divenne un impero considerevole e popoloso che rivaleggiava con l'Egitto. Intorno al 1.500 a.C., fu assorbito dall'impero egiziano, ma le ribellioni continuarono per secoli. Nell'XI secolo a.C. emerse il più 'egittizzante' regno di Kush, apparentemente dalla cultura di Kerma, e riconquistò l'indipendenza della regione dall'Egitto.

Una interpretazione preliminare che mirasse alla definizione dei paleo-alvei e delle fluttuazioni del Nilo in relazione a contesti archeologici è stata fatta su immagine pancromatica Spot 116-311, scattata il 19 settembre 1986 e fornita dalla Missione archeologica dell'Università di Ginevra in Sudan (Marcolongo e Surian, 1993, 1997a-b). Il tratto del Nilo compreso tra Dongola e la barriera rocciosa del Jebel Ali Barsi (3<sup>a</sup> cataratta) è molto ricco di evidenze paleo-idrografiche, mostrando una notevole variabilità nell'attività e portata fluviale durante il periodo dell'Olocene. I depositi alluvionali (sedimenti antichi, recenti e attuali di Figura 147), formanti una vasta pianura con affioramenti rocciosi sparsi e depositi eolici, sono caratterizzati almeno da quattro terrazzi fluviali molto ampi e continui dal più antico ed esterno (numerato 1-1') al più recente terrazzo (4-4') che delimita l'attuale corso del fiume. Questi terrazzi testimoniano sia fasi di erosione che di dispersione/deposizione, espressione di cambiamenti nell'equilibrio idraulico del Nilo, causati dai cambiamenti climatici e forse dall'attività neotettonica. Sul ripiano di ciascun terrazzo sono presenti tracce di antichi meandri e alvei fossili, che devono aver interagito con il modello insediativo pre- e protostorico della zona. Le tracce sono particolarmente abbondanti a est del fiume, vicino a Kerma e intorno ai siti archeologici di Kadruka.

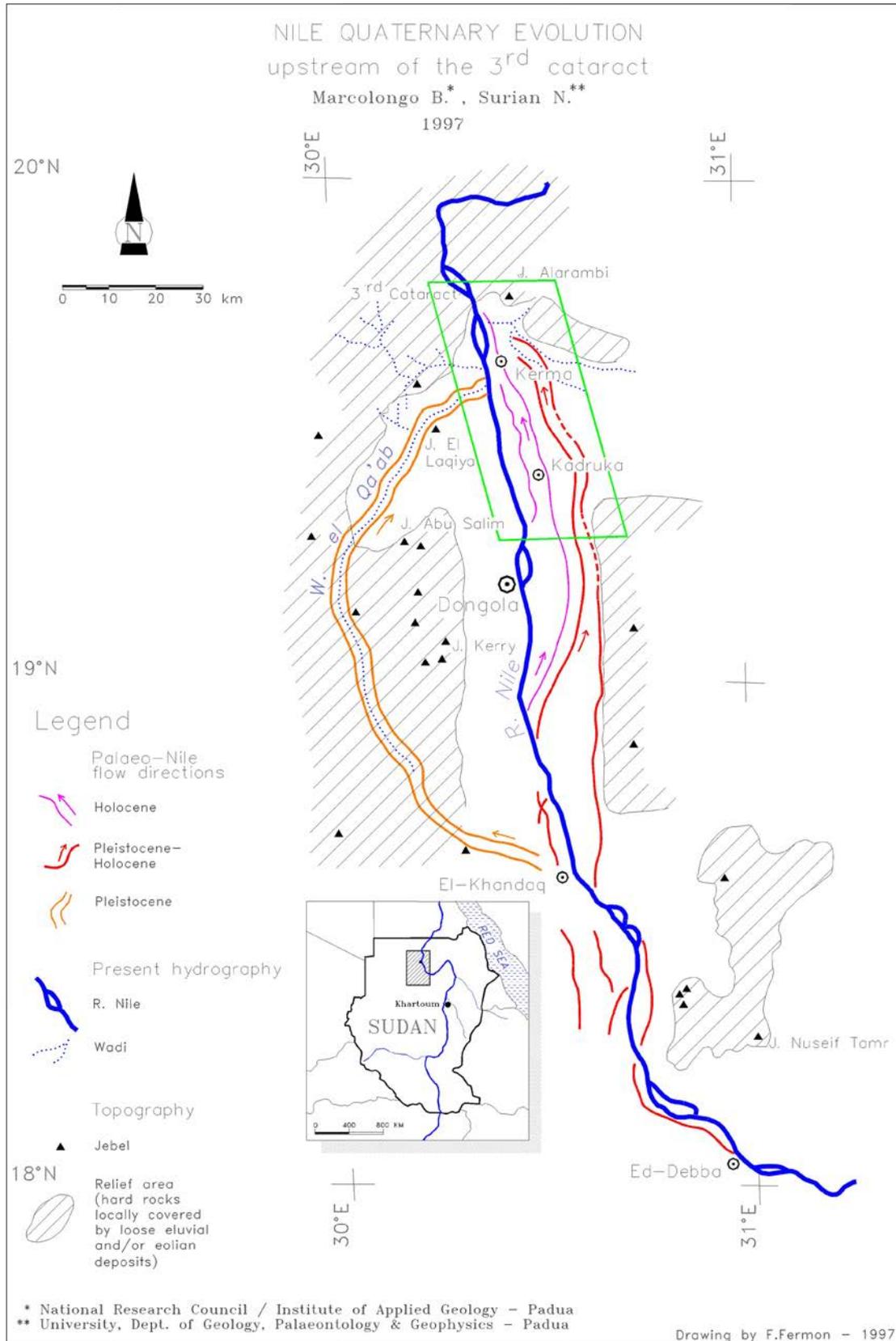
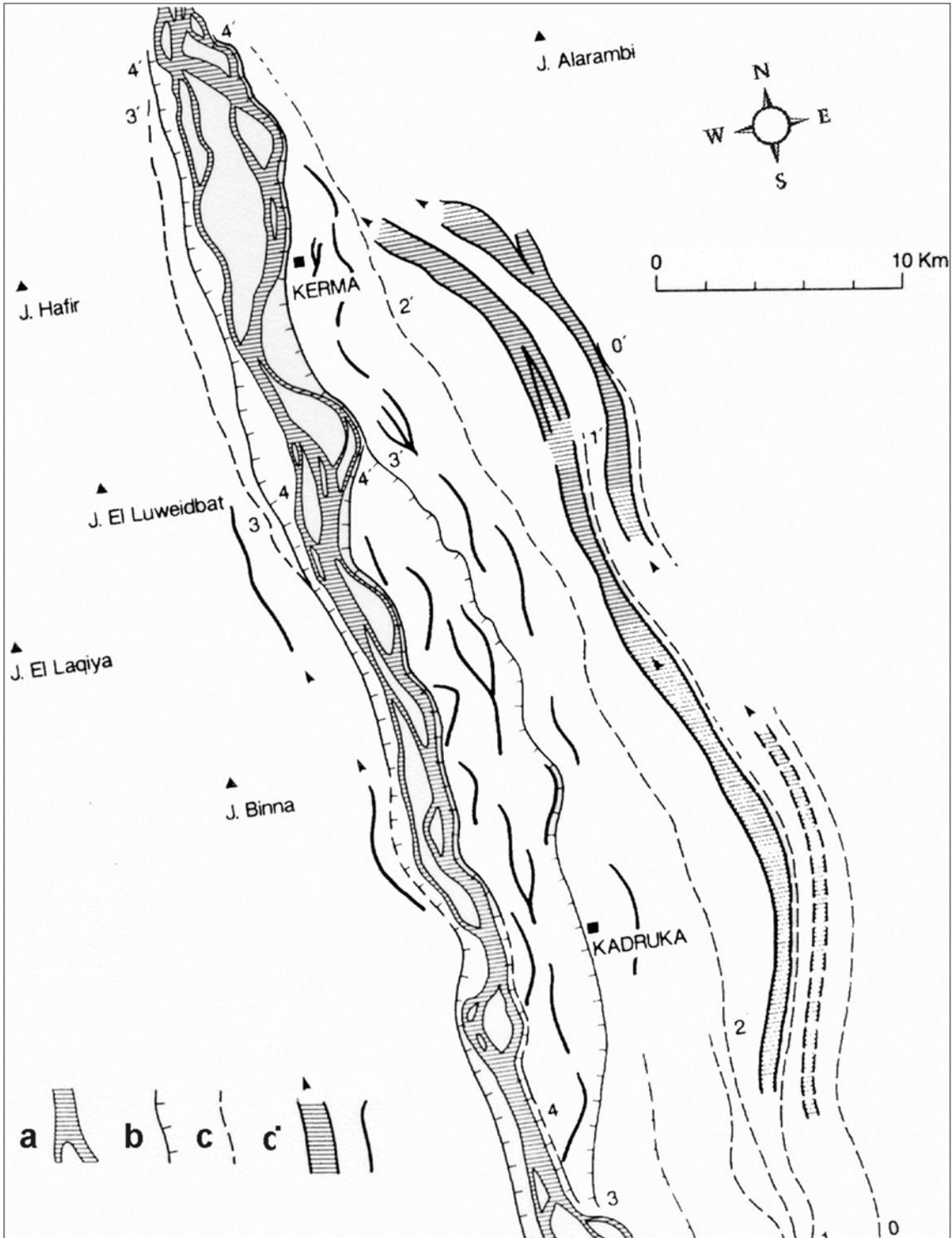


Figura 146: Evoluzione quaternaria del Nilo a monte della 3<sup>a</sup> Cataratta (Marcolongo e Surian 1997a).



*Figura 147: A sinistra immagine Spot e a destra interpretazione generale delle varie tracce paleo-idrografiche in rapporto ai siti di Kerma e Kadruka (Marcolongo e Surian 1997b).*

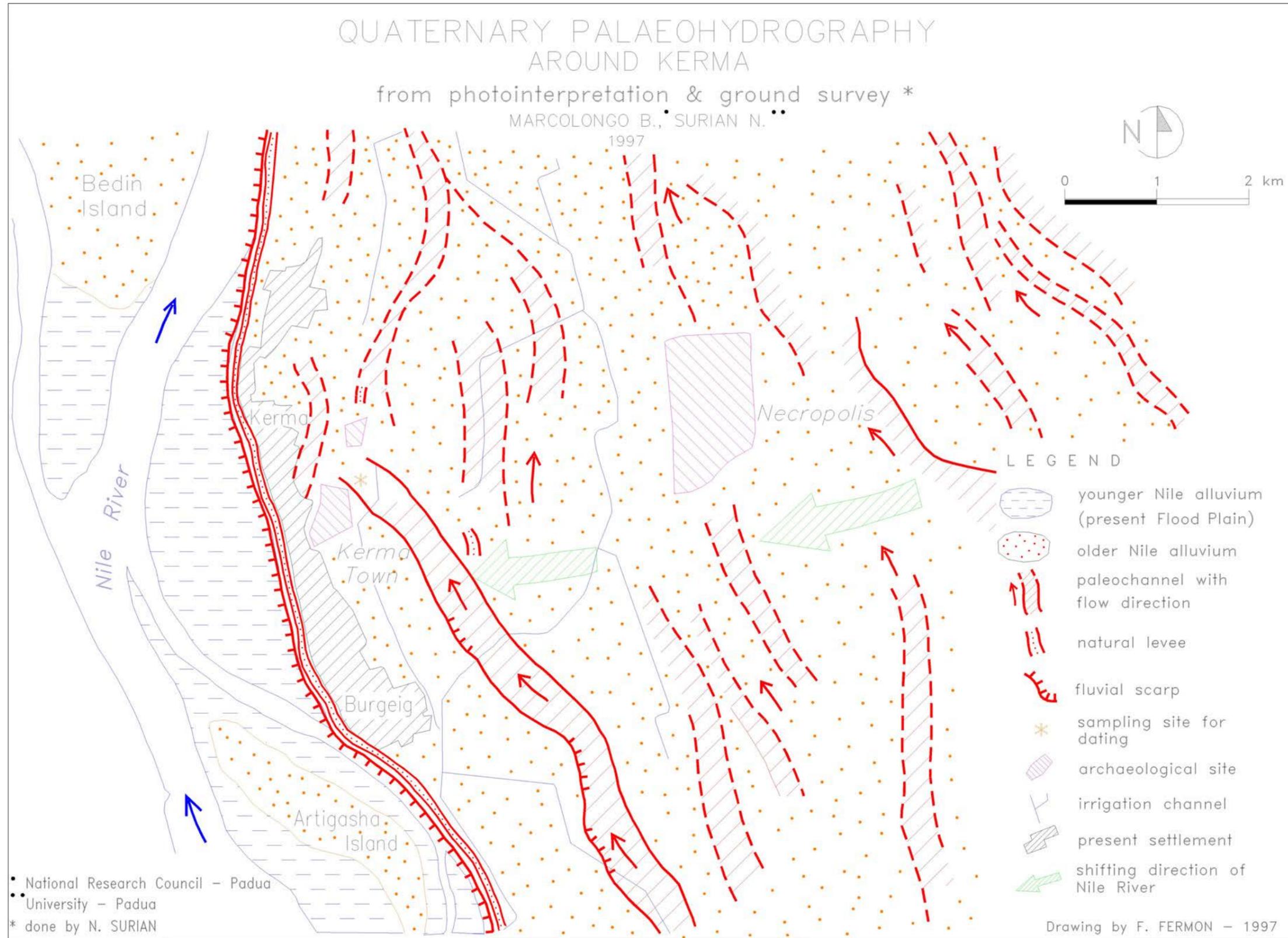


L'approfondimento dell'analisi su elaborati specifici dell'immagine iniziale ('stretching', colori falsati ecc. in Figura 148, 150) ha portato a descrivere con notevole precisione e dettaglio la storia dell'evoluzione fluviale del Nilo nei dintorni dei due importanti siti, ben visibile e descritta nelle Figure 149, 151.



Figura 148: Stralcio dell'immagine Spot ('stretch' + falsi colori) sulla piana di Kerma (Marcolongo e Surian 1997b).

Figura 149: Interpretazione di dettaglio dell'evoluzione del corso del Nilo nella piana del sito di Kerma (Marcolongo e Surian 1997b).



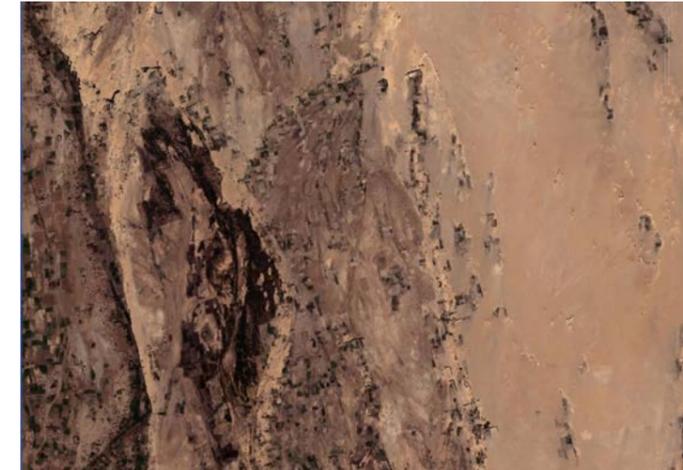


Figura 150: Stralcio dell'immagine SPOT ('stretch' + falsi colori) sulla piana di Kadruka (Marcolongo e Surian 1997b).

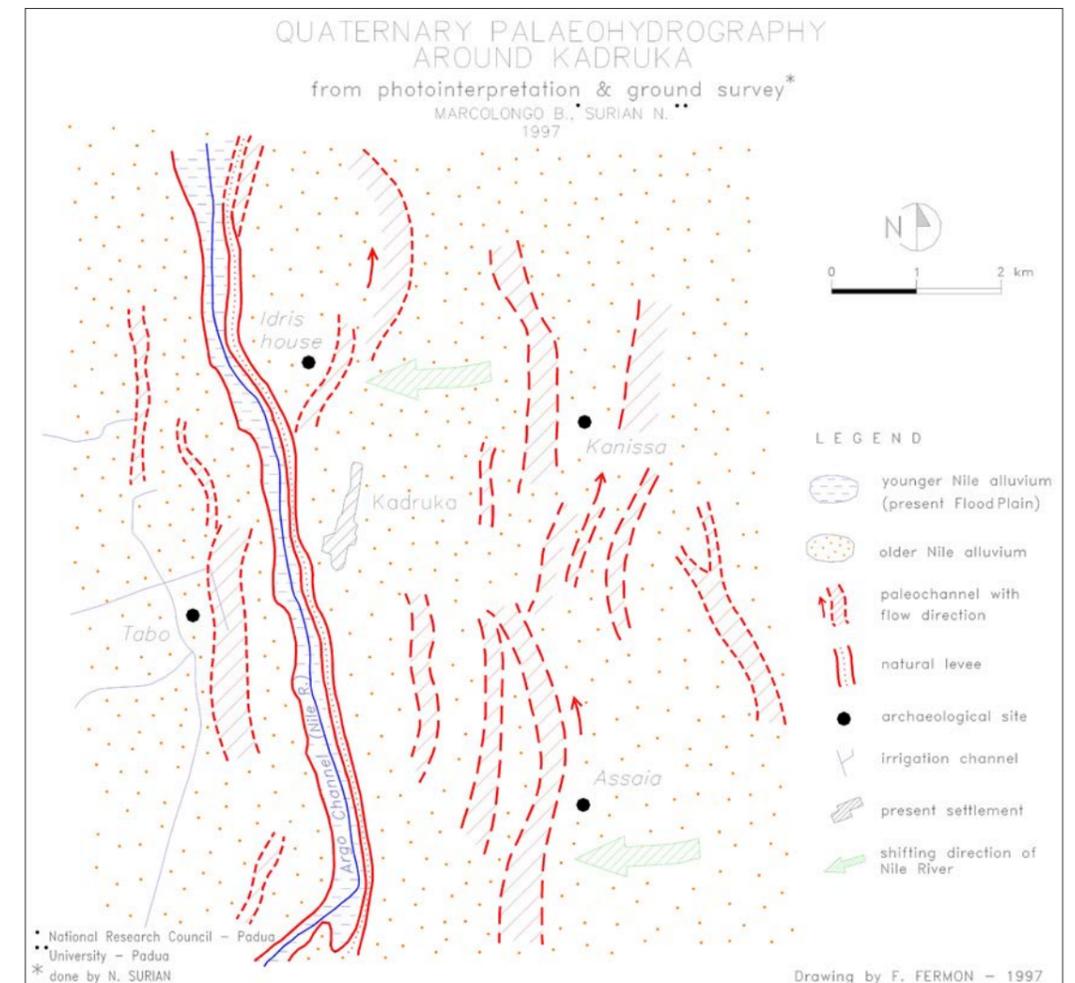


Figura 151: Interpretazione di dettaglio dell'evoluzione del corso del Nilo nella piana del sito di Kadruka (Marcolongo e Surian 1997b).

### 5.1.2 Il sito di Maadi nel suo contesto geomorfologico (Basso Egitto)

Ancora un esempio per la definizione di un antico paleo-corso è quello relativo al sito predinastico di Maadi (van Zeist e de Roller 1993; Hartung 2013), alla periferia sud del Cairo (Figura 152), scoperto all'inizio del XX secolo e da allora ampiamente scavato da squadre congiunte egiziane e internazionali (Menghin e Amer 1932, 1936), tra cui anche, dal 1977 al 1986, una Missione Italiana (Bajot 2017).

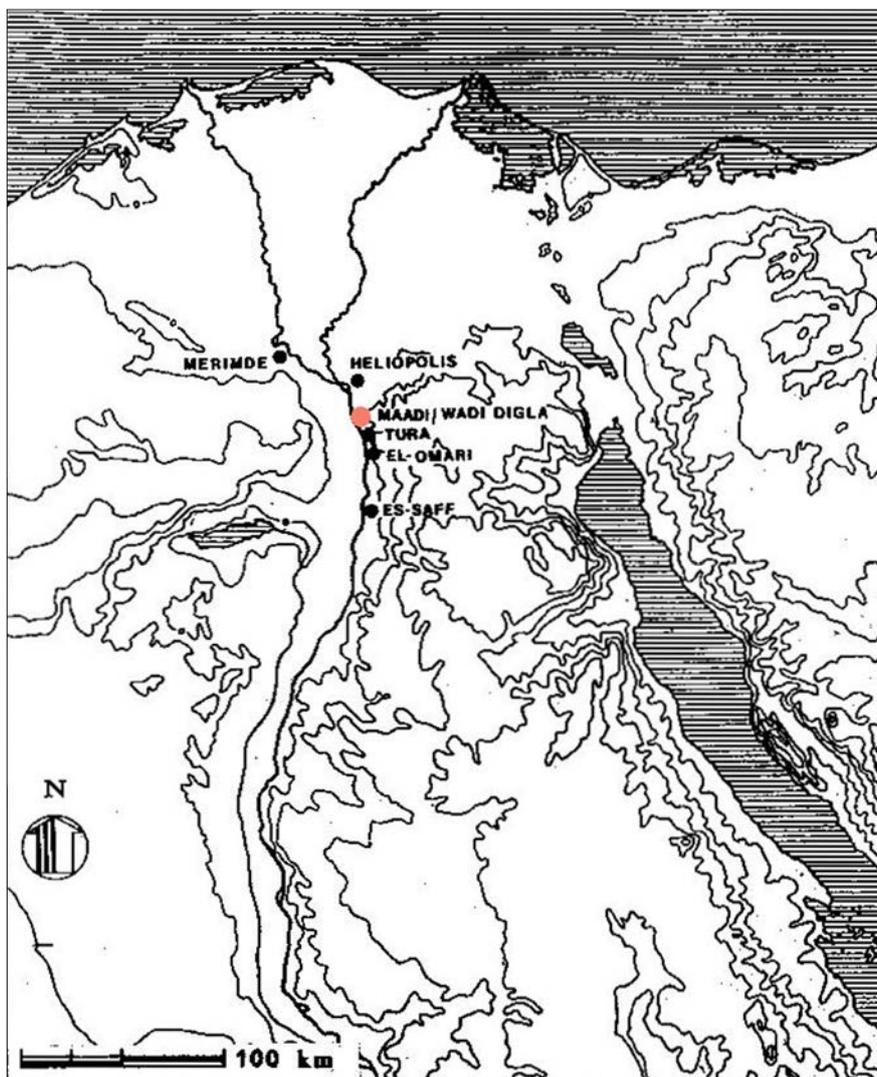


Figura 152: Siti pre-dinastici del Basso Egitto (van Zeist e de Roller 1993).

L'abitato, largo solo 100 m, si estende per circa 2 km su un terrazzo fluviale alla destra del Nilo. La parte più orientale dell'insediamento, datata intorno al 2.700 a.C., era costituita da capanne rotonde sorrette da strutture in legno e dotate di focolare, fosse di stoccaggio e pentole interrate. Accanto ai vasi domestici è stata rinvenuta anche una peculiare produzione ceramica di vasi dalla forma e dalle dimensioni molto standardizzate, probabilmente destinati allo stoccaggio e alla distribuzione di prodotti in quantità misurabili, insieme a una serie di oggetti di prestigio, come vasi di pietra, tavolozze e figurine.

Le caratteristiche sofisticate sia della produzione agricola che dell'allevamento, così come l'artigianato specializzato e le prove del commercio a lunga distanza e della produzione di massa suggeriscono che questo sito potrebbe rappresentare un passo avanti nel processo di urbanizzazione in Egitto.

Una composizione a falsi colori di Landsat-5ETM ha permesso l'identificazione di due ampi paleo-corsi del Nilo, che al momento dell'occupazione del sito probabilmente scorreva ai suoi piedi e che successivamente, anche a causa degli apporti laterali del conoide del wādī Degla, si è spostato verso ovest (Figure 153-155).

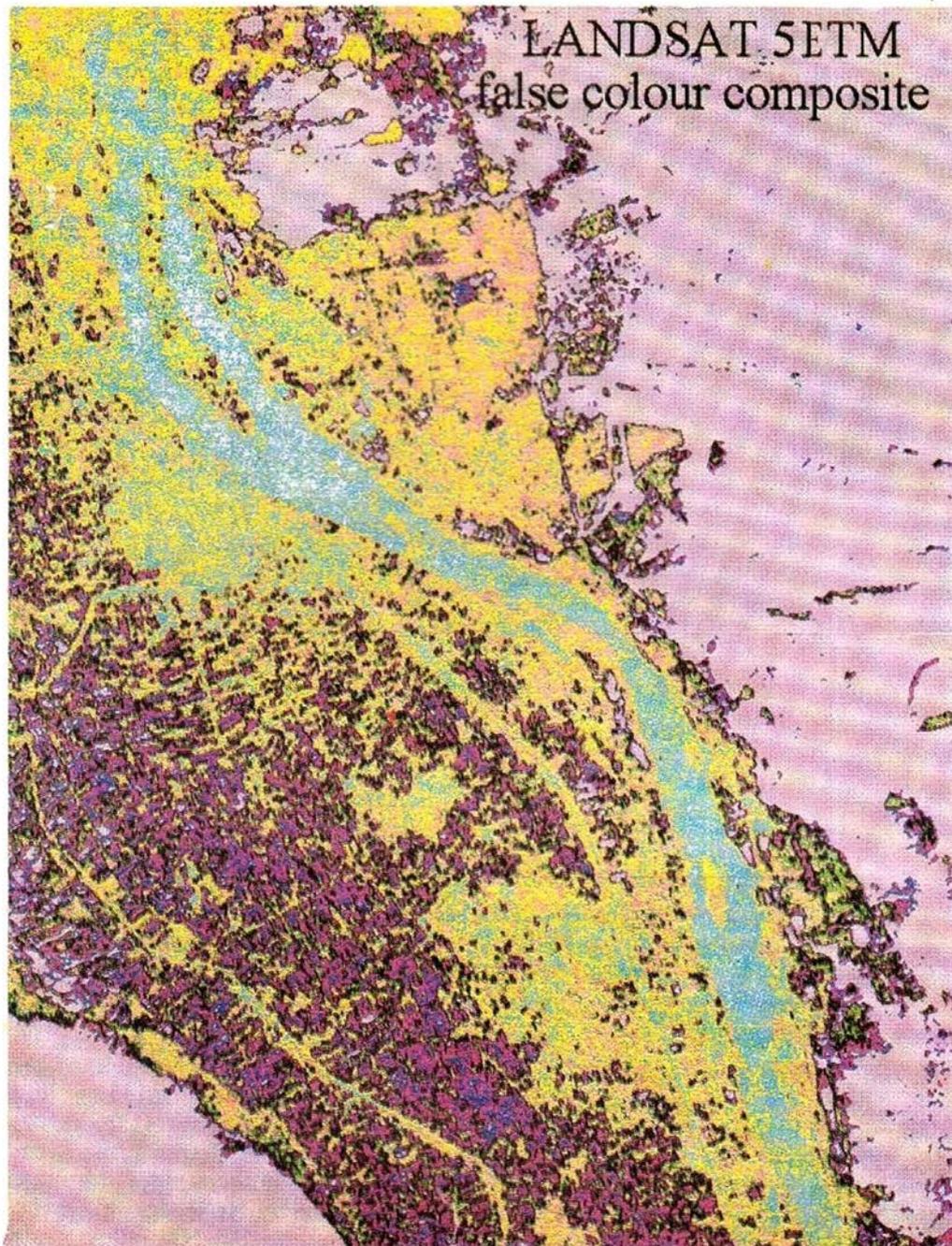


Figura 153: Composizione a falsi colori di Landsat-5ETM.

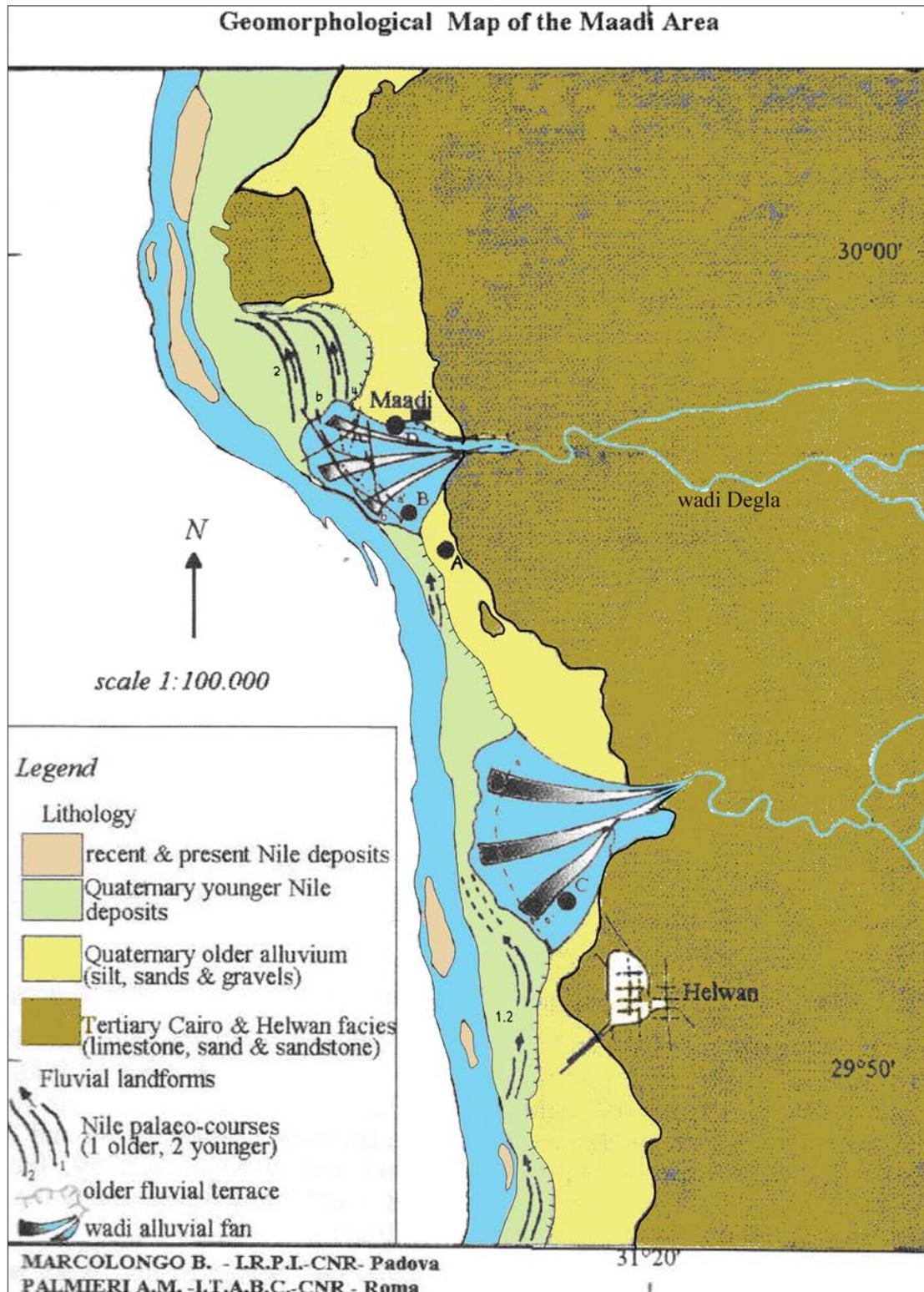


Figura 154: Interpretazione geomorfologica, che riporta la litologia semplificata dell'area di Maadi e le principali morfologie dovute alla morfogenesi fluviale. Tra i depositi del Quaternario 'Older Alluvium' include limi, sabbie e ghiaie deposte principalmente dal Nilo e in subordine dai suoi tributari, mentre a 'Younger Nile' appartengono a sedimenti medio-olocenici solo del Nilo (Caneva, Marcolongo e Palmieri 1987).



Figura 155: Interpretazione geomorfologica sovrapposta su immagine Ikonos di Google Earth (Caneva, Marcolongo e Palmieri 1987).

Risulta pertanto evidente la localizzazione di Maadi sulla sponda orientale di un paleo-Nilo quaternario (Figure 154-155), elemento di risorsa e di attrazione del contesto fisico locale. Maadi si configura quindi come un sito rivierasco posto in una posizione favorevole all'incrocio tra una via fluviale e una via terrestre di penetrazione verso il Mar Rosso lungo la vallata di wādī Degla.

### 5.1.3 Delta del Nilo e suo antico braccio 'pelusiaco'

È notorio ormai che il Delta del Nilo costituisce una unità fisiografica ben definita, improntata da una intensa attività morfo-dinamica. Infatti, se si osserva ora la configurazione attuale della zona deltaica è palese come questa rappresenti il risultato di un interrotto e lungo processo evolutivo che, iniziato dopo l'ultima trasgressione flandriana (circa 6.000 a.C.) ha condotto alla formazione di linee di costa successive con la creazione contestuale nel retroterra di lagune, stagni e paludi, di cui il lago Menzaleh è uno degli esempi più evidenti (Hereher 2014). Si pro-

pone pertanto come esempio la definizione della evoluzione paleo-ambientale della parte più orientale del delta del Nilo dopo la trasgressione 'flandriana' in relazione al modello insediativo antico, ovvero il riconoscimento del braccio cosiddetto 'pelusiaco' e i siti a esso relativi.

Il paesaggio della zona è caratterizzato, nel suo insieme, da una considerevole uniformità e da una morfologia relativamente piatta con dei rari punti cospicui di riferimento. Di conseguenza l'identificazione di forme collegabili ai differenti processi della dinamica eolica (dune, barcane ecc.), fluviale (paleo-corsi, meandri relitti ecc.) e marina (linee di costa, terrazze, lagune ecc.) è resa possibile solo attraverso l'integrazione dei dati ricavati sul terreno con l'interpretazione di immagini telerilevate.

Per la compilazione della carta tematica che qui si ripropone, la 'Esquisse Géomorphologique de la partie la plus orientale du Delta du Nil' (Figure 156-159) si sono utilizzate immagini Spot HRV registrate il 5 maggio 1988 assieme a foto cosmiche russe SOYOUZ KFA 1000, complementari sotto il profilo geometrico e spettrale tra di loro (Marcolongo 1992).

Le osservazioni geomorfologiche e paleo-idrografiche, effettuate durante le stagioni di rilevamento sul terreno degli anni 1990-91, hanno permesso di affinare tale analisi, i cui principali risultati ottenuti includono l'identificazione del letto dell'antico ramo pelusiaco del Nilo tra el-Qantara e la sua foce, sulla riva sinistra del quale si localizza Balusa (l'antico porto greco di *Pélusion*); la localizzazione dei litorali successivi formati da modificazioni della morfologia del sistema idrografico dell'area deltizia; la scoperta della sopravvivenza di un paleo-laguna che era senza dubbio ancora esistente durante il periodo attivo del ramo pelusiaco; infine, il riconoscimento di due allineamenti perpendicolari di dune (due sistemi dunali), che si estendono indietro nel deserto, testimonianza di due successive fasi di inaridimento climatico quaternario.

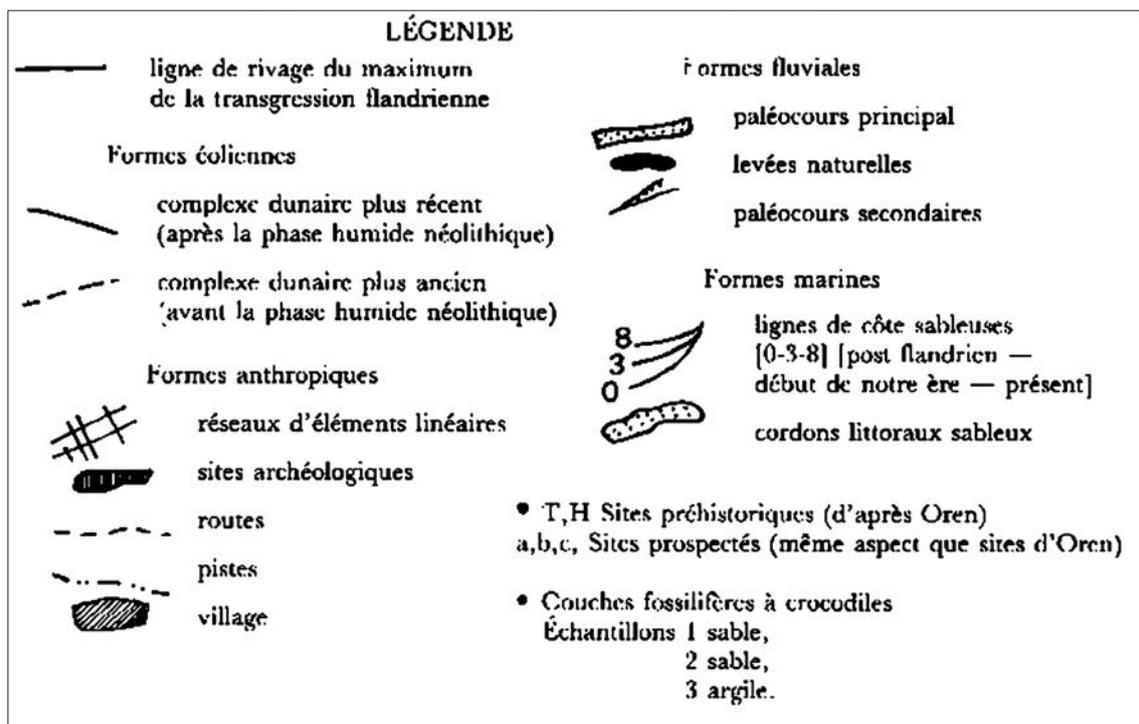


Figura 156: Legenda della carta tematica 'Esquisse Géomorphologique de la partie la plus orientale du Delta du Nil' (Marcolongo 1992).

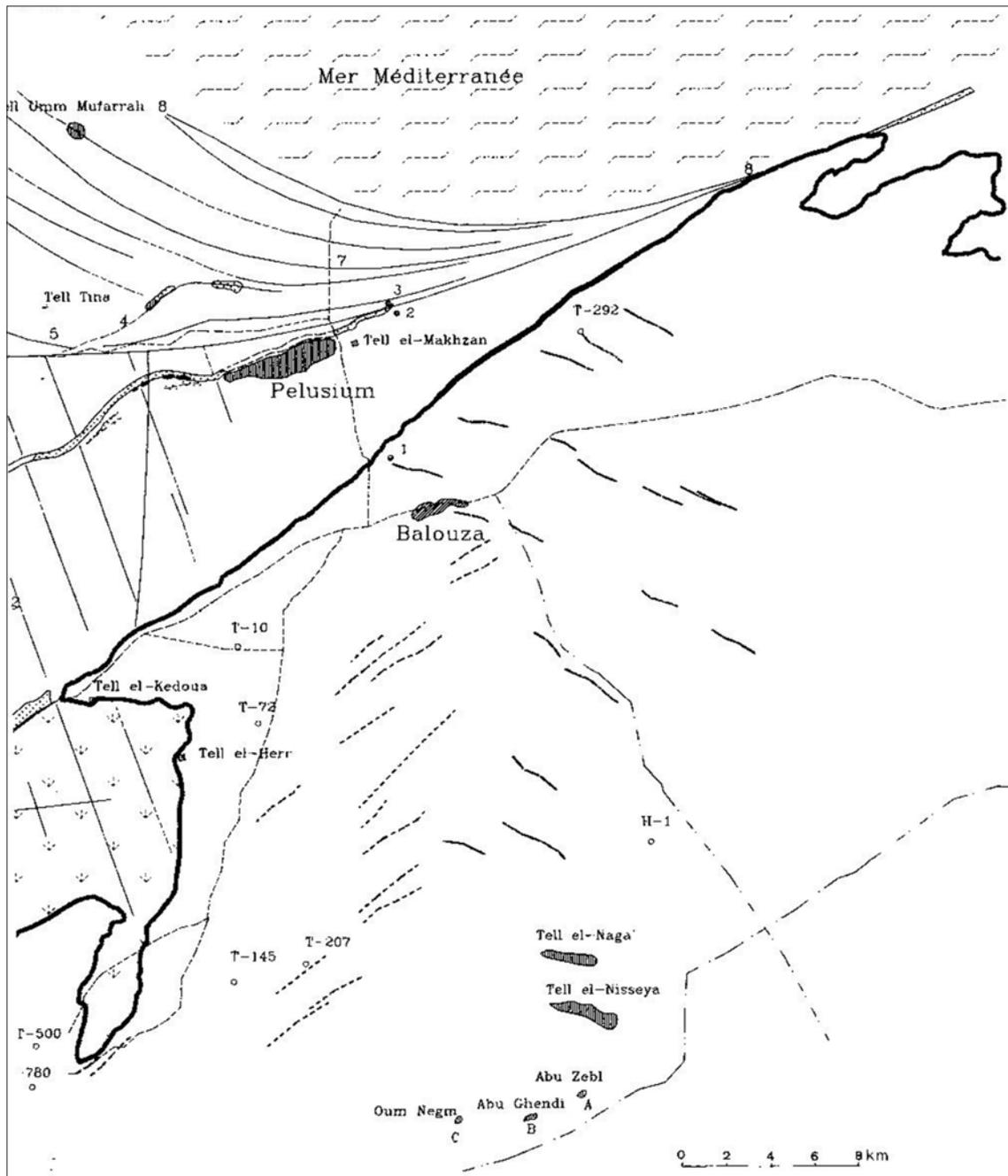


Figura 157: Porzione orientale della carta tematica 'Esquisse Géomorphologique de la partie la plus orientale du Delta du Nil' (Marcolongo 1992).

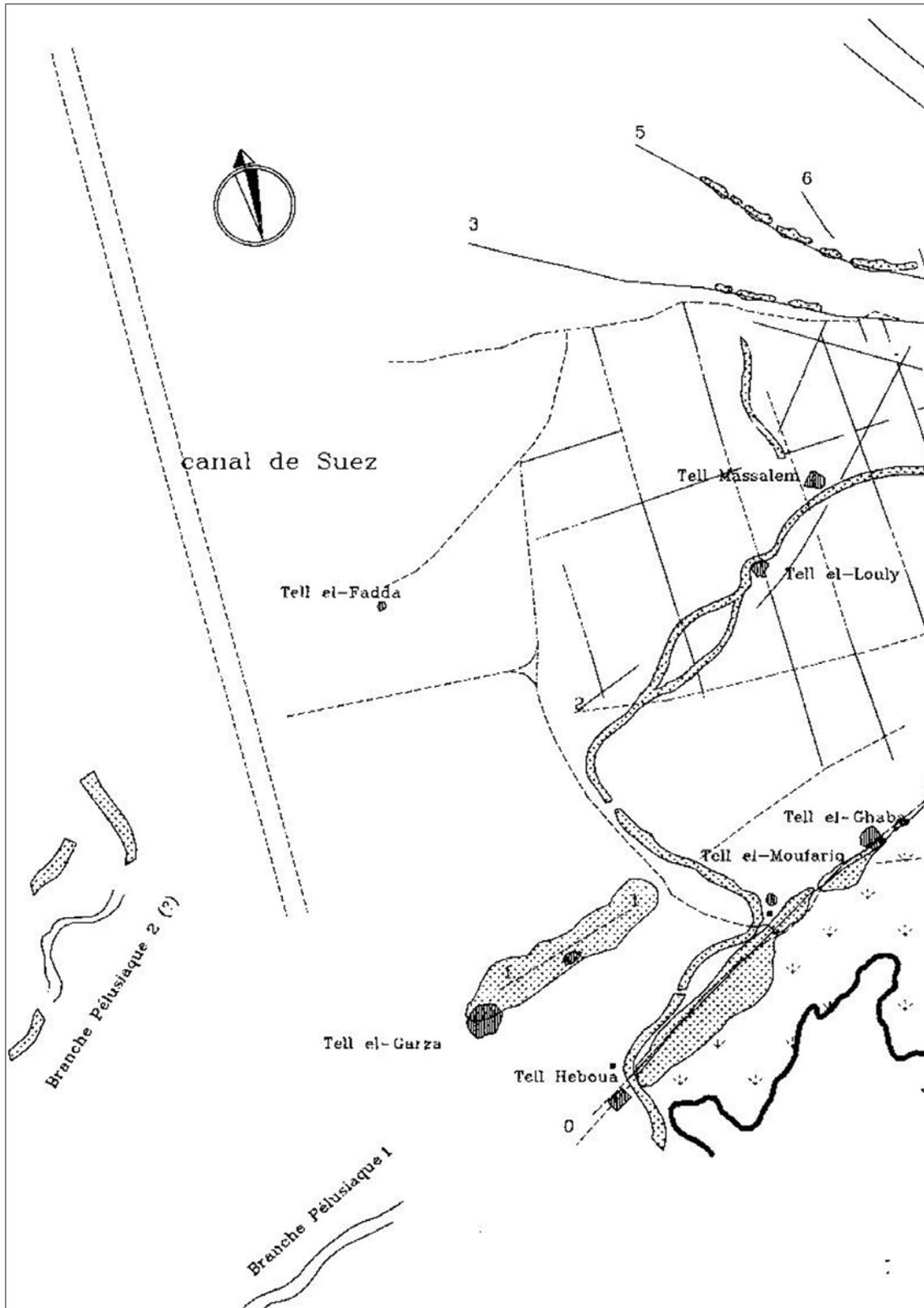


Figura 158: Porzione occidentale della carta tematica 'Esquisse Géomorphologique de la partie la plus orientale du Delta du Nil' (Marcolongo 1992).



Figura 159: Carta tematica drappeggiata sopra immagini Ikonos di Google Earth (Marcolongo 1992).

Tra i principali risultati è da annoverare l'identificazione della antica 'branca pelusiaca' del Nilo tra el-Qantara e il suo sbocco in mare, posto a qualche centinaio di metri a E-NE del sito archeologico di *Pēlusion*; di fatti, prima dell'impiego di immagini satellitari e analisi telerilevate il ramo Pelusiaco, citato dagli autori classici assieme al Tanitico, al Mendesiano, al Fatnitico, al Sebenitico, al Bolbitinico e al Canopico (Figura 160, Ball 1942: 69) non era stato mai precisamente localizzato (Marcolongo 1992).

I valori specifici dell'energia riflessa dalle sabbie del paleo-corso, molto elevati rispetto a quelli dei sedimenti limoso-argillosi delle alluvioni circostanti, permettono di seguirne precisamente il corso sinuoso che si sviluppa attraverso una zona oggi paludosa, difficilmente accessibile e controllabile. Il sito archeologico, nello specifico, si eleva sulla riva destra di tale ramo deltizio che, un po' a monte, forma un'ampia ansa cambiando direzione da NE verso Est. Questa fascia di scorrimento idrico è rimasta verosimilmente attiva fino all'inizio della nostra era volgare, come viene testimoniato dalla sua foce che taglia un antico cordone litorale databile al medesimo periodo e bloccata, al contrario, da cordoni successivi discordanti, formatisi al volgere dell'era cristiana.

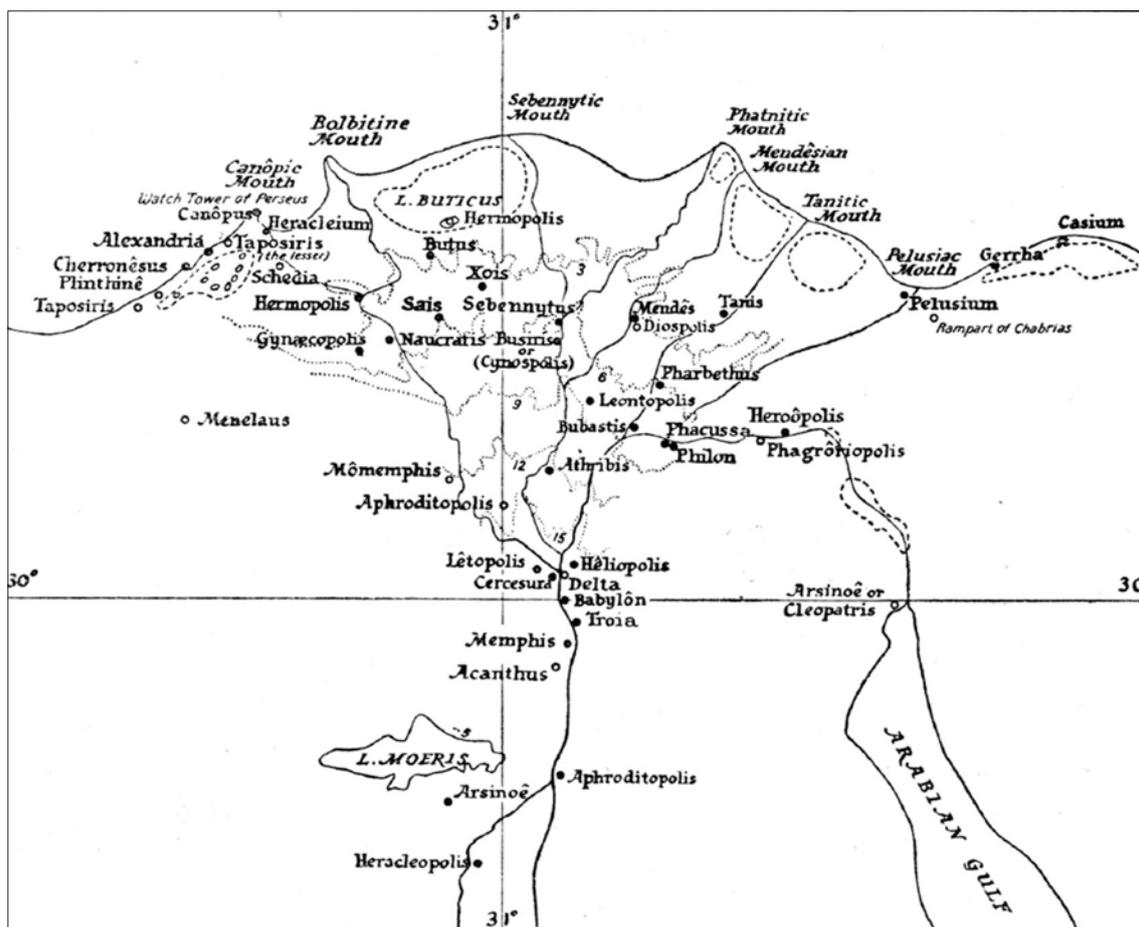


Figura 160: Delta del Nilo secondo Strabone (circa 20 a.C.) (Ball 1942: 69).

Le linee di costa fossili, dopo l'ultima 'trasgressione flandriana' che ha lasciato sul terreno un bordo di terrazzo marino ben continuo e sopraelevato di qualche metro al di sopra della pianura distale, sono anch'esse chiaramente identificabili sulle varie immagini impiegate. Si è riconosciuta specificatamente una discordanza angolare significativa tra la riva attiva fino al 1° secolo d.C. (numero 3 su 'Esquisse...') e quelle posteriori compresa la riva attuale (numero 8 sulla stessa carta), ciò che fa pensare tra l'altro a un cambiamento sostanziale e piuttosto rapido della morfologia della rete idrografica deltizia a questa epoca, con l'abbandono definitivo del ramo Pelusiaco seguito dall'aumento della portata delle branche.

Nel retroterra della trasgressione flandriana, tra Balouza ed el-Qantara, si estende una larga zona paludosa-lacustre interpretabile come il relitto di una paleo-laguna che non è ormai più in comunicazione con la laguna costiera di oggi, ma che verosimilmente lo era durante l'esistenza della branca Pelusiaca.

Infine nell'avampaese desertico si osservano facilmente due sistemi perpendicolari di dune allungate, di cui quello orientato NO-SE appare come il più antico.

## 5.2 Oman. Millenarie oasi urbane sulle sponde del wādī banī Ḥālīd

Molto recentemente, nell'autunno 2019, un progetto congiunto Italo-omanita ha avviato una serie di prospezioni e scavi archeologici lungo il corso del wādī banī Ḥālīd, un poderoso e spettacolare corso d'acqua, frutto di sorgente naturali (*Muqal Cave*), che scorre lungo il limite più orientale della catena montuosa del al-Ḥajar, nell'estremità più orientale della Penisola arabica (*Šarqiyah governorate*) (Loreto 2020). In tale nicchia ecologica, ovvero in un ambiente fortemente circoscritto e protetto dalle montagne, sin dalla seconda metà del I millennio a.C. si susseguono forme di insediamento basate sullo sfruttamento delle acque di sorgente e delle piogge stagionali che, sebbene episodicamente, hanno contribuito alla formazione di terreni alluvionali agricoli e forme di immagazzinamento dell'acqua artificiali. Inoltre, la posizione stessa del wādī banī Ḥālīd tra le coste settentrionali e orientali, nonché in prossimità delle piane alluvionali interne dell'Oman ha fatto sì che si determinassero dei naturali canali di comunicazione con le comunità costiere e, ancor più, con le culture dell'interno (Figura 161). Pertanto, il wādī banī Ḥālīd si pone come un esempio di grande utilità per comprendere come l'adozione di strumenti telerilevati possa contribuire alla definizione delle dinamiche insediative e produttive in un contesto che nel corso dei millenni non ha subito vistose variazioni morfologiche. Al contrario ha mantenuto vivi, ancor oggi, dei meccanismi di sfruttamento dell'ambiente che potremmo definire 'ecosostenibili'.



Figura 161: Wādī banī Ḥālīd e la porzione più orientale della catena al-Ḥajar (Landsat ETM).

### 5.2.1 Dinamiche del popolamento montano tra la Tarda Età del Ferro e l'epoca islamica in Arabia orientale

Wādī banī Ḥālīd è un corso d'acqua che scorre da NO a SE attraverso una regione montuosa la cui elevazione varia da 1750 m nelle sorgenti a 315 m all'uscita del bacino idrico (apice del conoide alluvionale), per una distanza lineare di 35 km. Può quindi essere considerato un wādī ad alta energia che taglia in profondità le formazioni sedimentarie della parte superiore del bacino, trasportando molto materiale grossolano lungo la porzione mediana e depositandole nella parte inferiore e nel grande conoide di deiezione (Figura 162).

La carta archeologica preliminare dell'area comprende il *water divide* (bacino idrografico), il tortuoso *talweg* (il corso principale del wādī), i principali affluenti fluviali (che scorrono dopo le piogge) e l'ampio conoide alluvionale meridionale o conoide di deiezione del wādī banī Ḥālīd, da cui deriva una superficie totale del bacino di circa 250 km<sup>2</sup>.

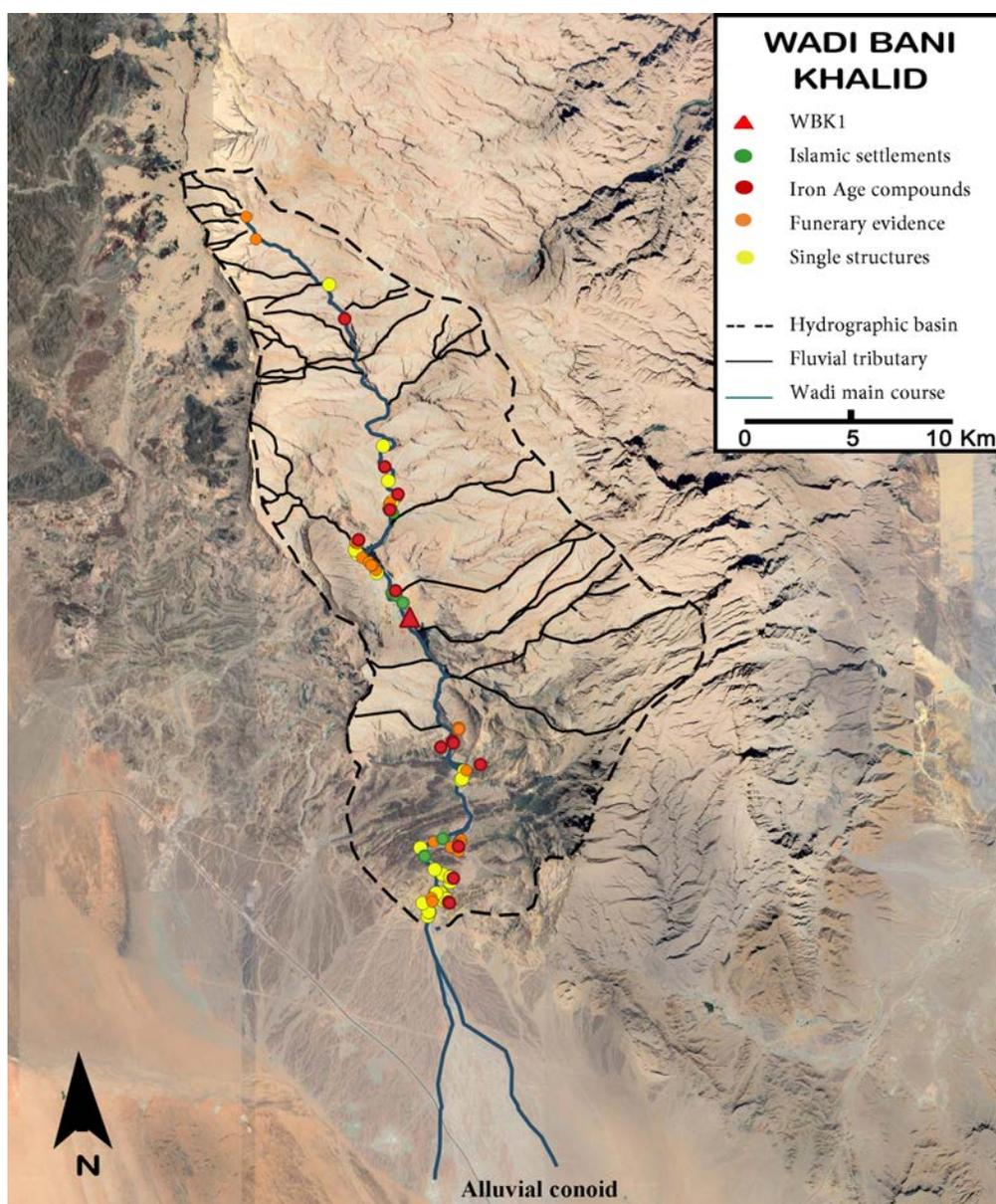


Figura 162: Carta geoarcheologica del wādī banī Ḥālīd, con indicazione del bacino idrografico e dei siti archeologici da esso dipendenti (elaborazione in ambiente QuantumGIS).

La conformazione e lo sviluppo della valle sono stati influenzati e controllati dalla tettonica dell'area, formando localmente una grande sinclinale in marne bioclastiche e calcari marnosi, massicci calcari bioclastici e marne con subalterni scisti e arenarie, tutte dell'Eocene medio. Quasi in tutto il bacino idrico del wādī banī Ḥālīd scorre lungo l'asse sinclinale e quindi può essere classificato come 'fiume conseguente', vale a dire un torrente il cui corso è la diretta conseguenza dell'originario pendio della superficie su cui si è sviluppato (Figura 163).



Figura 163: La piana alluvionale lungo la quale sorgono i siti antichi (in primo piano WBK1, sito dell'Età del Ferro Tarda databile a partire dal IV sec. a.C.) e alcuni dei villaggi odierni. Sullo sfondo ben si apprezza la morfoscultura sinclinale dove la Muqal Cave dà vita al vitale corso d'acqua wādī banī Ḥālīd.

Su queste premesse, l'indagine geoarcheologica si è concentrata sul corso medio inframontuoso del wādī banī Ḥālīd, che presenta una caratteristica molto peculiare, ovvero una pianura alluvio-

nale relativamente più estesa sviluppatasi poco a valle della confluenza con la *Muqal Cave*, suscettibile di sfruttamento agricolo e adatta per l'insediamento (Figura 164).

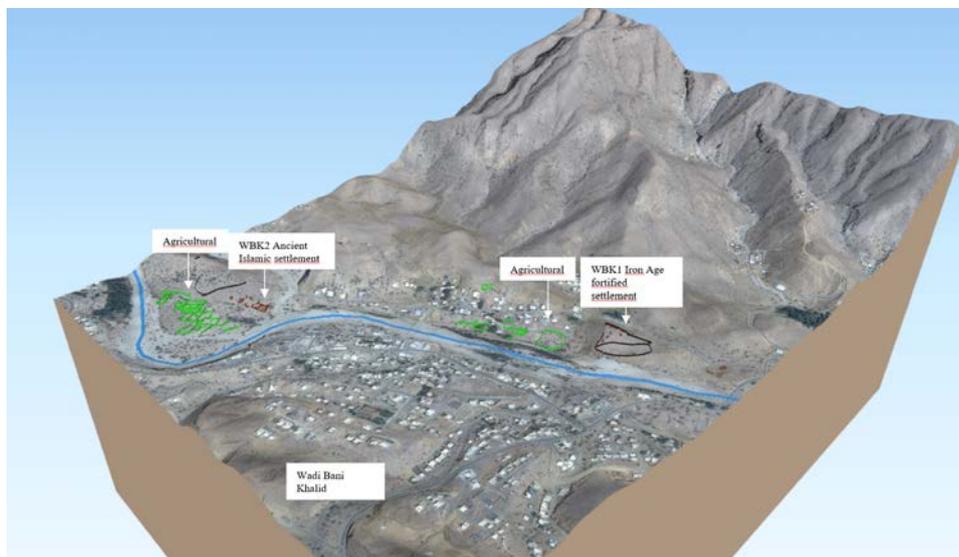


Figura 164: DEM (Digital Elevation Model) della piana alluvionale lungo la quale sorgono i siti antichi e alcuni dei villaggi odierni.

Questo è il motivo per cui i siti archeologici di WBK1 (Tarda Età del Ferro), WKB2 (il principale insediamento islamico), WKB3-6 (insediamenti islamici), insieme agli odierni villaggi situati lungo il wādī banī Ḥālīd sono tutti concentrati all'interno e intorno a questa fascia di pianura alluvionale.

In ordine di tempo, la più antica occupazione antropica documentata con certezza è quella relativa alla Tarda Età del Ferro (*Late Iron Age*). In questa fase, che si data tra il IV sec. a.C. e il I-II sec. d.C., il comprensorio territoriale del wādī banī Ḥālīd è dominato da un imponente e fortificato sito abitativo (WBK1, Figure 165, 166) che ricade nella definizione di oasi urbana, ovvero un insediamento che, nonostante la ridotta estensione (non più di 1,5 ettari) assume tutte le caratteristiche di un sito dominante in grado di controllare, e grazie a essa prosperare, la vallata irrigua del wādī banī Ḥālīd.



Figura 165: Il sito fortificato di WBK1 visto dalla sponda sinistra del wādī banī Ḥālīd.

WBK1 si erge su di un *talus* roccioso che si staglia naturalmente lungo il fianco sinistro della vallata, in posizione protetta e in grado di controllare le strutture agricole sottostanti, composte, sebbene poco preservate, da dighe e muri di terrazzamento.

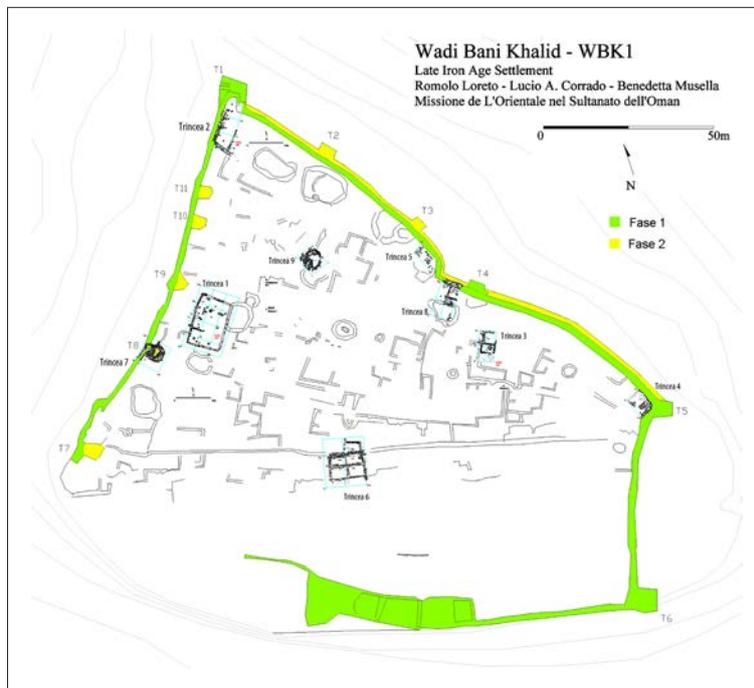


Figura 166: Rilievo planimetrico di WBK1 eseguito mediante Stazione Totale sul campo.

Muovendosi di circa un chilometro più a nord (Figura 167), risalendo il corso del wādī banī Ḥālīd, ci si ritrova proiettati di circa un millennio più avanti, in un periodo compreso tra il XVI e il XVIII secolo, quando la vallata irrigua era dominata da un insediamento di epoca islamica (WBK2) che, anche grazie allo stato di conservazione delle sue strutture idrauliche e agricole, permette di rilevare, ancora una volta, un sistema di sfruttamento dell'ambiente che affonda le proprie radici nel I millennio a.C.



Figura 167: Il corso superiore del wādī banī Ḥālīd con, all'estrema sinistra, WBK2.

### 5.2.2 Il corso superiore del wādī banī Ḥālid. Dighe, sorgenti e falāj di epoca islamica

Dato che il contesto archeologico relativo al periodo islamico si presenta particolarmente ricco, nonché complesso e articolato, di evidenze non solo urbane ma anche e soprattutto idrauliche e di natura agricola, l'approccio d'analisi è stato quello di affidarsi alla foto interpretazione e al telerilevamento dapprima su immagini *Ikonos* ad alta risoluzione (5 m) montate su *Google Earth* e poi su immagini *Pléiades* pancromatiche ad altissima risoluzione (0,5 m) per eseguire telerilevi di dettaglio. A tale approccio da remoto è immediatamente seguita una fase di verifica sul campo, per una più raffinata mappatura delle evidenze archeologiche e delle morfologie anomale o cospicue individuate durante la fase preliminare.

Una prima interpretazione geoarcheologica da remoto è dunque avvenuta intorno alla pianura alluvionale, focalizzata nella sua parte alta, a nord, in stretta vicinanza con WBK2, il principale insediamento islamico a cui è associata una struttura di proporzioni ciclopiche già visibile da satellite, una diga artificiale (Figura 168). Per spiegare la funzione di tale diga, si deve osservare il confine occidentale della pianura alluvionale (Figura 169), dove si può definire l'estensione di una serie di piccoli corsi d'acqua affluenti (*tributary streams*) che confluiscono verso un affluente principale (*main tributary*) del wādī banī Ḥālid (Figura 169), il cui sbocco è stato gestito con la creazione in epoca antica di una massiccia diga in ciottoli ciclopici a formare un bacino artificiale (Figura 170), utile come riserva idrica nei periodi di siccità come deposito di argilla di origine alluvionale, forse utilizzata per l'economia locale.

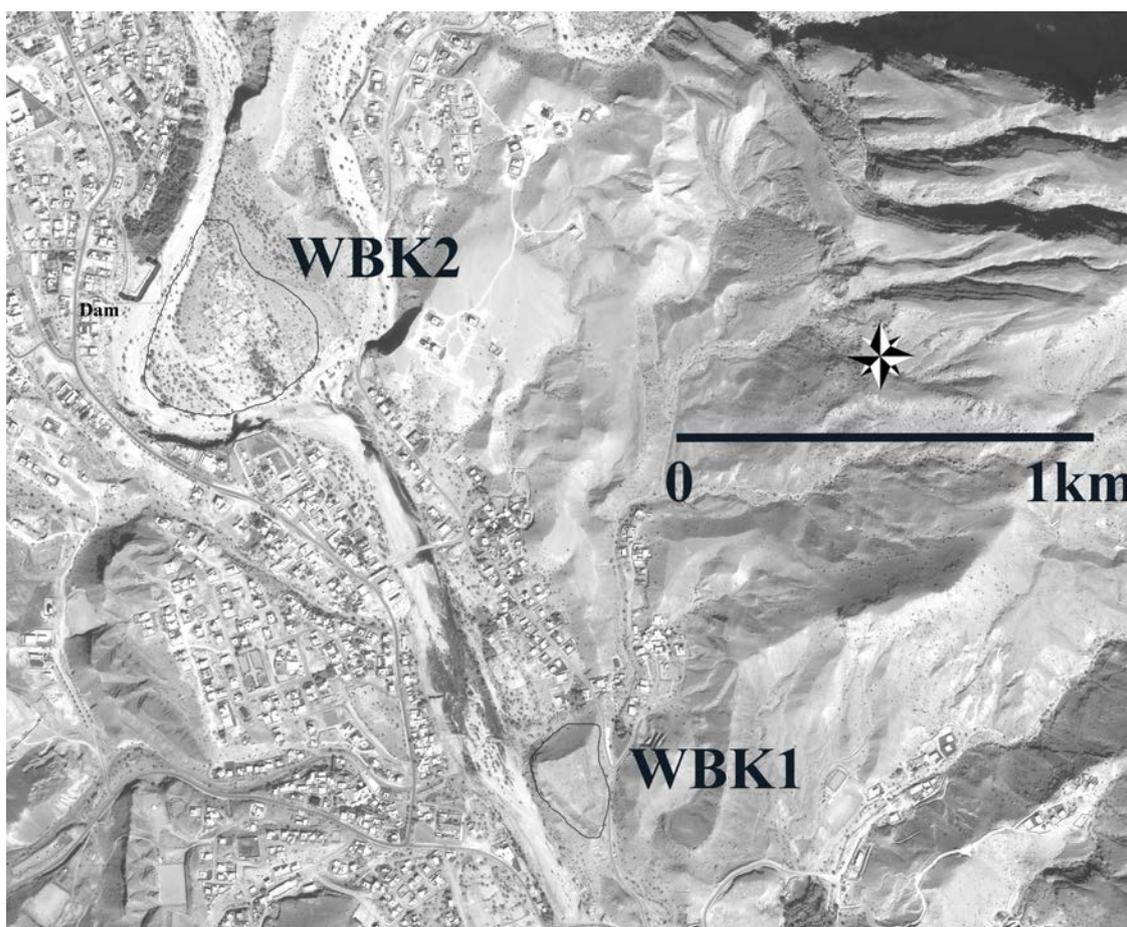


Figura 168: Immagine Pléiades pancromatica ad altissima risoluzione che mostra la piana alluvionale con WBK1 e WBK2 (al quale è associata una diga artificiale).

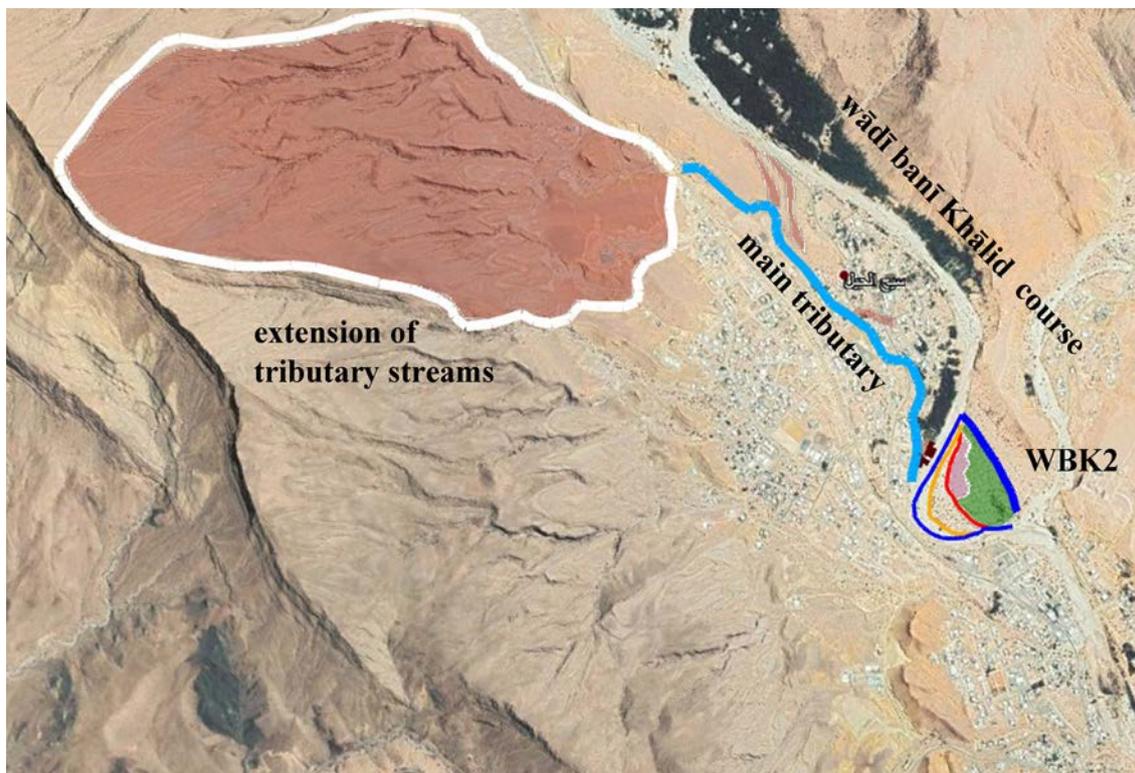


Figura 169: Fotointerpretazione del contesto idrografico di WBK2 da immagine Ikonos montata su Google Earth.



Figura 170: La diga ciclopica che sbarra il tributario di destra del wādī bani Ḥālīd nella piana alluvionale.

La diga racchiude un bacino idrico fermo, alimentato in passato dall'affluente di destra del wādī bani Ḥālīd, proprio di fronte ad antichi campi coltivati dagli abitanti del villaggio islamico WBK2 (Figura 171), posti su vecchi depositi alluvionali. In Figura 171 sono indicati l'area agricola, con la porzione di campo erosa in passato dal wādī Bani Ḥālīd (marcata in blu), e tre terrazze alluvionali digradanti dalle più recenti (marcata in verde) a quelle più antiche (marcate in rosso e in giallo).

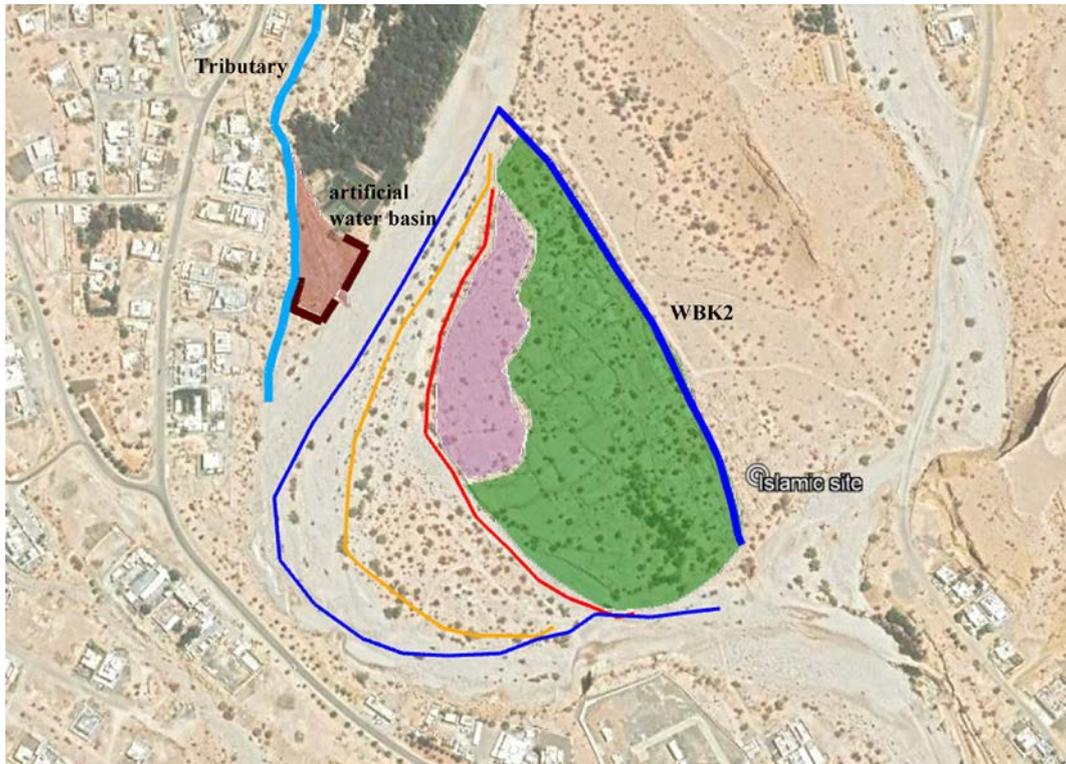


Figura 171: Fotointerpretazione del contesto idrografico di WBK2 da immagine Ikonos montata su Google Earth.

Dopo un sopralluogo sul campo, è stato scoperto un canale d'acqua molto articolato (*falāj*) deviato dal corso principale del wādī banī Ḥālīd (Figura 172) per l'irrigazione e il consumo domestico. Il *falāj*, un vero e proprio acquedotto a cielo aperto, deriva dal wādī a monte e distribuisce la sua acqua attraverso tutta la superficie dei campi antichi a valle fino al vecchio sito islamico (Figure 173-176).



Figura 172: Inlet o imbocco a monte del *falāj* che intercettava le acque del wādī banī Ḥālīd per convogliarle verso WBK2.



Figura 173: Il prosieguo del falāj che immette le acque del wādī banī Ḥālid entro il complesso agrario di WBK2.



Figura 174: Il prosieguo del falāj che immette le acque del wādī banī Ḥālid entro il complesso agrario di WBK2.



Figura 175: Il prosieguo del falāj che immette le acque del wādī banī Ḥālīd ora entro una serie di bacini di raccolta.

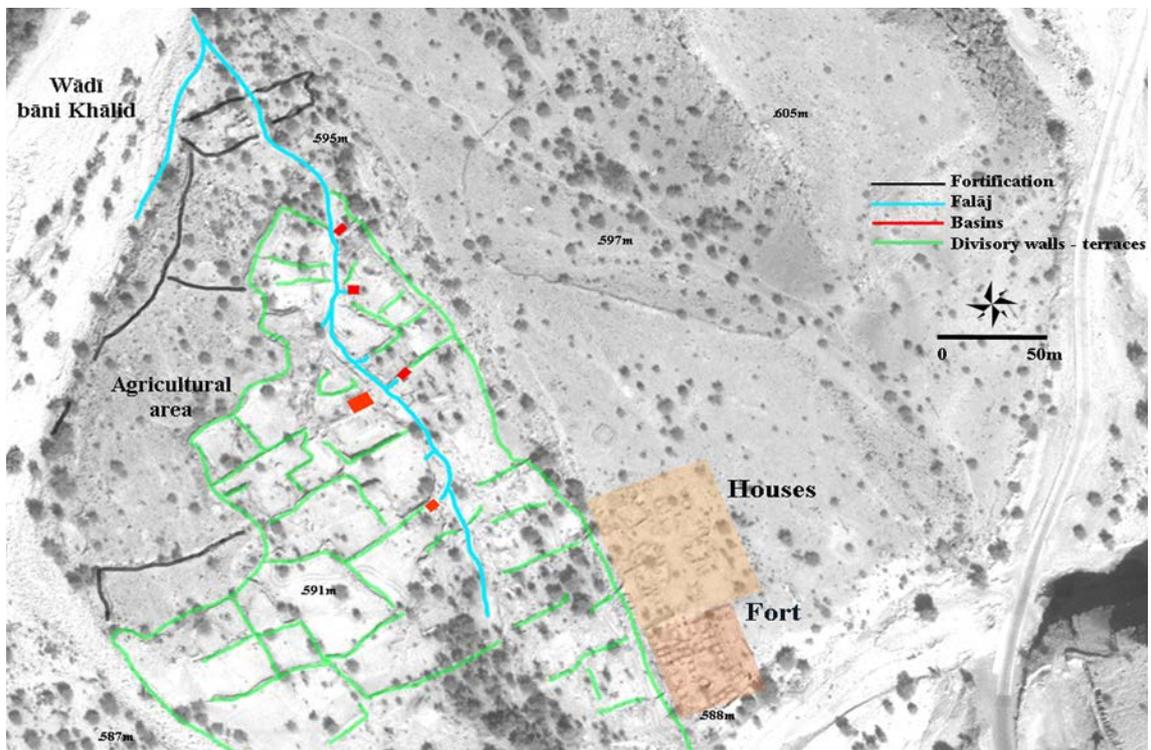


Figura 176: Telerilievo di WBK2 su stralcio di immagine Pléiades pancromatica.

In conclusione, ciò che più affascina è riscontrare ancora oggi dei sistemi irrigui che, nonostante tutto, ancora seguono questi modelli millenari. Benché gli attuali *falāj* siano composti di malte cementizie e non argillose, e immancabili ciottoli, la filiera distributiva della risorsa idrica resta sostanzialmente immutata. Dalle sorgenti ancora attive (Figura 177) l'acqua confluisce verso bacini di raccolta che garantiscano riserva sufficiente in caso di periodi di siccità (Figura 178), ma che quotidianamente lasciano fluire quella quantità d'acqua tale da sostenere gli abbondanti palmeti attivi (Figura 179) affinché le comunità locali possano nutrire le proprie radici millenarie (Figura 180).



Figura 177: Le sorgenti a monte del wādī banī Ḥālid.



Figura 178: Diga artificiale a monte della piana irrigua.



*Figura 179: Esempio di odierno falāj.*



*Figura 180: Villaggi odierni attorno a palmeto sostenuto da falāj.*



## 6. Steppe, piane, piane alluvionali e contesti lacustri

*'Che fai tu, luna, in ciel? dimmi, che fai,  
silenziosa luna?'*

(Giacomo Leopardi, *Canto notturno di un pastore errante dell'Asia*,  
in *Canti*, Napoli, Saverio Starita Editore, 1835).

Composto a Recanati fra il 22 ottobre 1829 e il 9 aprile 1830, il canto fu pubblicato nell'edizione del 1831. Probabilmente il Poeta trovò ispirazione da una frase tratta dal *Journal des Savants*, che riguardava le abitudini di questi pastori: 'Plusieurs d'entre eux passent la nuit assis sur une pierre à regarder la lune, et à improviser des paroles assez tristes sur des airs qui ne le sont pas moins', da una recensione parzialmente trascritta nello *Zibaldone* del 3 ottobre 1828.

Le pianure, morfologie sub-orizzontali capaci di accogliere e disorientare, rappresentano un paesaggio mutevole come in un sogno, misterioso e nel contempo accogliente e protettivo. Predomina in esse lo spazio sconfinato e l'abbraccio ovunque del cielo con la terra, due opposti che da sempre sono tra di loro legati nella tradizione culturale ed esoterica orientale e centro asiatica in particolare.

Si potrebbe dire, seguendo questo filo conduttore della danza dinamica di Yin (Jin) e Yang (Jang), che la pianura, la steppa, siano paesi di vuoto e di aria trasparente, più che di pieno o rilievi segnati dal tempo, dove conviene muoversi con bagaglio sempre più leggero ed essenziale come fanno da millenni i nomadi.

Togliere piuttosto che aggiungere, scavare piuttosto che sopraelevare, semplificare piuttosto che complicare, è la corretta posizione di chi intende sviluppare una loro interpretazione geoarcheologica completa e spinta fino all'ultimo stadio deduttivo.

Oggi la diffusa disponibilità di strumenti avanzati per l'analisi del territorio, quali i numerosi sensori multispettrali montati a bordo di vari satelliti, apre nuove prospettive di studio nel settore, tra l'altro, delle ricostruzioni paleo-ambientali orientate a comprendere gli stretti rapporti tra risorse naturali e modelli insediativi del passato. I dati telerilevati sempre più aggiungono informazioni complementari alle osservazioni dirette o alle notizie bibliografiche e, con risoluzioni spaziali e temporali adeguate, offrono una visione sintetica dell' 'oggetto' e delle sue problematiche spazio-temporali di grande efficacia.

### 6.1 India. Geoarcheologia della piana gangetica attorno a Kampilya

L'ampio territorio di piana proluviale che si estende ai piedi della catena himalayana fino al grande deserto indiano del Thar è stato (tardo Pleistocene-Olocene), ed è ancor oggi, sede di un intenso assestamento del terreno (neo-tettonica, con fenomeni di basculamento, innalzamento e sprofondamento), per cui la rete idrografica appare mutevole nel tempo con cambiamenti molto consistenti di direzione e spostamenti di corso dal bacino dell'Indo a quello del Gange.

#### 6.1.1 *Forme mutevoli*

Negli ultimi decenni numerosi studiosi indiani e stranieri di varie discipline hanno lavorato su questo attivo bacino di avampaese, costituito dalla pianura indogangetica dove la sedimentazione avviene per processi fluviali. Tra l'altro, è stato sottolineato il controllo neotettonico sul tratto medio del Gange nei pressi di Kanpur (UP), dove il fiume si sta spostando verso SE attratto da una faglia normale, la cosiddetta 'faglia di Moradabad', con direzione NO-SE parallela all'orogeno (Bajpai 1989; Singh e Bajpai 1989; Singh *et al.* 1990; Parkash e Kumar 1991). Inoltre, imponenti cambiamenti nei corsi dei fiumi, dovuti sia alla neotettonica che al clima, sono stati

riconosciuti in Haryana, Panjab e Rajasthan con l'abbandono di una direzione di flusso occidentale globale (Ghaggar-Sarasvati che riceveva i contributi del paleo-Yamuna-Drishadvati) e la formazione di una nuova direzione di flusso verso sud rappresentata principalmente dall'attuale Yamuna (Pal *et al.* 1984; Francfort 1984; Gentelle 1984; Misra 1994; Gupta 1996; Agrawal *et al.* 1995; Marcolongo e Tosi 1995).

Proprio quest'area, d'altro canto, è stata sede dell'insorgere e dello sviluppo della cultura 'harappana' e la distribuzione degli antichi siti della regione va vista pertanto in rapporto dia-cronico con una situazione paleo-ambientale ben diversa da quella odierna.

Anche le migrazioni che, nel corso del II millennio a.C., hanno portato un considerevole numero di genti a insediarsi in area gangetica, hanno come probabile concausa un imponente cambiamento idrografico che si deve essere verificato con l'abbandono da parte della Yamuna di una direttrice di deflusso occidentale, tributaria del sistema Saraswati-Indo, e l'incanalamento delle sue acque verso sud-est fino a confluire nel Gange.

Il seguente schizzo (Figura 181) offre una sintetica panoramica delle principali evidenze della paleo-idrografia quaternaria e dei suoi andamenti nel bacino indogangetico.

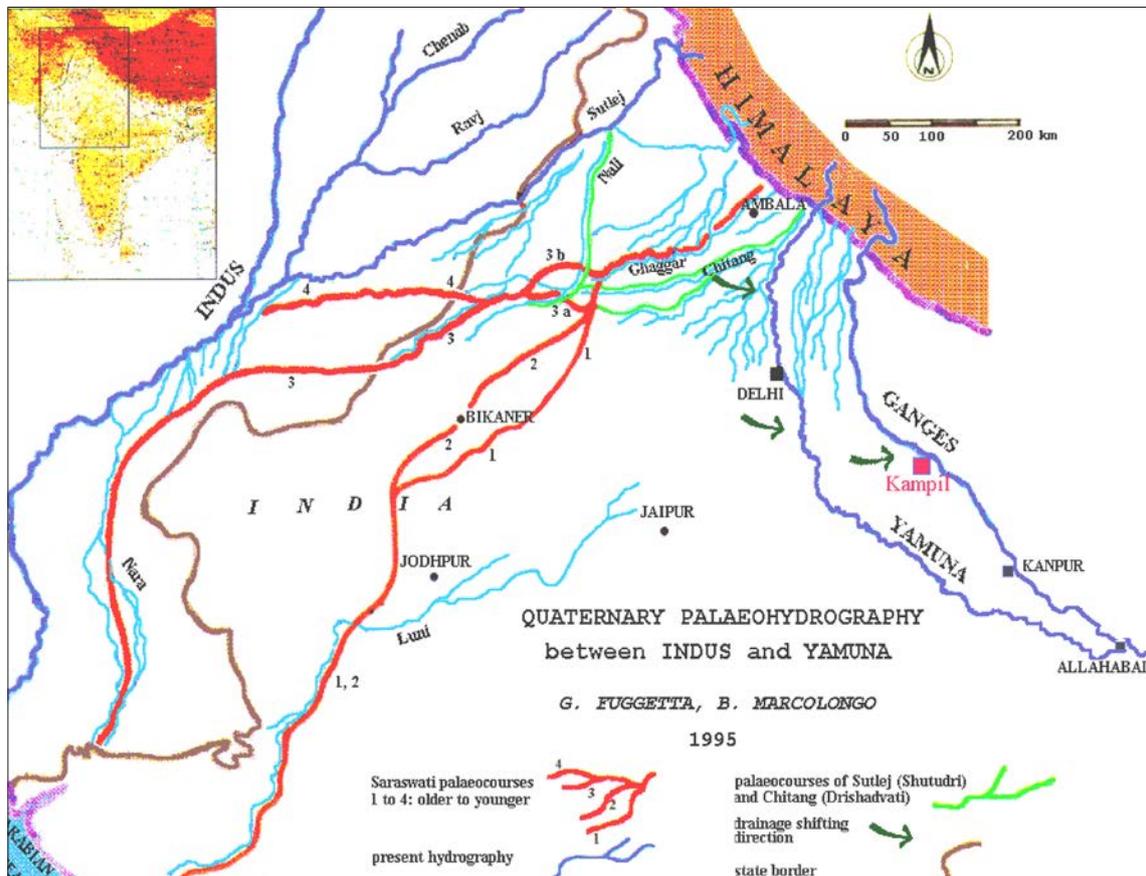


Figura 181: Paleoidrografia Quaternaria della piana indo-gangetica (Marcolongo e Tosi 1995).

In questo quadro generale si inserisce la scoperta, all'inizio del 1996, del grande complesso archeologico di Drupad Kila/Kampilya nella media valle alluvionale del Gange (distretto di Farrukhabad, Uttar Pradesh), fatta sulla base di uno studio preliminare di immagini telerilevate pancromatiche riprese dalla serie di satelliti indiani IRS 1B e 1D (Figura 182),

che aveva fornito un modello teorico di previsione della presenza di possibili emergenze archeologiche.

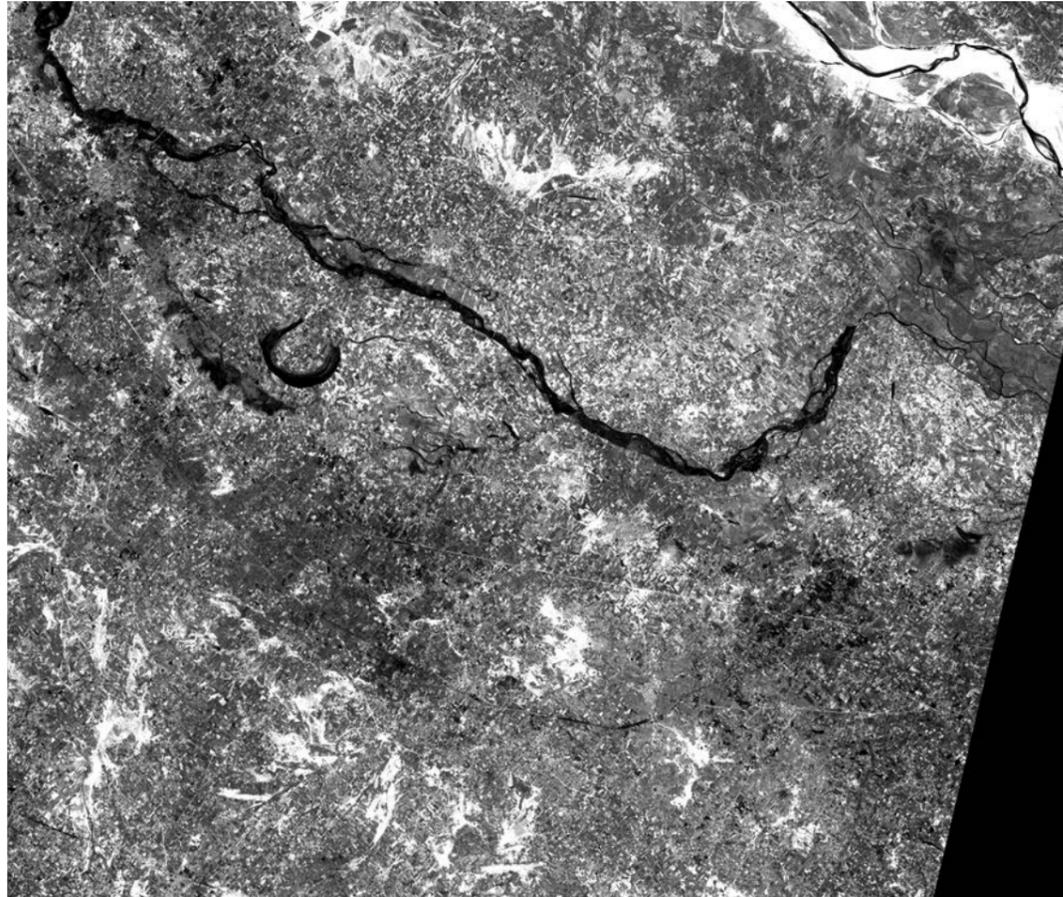


Figura 182: Porzione di immagine IRS 1D-PAN sulla piana del Doab. Nell'angolo in alto a destra il piano alluvionale attuale del Gange. La scena è attraversata nella parte alta dal corso del Burhiganga Nadi (Vecchio Ganga), a cui è riconoscibile l'ampio meandro relitto a forma di ferro di cavallo posto più a sud. L'intera idrografia con le varie paleo-forme mostra chiaramente una tendenza di spostamento del deflusso verso NE.

#### 6.1.2 Drupad Kila/Kampilya

Il recupero di questo importante sito, che occupa una posizione prominente nell'antico regno di South Panchala, come testimoniato dal poema epico del *Mahābhārata*, e per questo ricercato fin dall'inizio delle prospezioni archeologiche in India di Alexander Cunningham senza successo, ha suscitato il vivo interesse della comunità scientifica e ha portato allo sviluppo di una ben più ampia ricostruzione paleo-ambientale della piana del Doab tutto attorno al villaggio di Kampil (Figura 181, 70°16'40" long. est, 27°36'40" lat. nord). Essa ha messo in luce tra l'altro l'esistenza, a sud-ovest dell'attuale riva destra del Gange, di una serie di paleo-alvei, riconoscibili sul terreno sotto forma di allungati argini sabbiosi naturali. Queste caratteristiche morfologie con la loro distribuzione spaziale dolcemente sinuosa e le relative discontinuità angolari indicano un processo di migrazione locale del Gange verso l'odierna pianura alluvionale (nord-est), essendo il corso più esterno anche quello più antico (Figura 183).



# KAMPILYA Project

## Geo-archaeological interpretation in the plain around DRUPAD KILA

from satellite image (IRS 1D PAN scene 98-52 11 Feb '99)

Bruno MARCOLONGO

2000

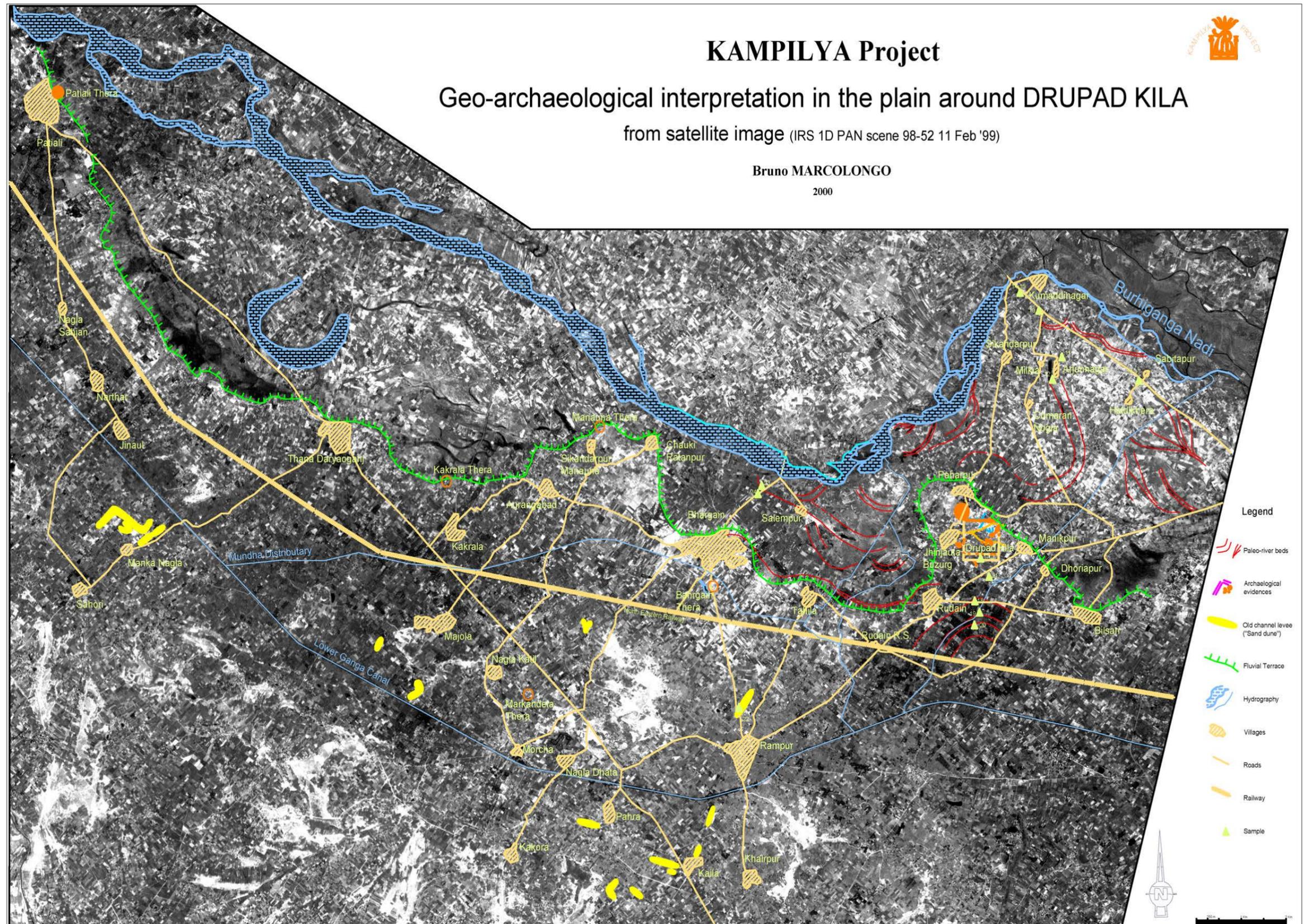


Figura 183: Interpretazione geoarcheologica della piana del Doab attorno al sito di Drupad Kila/Kampilya (Marcolongo 1998, 2001).

Prendendo in considerazione ora la ristretta porzione di pianura centrata attorno a Drupad Kila (Figura 184) e tentando una correlazione morfogenetica con gli elementi geomorfici descritti da Singh *et al.* (1990) su più ampia scala a livello regionale, le direzioni di paleo-flusso qui numerate 0, 1 e 3 sembrano essere tutte situate su una superficie posta a circa 5-10 m sopra al corso odierno del Gange e ristretta alla sua piana alluvionale, costituita da limi sabbiosi e sabbie. Al contrario le direzioni di paleo-flusso (num. 4) che giacciono sul *plateau* regionale con estesi interfluvi, presente su entrambi i lati del Gange, situato a 10-20 metri al di sopra del piano alluvionale attuale e costituito in prevalenza da argilla siltosa con concrezioni calcaree diffuse, sono tutte più antiche.

Il limite tra le due superfici genetiche è segnato da un terrazzo fluviale pressoché continuo (*fluvial terrace* in Figura 184), con una scarpata di 5-10 m di altezza che corre parallela all'attuale corso del Gange.

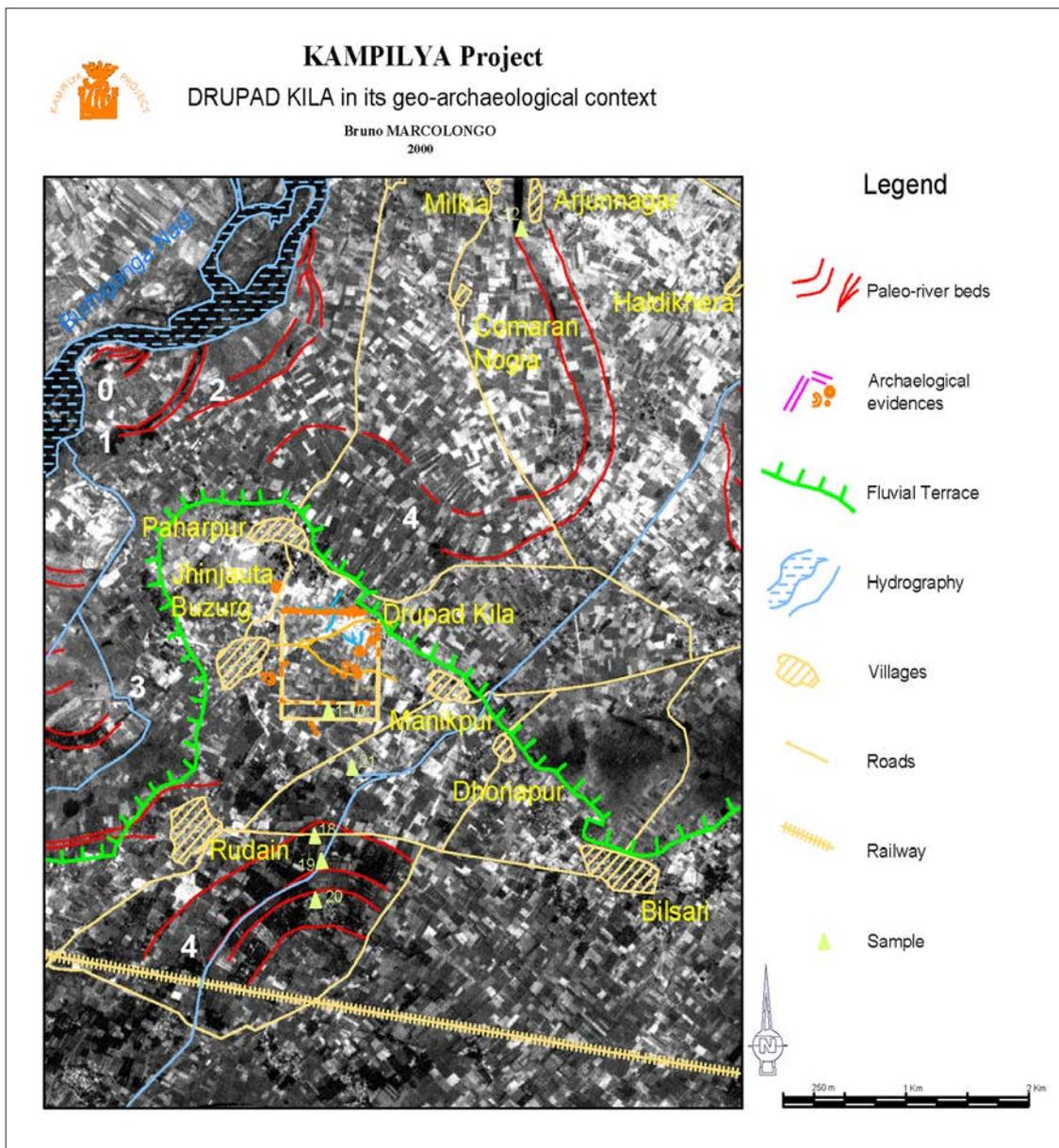


Figura 184: Dettaglio dell'interpretazione geoarcheologica centrato su Drupad Kila (Marcolongo 1998, 2001).

L'analisi di dettaglio sul sito (Figure 185-186) ha evidenziato sinteticamente quanto segue: un terrazzo fluviale principale, sulla cui sommità è situato il complesso 'Drupad Kila'; un terrazzo secondario e probabilmente più giovane che fiancheggia la porzione meridionale della città murata; un'importante direzione di flusso paleo-Ganga con andamento tortuoso, che presenta una biforcazione proprio di fronte al villaggio di Manikpur (500 m a est di Drupad Kila, Figura 184); infine, un episodio minore di paleo-flusso interessante la fascia meridionale di Drupad Kila.

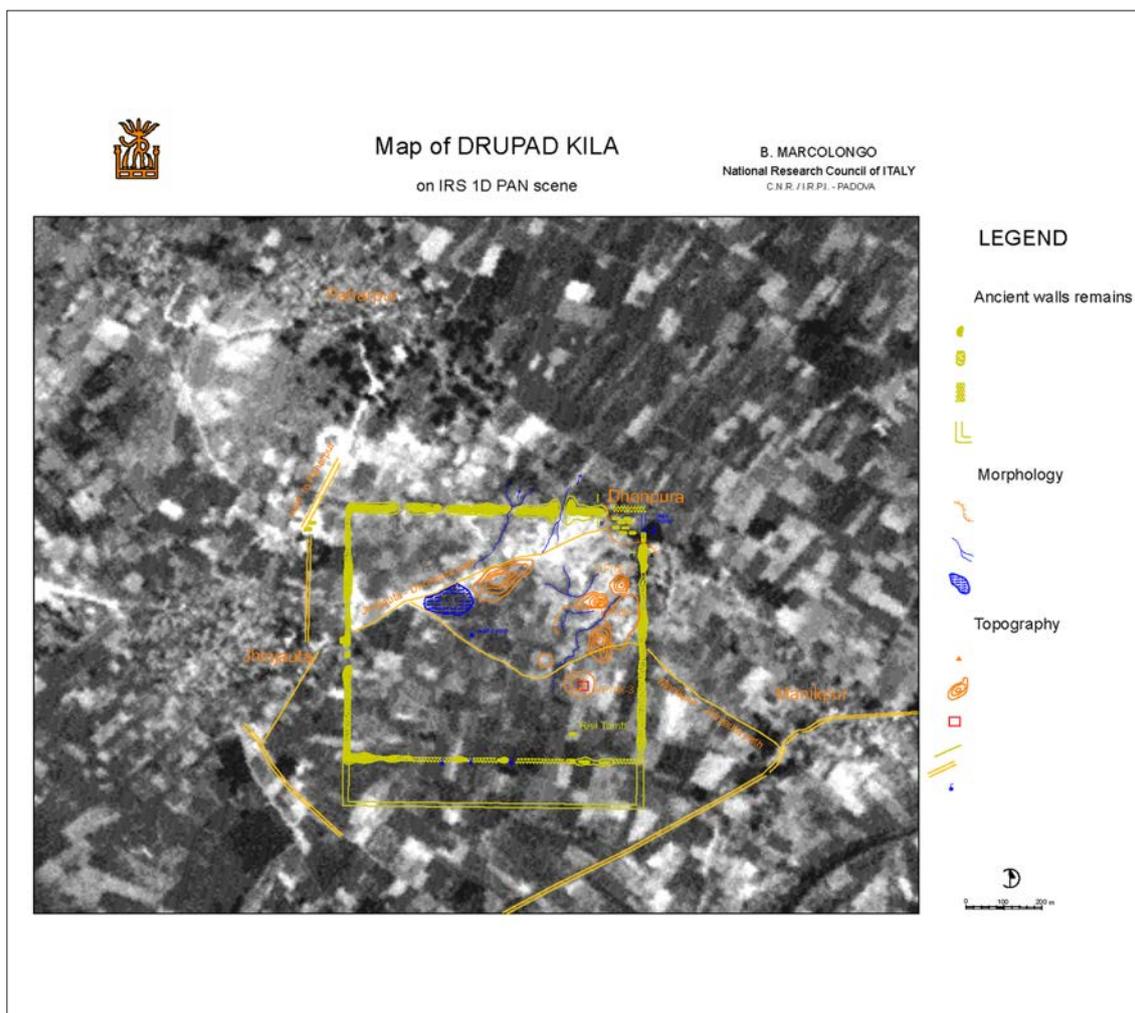


Figura 185: Drupad Kila su Irs 1D PAN (Marcolongo 1998, 2001).

All'interno di Drupad Kila sono sparsi molti cumuli di dimensioni e altezza variabili. Per il momento solo alcuni tra quelli più sviluppati sono stati segnalati sulla mappa (Figure 185-186), tuttavia tutti si trovano nel quartiere nord-est, indicando forse sia una concentrazione di importanti edifici pubblici sia un'occupazione residenziale più lunga e importante. In questa parte, a causa dell'energia di rilievo relativamente più elevata generata da strati antropici più spessi, l'erosione pluviale e di ruscellamento superficiale ha inciso profondamente nel terreno formando un terrazzo locale e un piccolo *talweg*.

L'angolo nord-est delle murature in mattoni cotti, come accennato in precedenza, appare distrutto per una lunghezza rispettivamente di 100 m lungo il lato nord e 80 m lungo il lato

est. Una scarpata terrazzata delimita i depositi antropici, come espressione del rimodellamento morfogenetico tardivo del terrazzo fluviale maggiore prima del definitivo abbandono dell'antica direzione di flusso del Gange.

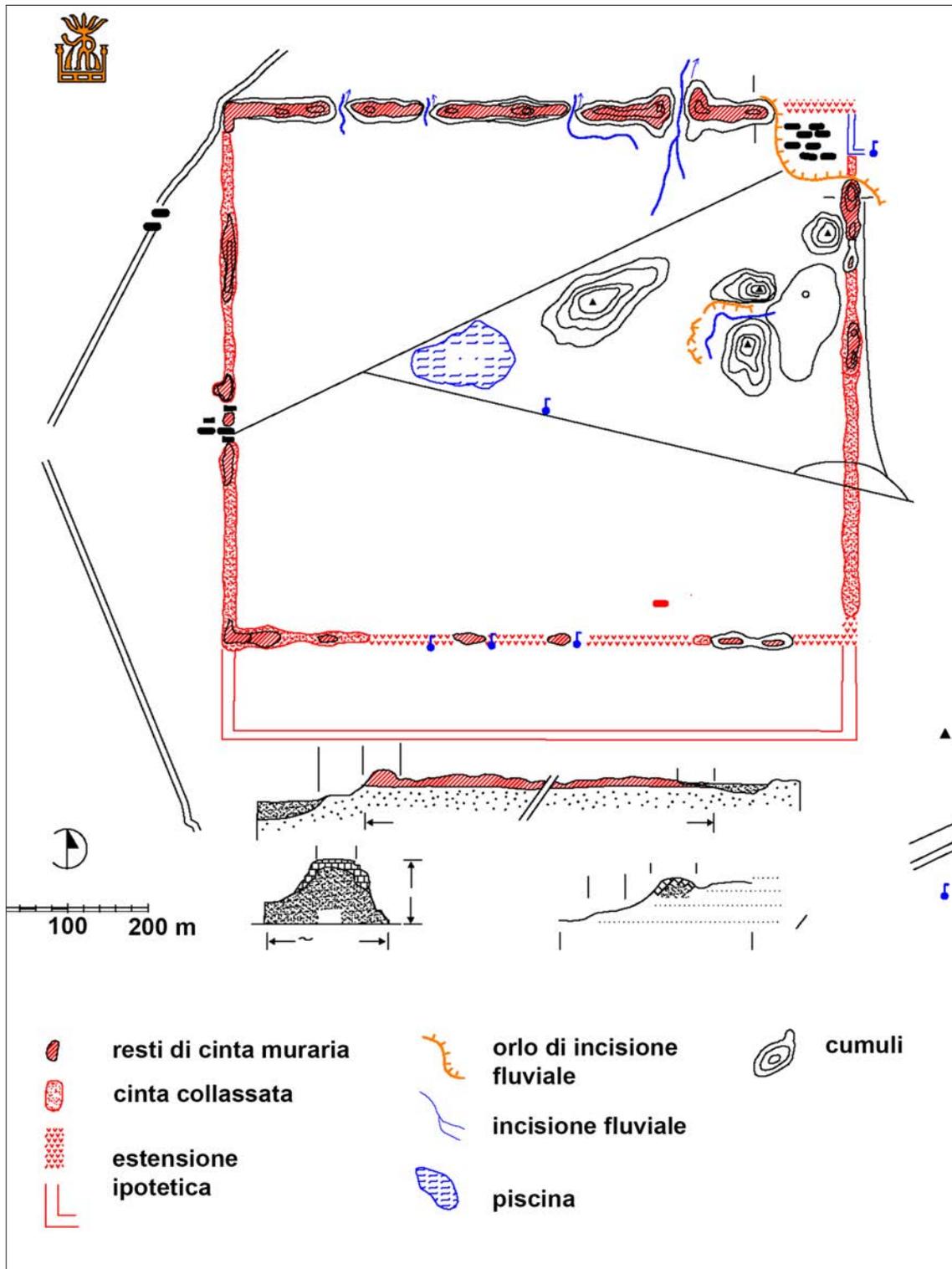


Figura 186: Planimetria del sito (Marcolongo 1998, 2001).

Uno stagno di forma ellittica, che copre circa 1 ettaro con acqua bassa, è un elemento di rilievo a circa cento metri a O-NO dal centro della città murata. Si può ipotizzare che, sebbene per il momento manchino precise misure altimetriche e idrologiche, questo corpo idrico sia formato dall'emersione di acque sotterranee locali, forse una falda freatica arroccata alloggiata nei depositi alluvionali sottostanti le strutture di Drupad Kila. Cioè, questo peculiare vaso deve aver caratterizzato sin dall'inizio il sito, tenendo conto solo delle probabili variazioni di estensione dovute alle fluttuazioni superficiali delle acque sotterranee.

Il paleo-corso maggiore è correlabile con il già citato argine naturale numero 4. In un contesto cronologico appare quindi una delle più recenti tra le varie tracce paleo-fluviali e deve essere stato attivo durante l'Olocene medio-recente probabilmente fino al periodo protostorico e storico. Un ulteriore passaggio nel progressivo spostamento del Gange verso NE è testimoniato dal corso storico di Burhiganga Nadi, distante da esso alcuni km nella pianura alluvionale. La sua azione morfogenetica è responsabile dell'incisione della scarpata posta da pochi metri fino a 10 m al di sopra dell'attuale golena. Questa scarpata taglia l'angolo NE di Drupad Kila, indicando così chiaramente che il Gange vi scorreva ancora durante la vita del sito (orlo di incisione fluviale in Figura 186) e probabilmente ne ha causato l'abbandono, almeno come insediamento stabile e organizzato, dopo una serie di rovinose inondazioni. Da osservazioni archeologiche preliminari la parte superiore visibile di Drupad Kila abbraccia ragionevolmente un periodo che va dalla seconda metà del primo millennio a.C. al primo secolo d.C.

La direzione del paleo-flusso minore, serpeggiante da ovest a est nella porzione meridionale dell'area, è la prova di una o più alluvioni sopra argine che potrebbero aver distrutto e seppellito, sotto pochi metri di sedimenti fini (sabbie limose e argillose), una fascia di Drupad Kila, la cui larghezza si potrebbe dedurre essere di circa 120 m. In altre parole, un sito più antico si sarebbe potuto estendere su un quadrato di 780 m di lato, mentre uno più giovane si sarebbe potuto ridurre a una forma rettangolare di 780 x 660 m<sup>2</sup>.

In sintesi, l'attività morfogenetica del paleo-Gange localmente è stata caratterizzata prima da alluvioni e deposizione, poi da erosione e trasporto di sedimenti e infine da marcati spostamenti dell'alveo. La maggior parte dei tumuli individuati intorno a Drupad Kila si trovano anche lungo i bordi del terrazzo fluviale e ciò è particolarmente vero per la cosiddetta Fortezza di Ghadi, la cui posizione sembra quasi controllare un guado di acque poco profonde attraverso il vecchio corso del Gange.

Questi elementi paleo-idrografici, estesi all'intero quadro complessivo, creano notevoli discontinuità morfologiche, rompendo la monotonia di un paesaggio relativamente pianeggiante e devono aver esercitato fin dall'antichità una forte attrazione per l'insediamento umano in termini di rilievo topografico e disponibilità di risorse naturali (falde acquifere poco profonde e suoli più fertili in corrispondenza degli argini naturali sabbioso-limosi). Infatti, molti siti in quest'area, con attestate testimonianze archeologiche almeno risalenti all'età del ferro, appaiono distribuiti lungo il terrazzo fluviale appena citato (es. Aurangabad, Bhargain, Bilsari, Kampil, Raipur Mothra, Bithur, Bhojpur, Jajmau).

## 6.2 Mongolia. Sulle orme degli antichi pastori erranti dell'Asia

La Mongolia, che sotto l'aspetto morfologico-fisiografico può definirsi un acrocoro, è un Paese in via di sviluppo con un vasto territorio (circa 1.565.000 kmq), bassa densità di popolazione (1 ab/kmq) e un patrimonio culturale e storico (siti preistorici, arte rupestre, monumenti protostorici e storici, iscrizioni, resti di antichi monasteri) di notevole valore.

Crocevia di carovane che calcavano la via di migrazione meridiana –asse nord-sud– (da e per gli altopiani tibetani), o quella parallela –asse est-ovest– (da e per il Caspio e il Bacino Mediterraneo *lato sensu*), si incontra l'isolato e maestoso massiccio della Montagna Sacra, Ikh Bogd Uul (3.956 m s.l.m.), 'Dea Madre' venerata da sempre, che riprende nel suo grembo gli antenati morti e cela, come uno scrigno prezioso, molteplici testimonianze archeologiche tra cui 'petroglifi' che parlano al viandante il linguaggio senza tempo dei simboli (Figura 187).



Figura 187: Ikh Bogd Uul.

#### 6.2.1 Punti cospicui e contesti funerari

A cavallo degli anni 2000, e per 15 anni, un progetto geoarcheologico congiunto Italo-Mongolo CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche) - MAS (Accademia delle Scienze Mongola) ha condotto prospezioni e scavi nell'area gravitante attorno al lago Orog Nuur, ai piedi della 'Grande Montagna Sacra' (Gobi Altayn) (Marcolongo e Gunchinsuren 2007; Dal Zovo *et al.* 2014) (Figura 188).



Figura 188: La Grande Montagna Sacra.

La prima ricognizione di campagna fu progettata sulla base di una ricerca bibliografica, affiancata dall'acquisizione di carte topografiche a varia scala, ma soprattutto da una interpretazione geoarcheologica preliminare di immagini multispettrali da satellite Landsat-7ETM e immagini radar ERS-SAR (Figure 189-190). Questo lavoro propedeutico ebbe a ridurre i tempi e i costi della fase esplorativa, compiuta in una regione con precaria o nulla rete viaria.

Molti gruppi di *khurgan* e altre strutture tombali, localmente chiamate *khirigsuur*, appartenenti all'Età del Bronzo e del Ferro (periodo Hsiung-nu, III sec. a.C. – I sec. d.C.), sono state localizzate ai piedi della catena dei Gobi Altayn (Figura 191). In particolare sono rilevanti le concentrazioni di tumuli funerari in due ampi conoidi alluvionali presso Orog Nuur, indicati con chiazze verdi nella legenda in Figura 191, e lungo l'affluente del lago Biincagaan Nuur/ Bayansair Nuuru, localizzato più a NO (Figure 194-195).

Nel primo caso, si tratta di un totale di 246 tumuli, articolati in 81 *khirigsuur* con recinzione esterna rettangolare, 20 *khirigsuur* con recinzione esterna circolare, 70 *khirigsuur* senza alcuna recinzione esterna, 23 tombe a lastre, 52 tombe a forma di cerchio e 2 tombe poco chiare o molto disturbate (Figure 192-193). Nel secondo caso, spesso i tumuli maggiori sono accompagnati da piccole tombe satelliti, che contengono le spoglie di cavalli (Figura 196).

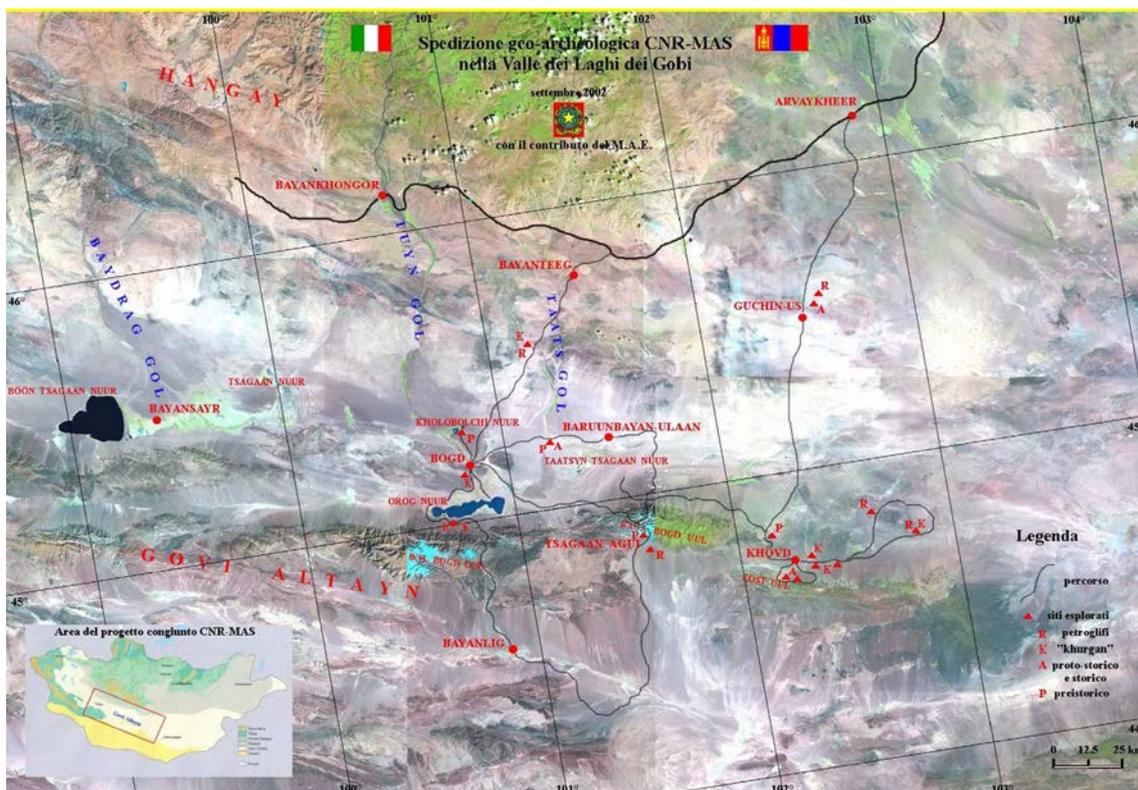


Figura 189: Itinerario, su immagine Landsat ETM a falsi colori, della prima spedizione congiunta Italo-Mongola CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche) - MAS (Accademia delle Scienze) nella vallata dei Laghi, ai piedi della 'Grande Montagna Sacra' (Gobi Altayn) (Marcolongo 2003).



Figura 190: Immagine Landsat-7ETM a colori falsati. Il lago di Orog (Orog Nuur) è ben riconoscibile poco sopra al centro della scena (colore blu scuro). In colore pastello sono evidenziate le coltri nevose della catena dei Gobi Altayn (Marcolongo 2003).

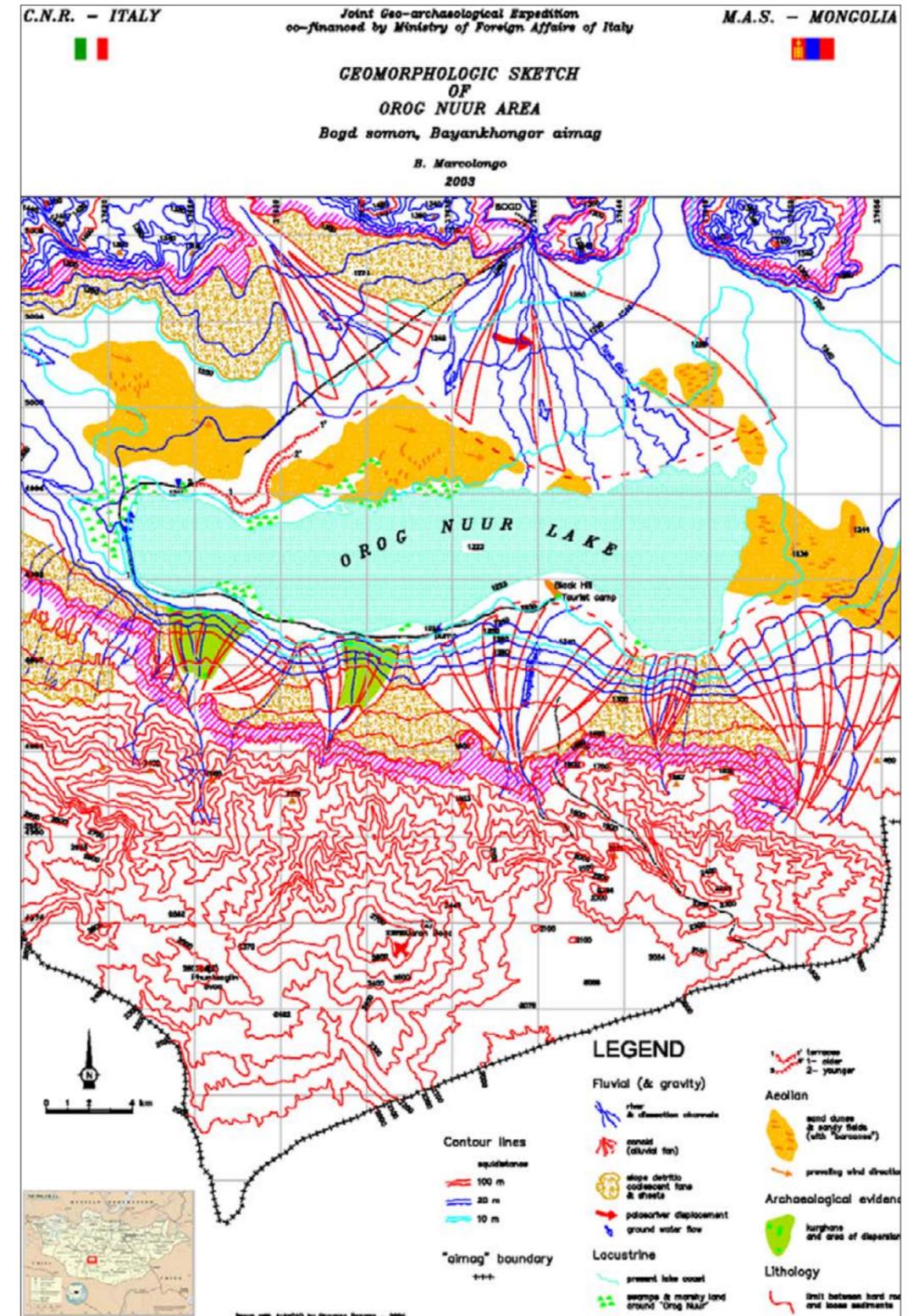


Figura 191. Interpretazione geoarcheologica attorno a Orog Nuur (Marcolongo 2003).

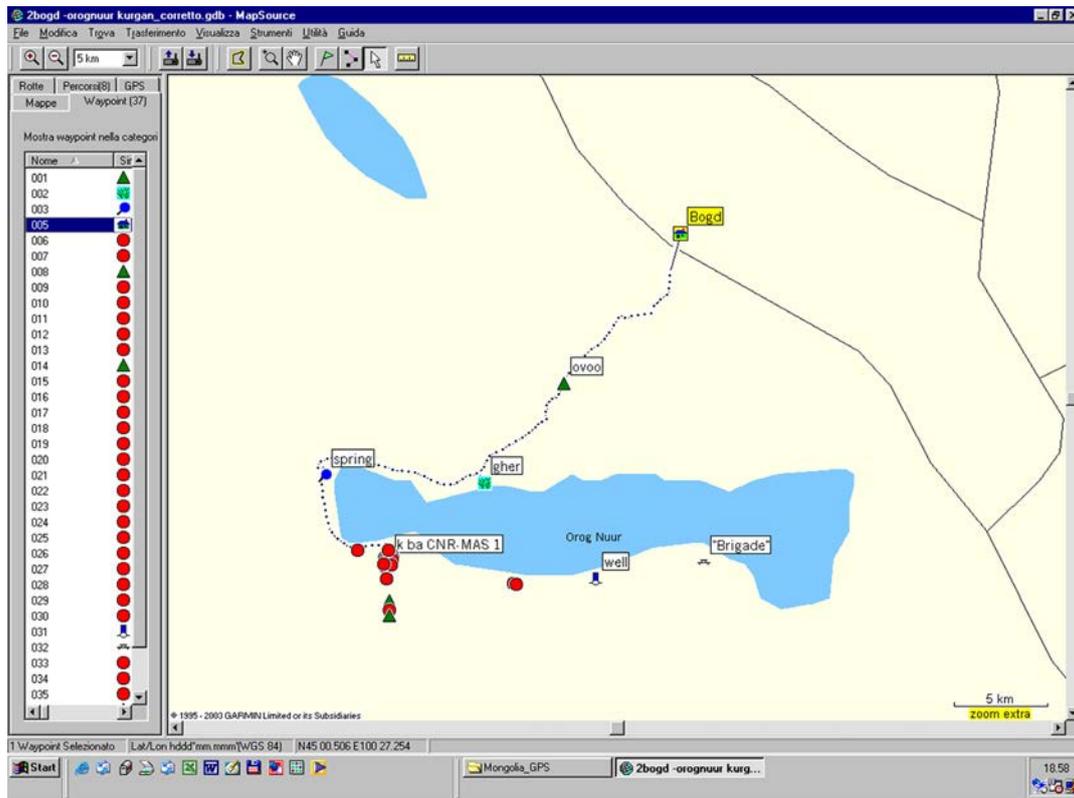


Figura 192: Necropoli scoperta durante la spedizione congiunta CNR-MAS nell'agosto 2002 all'estremità sud-occidentale del lago Orog Nuur, partendo da una interpretazione geoarcheologica preliminare su immagini Landsat-7ETM e radar ERS-SAR (Marcolongo 2003).



Figura 193: Sito CNR-MAS 1 scavato nell'agosto 2003 (sullo sfondo, verso nord, l'Orog Nuur) Il tumulo ad anello o khirigsuur era circondato da un recinto rettangolare in pietra (Marcolongo 2003).

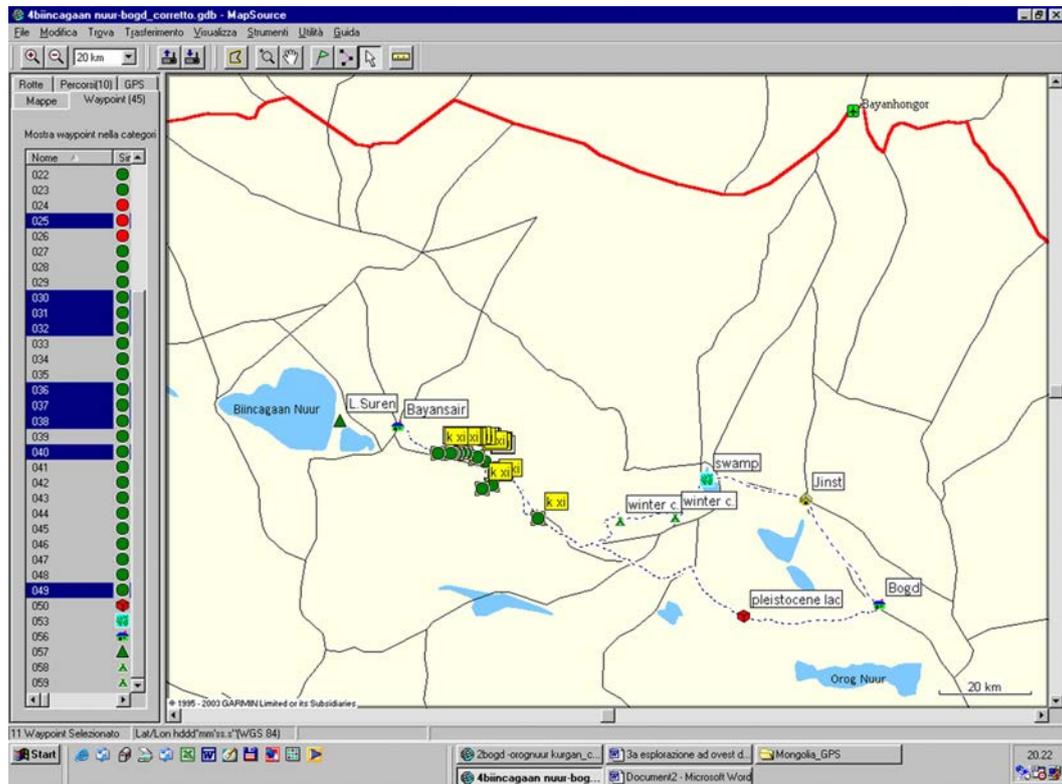


Figura 194: Grande necropoli di khurgans 'Xiongnu' sul glacis di Dund Argalaut Nuruu, centrata a  $N 45^{\circ} 29' 26.3''$ ,  $E 99^{\circ} 39' 12.6''$  a est di Bayansair (Marcolongo e Gunchinsuren 2007).



Figura 195: Immagine radar ERS SAR. La chiazza scura è il lago di Bayansair Nuuru, che mostra tutta una serie di variazioni di linee di costa lungo il suo bordo orientale. I tumuli sono distribuiti lungo la vallata del piccolo immissario che alimenta il lago (Marcolongo e Gunchinsuren 2007).



Figura 196: Tomba satellite con resti di cavallo (Marcolongo e Gunchinsuren 2007).

Accanto alle numerosissime tombe a tumulo distribuite tutto lungo la Vallata dei Laghi e al bordo degli stessi, durante le ricognizioni sul terreno sono stati trovati centinaia di petroglifi di varie epoche, incisi sui fianchi granitici dell'Ikh Bogd Uul (Figura 197).



Figura 197: Frequenti motivi graffiti: Gobi ibex (*Capra sibirica hagenbecki*) e 'argali' (*Ovis ammon mongolica*) (Marcolongo e Gunchinsuren 2007).

La densità di tutte queste emergenze antropiche sparse lungo la Vallata dei Laghi ha confermato il perdurare nel tempo di una grande direzione di spostamento e circolazione nomadica, intuibile da subito fin dall'inizio della ricerca che, solo grazie al diffuso utilizzo di molti dati tele-rilevati, ha potuto svilupparsi con successo in un ambiente molto duro e sconosciuto, privo di ogni riferimento stradale al suolo e dipeso esclusivamente da un approccio di tipo teleguidato.

### 6.3 Italia. Ricostruzione paleo-ambientale della Valle d'Agredo da immagini telerilevate

La Valle d'Agredo, conferita da Ugo di Provenza, re d'Italia, il giorno di Natale del 926 al vescovo Adalberto della diocesi trevigiana, è ricordata storicamente come un vasto territorio di pianura includente gli attuali Comuni di Castelfranco, Camposampiero, Noale e Mirano.

I suoi confini, tuttavia, non sono meglio definiti, anche per l'assenza di limiti fisiografici cospicui in un contesto planiziale a prima vista relativamente omogeneo. A ciò va aggiunta la presenza *in loco* di una forte pressione antropica, caratterizzata da una elevata densità di insediamenti sia residenziali che industriali, accompagnata da una vistosa attività estrattiva soprattutto lungo la fascia mediana delle risorgive, che non solo interferisce con la qualità della risorsa idrica, ma contribuisce anche a velare o mascherare non poco i tratti naturali del paesaggio.

La situazione ambientale odierna, quindi, non agevola certo il tentativo di riconoscere e ridisegnare l'estensione dell'antica Valle d'Agredo, che senza dubbio deve aver rappresentato per lungo tempo una solida realtà dapprima fisiografica e poi culturale, fissata attraverso le generazioni sia nel comune sentire popolare che nella dotta tradizione letteraria.

#### 6.3.1 Per una definizione dell'unità morfologica in esame

Nel caso qui trattato, se si osserva da un privilegiato punto prospettico esterno, riconducibile alle orbite dei satelliti Sojuz o Aster, il lembo dell'alta pianura padovana e trevigiana dove un tempo doveva estendersi la Valle d'Agredo (Figure 198-199), ci si accorge subito della intensità della pressione antropica esercitata sull'ambiente, espressa da un paesaggio molto rimodellato in cui le forme dell'uomo tendono a nascondere e talora a cancellare quelle della natura.

In questo contesto il territorio del Comune di Trebaseleghe occupa una posizione baricentrica prevalente, con un asse di sua massima estensione orientato (NE-SO) perpendicolarmente a quello che doveva essere l'asse di sviluppo fisiografico longitudinale della storica Valle d'Agredo (SE-NO).

L'indeterminazione, tuttavia, dei confini della Valle d'Agredo, che sconfinava quasi nell'incertezza di una loro reale consistenza, ha stimolato una analisi del territorio, delle sue forme e della sua evoluzione temporale, costruita sul confronto e l'integrazione di informazioni storiche, letterarie e naturalistiche con i dati telerilevati disponibili. Si è quindi cercato di raccogliere tutto il materiale bibliografico e cartografico utile, con particolare riguardo alle ricerche di carattere geomorfologico, paleo-idrografico e paleo-ambientale.

L'area di interesse ricade interamente nella 'unità morfologica' dell'antico conoide del Brenta, 'conoide relitto di Bassano' del Pleistocene superiore (Bondesan 1998, 2003), che si allunga in senso NO-SE dallo sbocco in pianura del fiume all'uscita della Valsugana fino alla fascia circumlagunare veneziana.

Tale ampio ventaglio di deposizione tardiglaciale (periodo compreso all'incirca tra 17.000 e 11.000 anni da oggi) mostra chiaramente una pendenza decrescente verso SE con valori attorno al 5‰ nella parte di alta pianura, ovvero fino alla linea Cittadella - Castelfranco, per poi ridursi fino all'1‰ e anche meno lungo il bordo della laguna. La seconda fascia di media e bassa pianura è segnata da una serie di bassi dossi fluviali e connesse depressioni interposte, che rappresentano diramazioni del Brenta preistorico. I paleo-alvei si elevano a meno di 2 m sulla piana circostante, con una larghezza da qualche centinaio di metri a 1-2 km e uno sviluppo che può superare i 15 km.

Il dosso sabbioso su cui oggi sorgono centri abitati quali Piombino Dese, Trebaseleghe e Scorzè appare, con i suoi quasi 20 km di lunghezza, il più continuo ed esteso dell'intera area (Figure 200-201).

Come si vedrà più avanti, l'analisi del microrilievo riportato in diversi contributi scientifici (Bondesan 1998, 2003) costituisce proprio uno dei punti di partenza per ritrovare la possibile identità fisiografica della storica Valle d'Agredo.

Anche la natura dei terreni e la distribuzione areale dei vari suoli diventano in questa ricerca un elemento importante per consolidare la ricostruzione della estensione della Valle stessa. Si è qui ripresa, infatti, una carta pedologica di dettaglio alla scala 1:25.000 (drappeggiata in Figura

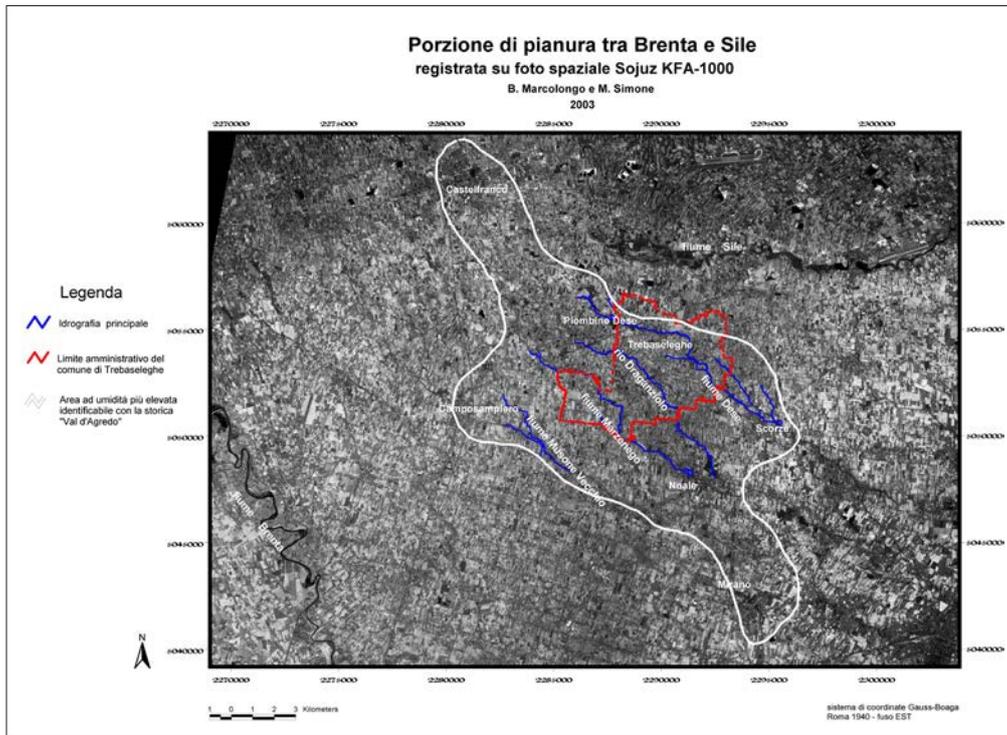


Figura 198: Stralcio dell'immagine Sojuz KFA 1000 con la delimitazione dell'area più umida estesa in senso NO-SE attraverso i territori dei Comuni di Castelfranco, Piombino Dese, Trebaseleghe, Camposampiero, Scorzè, Noale e Mirano (Marcolongo, Ninfo e Simone 2006).

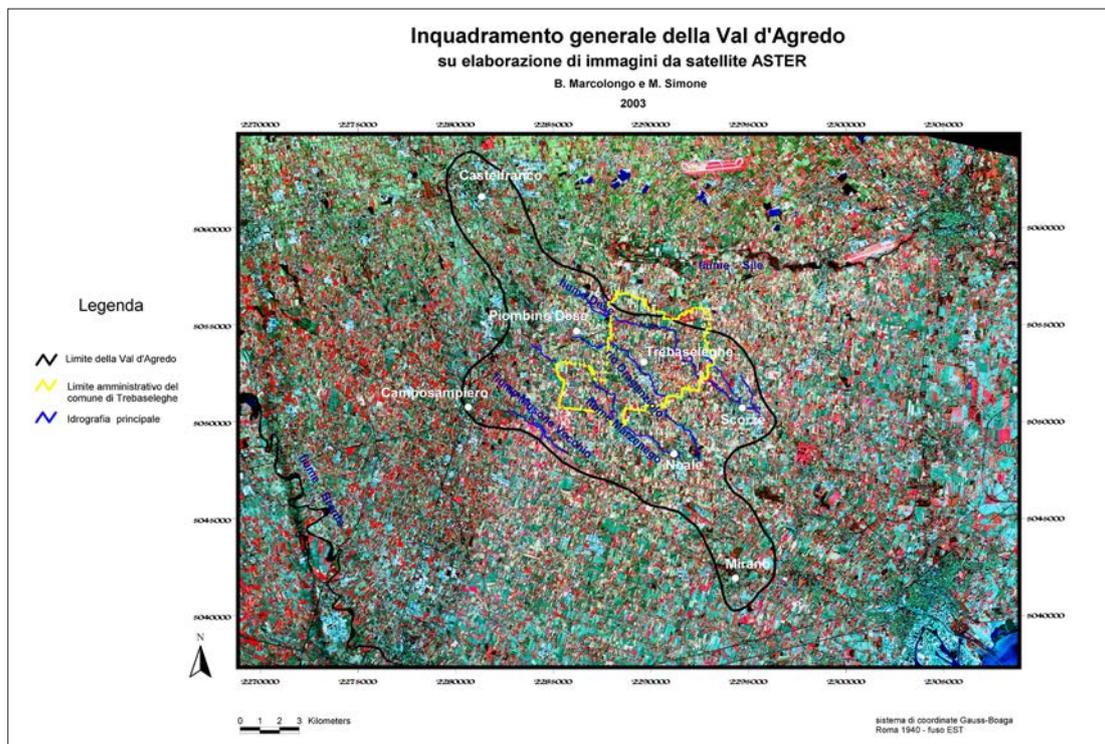


Figura 199: Tracciato sulla elaborazione di una ripresa Aster, che descrive in modo più aggiornato agli inizi del 2002 l'uso del suolo nell'area dello studio (Marcolongo, Ninfo e Simone 2006).

200) che interessa proprio i Comuni di Piombino Dese e Trebaseleghe, edita dall'Ente di Sviluppo Agricolo del Veneto (Mozzi *et al.* 1996), che sottolinea tra l'altro la stretta correlazione tra i suoli a tessitura sabbiosa e le fasce di culminazione dei dossi nell'area specifica.

Bisogna aggiungere, inoltre, che nel territorio del Comune di Trebaseleghe sono state individuate, attraverso l'interpretazione dei dati telerilevati e cartografici, tre anomalie del fitto e regolare mosaico di parcelle agrarie che ricopre l'intera piana, ad andamento dei campi grossomodo sub circolare o ellittico (simboleggiate con chiazze viola sulla carta in Figura 201). Anch'esse ricadono su cordoni sabbiosi e si dispongono lungo un allineamento che taglia trasversalmente l'asse della storica Valle d'Agredo, rispettivamente la prima in località Fossalta, la seconda poco a SO del centro abitato di Trebaseleghe e la terza in località S. Ambrogio. Tracce o ricordo di tali anomalie paesaggistiche, che rimandano per analogia di forma a delle 'motte', si hanno in una cartografia degli inizi dell'800<sup>22</sup> dove soprattutto la struttura in prossimità del paese di Trebaseleghe possiede prominenza morfologica, anche se appare erosa e ridisegnata dai lavori agricoli.

### 6.3.2 L'analisi telerilevata

Contestualmente alla raccolta e al riesame comparato degli elementi bibliografici ora menzionati, si è proceduto ad acquisire e a elaborare le immagini telerilevate, sia multispettrali sia pancromatiche, esistenti. La loro interpretazione, sovrapposta ai dati di cartografia digitale della Regione del Veneto, ha fornito informazioni complementari alle precedenti sul territorio investigato, come l'umidità dei terreni e la presenza di strutture pseudocircolari riferibili a 'motte', che hanno arricchito la descrizione della Valle d'Agredo.

L'immagine inizialmente utilizzata è stata una foto cosmica spettro-zonale Sojuz KFA 1000, ripresa nel giugno 1990 da una piattaforma spaziale russa in orbita a 270 km di altezza con una buona risoluzione geometrica a terra di 5 m. Essa evidenzia in modo marcato la presenza di una larga fascia di terreni allungata NO-SE a tonalità più scura, grossomodo delimitata nella Figura 198.

È molto significativo notare come in questa fascia ricadano tutti e quattro i centri abitati elencati nella donazione di Ugo di Provenza al vescovo Adalberto, che si ricorda in apertura. Verosimilmente è l'espressione dell'esistenza di una fascia di umidità più elevata, connessa alle direzioni preferenziali di deflusso idrico sotterraneo che continuano a seguire i rami preistorici del Brenta a cui si è fatto cenno prima.

Sono state successivamente analizzate delle immagini Aster (Figura 199) riprese nel dicembre 2001 e febbraio 2002, con una risoluzione geometrica a terra di 15 m, fornite dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti - Magistrato alle Acque di Venezia/Concessionario Consorzio Venezia Nuova. La loro interpretazione ha ribadito la presenza di una fascia mediana più umida e omogenea come tessitura del terreno lungo la direttrice Piombino Dese - Trebaseleghe - Noale - Mirano, che si è già visto poter corrispondere all'asse longitudinale della storica Valle d'Agredo.

Da ultimo, per spingere lo studio a un livello di dettaglio superiore nel territorio del Comune di Trebaseleghe, data la sua peculiare centralità all'interno della riconosciuta fascia isotropa, sono state opportunamente trattate e interpretate anche varie immagini Ikonos, registrate nel luglio 2002 con una elevata risoluzione geometrica a terra (4 m per le bande multispettrali e 1 m per quella pancromatica) e messe a disposizione dal medesimo concessionario Consorzio Venezia Nuova.<sup>23</sup> Il loro contributo si esplica soprattutto nella fine descrizione del mosaico di particelle agrarie, che testimonia con gli orientamenti e la fitta griglia geometrica di canali irrigui o di scolo, strade interpode-

<sup>22</sup> *Topographisch-geometrische Kriegs karte von dem Herzogthurns Venedig* (Carta militare topografico-geometrica del ducato di Venezia), Generale Anton von Zach, 1798-1804.

<sup>23</sup> Tutti i dati telerilevati sono stati appoggiati su una base geometrica corretta, costituita dalla cartografia numerica digitale alla scala 1:5.000 che la Segreteria Regionale al Territorio della Regione del Veneto ha prodotto nella seconda metà degli anni '90.

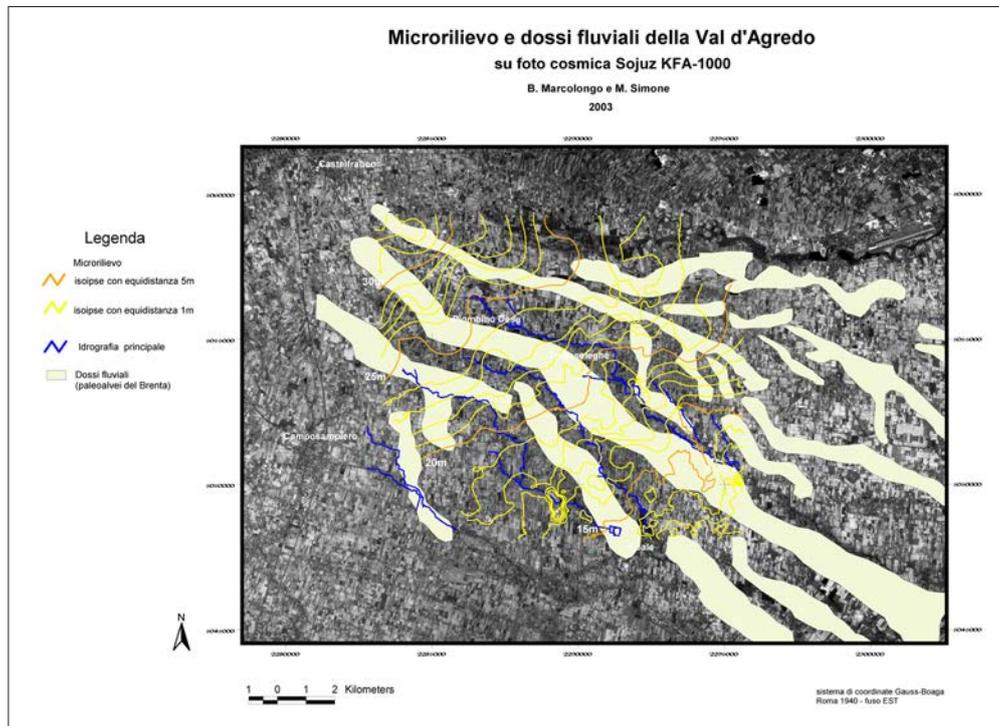


Figura 200: Andamento dei dossi sabbiosi, espressione degli alvei del Brenta tardiglaciale, che segnano in modo caratteristico il territorio della Valle d'Agredo, ripresi da fonte bibliografica (Bondesan 1998, 2003). Essi definiscono tra l'altro delle strette e allungate depressioni interdosso che guidano il corso dei principali fiumi di risorgiva della zona, quali il Dese, il Marzenego e il Musone Vecchio. La ramificazione più sviluppata e continua risulta essere quella che taglia trasversalmente i Comuni di Piombino Dese, Trebaseleghe e Scorzè. Questa forma positiva del rilievo che, seppur debolmente, segna un piatto paesaggio di pianura, deve essere identificata con l'asse longitudinale della storica Valle d'Agredo, entità fisiografica rimasta radicata per lungo tempo nella memoria dell'uomo (Marcolongo, Ninfo e Simone 2006).

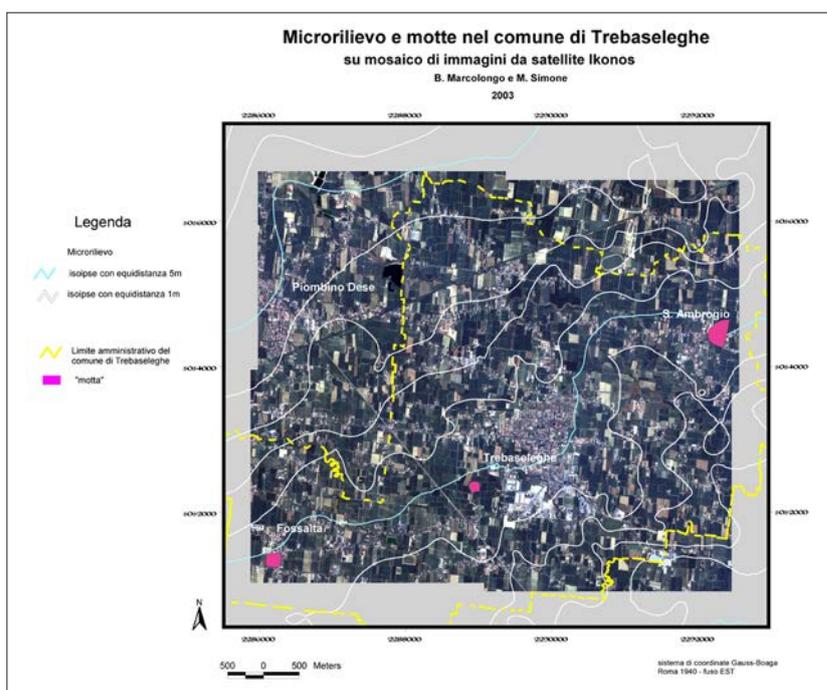


Figura 201: Sviluppo del microrilievo con le isopse generate automaticamente da un opportuno software (Idrisi) a partire dalle quote puntuali della cartografia numerica digitale della Regione del Veneto alla scala 1:5.000. Risulta evidente la localizzazione dell'abitato di Trebaseleghe sulla sommità del dosso sabbioso ora citato, delimitato lateralmente da fasce di terreni più fini di antica esondazione fluviale (Marcolongo, Ninfo e Simone 2006).

rali e confini di proprietà, la sopravvivenza di un antico sistema di partizione dell'agro identificabile con la porzione più occidentale della centuriazione romana di Altino (Figura 202) (Bondesan 1998).

Questi lineamenti di massima già emergevano in una ricerca di carattere più generale condotta negli anni '70 e riguardante l'intera pianura veneta orientale (Marcolongo e Mascellani 1978), un cui stralcio relativo al territorio comunale di Noale appare inserito, quale citazione bibliografica, nel recente lavoro su *CD rom 'Novalis Antiqua'*, edito a cura di A. Fattori. Nel caso presente, tuttavia, la migliorata risoluzione spaziale del dato telerilevato, unita a una visione di sintesi di grande continuità, permette di riconoscere numerose tracce, ancor oggi coincidenti con canali e strade interpoderali, delle centuriazioni di Asolo-Castelfranco-Cittadella, di Paese-Treviso, di Altino e di Padova-Campodarsego (Marcolongo e Mascellani 1978; Costi *et al.* 1992; Bondesan 1998, 2003). La Valle d'Agredo risulta essenzialmente interessata dalla centuriazione di Altino che a nord si estende fino al Sile e a ovest fino al Musone Vecchio.

La storica Valle d'Agredo, oggetto iniziale della ricerca, si configura sempre più attraverso questa ricostruzione delle forme del paesaggio e della loro evoluzione come una vera entità territoriale insediativa, che ricorda e occupa in effetti un preistorico tratto vallivo di pianura del Brenta.

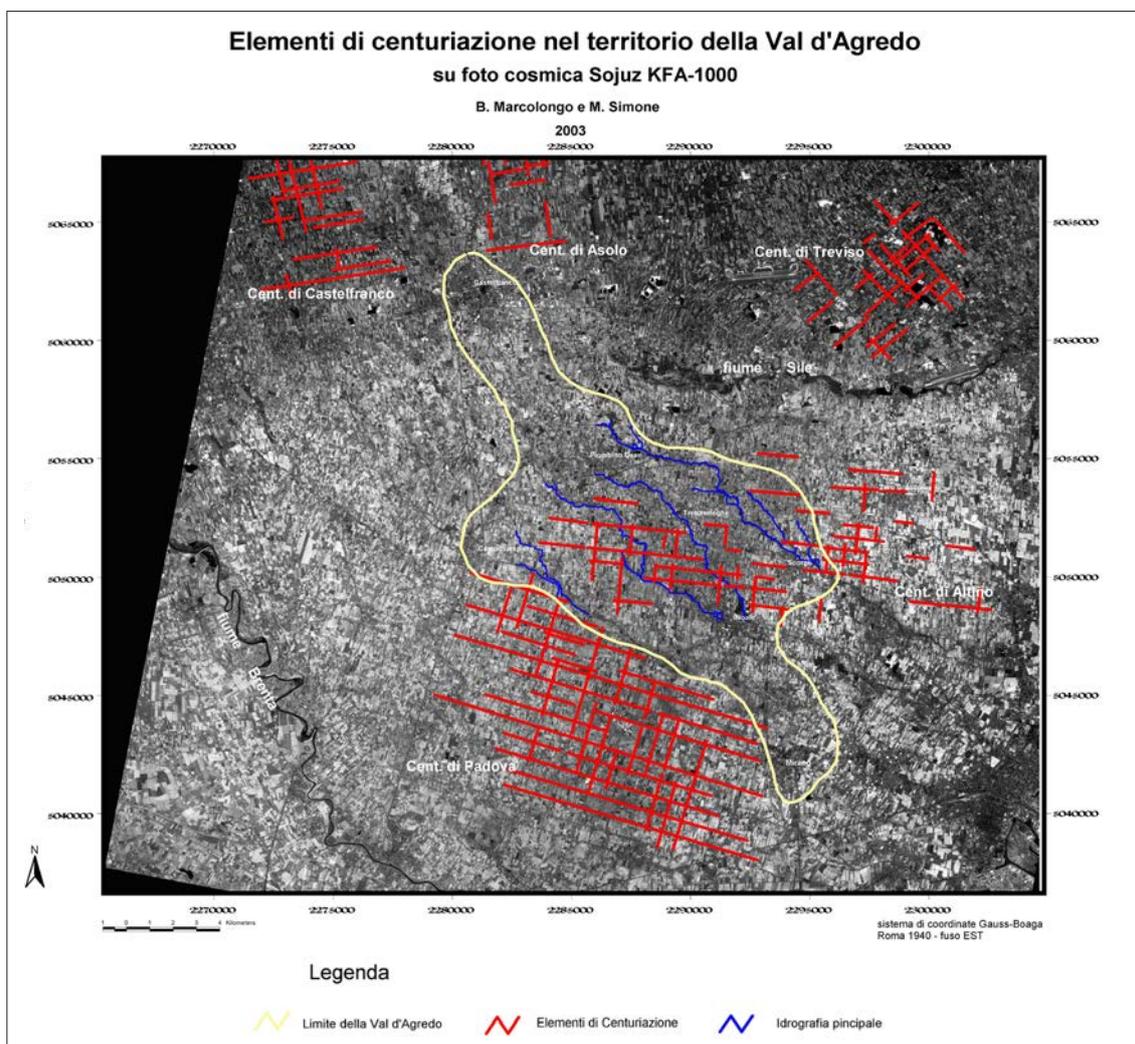


Figura 202: Limiti delle antiche centuriazioni che hanno improntato attraverso i tempi l'area investigata, così come si evidenziano sulla foto cosmica Sojuz (Marcolongo, Ninfo e Simone 2006).

Gli effetti dell'antico ramo fluviale si sono fatti sentire molto più a lungo anche dopo l'abbandono del suo percorso di superficie, attraverso il controllo genetico sullo sviluppo dei corsi minori di risorgiva come il Dese e il Marzenego, il condizionamento della direzione di deflusso della falda freatica e la distribuzione dei terreni di varia tessitura spagliati dal fiume stesso.

L'asse della Valle d'Agredo, giustappoendosi a quello dell'asta tardiglaciale del Brenta, ha rinnovato nel tempo una direttrice fisiografica di connessione tra l'area perilagunare e l'imbocco della Valsugana con l'attivazione in epoca storica di una importante via di comunicazione e commercio, legame tra l'area adriatica e quella alpina continentale. Attorno a tale via si è poi aggregata e sviluppata la complessa organizzazione spaziale del territorio, che una volta di più testimonia come nel paesaggio odierno vi sia frequentemente un adeguamento morfologico del più recente alle forme più antiche, senza la cancellazione totale delle tracce del passato (Figura 203).

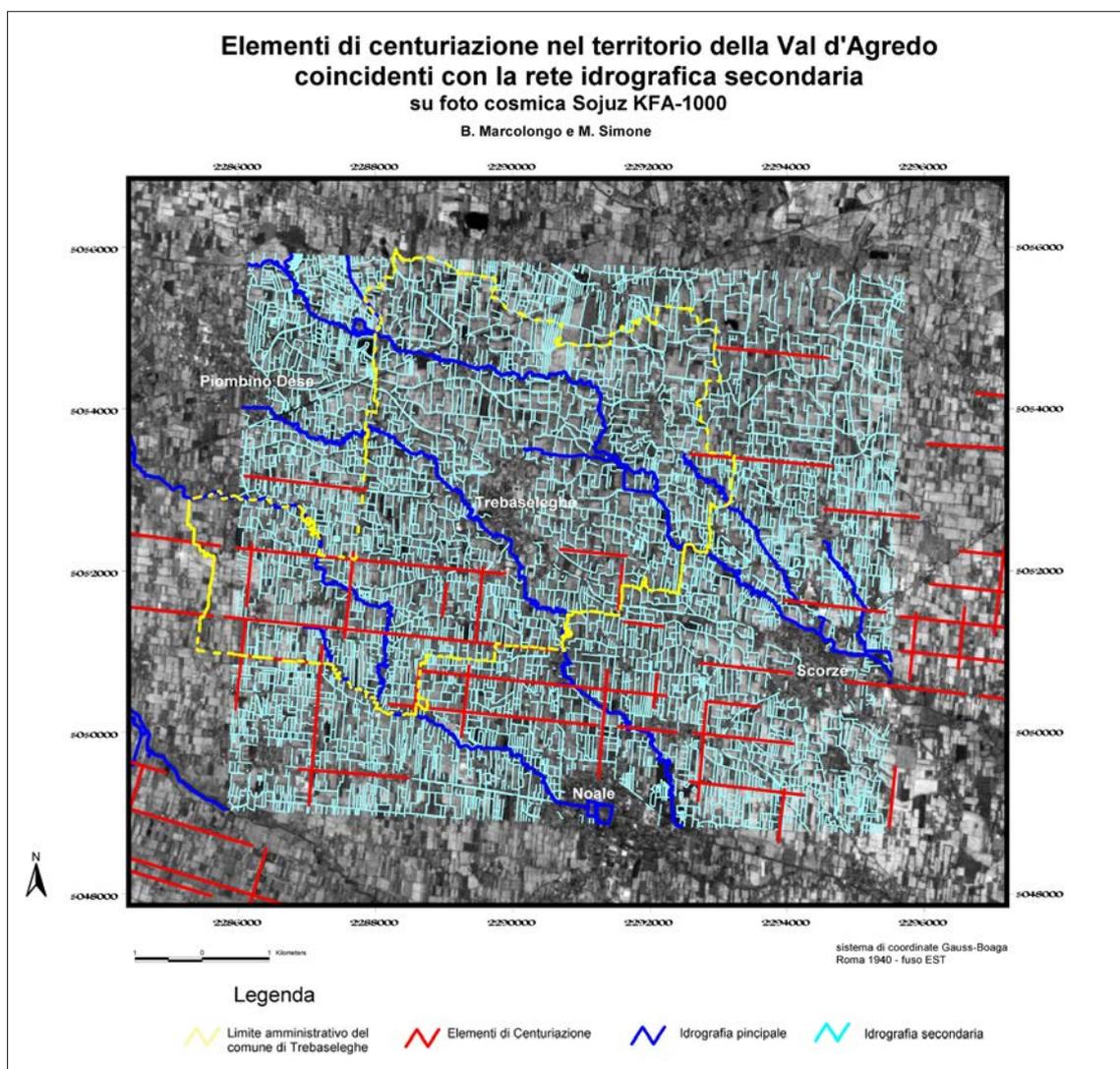


Figura 203: Stralcio della idrografia secondaria nell'area di Trebaseleghe, da cui appare evidente l'impronta che l'antica suddivisione agraria ha lasciato nel paesaggio attraverso il controllo dell'andamento della rete di irrigazione e drenaggio. Ad una lettura attenta emerge che il graticciato romano è relativamente più rarefatto e disgregato in corrispondenza della culminazione del dosso Piombino Dese-Trebaseleghe-Scorzè, che ha esercitato nel tempo una maggiore attrazione sugli insediamenti, tradottasi in una concentrazione di centri abitati e industriali e vie di comunicazione, solo parzialmente giustapposti al reticolo di base (Marcolongo, Ninfo e Simone 2006).

## 6.4 Italia. Centuriazione romana e paleo-idrografia della Pianura Friulana

L'organizzazione agraria della pianura friulana in epoca romana, appartenente alla 'Regio X Venetia et Histria', rappresenta un eccellente esempio di partizione centuriata dell'agro in stretta connessione con il coevo reticolo di drenaggio superficiale e la locale fascia delle risorgive, limite naturale tra l'alta e la bassa piana alluvionale dei fiumi Tagliamento-Torre-Natisone (Figura 204). Un esempio ugualmente esemplificativo delle applicazioni da remoto, nello specifico dall'Italia meridionale, è in Regoli 2003: 72-80.

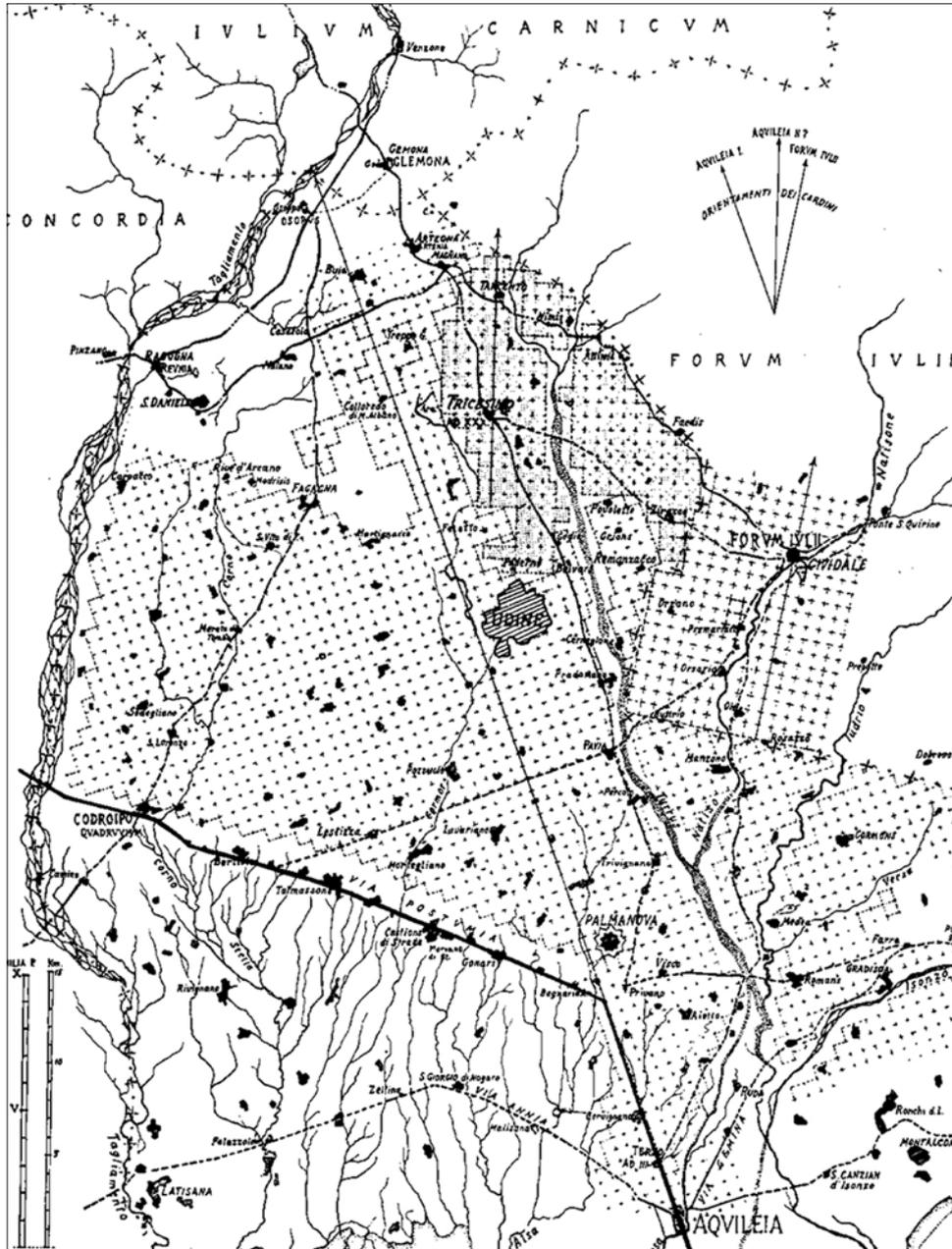


Figura 204: Schema dei principali sistemi di centuriazione romana presenti nella pianura friulana. Si noti che le suddivisioni centuriate non si sviluppano a sud della romana Via Postumia, laddove le acque di 'risorgiva' di numerosi 'fontani' danno origine a tutto un fitto reticolo idrografico (Marcolongo 2000).

#### 6.4.1 Individuazione, identificazione, classificazione e deduzione

Si presenta qui la sintesi di uno studio condotto su immagini del satellite indiano IRS 1D (Figura 205)<sup>24</sup> per ricostruire da un lato l'insieme delle numerose tracce paleo-idrografiche (paleo-alvei, fasce di divagazione, meandri relitti, rotte fluviali), dall'altro il sistema complesso e articolato di centuriazioni romane, che ancora oggi influenza l'architettura del mosaico di particelle agrarie presente (Marcolongo *et al.* 2001). Data l'estensione notevole dell'area (oltre 1.500 km<sup>2</sup>), questo è un tipico esempio della opportunità di impiegare immagini con risoluzioni tra 5 m (PAN) e 25 m (LISS), valide a scala regionale.

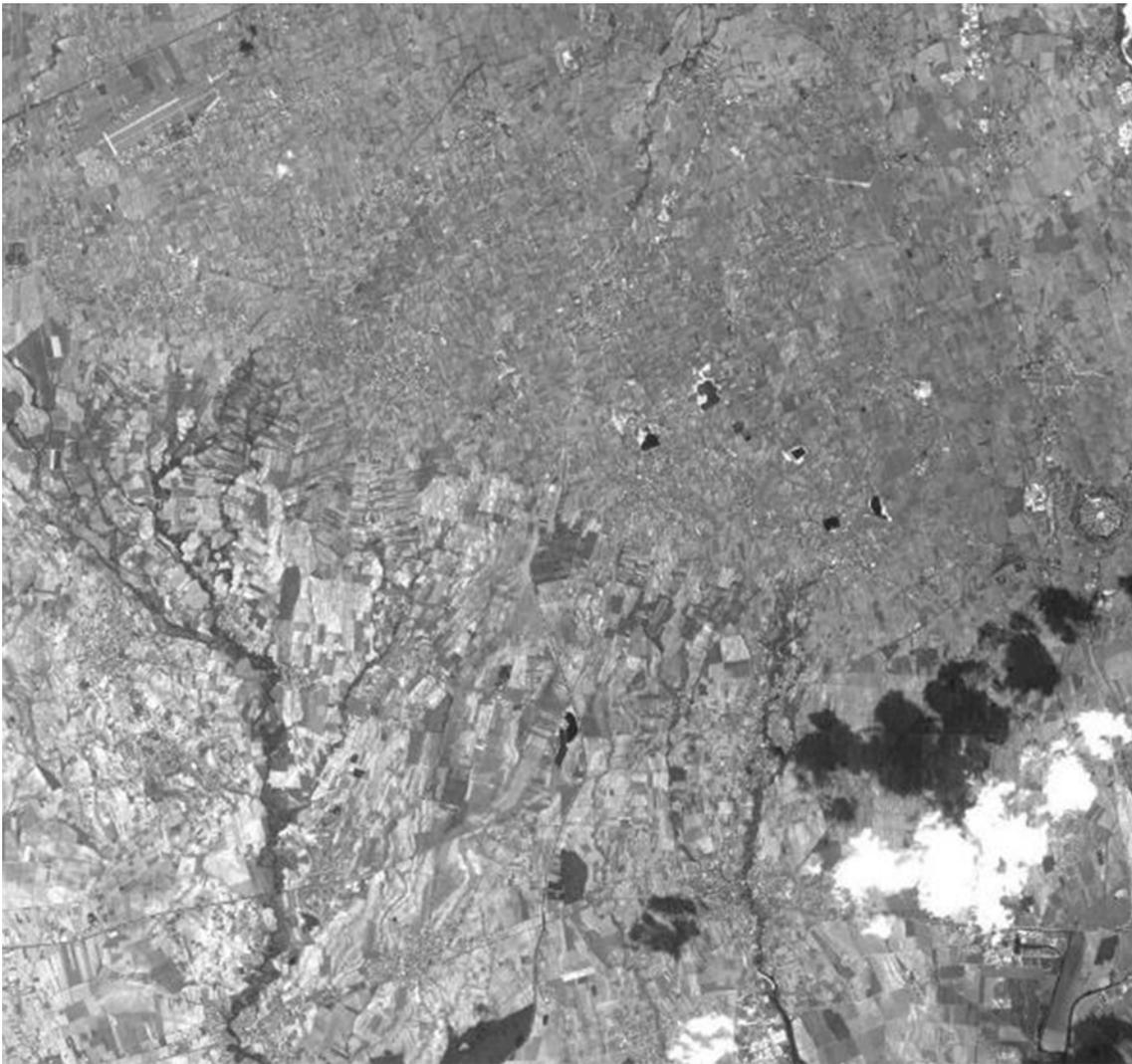


Figura 205: Immagine IRS-1D PAN (risoluzione a terra 5m), ritagliata sul foglio n. 87 'Palmanova' della Carta Tecnica Regionale del Friuli-Venezia Giulia, che copre un'area a cavallo della 'fascia delle risorgive', delimitante l'alta pianura con il fitto reticolo centuriato dalla bassa pianura con parcellizzazione agraria irregolare e caotica (Marcolongo 2000).

<sup>24</sup> I dati telerilevati di partenza, impiegati per la realizzazione dello studio, sono riprese spaziali PAN (Pan-chromatic camera, risoluzione a terra di 5 m) e da un quarto di scena multispettrale LISS III (*Linear Imaging and Self Scanning Sensor*, risoluzione a terra di 25 m, bande 2, 3, 4 e 5) di IRS 1-D (*Indian Remote Sensing Satellite*), acquisite nel marzo 1999.

Dopo una accurata georeferenziazione e ritaglio delle immagini di partenza, affinché esse potessero essere perfettamente sovrapponibili alla cartografia tecnica regionale (fogli 1:50.000), l'interpretazione interattiva con *software* Idrisi, seguendo la metodologia delle fasi di approfondimento successivo (individuazione, identificazione, classificazione e deduzione) ha messo in luce quattro principali categorie di elementi geoarcheologici: gli elementi sopravvissuti della centuriazione; gli elementi della paleo-idrografia relativa; le lineazioni; e le strutture pseudo-circolari.

Ciascuna di queste grandi categorie racchiude poi al proprio interno una ulteriore suddivisione frutto di una successiva fase di analisi.

Nel dettaglio (Figure 206-207), la prima categoria (elementi della centuriazione) comprende tutti gli oggetti che, risultando allineati con gli assi principali della centuriazione, conformemente a quanto già riportato in letteratura e a ipotesi interpretative preliminari, possono costituire le tracce relitte dei *limites*. Tali oggetti sono stati suddivisi in base alla loro natura (sistema viario, reticolo idrografico e limiti poderali) e in base alla loro orientazione (*cardines* e *decumani*). Le sottocategorie interpretate e riportate in cartografia sono quindi:

- strade K (sistema viario orientato secondo i *cardines*);
- strade D (sistema viario orientato secondo i *decumani*);
- idro K (reticolo idrografico orientato secondo i *cardines*);
- idro D (reticolo idrografico orientato secondo i *decumani*);
- campi K (limiti poderali orientati secondo i *cardines*);
- campi D (limiti poderali orientati secondo i *decumani*).

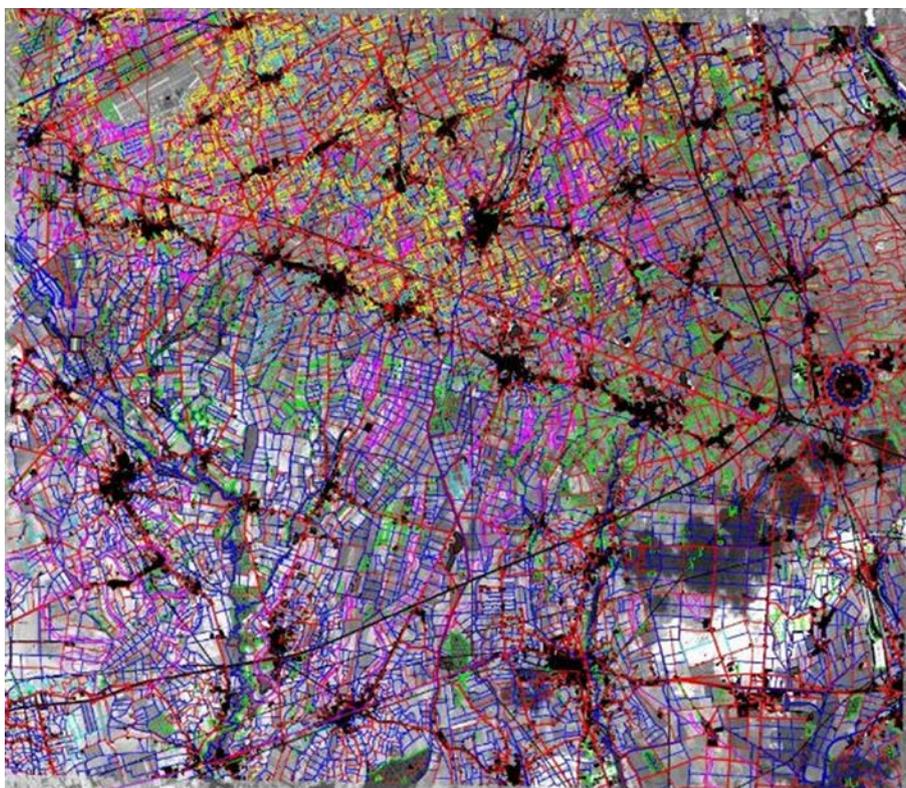


Figura 206: Interpretazione di dettaglio della IRS-1D PAN, secondo lo schema prima illustrato, che evidenzia i *limites* centuriati regolari (20 *actus*) dell'agro a nord della Via Postumia (linea viola grosso modo al centro della foto, che taglia la pianura con direzione da nord-ovest verso sud-est) e la sua assenza nella porzione più meridionale (Marcolongo 2000).

Nelle aree più esterne rispetto alla zona del laboratorio paesistico gli elementi della centuriazione riconosciuti non sono stati oggetto delle successive operazioni di classificazione, ma ci si è limitati alla creazione di un'unica categoria comprendente tutti i vari tipi di elementi (strade, idrografia, campi). In ogni caso le operazioni di interpretazione hanno permesso l'identificazione di numerosi elementi appartenenti a diversi sistemi di centuriazione con direzioni autonome rispetto alla centuriazione di Aquileia, predominante nella porzione centrale della pianura. A queste centuriazioni minori sono stati attribuiti i nomi dei principali centri urbani presenti. Questi sono: Cividale del Friuli, San Daniele del Friuli e Tricesimo.



Figura 207: Ingrandimento su una porzione della pianura friulana. In giallo, celeste e rosso i limites della centuriazione coincidenti rispettivamente con partizioni agrarie, canali e rete viaria; in viola le tracce di rotte fluviali e paleo-alvei. Lungo la Via Postumia sono allineati i principali centri abitati attuali (Marcolongo 2000).

Gli elementi della paleo-idrografia sono invece a loro volta suddivisi nelle sottocategorie: terrazzi fluviali; conoidi; divagazioni fluviali; fasce di divagazione fluviale; paleo-alvei.

Tra queste, le fasce di divagazione sono intese come porzioni di territorio in cui la densità di elementi codificati, come le divagazioni fluviali (riconosciute sulla base di variazioni tonali e della struttura geometrica), è particolarmente elevata a testimonianza di una dinamica fluviale particolarmente attiva nel passato.

La categoria lineazioni non è stata oggetto di ulteriori suddivisioni anche se essa comprende chiaramente elementi che per loro natura appaiono profondamente diversi. A questa categoria sono infatti stati assegnati tutti quegli oggetti di natura geometrica principalmente lineare che, pur privi di alcuna corrispondenza con oggetti presenti sulla superficie, si evidenziano per le variazioni tonali marcate e la continuità areale. Tali oggetti corrispondono quindi a strutture sepolte la cui presenza determina una sorta di riverbero in superficie che si traduce in risposte spettrali anomale rispetto alle aree adiacenti. Nel dettaglio gli elementi interpretati corrispondono sia ad antichi sistemi viari totalmente obliterati dal successivo sviluppo territoriale, sia a *limites* della centuriazione in completa discordanza con l'attuale sistemazione idraulica e fondiaria.

Nella categoria strutture pseudocircolari sono stati infine inseriti tutti quegli elementi che presentando una conformazione geometrica circolare o pseudocircolare e caratteristiche tonali discordi rispetto ai terreni circostanti rivelano una probabile origine antropica. In questa categoria ricadono così sia i castellieri protostorici (Figure 208-209), talvolta resi particolarmente evidenti anche per la presenza di anomalie altimetriche, e gli insediamenti di età neolitica, caratterizzati solo da anomalie tonali (sottocategoria neolitico).



Figura 208: Il castelliere del Bronzo medio (1.700 a.C.) di Sedegliano (Cassola Guida e Corazza 2007), frazione di Gradi-sca in provincia di Udine, ben identificabile al centro dell'immagine IRS-1D PAN (cerchio scuro). Esso è uno tra i siti fortificati protostorici del Friuli meglio conservati (Marcolongo 2000).



Figura 209: Interpretazione del contesto paleo-ambientale del castelliere di Sedegliano (cerchio verde), con particolare riguardo alla paleo-idrografia (in viola). Il castelliere è ubicato su un microrilievo della piana in posizione protetta, sovrastante due correnti di deflusso idrico superficiale (viola) che convergono verso sud (Marcolongo 2000).

L'elevato numero di *limites* della centuriazione, identificati e classificati grazie alle immagini spaziali, ha permesso, infine, una elaborazione statistica, che in qualche modo mostra la persistenza del modello di occupazione antica nell'organizzazione territoriale del presente (Tabella 1), con angoli di deviazione minimi tra il reticolo antico e quello moderno.

Elemento	Angolo rispetto al nord	Deviazione standard	Lunghezza totale (m)
STRADE D	69,43	2,26	79448
STRADE K	339,19	2,02	96876
CAMPI D	69,30	1,63	156867
CAMPI K	339,32	1,59	197987
IDRO D	69,50	2,14	62496
IDRO K	339,40	2,32	69047

Tabella 1: Foglio 87, Palmanova.

6.5 Turchia. Il contesto fisico ambientale dell'area di Malatya ricostruito attraverso l'interpretazione di dati telerilevati e di ricognizioni dirette

La piana di Malatya si stende come una ampia depressione allungata da SO a NE tra i rilievi del Tauro sud-orientale e quelli dell'Antitauro. Ad essi si raccorda con fasce di *glacis* particolarmente potenti e sviluppate, che rappresentano zone di transizione a pendenza via via maggiore verso l'interno dei complessi montuosi.

La sua forma di triangolo rettangolo, rastremato verso E fino alla chiusura della stretta gola rocciosa dove sorge la diga dell'invaso di Karakaya poco a valle di Kale, copre un'area di circa 500 km<sup>2</sup> con altitudine media sugli 800 m.

Vari corsi, alimentati dalle acque di ruscellamento dei versanti o dall'emergenza di numerose sorgenti per lo più carsiche che drenano un bacino sotterraneo ben più ampio di quello sotteso superficialmente, solcano il territorio per confluire tutti nell'Eufrate. La relativa ricchezza della risorsa idrica, sebbene la piovosità non ecceda localmente i 400 mm, contribuisce a creare attorno a Malatya condizioni di oasi favorevoli alla coltivazione intensiva soprattutto di alberi da frutto. Le pratiche agricole, aiutate da una capillare rete irrigua bene strutturata e mantenuta, rappresentano il tratto fisiografico più evidente del paesaggio che, nel suo complesso, appare fortemente antropizzato e riorganizzato secondo un modello di sfruttamento che espone le emergenze culturali a un potenziale rischio di cancellazione più o meno radicale.

### 6.5.1 Il contesto geologico della ricognizione geoarcheologica

Sotto il profilo geologico strutturale, questa depressione si è imposta in coincidenza di una sinclinale che appartiene a tutto un sistema di strutture plicative (anticlinali e sinclinali) allungate SO-NE con frequenti ondulazioni assiali (Figura 210).

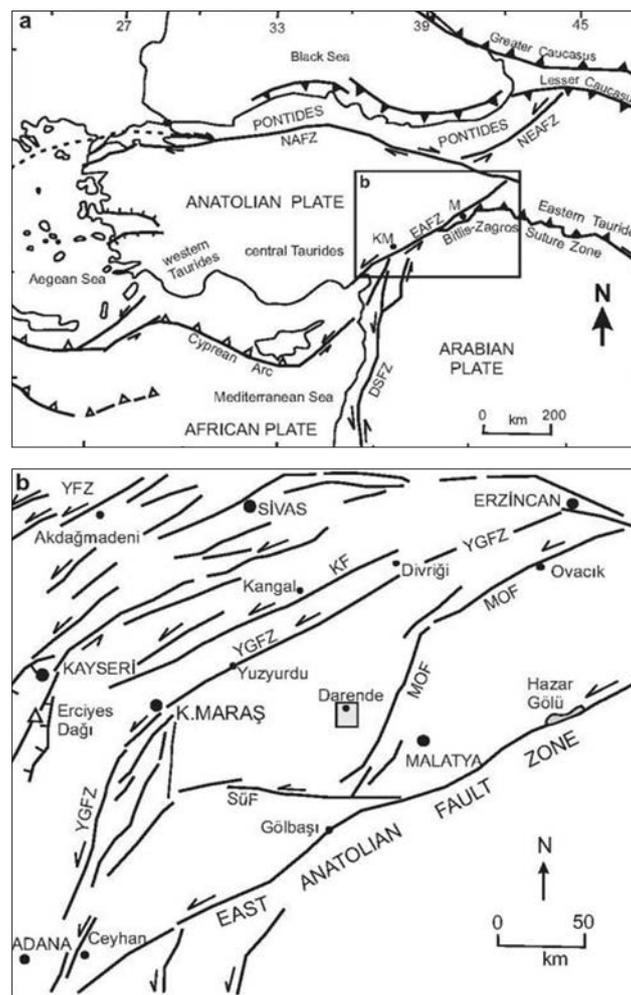


Figura 210. Mappa semplificata della tettonica della Turchia con indicazione delle maggiori strutture e placche (Gürbüz e Gül 2005).

Essa è inserita in un quadro neo-tettonico complesso che ha localmente il suo maggiore elemento nella 'East Anatolian fault zone', una estesa fascia di scorrimento crostale con direzione SO-NE al contatto tra 'placca anatolica' (*Anatolian plate*) e 'placca arabica' (*Arabian plate*).

Le culminazioni assiali maggiori si hanno in coincidenza con le cime delle montagne a S e SO di Malatya, costituite per la maggior parte da rocce paleozoiche metamorfiche (scisti, mica-scisti, gneiss) e calcaree, talora marmorizzate, con inclusioni di corpi ultrabasici e ultramafici (peridotite, gabbro e serpentino). Formazioni mesozoiche calcaree formano i rilievi che degradano verso la piana, dove affiorano conglomerati e arenarie con intercalazioni calcaree del Paleocene-Eocene, argille fluvio-lacustri del Neogene e conglomerati scarsamente cementati con ghiaie e sabbie del Plio-Quaternario.

L'intero complesso sedimentario appare in vari punti fratturato, ripiegato e basculato quale prodotto di una chiara e intensa attività neo-tettonica plio-quadernaria, che continua a interessare globalmente l'area tra l'altro con una attività sismica di grado elevato.

Questa situazione litologico-strutturale si riflette in forme del paesaggio peculiari per la piana di Malatya, segnata da ondulazioni collinari allungate secondo la direzione dell'asse di ripiegamento prevalente (NE-SO), talora profondamente incise soprattutto nel settore più meridionale verso il piede dei rilievi. Essa inoltre controlla il modello di deflusso sia superficiale che sotterraneo e la distribuzione complessiva delle risorse idriche.

In particolare nei dintorni di Malatya emergono lungo una fascia continua numerose sorgenti, che vengono alimentate dall'acquifero contenuto nei calcari carsificati e fessurati dei massicci montuosi meridionali. In uno studio precedente (Marcolongo e Palmieri 1983) si era focalizzata l'attenzione sulle risorse idriche sotterranee nelle immediate vicinanze di Arslantepe, la cui posizione risulta particolarmente favorita dalla locale ricchezza d'acqua di buona qualità e portata costante (Figura 211).

La carta di sintesi ripresa da quel lavoro sottolinea i tre elementi essenziali del circuito che si possono estrapolare e riproporre anche per il territorio più ampio investigato in questa ricognizione:

- un'area di ricarica, che coincide in grande con la catena montuosa a sud e SE di Malatya, delimitata da uno spartiacque idrogeologico ben più spostato a meridione rispetto a quello idrografico. Si tratta quindi di una fascia molto estesa che contribuisce a mantenere un flusso d'acqua sotterranea abbondante e continuo;
- una direzione generale di deflusso preferenziale orientata verso NO, guidata dalla giacitura degli strati permeabili e dei numerosi piani di fratturazione che interessano le rocce compatte dei rilievi;
- una zona di accumulo e conseguente emergenza dell'acqua, che si concentra soprattutto lungo un fronte molto esteso al passaggio tra rocce conglomeratiche più o meno compatte e permeabili con rocce argillose pressoché impermeabili. Questa 'fascia delle risorgive' è l'elemento più peculiare della piana di Malatya, in grado di influenzare gli insediamenti e guidare l'attività agricola. Infatti, i numerosi corsi di superficie che prendono origine da tali sorgenti, tra i quali anche il Pinarbasi che scorre poco a est della collina di Arslantepe, formano l'ossatura naturale di una fitta rete artificiale di canali di irrigazione che recupera all'agricoltura la maggior parte dell'area, trasformata in un'oasi con densa copertura vegetale, sebbene il contesto climatico sia quello di una zona semiarida con scarse precipitazioni.

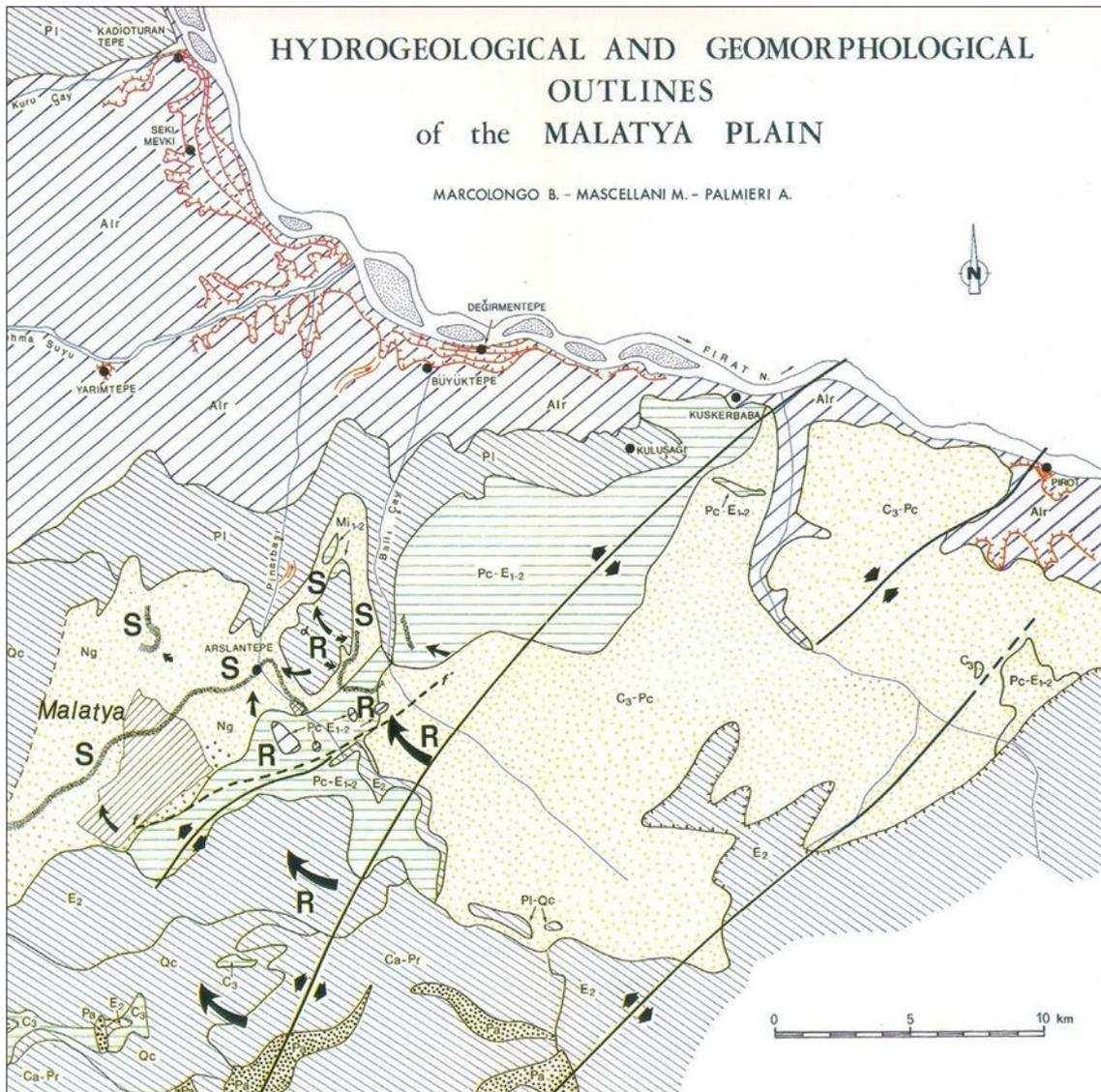


Figura 211: Carta idrogeologica e geomorfologica della piana di Malatya (Marcolongo e Palmieri 1983).

#### Legenda

**R** area di ricarica dell'acquifero

↪ direzione preferenziale di scorrimento sotterraneo

**S** zone di accumulo ed emergenza

**Alr** alluvioni recenti e attuali (ghiaie e sabbie): permeabilità massima per porosità

**Qc-Pl** depositi plio-quadernari (conglomerati, ghiaie e sabbie): permeabilità alta per porosità

**Ng** depositi neogenici fluvio-lacustri (argille): permeabilità bassa o nulla per porosità

**Pc-E<sub>1-2</sub>** complesso 'flyschoid' eocenico (marne, arenarie e conglomerati): permeabilità variabile

**E<sub>2</sub>** calcari massicci fratturati eocenici: permeabilità medio-alta per fratturazione e carsismo

**C<sub>3</sub>-Pc** calcari marnosi e marne cretaceo-paleocenici: permeabilità bassa per fratturazione

**Ca-Pr** rocce metamorfiche paleozoiche: permeabilità medio-alta per fratturazione

**α** andesiti e basalti (Gelincik Tepe) post-miocenici: permeabilità medio-alta per fratturazione e alterazione

Vi sono comunque molte altre sorgenti affioranti nella zona di studio, soprattutto nelle fasce di *glacis* e ai piedi dei versanti. La loro distribuzione si concentra in particolare nella porzione più orientale, che ha una prevalenza di rocce ignee effusive e metamorfiche permeabili per elevata alterazione e fratturazione.

Lo scorrimento generale delle acque sotterranee avviene secondo una direttrice che si allunga da S e SE verso N e NO. Le sorgenti della parte centro occidentale sono alimentate da circuiti che interessano terreni a permeabilità primaria (porosità del complesso flyschoidale, delle ghiaie e delle sabbie plio-quadernarie), mentre quelle della zona più orientale sono legate, come già detto, alla permeabilità secondaria delle masse rocciose (Figura 212). Inoltre i punti di emergenza della parte orientale sono ubicati su versanti con pendenze superiori ai 20°, mentre nel settore centro occidentale le pendenze sono molto minori (attorno ai 5°).

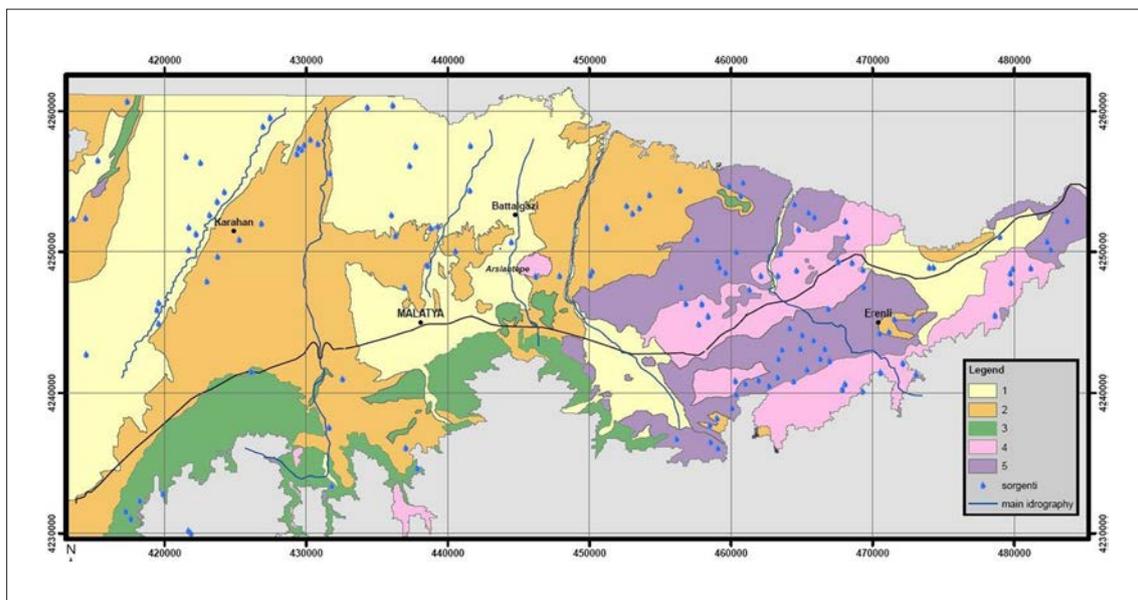


Figura 212: Carta delle sorgenti, elaborata in ambiente GIS Idrisi, sovrapposta alla carta geologica semplificata (1 'giallo' = rocce sciolte-depositi alluvionali e detritici-; 2 'marrone chiaro' = rocce sedimentarie eterogenee -flysch-; 3 'verdino' = rocce carbonatiche compatte; 4 'rosa' = rocce ignee effusive e metamorfiche meno compatte; 5 'viola' = rocce ignee intrusive e effusive e rocce metamorfiche compatte) dimostra questo stretto controllo esercitato dalla litologia sulla localizzazione delle emergenze di acqua sotterranea (Marcolongo, Palmieri e Simone - in stampa).

### 6.5.2 Metodologia di indagine

La situazione fisico-ambientale così delineata ha suggerito un approccio di ricognizione particolare, che fosse in grado da un lato di identificare nuove emergenze archeologiche anche in un paesaggio soggetto a forte pressione e trasformazione antropica e dall'altro potesse dar conto di una distribuzione e densità dei siti rinvenuti non omogenee per le varie porzioni di territorio percorso (Marcolongo *et al.* in preparazione).

Si è pensato quindi di utilizzare come dato di partenza per la ricerca una foto cosmica KFA1.000 ripresa nella tarda primavera del 1989 dalla piattaforma sovietica Sojuz<sup>25</sup>, ricca di in-

<sup>25</sup> Caratteristiche della foto cosmica KFA 1.000 della Sojuz: altitudine della ripresa 270 km, area coperta 81x81 km<sup>2</sup>, lunghezza focale 1.000 mm, risoluzione geometrica lineare 5 m, intervalli spettrali coperti 0.57-0.68  $\mu$  e 0.68-0.81  $\mu$ .

formazioni tanto sul piano geometrico quanto su quello tematico propedeutiche al rilevamento geoarcheologico di campagna (Figura 213).



*Figura 213: Fotocosmica Sojuz KFA 1.000 (Marcolongo, Palmieri e Simone - in stampa).*

Nel contempo si è anche elaborata una carta di propensione o suscettibilità all'erosione dell'intera piana di Malatya, sulla base di un modello concettuale che vede entrare in gioco con diversi pesi e misure parametri fisici e antropici specifici, come pendenza, litologia, copertura vegetale e uso del suolo. Una diseguale e discontinua presenza areale delle testimonianze archeologiche può venire infatti motivata pure in termini di condizioni naturali più o meno favorevoli alla preservazione dei siti e alla conservazione degli elementi di cultura materiale a essi associati. La semplice constatazione di una assenza di dati sul terreno non è significativa ai fini di una ricostruzione complessiva dei modelli insediativi del passato, che possono essere stati con diverso

grado di intensità obliterati in parte o completamente nel corso del tempo dall'azione delle piogge, del ruscellamento, della gravità e dell'uomo medesimo.

#### Fotointerpretazione

L'immagine da satellite è stata dapprima opportunamente ritagliata e georeferenziata in modo da disporre di un documento coerente con la base geometrica di riferimento, rappresentata da carte topografiche turche alla scala 1:100.000 e 1:25.000 (Figura 214).

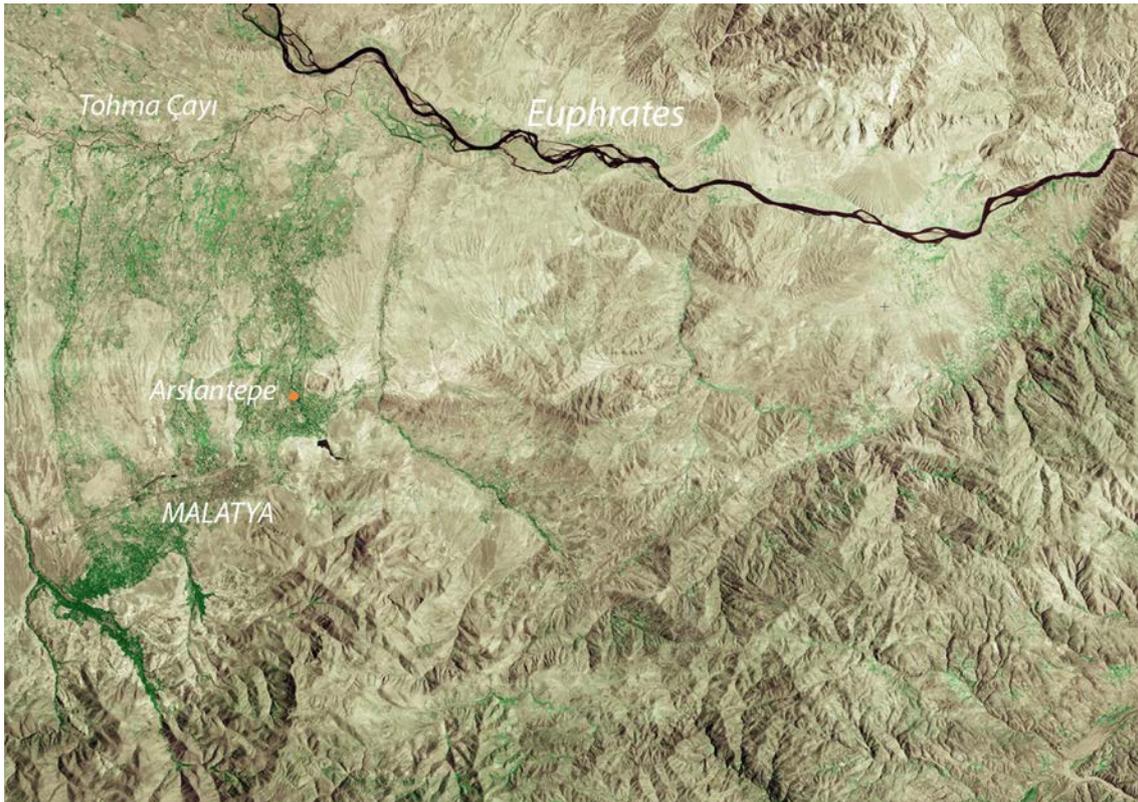


Figura 214: Stralcio della fotocsmica Sojuz KFA 1.000 sopra la piana di Malatya (quadrante NO) (Marcolongo, Palmieri e Simone - in stampa).

Una successiva elaborazione spettrale, come il miglioramento del contrasto (elaborazione *stretching* in ambiente *software* Idrisi), è poi servita a esaltare i contorni delle anomalie radiometriche individuabili. Il loro riconoscimento è un passaggio fondamentale nel processo interpretativo che porta infine alla identificazione di strutture o emergenze antiche associate a particolari forme del paesaggio. Nello specifico gli elementi morfologico-spettrali dell'immagine, su cui si è soffermata l'attenzione durante il processo interpretativo, sono stati:

- le strutture circolari o pseudocircolari con una marcata variazione di riflettanza rispetto al contesto circostante (*mounds* più o meno pronunciati ed estesi, punti di concentrazione di materiali eterogenei);
- le discontinuità areali e lineari di varia forma della tonalità (zone umide o alterate, terreni di riporto e riempimento, elementi di strutture più complesse ecc.);
- le aree a tessitura anomala (suoli diversi con dispersione non omogenea in superficie di vari inclusi). Inoltre la struttura della parcellizzazione agraria, laddove presente, è stata analizzata

con attenzione per cartografare tutti quegli andamenti anomali (per esempio appezzamenti organizzati in modo circolare o pseudocircolare attorno a ‘poli di attrazione’, possibili ‘höyük’ o ‘tepe’) che possono essere influenzati da preesistenti strutture antropiche (Figure 215-221).



Figura 215: Piana di Malatya. Tracce di una antica centuriazione romana conservate nella struttura regolare della parcellizzazione agraria, in un contesto altrimenti irregolare e disorganizzato (Marcolongo, Palmieri e Simone - in stampa).



Figura 216: Piana di Malatya. Tracce di paleo-alvei rivelate da strutture meandriformi della parcellizzazione agraria (Marcolongo, Palmieri e Simone - in stampa).



Figura 217: Strutture circolari (B=Büyük Tepe e K=Küçük Karamıldan ) con marcata variazione di riflettanza rispetto al contesto circostante (Marcolongo, Palmieri e Simone - in stampa).



Figura 218: Il rilievo di Büyük Tepe ripreso durante la ricognizione (groundtruthing) (Marcolongo, Palmieri e Simone - in stampa).



Figura 219: Il rilievo di Küçük Karamildan ripreso durante la ricognizione, con fortezza romana sulla sommità (Marcolongo, Palmieri e Simone - in stampa).



Figura 220: Organizzazione del mosaico particellato attorno alla struttura ovale di Arslantepe (Marcolongo, Palmieri e Simone - in stampa).



Figura 221: La collina di Arslantepe (Marcolongo, Palmieri e Simone - in stampa).

Durante le tre campagne sul terreno compiute nel 2004, 2005 e 2006, questa interpretazione, fatta preliminarmente a tavolino, ha indirizzato la ricognizione verso i punti del territorio più suscettibili di contenere elementi archeologici utili alla ricostruzione complessiva del popolamento antico della piana di Malatya. Il *groundtruthing* è sempre stato preceduto dalla produzione di stralci della foto cosmica Sojuz KFA1.000, ingranditi a una scala opportuna (1:25.000 – 1:10.000) che si potesse rapidamente e agevolmente confrontare con i documenti cartografici ufficiali, in modo da integrare l'informazione spettrale con quella morfologica altrettanto essenziale. La complementarietà assoluta delle due categorie di dati e la frequente convergenza delle forme con le anomalie tonali e tessiturali ha reso produttiva, in termini di tempo impiegato e risultati conseguiti, non solo la ricognizione, ma anche la fase successiva di analisi e modellizzazione del rapporto uomo-territorio.

#### *Categorie del contesto morfologico*

I concreti risultati di una tale procedura interpretativa possono essere esemplificati attraverso la presentazione di una casistica selezionata di siti, che includono tutte le situazioni riscontrate nell'area di indagine e riconducibili a sei categorie di contesto morfologico: colline artificiali,

höyük o tell (Figure 222-223); colline naturali (Figure 224-225); formazioni tabulari elevate (Figure 226-227); complessi collinari (Figure 228-229); *glacis* (Figure 230-231); pianori (Figure 232-233).

### 1. höyük

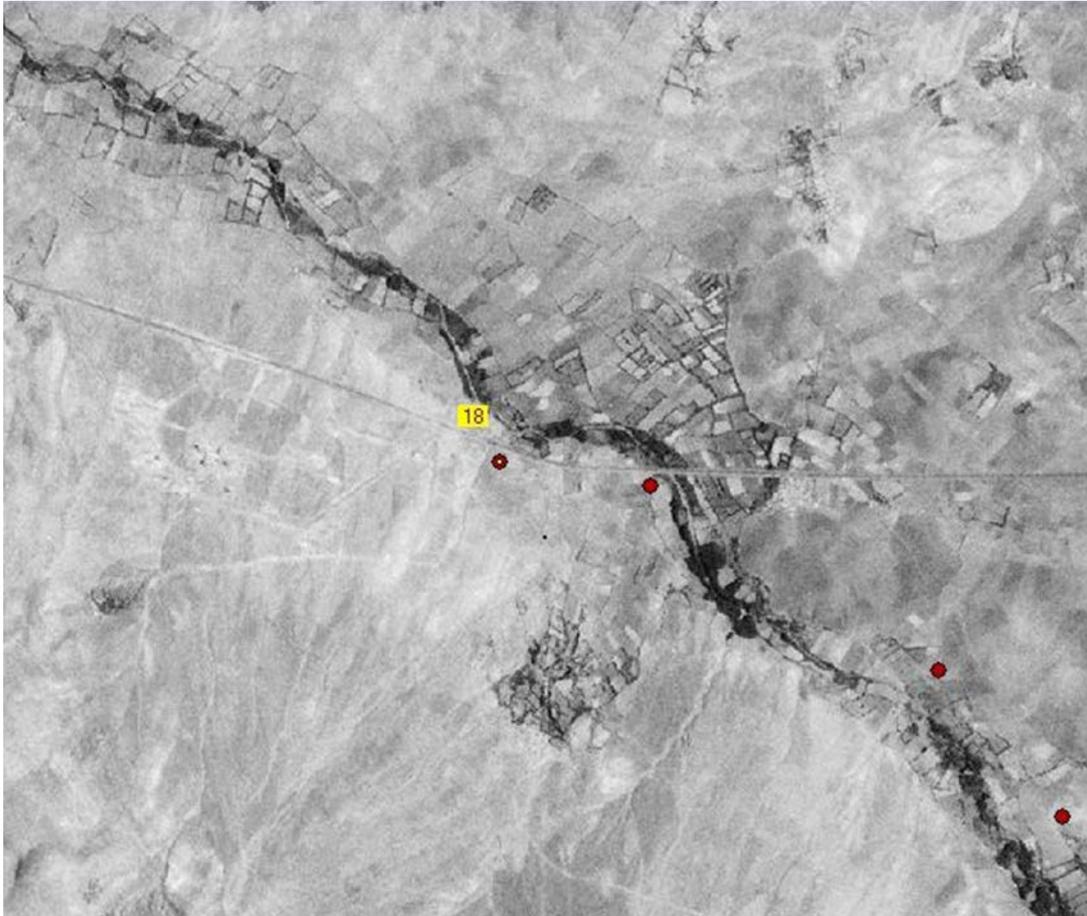


Figura 222: Stralcio della foto cosmica Sojuz KFA 1000 georeferenziata su cui è identificato il sito n. 18 Furuncu höyük (UTM X=452307, Y=4242861; Lat/Long N 38° 19' 57,4' E 38° 27' 15,5') (Marcolongo, Palmieri e Simone - in stampa).

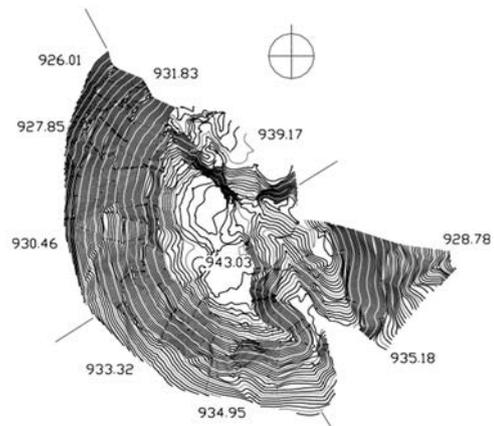


Figura 223: La morfologia del sito dai rilievi di campagna (Marcolongo, Palmieri e Simone - in stampa).

## 2. Collina naturale

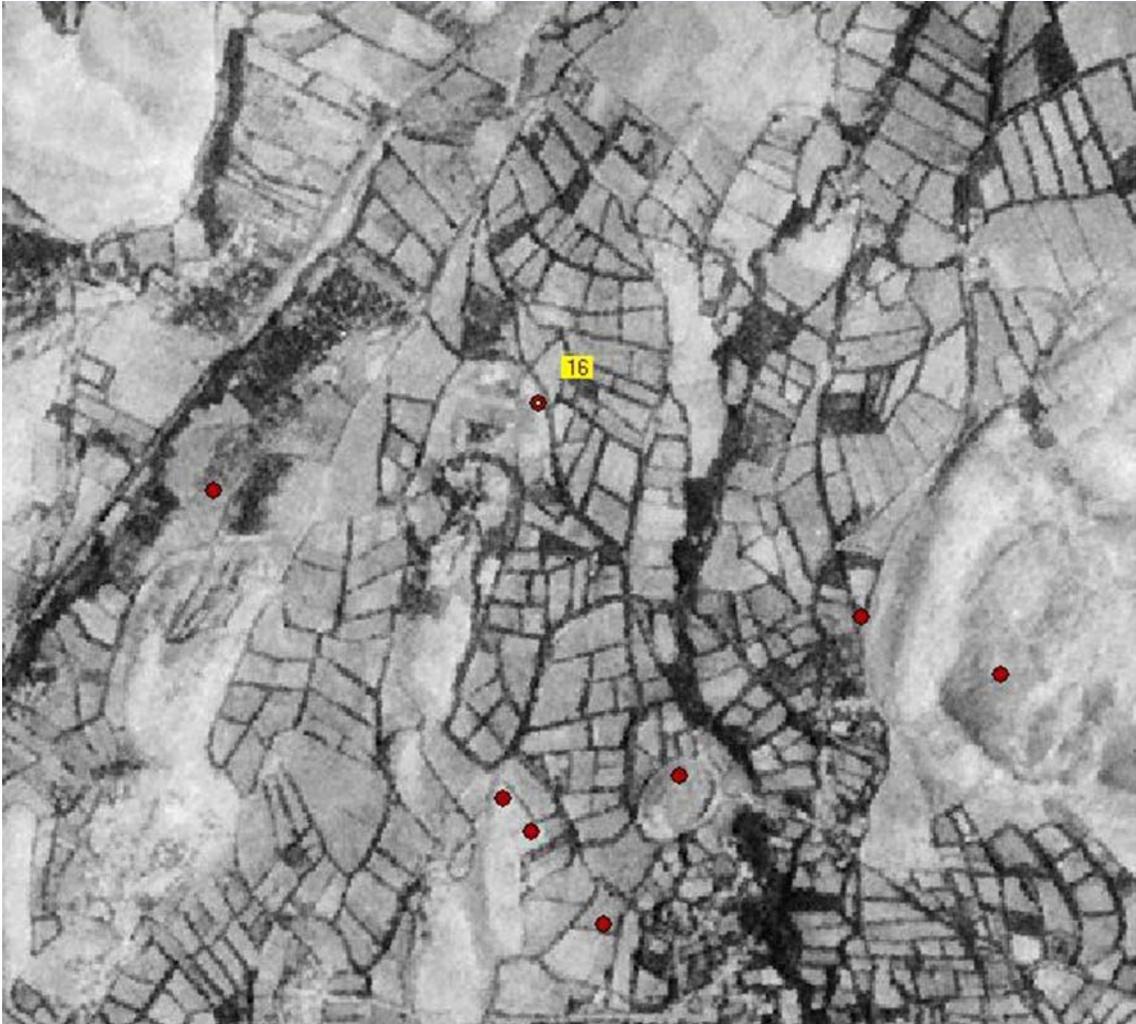


Figura 224: Stralcio della foto cosmica Sojuz KFA 1000 georeferenziata su cui è identificato il sito n. 16 Muhlisin Tepe (UTM X=443818, Y=4249465; Lat/Long N38° 23' 29,9", E38° 21' 24") (Marcolongo, Palmieri e Simone - in stampa).

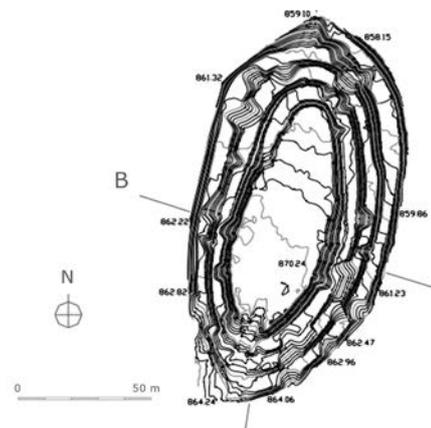


Figura 225: La morfologia del sito dai rilievi di campagna (Marcolongo, Palmieri e Simone - in stampa).

## 3. Formazione tabulare elevata

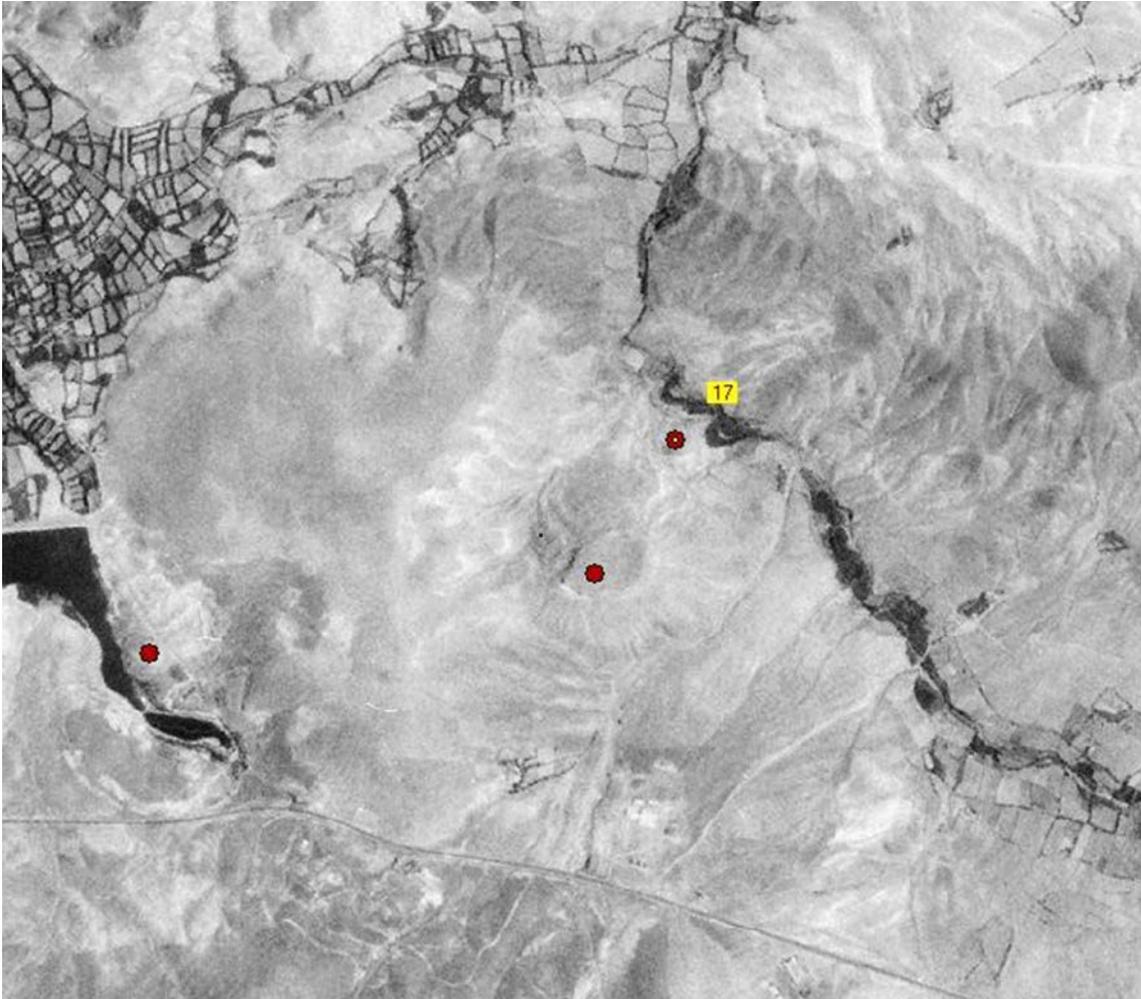


Figura 226: Stralcio della foto cosmica Sojuz KFA 1000 georeferenziata su cui è identificato il sito n. 17 Küçük Karamıldan Tepe (UTM X = 448324, Y = 4246489; N 38° 21' 54,3", E 38° 24' 30,5") (Marcolongo, Palmieri e Simone - in stampa).

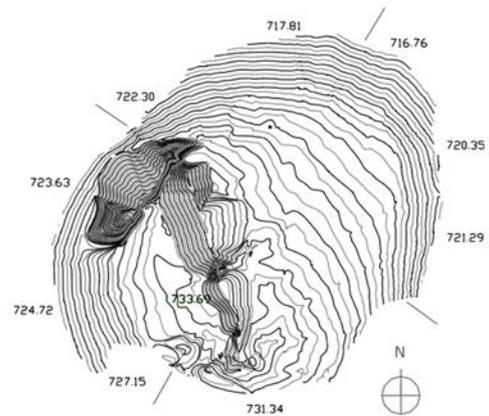


Figura 227: La morfologia del sito dai rilievi di campagna (Marcolongo, Palmieri e Simone - in stampa).

## 4. Complesso collinare

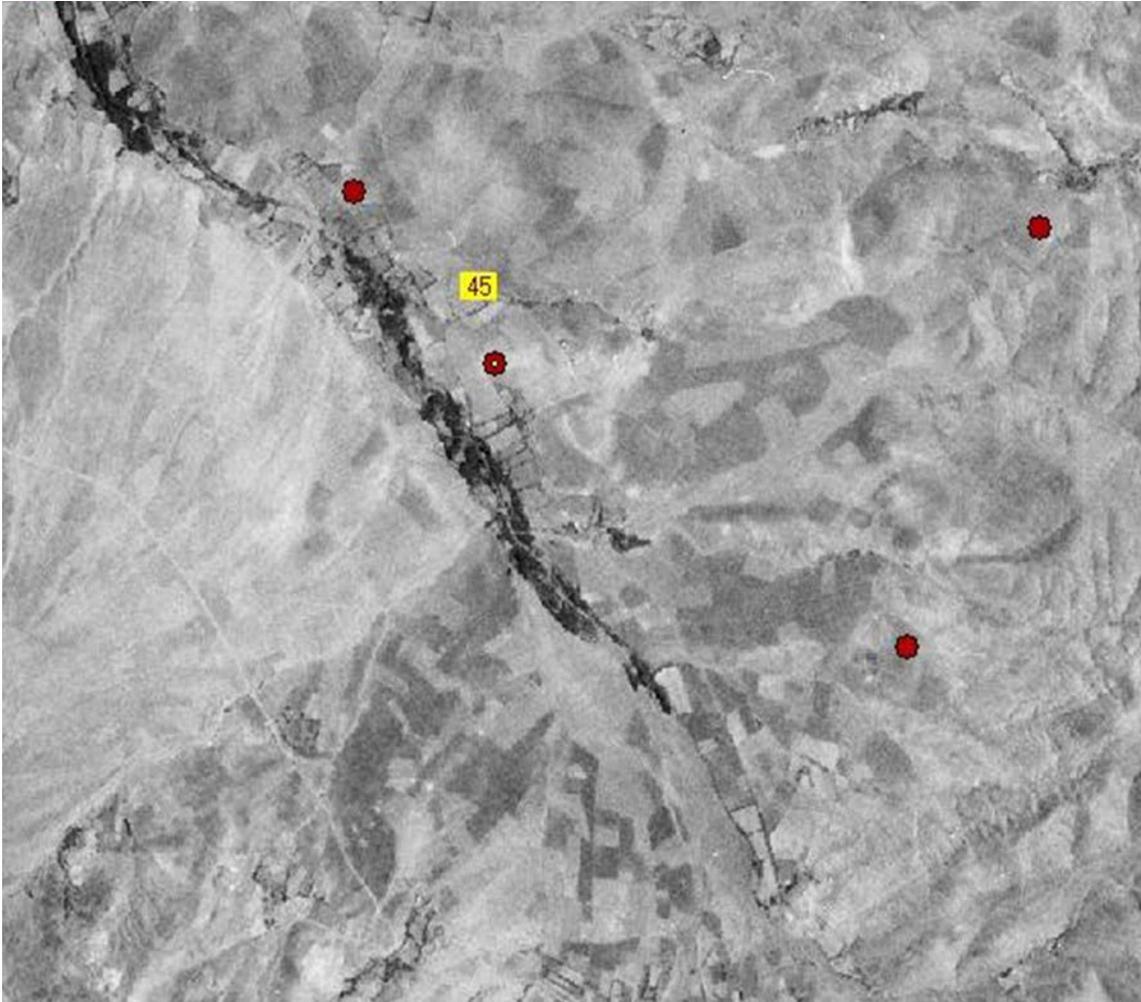


Figura 228: Stralcio della foto cosmica Sojuz KFA 1000 georeferenziata su cui è identificato il sito n. 45 Barmazli Tepe (UTM X = 455374, Y = 4240929; N: 38° 18' 55,3' E: 38° 29' 22,3') (Marcolongo, Palmieri e Simone - in stampa).

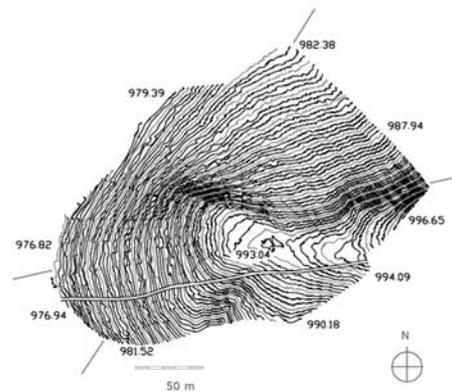


Figura 229: La morfologia del sito dai rilievi di campagna (Marcolongo, Palmieri e Simone - in stampa).

## 5. Glacis



Figura 230: Stralcio della foto cosmica Sojuz KFA 1000 georeferenziata su cui è identificato il sito n. 72 Sojuk Pinar (UTM X = 479213, Y = 4250945; N: 38° 24' 23,4' E: 38° 45' 42,9') (Marcolongo, Palmieri e Simone - in stampa).

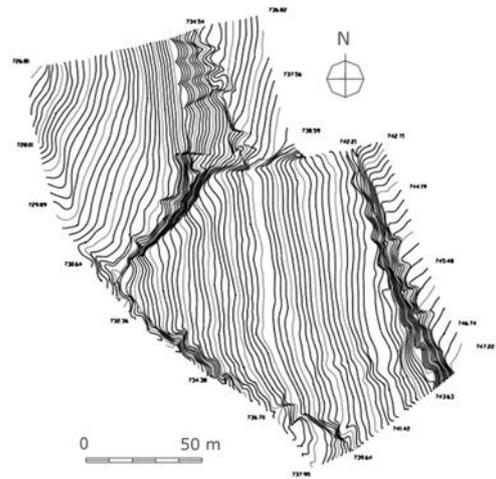


Figura 231: La morfologia del sito dai rilievi di campagna (Marcolongo, Palmieri e Simone - in stampa).

## 6. Pianoro



Figura 232: Stralcio della foto cosmica Sojuz KFA 1000 georeferenziata su cui è identificato il sito di CakılıMevkii/Area B (UTM X = 479213, Y = 4250945; N 38° 21' 49,7" E 38° 36' 02,2") (Marcolongo, Palmieri e Simone - in stampa).

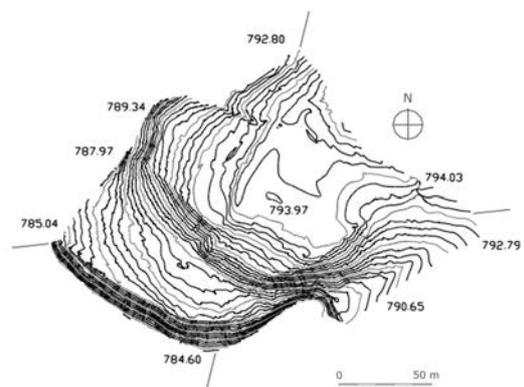


Figura 233: La morfologia del sito dai rilievi di campagna (Marcolongo, Palmieri e Simone - in stampa).

### 6.5.3 Produzione della carta della suscettibilità all'erosione

La suscettibilità all'erosione del territorio, ovvero una predisposizione alla alterazione e rimozione di spessori variabili di terreno con conseguente modifica delle forme del paesaggio, è uno degli aspetti più significativi per ricostruire i rapporti tra ambiente e insediamenti antichi. Aree soggette a una intensa dinamica dei versanti e a mobilità dei depositi sciolti sono ovviamente di scarsa se non nulla attrazione per la residenza e le attività dell'uomo, divenendo spesso il dominio di terre marginali a redditività praticamente nulla.

Il processo erosivo in senso generale, che come si vedrà dipende tanto da fattori naturali intrinseci quanto da fattori esterni umani, può attivarsi in certi momenti temporali legati a cause scatenanti (sisimi di grande intensità, piogge violente, disboscamenti estesi ecc.) oppure essere più o meno continuo con fasi alterne di latenza e ripresa.

Nel caso specifico, la piana di Malatya e le fasce collinari contermini presentano ampie porzioni soggette a forte degrado (erosione calanchiva - *gully erosion* ed erosione laminare - *sheet erosion*), che inevitabilmente hanno influenzato il rinvenimento o meno di emergenze archeologiche.

Il mancato ritrovamento di siti in questi luoghi può essere dovuto sia a una loro assenza originaria, sia all'asportazione o distruzione delle testimonianze operate successivamente in condizioni di instabilità del contesto fisico. Anche se è difficile collocare nel tempo le singole fasi della dinamica erosiva, la cartografia delle zone instabili circonda in ogni caso le aree potenzialmente sterili, completando il quadro ambientale e affinando l'interpretazione geoarcheologica.

La costruzione della carta di suscettibilità all'erosione si è fondata su una classificazione per pesi e misure di quattro fattori fondamentali:

- pendenza del terreno;
- copertura vegetale;
- uso del suolo;
- litologia.

L'andamento spaziale di tali parametri è stato rappresentato con altrettante carte tematiche inserite in un ambiente GIS coerente e omogeneo, dove poter eseguire vari incroci e sovrapposizioni complesse in grado di stimolare un approfondimento interpretativo dell'intero contesto ambientale.

I dati di partenza sono rappresentati da una immagine multispettrale Landsat-7ETM del 17 luglio 2000<sup>26</sup>, da una ripresa SRTM WRS2 del 17 luglio 2000<sup>27</sup>, da due fogli topografici alla scala 1:100.000 (L40; L41) e infine da due carte geologiche corrispondenti ai fogli topografici.

<sup>26</sup> Landsat-7ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus): altitudine della ripresa 705 km, area coperta 185x185 km<sup>2</sup>, risoluzione lineare al suolo 15 m per la banda pancromatica e 30 m per le bande multispettrali da 1 a 5 e 7, intervalli spettrali coperti 0,45 - 0,52 µm (banda 1), 0,52 - 0,60 µm (banda 2), 0,63 - 0,69 µm (banda 3), 0,76 - 0,90 µm (banda 4), 1,55 - 1,73 µm (banda 5), 2,08 - 2,35 µm (banda 7), 10,4 - 12,5 µm (banda 6), 0,52 - 0,9 µm (banda 8).

<sup>27</sup> Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) ha ottenuto dati di elevazione su scala quasi globale per generare il database topografico digitale ad alta risoluzione più completo della Terra. SRTM consisteva in un sistema radar appositamente modificato che ha volato a bordo dello Space Shuttle Endeavour durante una missione di 11 giorni nel febbraio del 2000. Tutte le elevazioni sono in metri riferite al geoide WGS84 EGM96 e orizzontalmente riferite all'ellissoide WGS84, utilizzando la proiezione UTM. Questa conversione WRS-2 per i dati SRTM ha lo scopo di sincronizzare l'uso insieme al set di dati Landsat GeoCover disponibile anche dal sito Web GLCF (<http://glcf.umiacs.umd.edu/index.shtml>).

### Carta delle pendenze

L'elaborazione di questi elementi<sup>28</sup> iniziali ha dapprima riguardato il modello digitale del terreno (DTM) contenuto nella immagine SRTM, avente una risoluzione di 3 arcsec (*pixel* di 90x90 m<sup>2</sup>). Da esso sono state ricavate 7 classi di pendenza via via maggiore, riclassificate poi con una riaggregazione in 5 classi finali ai fini della suscettibilità all'erosione, generando dapprima una carta delle pendenze (Figura 234). Quest'ultima è direttamente proporzionale al grado di pendenza secondo lo schema che segue (Tabella 2).

Classe di pendenza	Intervallo di pendenza (%)	Riclassificazione
1	0-1	1
2	1-3	2
3	3-5	3
4	5-10	4
5	10-20	4
6	20-30	5
7	>30	5

Tabella 2: Classi di pendenza.

La parte occidentale e centrale dell'area presenta quasi dovunque deboli pendenze al di sotto del 5%. Solo il settore orientale e la frangia meridionale hanno una energia di rilievo marcata con pendenze medie tra 10% e 20%, localmente oltre 30%, che contribuiscono a creare condizioni favorevoli per una accentuata erosione.

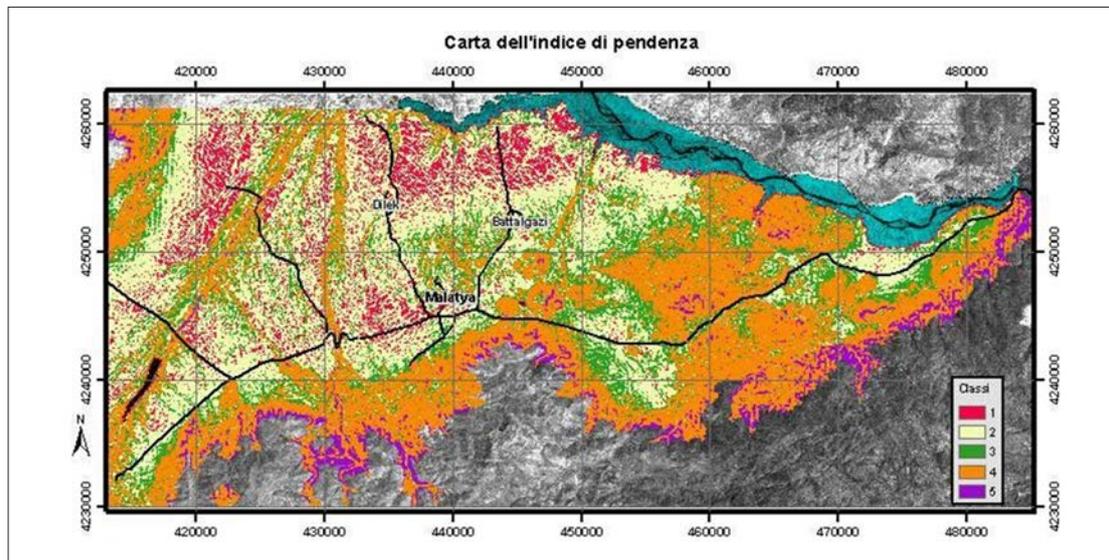


Figura 234: Il risultato grafico dell'applicazione della tabella a tutti i singoli pixel dell'immagine genera una carta delle pendenze (Marcolongo, Palmieri e Simone - in stampa).

<sup>28</sup> La georeferenziazione delle immagini da satellite e l'elaborazione dei dati in formato raster è stata eseguita con il software IDRISI. Tutti i livelli tematici, in formato sia *raster* che vettoriale, sono stati integrati utilizzando il software ArcGis.

### Carta della copertura vegetale

Successivamente si è costruita una carta che descrive la consistenza e l'estensione della copertura vegetale attraverso il computo di un 'Indice di vegetazione', direttamente ricavato dalla immagine Landsat-7ETM con un opportuno algoritmo (Figure 235-236)<sup>29</sup>.

È stato assunto come livello base di taratura, per la suddivisione delle classi di densità della vegetazione, il valore registrato sullo specchio d'acqua dell'invaso di Karakaya.

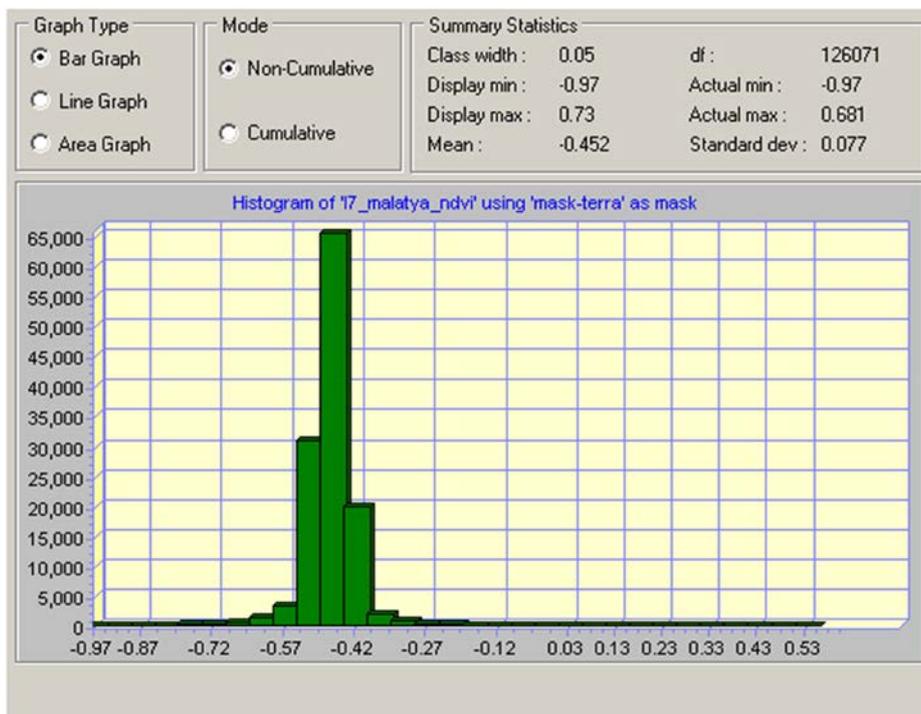


Figura 235: Istogramma di NDVI per Karakaya (Marcolongo, Palmieri e Simone - in stampa).

<sup>29</sup>  $NDVI = (\rho_4 - \rho_3) / (\rho_4 + \rho_3)$ . L'Indice di vegetazione, nella sua formulazione come NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), sfrutta la diversa risposta della copertura vegetale alla banda spettrale del rosso (3) e del vicino infrarosso (4), fornendo un valore numerico adimensionale compreso tra -1 e +1. Tale valore è stato dimostrato essere in stretta relazione con la vegetazione, intesa come biomassa e area fogliare. La caratteristica del comportamento dei pigmenti delle foglie non sottoposte a stress è infatti quella di riflettere soltanto circa il 10% della radiazione ricevuta nella regione spettrale della luce visibile (rosso) e allo stesso tempo di riflettere oltre il 40% di quella ricevuta nell'infrarosso vicino. Nelle mappe elaborate, valori bassi di NDVI si verificano in aree a bassa o assente copertura vegetale, o dove la vegetazione presente è senescente o sofferente, mentre gli alti valori dell'indice rispecchiano una situazione di forte attività fotosintetica e quindi elevata presenza di biomassa.

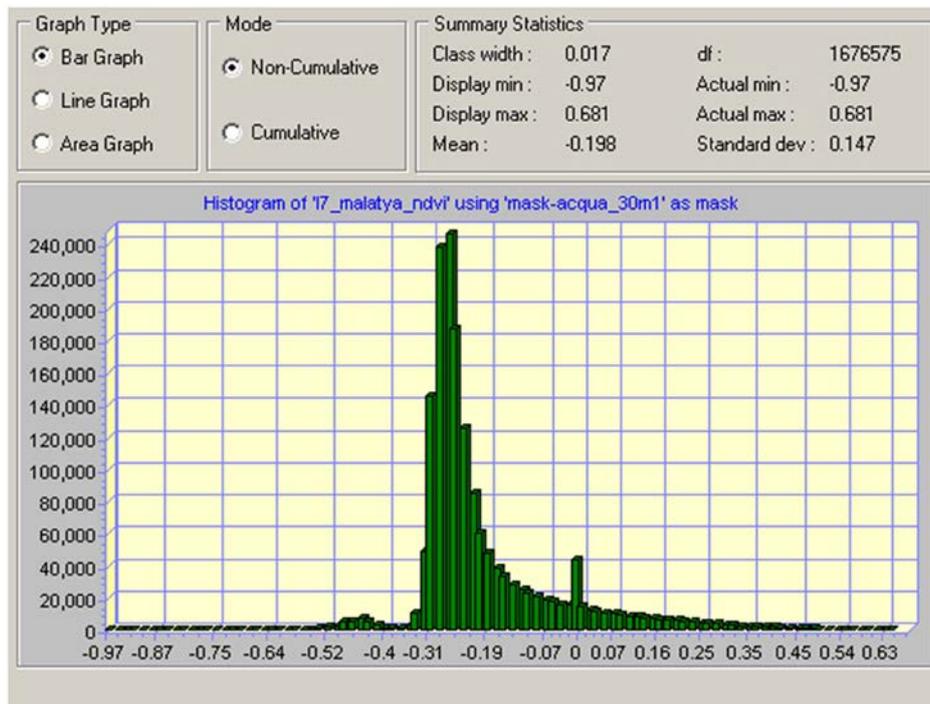


Figura 236: Istogramma di NDVI per il terreno (Marcolongo, Palmieri e Simone - in stampa).

I grafici (Tabella 3) indicano i valori tipici dell'acqua ( $-0,52 \leq \text{NDVI} \leq -0,40$ ) e del suolo nudo o con scarsa vegetazione, che rappresenta la maggior porzione di territorio ( $-0,31 \leq \text{NDVI} \leq -0,19$ ). Valori positivi indicano invece i diversi gradi di copertura del suolo da parte della vegetazione.

A partire quindi da valori superiori a  $-0,4$  si riscontra sul terreno una copertura vegetale sempre più sviluppata man mano che l'indice aumenta (Figura 237). Nel caso specifico sono stati separati 4 gruppi a intervalli regolari di incremento ( $0,27$ ), riclassificati secondo la tabella qui sotto ripresa. La loro presenza nell'area della ricognizione viene infine indicata dalla relativa carta.

Classe	Valori di NDVI	Riclassificazione
0	$-1 \leq \text{NDVI} < -0,4$ (acqua)	5
1	$-0,4 \leq \text{NDVI} < -0,13$	5
2	$-0,13 \leq \text{NDVI} < +0,14$	3
3	$+0,14 \leq \text{NDVI} < +0,41$	1
4	$\geq +0,41$	1

Tabella 3: Valori di NDVI.

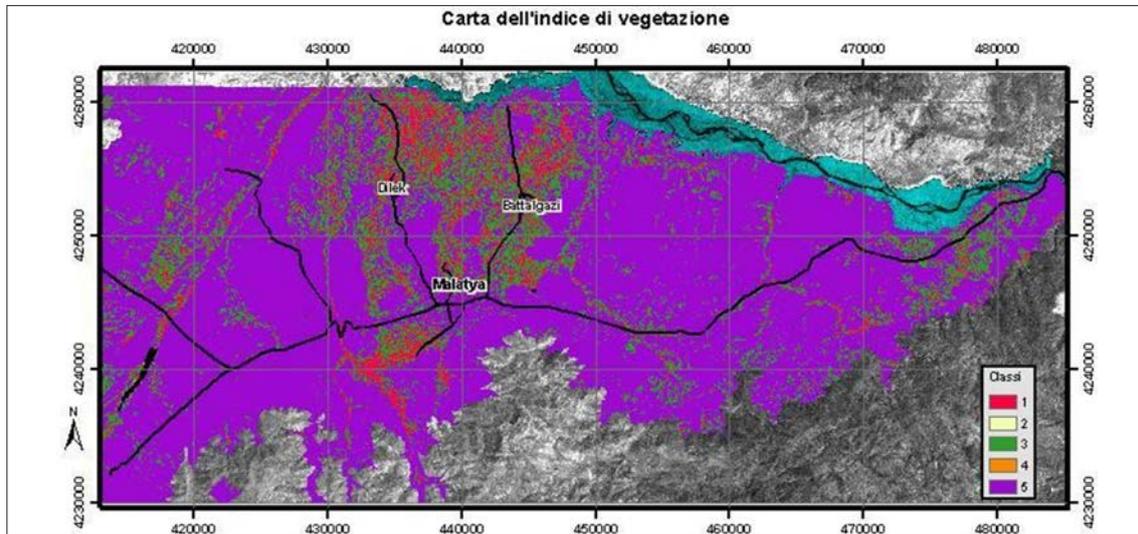


Figura 237: Carta dell'indice di vegetazione. Nella porzione centrale della piana di Malatya si addensano le classi con un elevato indice di copertura vegetale e pertanto le zone meno propense all'erosione. La parte più orientale e la fascia collinare e montuosa sono invece caratterizzate da valori di NDVI molto bassi con una marcata predisposizione all'erosione (Marcolongo, Palmieri e Simone - in stampa).

#### Carta dell'uso del suolo

Una ulteriore elaborazione condotta sulle bande della immagine multispettrale Landsat-7ETM ha quindi prodotto la carta dell'uso del suolo.

Si è seguita una procedura consolidata di classificazione con apprendimento (*supervised classification*), identificando dapprima dei *training sites* rappresentativi delle singole categorie di cui si è ricavata la firma spettrale tipica, per poi estendere in modo automatico l'analisi al resto dell'immagine, attribuendo ciascun *pixel* alla classe di riflettanza più simile secondo una scala di probabilità di appartenenza (classificatore della 'massima verosimiglianza' *max likelihood*, integrato dalla probabilità di esistenza della classe medesima). L'esistenza di classi agricole e dell'urbano è stata ritenuta più probabile nelle fasce a minore pendenza, mentre in aree con pendenze elevate sono state associate maggiori probabilità alle classi del suolo nudo e della vegetazione spontanea.

Le classi utili definite per una stima della suscettibilità all'erosione sono così riassunte (Tabella 4).

Classe	Descrizione	Riclassificazione
1	Acqua	0
2	Agricolo vegetato	1
3	Agricolo mediamente vegetato	2
4	Agricolo a vegetazione rada o assente	3
5	Vegetazione spontanea	1
6	Suolo nudo	5
7	Urbanizzato	5
8	Vegetazione spontanea rada	2

Tabella 4: Classi per una stima della suscettibilità all'erosione.

Il confronto tra le loro firme spettrali mostra degli andamenti dei valori medi di riflettanza nelle varie bande dell'immagine ben distinti tra le diverse categorie di uso del suolo, convalidando di conseguenza la rappresentatività dei *training sites* scelti (Figure 238-239).

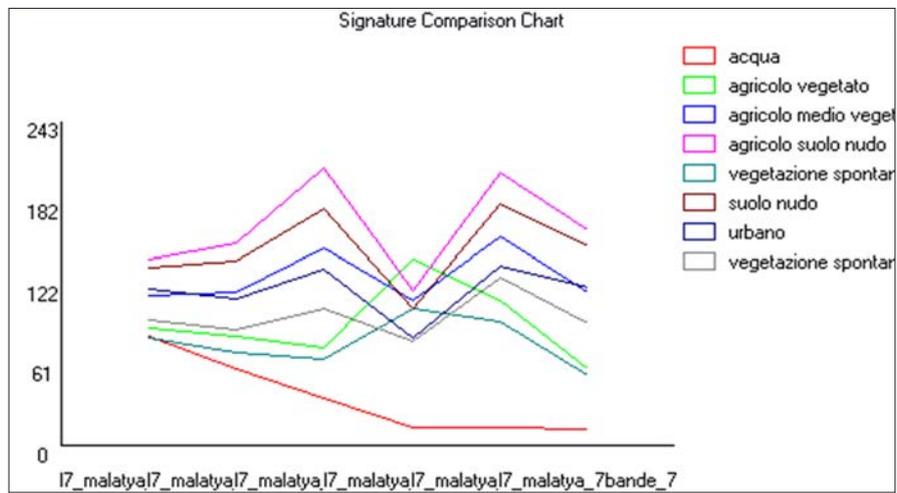


Figura 238: Firme spettrali delle classi di uso del suolo considerate (Marcolongo, Palmieri e Simone - in stampa).

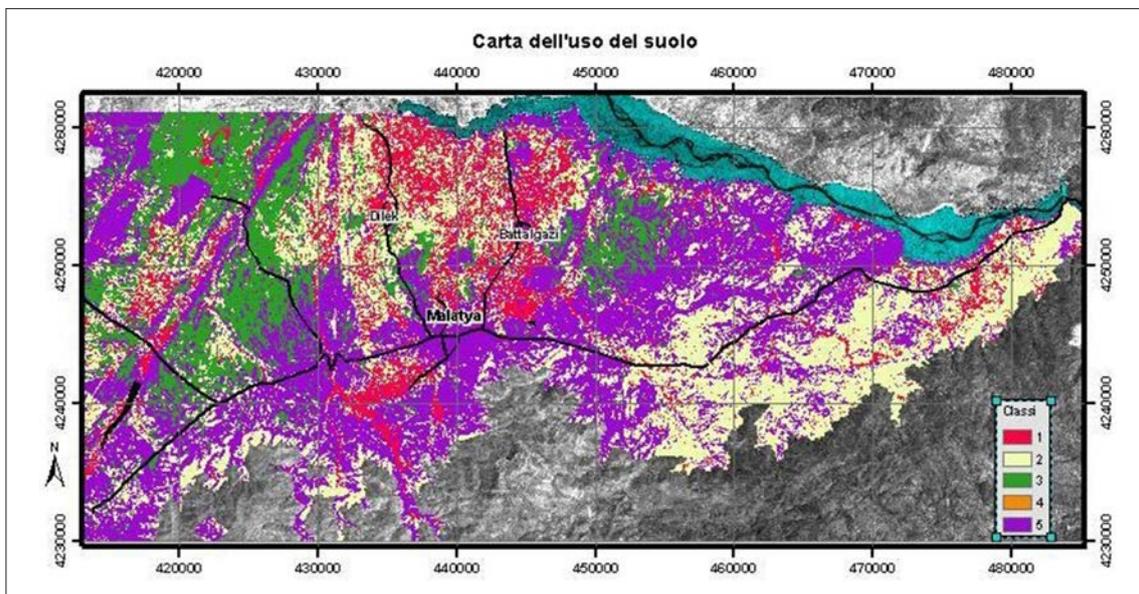


Figura 239: Carta dell'uso del suolo (Marcolongo, Palmieri e Simone - in stampa).

Il quadro complessivo è in questo caso più articolato, sebbene le classi predisponenti all'erosione siano sempre concentrate nei settori meridionale e centro-orientale. Nella fascia più orientale, infatti, prevalgono di nuovo appezzamenti agrari coltivati come nella parte centrale della piana di Malatya, che usualmente stabilizzano il territorio.

#### Carta della litologia

Quindi è stata realizzata l'ultima carta tematica della serie, quella litologica, rielaborando le due carte geologiche alla scala 1:100.000 corrispondenti ai fogli L40 ed L41.

La sequenza litologica originaria, particolarmente complessa nell'arco strutturale dei monti del Tauro considerato sia per le rocce sedimentarie che per quelle ignee e metamorfiche, è stata semplificata e accorpata in 5 grandi classi. All'interno di ognuna di esse le varie formazioni influenzano più o meno allo stesso modo il tipo e il grado di erosione, per cui si è giunti a una suddivisione del territorio sufficientemente chiara e coerente con i tematismi visti in precedenza. Dalle rocce sciolte incoerenti o semicoerenti (ghiaie, sabbie, conglomerati poco cementati) si passa a rocce sedimentarie eterogenee variamente coerenti (*flysch*, argille, marne, calcareniti, arenarie, conglomerati), a rocce carbonatiche compatte (calcari, dolomie, marmi), a rocce ignee effusive e rocce metamorfiche meno compatte (tufi e scisti alterati) e infine a rocce ignee, sia intrusive che effusive, compatte. La seguente tabella propone una riclassificazione dei litotipi in base alla loro suscettibilità all'erosione (Tabella 5).

Classe	Descrizione	Riclassificazione
1	Rocce sciolte (depositi alluvionali e detritici)	4
2	Rocce sedimentarie eterogenee ( <i>flysch</i> , calcareniti, conglomerati ecc.)	5
3	Rocce carbonatiche compatte (calcari e dolomie, marmi)	1
4	Rocce effusive e metamorfiche menocompatte (tufi, scisti)	2
5	Rocce intrusive, effusive e metamorfiche compatte (graniti, basalti, gneiss)	1

Tabella 5: Riclassificazione dei litotipi in base alla loro suscettibilità all'erosione.

La carta litologica che ne consegue (Figura 240) evidenzia la presenza di formazioni particolarmente erodibili ed estese (argille neogeniche e formazioni *flyschoidi*, rocce sciolte) nella parte centro-occidentale dell'area investigata, mentre la fascia dei rilievi meridionali (rocce carbonatiche compatte) e la porzione orientale (rocce ignee e metamorfiche compatte) sono meno soggette alla trasformazione del paesaggio per erosione.

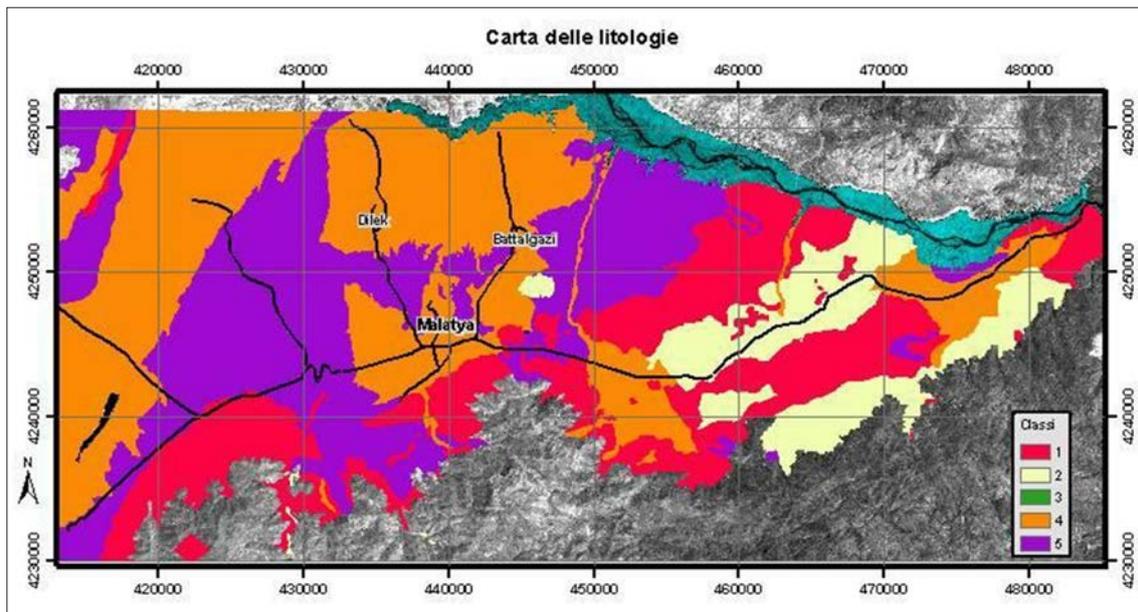


Figura 240: Carta delle litologie (Marcolongo, Palmieri e Simone - in stampa).

*Carta finale della suscettibilità all'erosione*

Si è giunti quindi alla elaborazione della carta tematica finale della suscettibilità all'erosione, riassuntiva di tutti i parametri sin qui considerati. Questi tuttavia non intervengono sulla sua formazione in egual misura, ma secondo un rapporto di peso piuttosto variabile. La sua stima è ovviamente soggettiva, ma le osservazioni dirette di campagna e i dati bibliografici disponibili hanno suggerito la seguente taratura (Tabella 6).

<i>Parametri del modello di suscettibilità all'erosione</i>	<i>Peso relativo</i>
Pendenza	2
Copertura vegetale (NDVI)	1,5
Uso del suolo	1
Litologia	2

*Tabella 6: Taratura dei parametri considerati.*

Il maggior peso nell'attivazione e nello sviluppo dell'erosione sicuramente è imputabile al grado di pendenza dei versanti, come pure al tipo di roccia sciolta o lapidea che si incontra. La copertura vegetale contribuisce in modo inversamente proporzionale a incrementare tale fenomeno con un peso minore, ma senz'altro superiore a quello dell'uso del suolo che globalmente viene preso come valore di base.

La moltiplicazione dei punteggi delle singole classi di ciascun parametro per il peso relativo dello stesso porta a dei valori corretti, che vengono da ultimo sommati in modo lineare secondo un intuitivo algoritmo<sup>30</sup>.

Si ottengono quindi punteggi finali che possono oscillare nell'ambito di un intervallo compreso tra 0 e 33 (Figura 241 e Tabella 7). Osservando l'istogramma della loro distribuzione si identificano 5 classi di propensione all'erosione a cavallo di picchi o insiemi di picchi significativi, che dimostrano di avere una reale consistenza fisico-ambientale.

Il risultato finale di questa procedura metodologica è quindi la carta della suscettibilità all'erosione (Figura 242), calibrata sulle condizioni fisico-ambientali proprie della piana di Malatya. Essa descrive il territorio della ricognizione in termini di maggiore o minore propensione ai cambiamenti morfologici.

Le zone stabili e produttive sono da sempre le più ambite da parte dell'uomo, attraendo tanto gli insediamenti che le pratiche agricole. Si tratta di paesaggi maturi e complessi spesso con una giustapposizione delle strutture recenti o attuali su quelle più antiche<sup>31</sup>. Qui le emergenze archeologiche possono essere numerose e la loro identificazione implica un approccio deduttivo che parte da una attenta osservazione della organizzazione areale ('pattern') dei vari elementi morfologici e antropici presenti. Nel nostro caso si può dire che tutte le porzioni della piana con un grado di erodibilità trascurabile racchiudono e conservano la totalità delle possibili tracce di occupazione antica.

Di contro le zone a intensa dinamica morfologica, segnate da valori di erodibilità massima o elevata, oltre a non aver mai attratto l'uomo tendono a cancellare ogni possibile testimonianza del passato. Poiché i processi di erosione osservati localmente, guidati in particolare dalla energia del rilievo e dalla litologia, si sviluppano secondo una scala temporale molto più dilatata

<sup>30</sup> Suscettibilità all'erosione  $\epsilon_{\sigma} = [(\text{slope}_{\text{reclass}} \times 2) + (\text{NDVI}_{\text{reclass}} \times 1,5) + (\text{land use}_{\text{reclass}} \times 1) + (\text{lithology}_{\text{reclass}} \times 2)]$ .

<sup>31</sup> Il termine 'giustapposizione' implica un adeguamento morfologico del recente alle forme più antiche, mentre la sovrapposizione rimanda a una cancellazione delle tracce del passato.

di quella che riguarda gli insediamenti antichi, si può ritenere con verosimile certezza che in queste zone non vi siano mai state occupazioni consistenti e stabili.

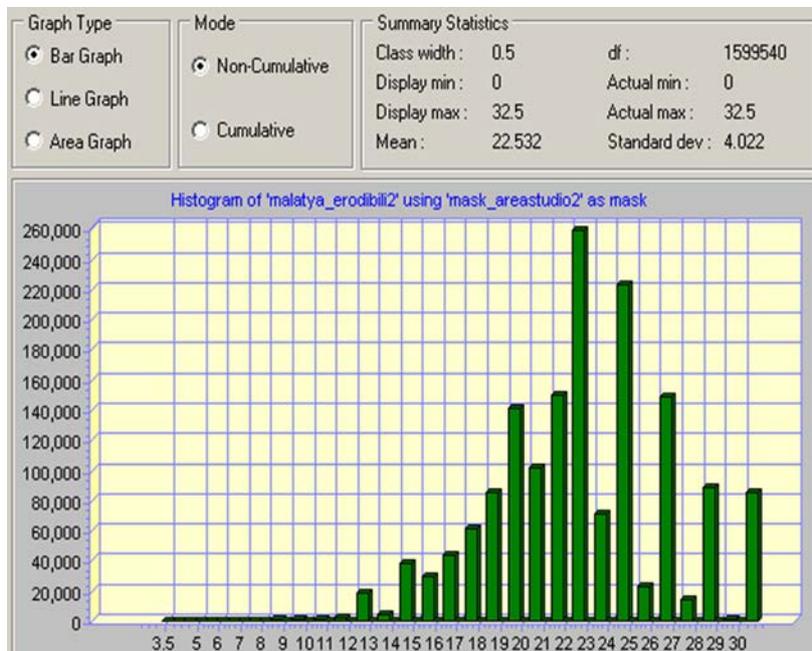


Figura 241: Istogramma delle classi di propensione all'erosione (Marcolongo, Palmieri e Simone - in stampa).

Intervalli di Valori	Classe	Descrizione
0-7	0	Non classificato < valore minimo
7-15	1	Erodibilità scarsa/trascurabile
15-19	2	Erodibilità bassa
19-22	3	Erodibilità media
22-27	4	Erodibilità elevata
27-33	5	Erodibilità massima

Tabella 7: Intervalli di propensione all'erosione.

Sono quindi le zone di transizione a erodibilità media e medio-bassa a essere le più interessanti per una ipotetica espansione dell'area di occupazione nei vari periodi, che rappresenta un tentativo di ricostruzione sincronica del rapporto tra l'insediamento e il suo territorio.

Nello specifico, la distribuzione complessiva della erodibilità può essere così riassunta:

- prevalenza nella parte centro occidentale, ondulata o pianeggiante con affioramenti flyschoidi e alluvionali, di una suscettibilità all'erosione elevata che diviene massima lungo i corsi d'acqua e in alcune particolari zone. Si ritaglia in essa l'area centrale coltivata più stabile (suscettibilità all'erosione medio-bassa) e l'area stabilizzata nei dintorni dell'aeroporto;
- zone di transizione estese soprattutto nella porzione centrale della piana e nella parte più sudorientale, dove il modello insediativo antico potrebbe per questo essere stato più denso e successivamente eroso e obliterato;

- alternanza a 'pelle di leopardo' di aree stabili e non stabili nella parte orientale, caratterizzata da una situazione molto variabile;
- fascia di massima erodibilità orientata SO-NE, coincidente con un particolare assetto morfotettonico, lungo le pendici nord occidentali di alte cime montuose quali il Selvi Dagi (1412 m s.l.m.) e il Meyon (1107 m s.l.m.).

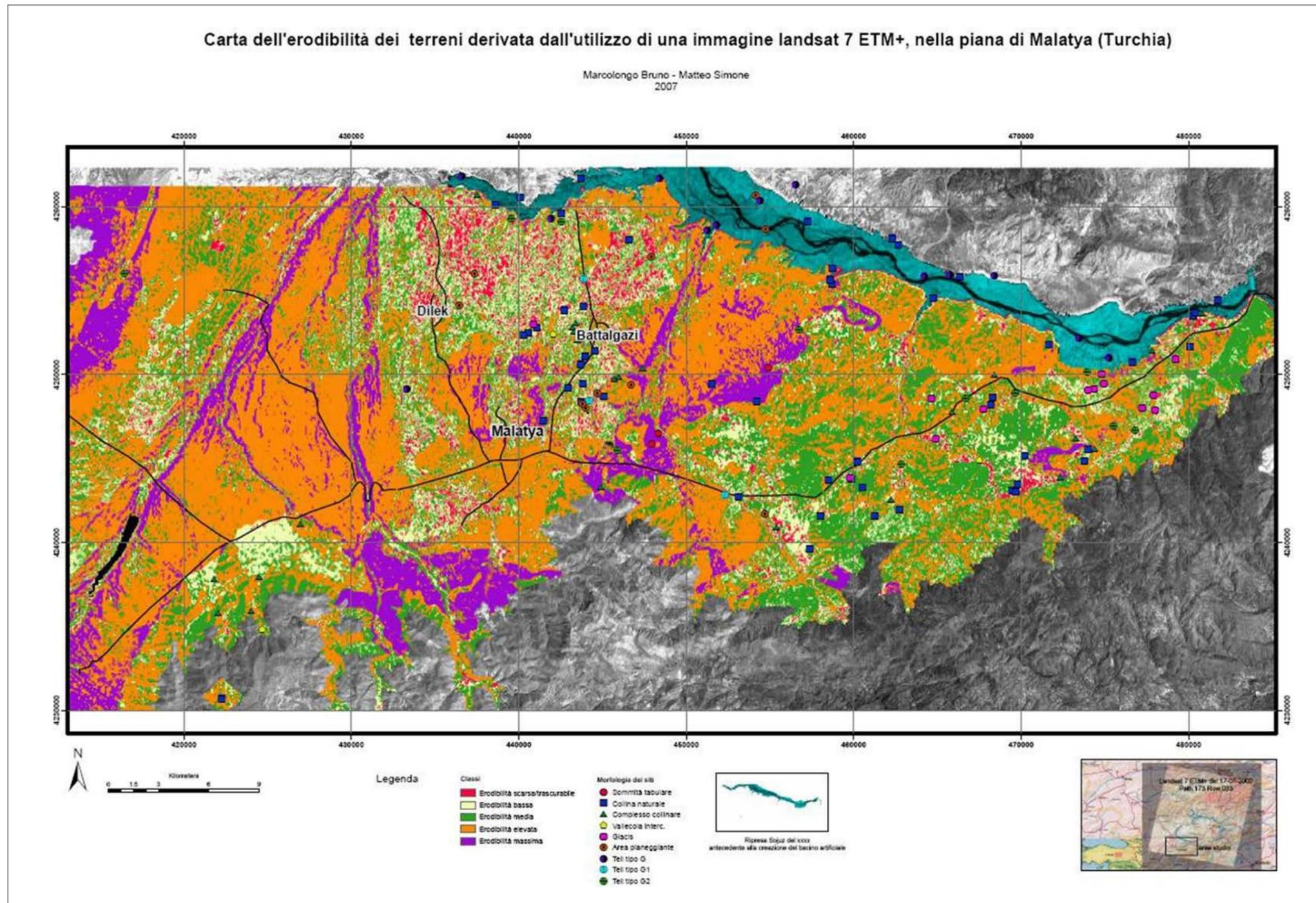


Figura 242: Carta finale di suscettibilità all'erosione (Marcolongo, Palmieri e Simone - in stampa).

#### 6.5.4 Considerazioni finali sui rapporti tra modello insediativo e ambiente

Il rapporto tra la classificazione geomorfologica dei siti e le varie categorie di suscettibilità all'erosione è il primo tema che viene subito sollecitato per un approfondimento dell'analisi dalla disponibilità dei dati sin qui illustrati.

La tabella sottostante propone in forma di matrice la collocazione delle varie tipologie di contesto fisico dell'emergenza archeologica nei diversi settori di maggiore o minore instabilità del territorio (Tabella 8).

<i>höyük</i>	0 e 1	2	3	4	5
Tell	11	4	3	5	5
Colline naturali	12	6	16	15	4
Tabulati	0	0	1	0	2
Complesso collinare	2	3	6	7	5
Glacis	1	4	4	4	0
Pianori	5	2	3	4	0
Totale	31	19	33	35	14

Tabella 8: Correlazione siti - settori di instabilità del territorio.

I siti classificati 'colline artificiali' (*tell* o *tepe*), espressione di una presenza insediativa più o meno continua e lunga, sono ubicati come è giusto attendersi nelle porzioni più stabili e produttive della piana di Malatya (classi 0-1 e 2). Qui si concentrano anche numerosi insediamenti su collina naturale in buono stato di conservazione, assieme ad altri legati a zone pianeggianti e a *glacis*. Verosimilmente i 50 siti rilevati nelle zone a bassa (classe 2) o trascurabile (classe 0-1) erodibilità costituiscono la totalità delle emergenze qui possibili.

Diversa è la situazione per le zone a erodibilità media (classe 3) ed elevata (classe 4), dove si collocano gruppi altrettanto numerosi di siti. La loro tipologia prevalente diviene la 'collina naturale' e il 'complesso collinare', mentre in subordine si trova la condizione di *glacis* in prossimità dei rilievi più marcati. Il numero complessivo di siti riconosciuti (rispettivamente 33 per la classe 3 e 35 per la classe 4) potrebbero comunque essere inferiore alla totalità dei punti di popolamento effettivamente frequentati nell'antichità.

Infine, le categorie geomorfologiche dei siti individuati in aree a massima erodibilità risultano molto coerenti con l'alta energia del rilievo che si riscontra. Si ha un numero ridotto di emergenze (14), ma sempre in condizioni di prominenza sul territorio circostante, mancando completamente l'occupazione in zone piane o di debole *glacis*. Il loro numero potrebbe essere stato maggiore nel passato, ma la forte predisposizione all'innescò e allo sviluppo dell'attività erosiva con buona probabilità ha cancellato le tracce di molti di essi.

Emerge da tutto questo la proposta di un modello virtuale dell'estensione del popolamento antico applicato in modo non lineare sulla piana di Malatya, con un ipotetico infittimento dei siti in alcune fasce specifiche e il mantenimento del loro numero invece in altre aree. Questo tipo di operazione potrebbe essere spinto fino a una suddivisione diacronica delle potenziali aree di insediamento se si tiene conto della distribuzione percentuale delle varie categorie geomorfologiche dei siti attraverso le diverse fasi culturali riconosciute.

In sintesi si possono riconoscere le seguenti correlazioni:

- durante 'Early and Middle Chalcolithic' vi è una distribuzione più o meno simile di siti attraverso tutte le tipologie, con esclusione della categoria 'tabular summit', quindi una occupazione generalizzata e diffusa dell'intera piana di Malatya;
- una grande frattura nel modello insediativo (*iatus*) si presenta con 'Early Bronze Age I – II', periodo nel corso del quale scompare la classe di 'Flat land' e crescono numericamente molto le categorie di 'colline naturali' e *tell*. Ovvero in altri termini si diffonde la scelta di luoghi cospicui ed elevati di più facile difesa in momenti forse di maggiore insicurezza e ridotto potere centrale. Tale tendenza continua durante 'Early Bronze Age III';
- la classe di siti denominata 'pianori' risulta infine molto scarsa attraverso tutte le epoche, forse perché essa si ubica quasi esclusivamente in zone flyschoidi a elevata erodibilità dove le tracce di siti molto esposti vengono facilmente e profondamente cancellate.

L'erosione, come è logico attendersi, appare aver agito più lungamente e radicalmente nei confronti dei siti più antichi. Nel Calcolitico infatti sono meno numerosi proprio i siti a maggiore energia di rilievo, come 'colline naturali' e *tell*, che vengono attaccati per primi dalla dinamica esogena.

In seguito durante l'intera Età del Bronzo si assiste a un drastico aumento di siti posti su zone elevate ('colline naturali', *tell*, 'complessi collinari' e 'tabulari') e a un abbandono dei 'pianori'. Tutto ciò indica una scelta intenzionale a seguito di ampi mutamenti sociali ed economici, ma che percentualmente rimane più testimoniata di quella dei periodi precedenti poiché, tra l'altro, l'attività erosiva è stata più limitata nel tempo.



## 7. Panorami desertici

'Like the Paradise of eternity, none can enter it  
till after having previously passe over hell-bridge'  
*Recita William Gifford Palgrave,*  
*citando un autore Arabo,*  
*al momento del suo ingresso nell'oasi di*  
*Dūmat al-Jandal, nel 1863*

Il vastissimo quadrilatero che è la Penisola arabica ha sperimentato una storia paleo-climatica fatta di continue fluttuazioni scandite da fasi umide alternate a periodi di più o meno accentuata aridità (Figura 243). Tali mutazioni del clima, e dunque dell'ambiente, sono documentate sin dalle epoche preistoriche più antiche, ma lo sono ancor più dettagliatamente per la fase preistorica più recente, l'Olocene, o Neolitico in termini di culture antropiche (McClure 1978; Garrard e Harvey 1981; Schultz e Whitney 1986; Lézine *et al.* 1998; Wilkinso 2003; Loreto 2012).

A partire dalla fine dell'ultima glaciazione, intorno ai 14.000 anni fa, l'Arabia conobbe un clima radicalmente diverso da quello attuale, poiché compresa tra il favorevole sistema nord Atlantico e il sistema monsonico dell'Oceano Indiano. Questa congiuntura climatica raggiunse il suo *climax* tra i 10.000 e gli 8.000 anni fa, quando anche le più settentrionali aree della Penisola, dove oggi il grande deserto del Nefūd e le distese laviche della Harrat al-Harrah dominano il panorama nordarabico, poterono beneficiare di un regime pluviale e idrologico di superficie ottimale (*optimum* pluviometrico) (Sanlaville 1992; Arz *et al.* 2003; Jennings *et al.* 2015)<sup>32</sup>.



Figura 243: Aree della Penisola arabica analizzate nel capitolo.

<sup>32</sup> Le tracce di questo fortunato assetto climatico furono riconosciute, per la prima volta, da H.A. McClure (McClure 1976), che identificò fra le dune mobili del Rub' al-Ḥālī dei sedimenti di tipo lacustre, chiare tracce di una diversa morfologia del suolo e, di rimando, dell'ambiente. Negli anni '80, come si vedrà, i lavori della

Attraverso la foto interpretazione, mediante lo studio a falsi colori della composizione dei suoli e il riconoscimento di macro strutture antropiche, è possibile identificare due tipi di strategie di sussistenza relative a due diverse *facies* neolitiche di tipo socio-economico: la prima, definibile come Neolitico del deserto, è riconoscibile nelle aree interdunali, ovvero fra le barcane (dune mobili), dove risultano tipi di suoli che sono il risultato della deposizione di livelli argillosi di origine lacustre; la seconda è quella definibile come Neolitico delle Harrat, ovvero individuabile soprattutto lungo quelle aree arabiche caratterizzate da deserti rocciosi di origine vulcanica, appunto le distese laviche delle Harrat, che occupano gran parte del fianco occidentale della Penisola.

Risulta infine interessante, ai fini didattici di questo manuale, presentare sia il caso studio dei *qanāt* dell'Arabia centro-settentrionale, veri e propri acquedotti sotterranei che in epoca islamica intercettarono la falda freatica generatasi proprio grazie al percolare delle acque di superficie durante i millenni di *optimum* pluviometrico, sia il caso applicativo di considerazioni di natura geomorfologica integrate ad aspetti toponomastici del paesaggio antico e moderno.

## 7.1 Arabia Saudita

### 7.1.1 *Paleo-laghi e cacciatori-raccoglitori del Nefūd al-Kabīr*

L'area coperta dall'analisi telerilevata, centrata attorno all'oasi storica di Dūmat al-Jandal, è un rettangolo orientato in senso est-ovest, realizzato mediante un mosaico di immagini multispettrali Landsat-7ETM (Figura 244), che copre le propaggini settentrionali del Nefūd al-Kabīr e il corso del wādī aṣ-Ṣirḥān.

Osservando la scena da un punto di vista macroscopico si determina come la regione sia dominata dal poderoso alluvio del Ṣirḥān, ancora attivo nel tardo Pleistocene e Olocene antico, che nasce al confine tra la Giordania e l'Arabia Saudita, presso il cosiddetto bacino di Azraq. Il suo andamento prosegue poi verso sud-est per 250 km sino a immettersi nella valle del Jawf.

Da qui il wādī cambia bruscamente corso dirigendosi decisamente verso est, per 160 km, attraversando Dūmat al-Jandal e Sakaka, per perdersi pochi chilometri a est di Sakaka nelle distese del deserto del Nefūd.

#### *Osservazioni da remoto*

Restringendo il campo dell'analisi a un raggio di 50 km attorno a Dūmat al-Jandal è possibile osservare come circa 40 km a est del sito si possano distinguere l'attuale corso del Ṣirḥān, che procede in direzione est passando a nord di Dūmat al-Jandal, e un secondo alluvio che prosegue in direzione sud-est, a sud di Dūmat al-Jandal, che si dirige in pieno deserto del Nefūd all'altezza del moderno villaggio di Aṣfān.

Ad un livello di foto-interpretazione, dunque, si è ipotizzato che questo secondo alluvio, che procede circa 15 km a sud di Dūmat al-Jandal ed è attualmente ricoperto dalle sabbie e dalle dune del Nefūd, possa essere un paleo-alveo relativo a un antico e differente andamento delle propaggini orientali del wādī aṣ-Ṣirḥān (Figura 245).

Procedendo con l'analisi foto-interpretativa a un livello microscopico è possibile distinguere tra le barcane, all'interno di questo presunto paleo-alveo, delle aree dominate da porzioni tonali di riflesso variabile, di certo di natura differente rispetto alle sabbie di accumulo eolico, e verosimilmente composte da fini depositi lacustri di natura argillosa. Queste aree sono localizzate soprattutto a est del centro urbano di Aṣfān, un'area dunque che deve aver attratto l'uomo in cerca di risorse idriche.

Missione archeologica italiana in Yemen permisero di ricostruire la paleo-idrografia del Ramlat as-Sab'atayn (de Maignet 1996), mentre più recentemente si moltiplicano le attestazioni di paleo-corsi d'acqua, che solcano la quasi totalità della Penisola, e bacini lacustri (Lawler 2014; Loreto 2018a).

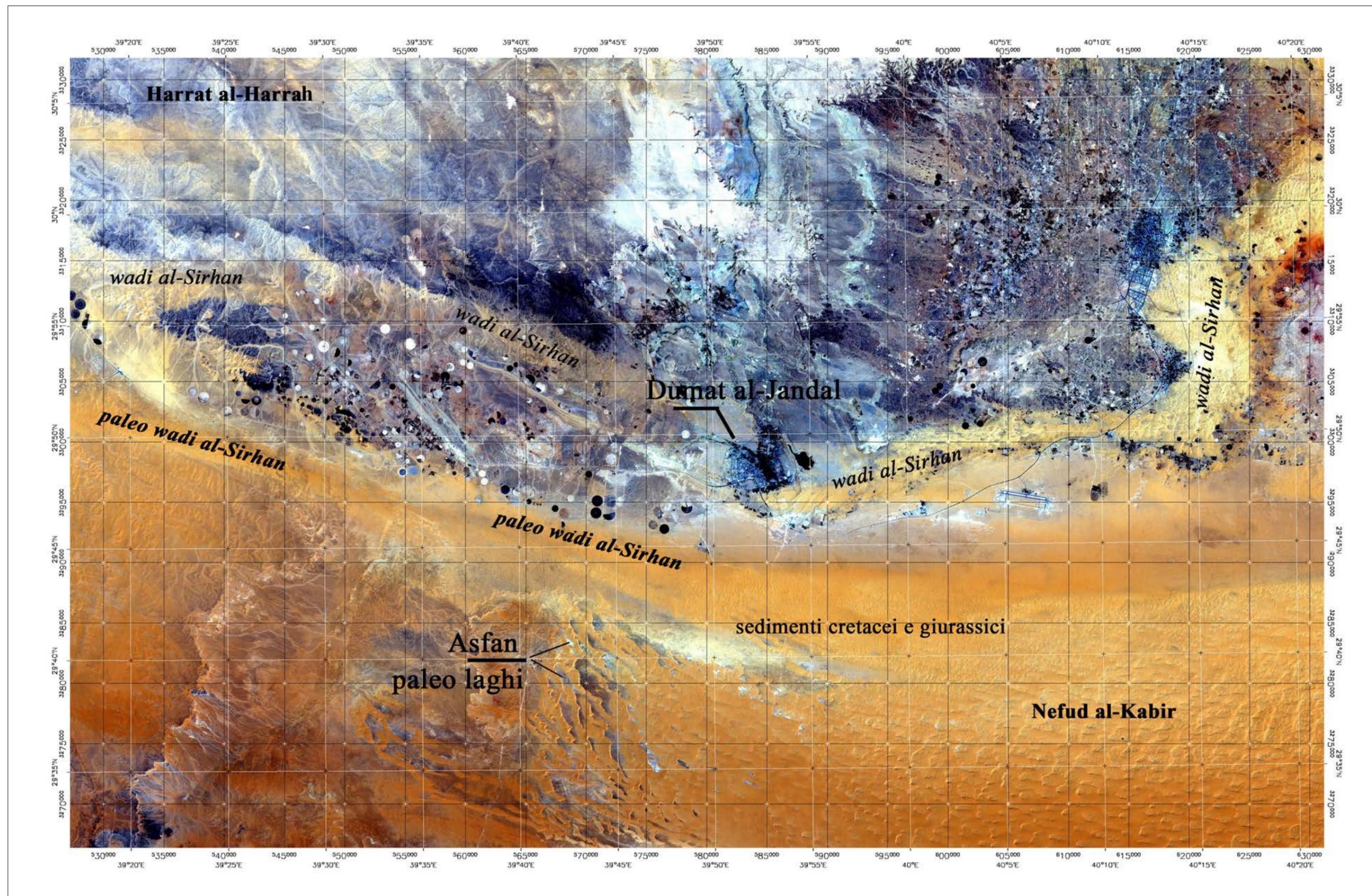


Figura 244: Mosaico di LANDSAT ETM multispettrali elaborate a falsi colori.

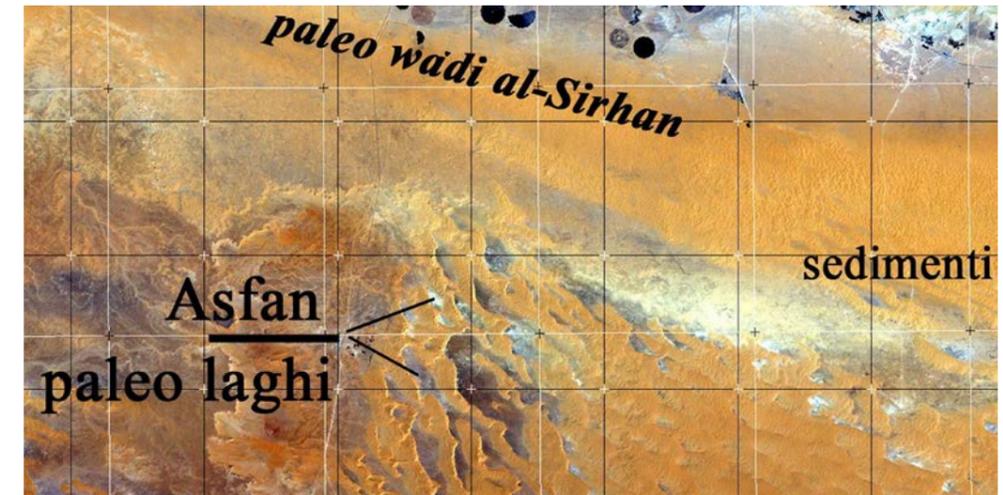


Figura 245: Dettaglio della ripresa Landsat ETM multispettrale elaborata a falsi colori.

Come è noto, essendo i contesti desertici di questo tipo del tutto privi di strutture antropiche, ma ricchi di evidenze materiali, come gli strumentari litici in selce ovviamente non visibili da remoto, una serie di prospezioni sul campo ha dimostrato la validità dell'impiego di tali considerazioni effettuate preliminarmente su immagini multispettrali elaborate a falsi colori per la definizione dei paleo-suoli (Figure 245-246).

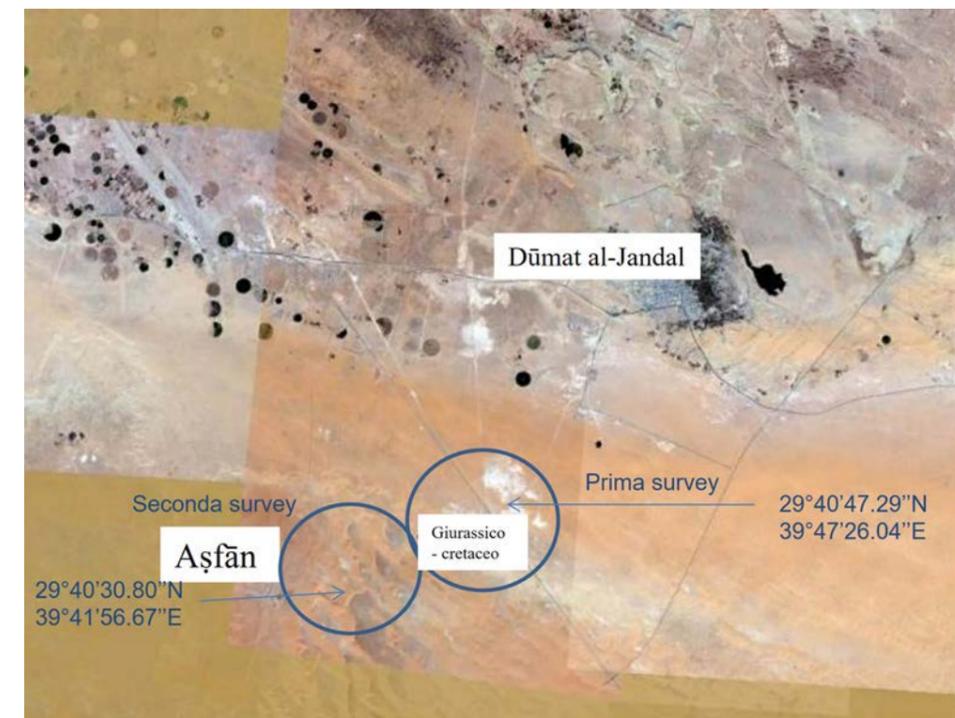


Figura 246: Mosaico di riprese Digital Globe GeoEye USGS.

*Verifiche sul campo*

L'analisi sul campo è stata condotta in due aree particolari: la prima a 7 km a nord-est di Aṣḥān (coordinate medie dell'area indagata 29°40'47.29"N, 39°47'26.04"E); la seconda a 2 km a est del centro abitato (coordinate medie dell'area indagata 29°40'30.80"N, 39°41'56.67"E).

La prima area scelta per l'indagine è coincisa con una miniera di calcaree attualmente in uso. In questa regione le sabbie del Nefūd coprono, di fatti, una serie di sedimenti giurassici e cretacei che si estendono a nord, est e sud del Nefūd per un raggio di circa 250 km. Si tratta di rocce terziarie, arenose e calcaree che preservano fossili animali del tipo tigilliti (Figura 247) (Wallace, Dini e al-Farasani 1997).



Figura 247: Tigilliti in banchi calcarei del Terziario dal Nefūd settentrionale.

La seconda area indagata è stata scelta in base alla possibilità di raggiungere le aree lasciate scoperte dalle barcane del deserto del Nefūd, testimonianza del più recente processo di desertificazione dell'Arabia e in continuo movimento attraverso i secoli. Varie stratigrafie di grande interesse sono state messe in luce, con una sequenza di sedimenti che non lasciano dubbi, ovvero una successione di diatomee (fossili di vegetali di origine lacustre) e livelli di argilliti grigio-verdastre (Figura 248).



*Figura 248: Stratigrafia di un paleo-lago del Nefūd settentrionale, datato tra i 10.000 e gli 8.000 anni fa, composta da banchi di diatomiti (in bianco) che sigillano depositi argillosi grigio-verdi.*

Sulla base dei dati stratigrafici raccolti presso Aṣfān è possibile dunque postulare la presenza di un paleo-corso del Ṣirḥān. Tale corso d'acqua, che attualmente passa attraverso Dūmat al-Jandal e Sakaka, sembra fosse dotato di un corso differente, che proseguiva da nord-ovest verso sud-est con andamento regolare, mentre oggi cambia bruscamente direzione, verso est, dopo 250 km dalla sorgente.

La presenza di un livello di diatomiti che sigilla il deposito argilloso permette, inoltre, di suggerire la presenza di uno o più paleo-laghi alimentati dal wādī. La dimostrazione della validità di tale ipotesi risiede nel rinvenimento di siti di occupazione antropica lungo i margini delle aree dove emergono i sedimenti lacustri. Questi siti si compongono di concentrazioni di migliaia di strumenti litici che attestano accampamenti temporanei per la lavorazione della selce e per la caccia e la lavorazione delle risorse alimentari: punte di freccia, lame, bulini e raschiatoi confermano le attività di caccia e raccolta, ma non solo. I siti di Aṣfān, sebbene non conservino strutture di alcun genere, dovevano essere centri di produzione per lo strumentario litico, come si determina dal rinvenimento di oggetti a diversi stadi di lavorazione (Figura 249).



Figura 249: Sito neolitico di Asfān in fase di raccolta sistematica dei manufatti litici in selce, tra cui un raschiatoio, due lame e un nucleo in fase di lavorazione.

### 7.1.2 Pseudo-architetture della fertile Harrat al-Harrah Antefatto

Sin dal 1927, grazie al tenente di volo P. Maitland, un pilota del servizio postale britannico aereo di base in Iraq che percorreva la rotta Baghdad-Cairo attraverso la Giordania, sono note migliaia di strutture dagli 'strani muri' (Maitland 1927) che costellano le regioni dalla Turchia meridionale allo Yemen, attraverso la Siria, la Giordania e l'intera dorsale occidentale della Penisola arabica, sostanzialmente lungo la linea di frattura (*rift*) determinatasi dal movimento tettonico di distacco della Placca arabica dallo Scudo africano. Oggi tali strutture sono ben note grazie proprio alle possibilità che strumenti *open source* come *Google Earth* forniscono, permettendo a svariati progetti di ricerca di mappare tali evidenze architettoniche da remoto. Più recentemente, inoltre, lo scavo di alcune di queste ha confermato, per l'ambiente arabico settentrionale, come per il resto di esse, una datazione corrispondente alla piena epoca neolitica, in particolare in un'epoca aceramica (8.000-6.000 a.C.) (Loreto 2017: 89-95; Smith 2020; Thomas *et al.* 2021). Maitland intendeva, con 'strani muri', soprattutto i cosiddetti *desert kites* (aquiloni del deserto), strutture per la caccia estese svariata centinaia di metri e percepibili, nella loro interezza, solo dall'alto. Di questo tipo di struttura, spesso associata a costruzioni circolari di tipo singolo o a grappolo (*compound*), furono identificate circa 500 unità nel 1995, e oggi se ne conoscono oltre 3500, dalla Turchia meridionale allo Yemen centrale (Betts e Helms 1987; Holzer *et al.* 2010; Piccause *et al.* 2004; Kennedy 2012; Morandi Bonacossi e Iamoni 2012).

*Un approccio predittivo*

L'estremamente alto numero di tali strutture integrate, diverse decine di migliaia tra *kites*, agglomerati di varie dimensioni e complessità o tombe, e la loro distribuzione lungo un'areale tanto ampio ha imposto un approccio d'analisi che contemplasse una serie di metodologie integrate in grado di rispondere a un quesito primario, ovvero se tale ampia distribuzione rispondesse a una particolare ragione o si connotasse per un nesso di casualità.

Per rispondere a tale quesito risulta indispensabile la definizione del contesto paleo-ambientale in cui queste architetture si collocano, una loro classificazione tipologica e una definizione dei rapporti distributivi tra tipi di evidenze e risorse. L'esempio qui esposto si focalizza sulle aree di pertinenza della Missione archeologica italiana in Arabia Saudita, pertanto esamina l'estensione della Harrat al-Harrah compresa entro i confini della regione saudita nordarabica del Jawf (Figura 250).



Figura 250: L'area della Harrat al-Harrah, sulla destra del wādī aṣ-Ṣirḥān, come appare a colori naturali (RGB).

A una prima analisi macroscopica (Figure 251-252), come si è detto, queste evidenze architettoniche si dispiegano soprattutto lungo aree rocciose e raramente in prossimità di zone a elevata copertura sabbiosa eolica o caratterizzata da fenomeni alluvionali. Diviene pertanto utile definire, con elevato grado di accuratezza, quale sia il reale areale interessato dai fenomeni vulcanici, conseguenti al distacco dell'Arabia dall'Africa (innescatosi tra i 30 e i 20 milioni di anni fa), che hanno dato vita a suoli di origine magmatica.

Con l'ausilio della documentazione cartografica geologica è possibile identificare, innanzi tutto, la distribuzione delle regioni interessate da fenomeni vulcanici (Figura 251), con la definizione della più completa cartografia geologica relativa ai suoli che caratterizzano l'areale in questione, in grado di evidenziare eventuali risorse come gli affioramenti di selce, risorsa indispensabile per le comunità neolitiche arabe per la produzione di strumenti litici (Figura 252).

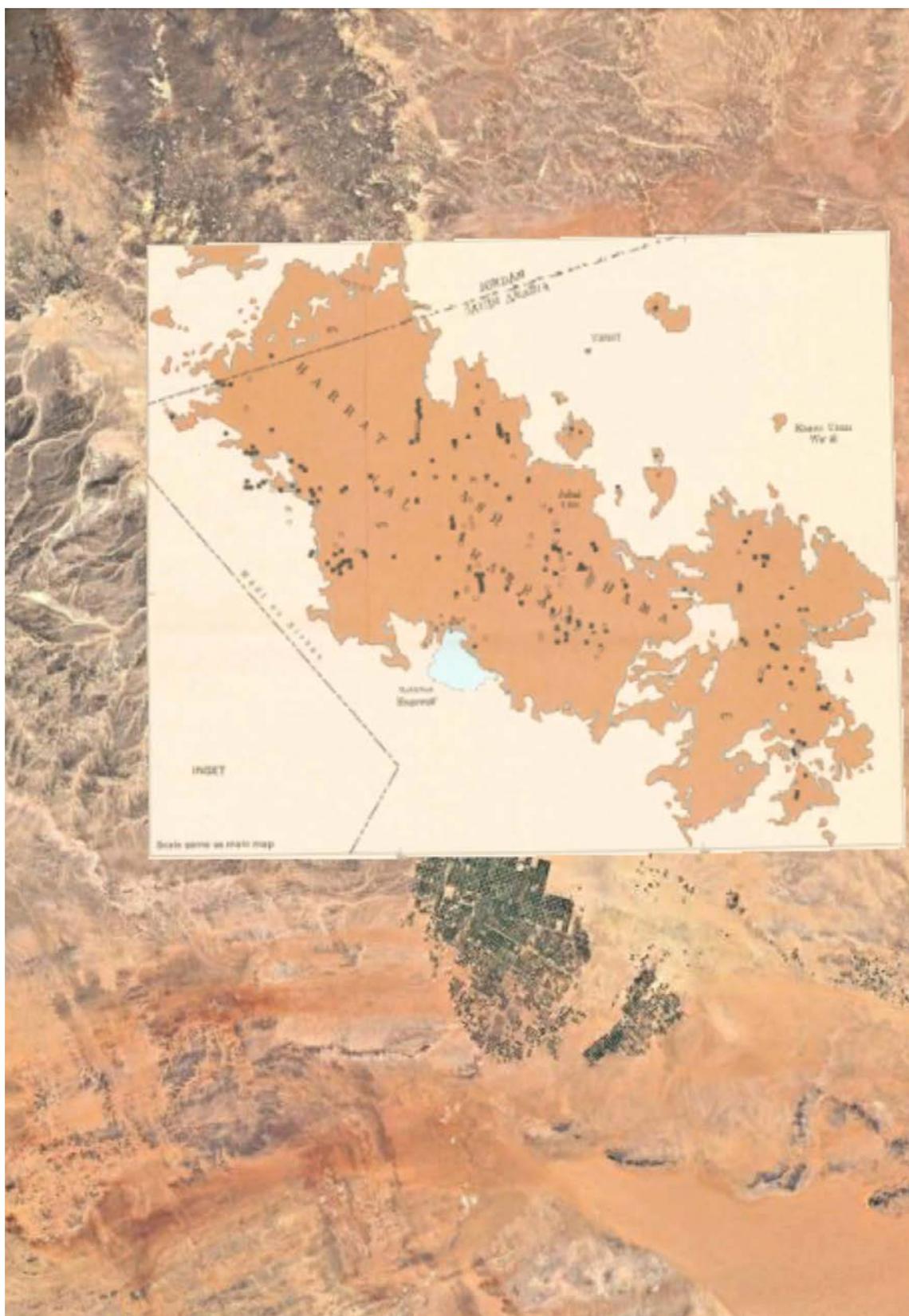


Figura 251: Estensione generale della Harrat al-Harrah sulla base della carta geologica (Saudi Geological Survey).

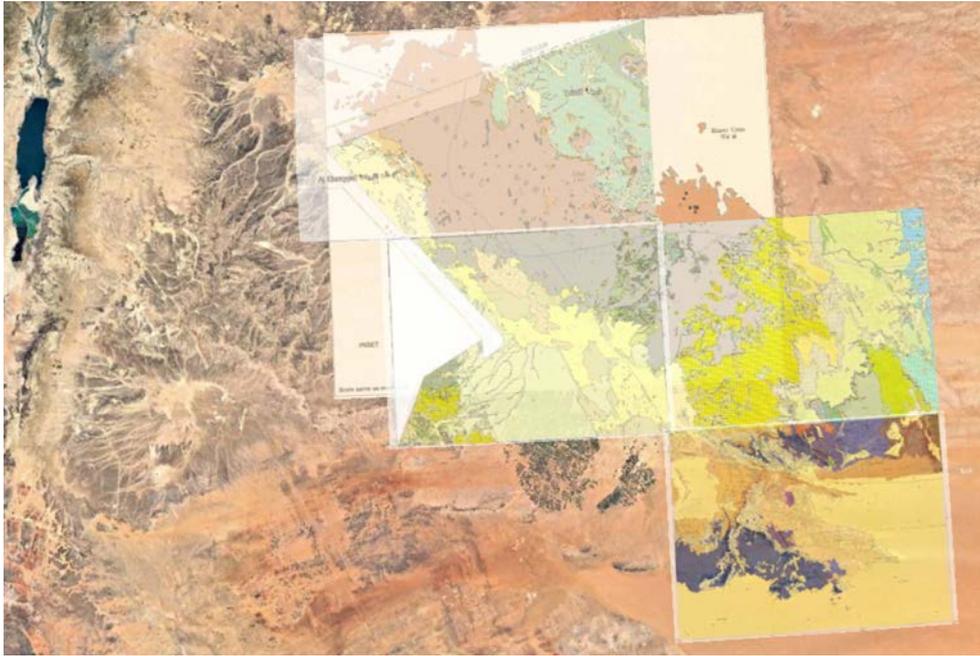


Figura 252: Estensione generale della Harrat al-Harrah con la sovrapposizione degli stralci delle carte geologiche di dettaglio che descrivono la completa geologia della regione (Saudi Geological Survey).

In seconda istanza interviene il telerilevamento da satellite, grazie all'impiego di elaborazioni composite di immagini a falsi colori che permettono di raffigurare, visivamente, i diversi tipi di suoli, ponendo l'accento, con gradazioni o tonalità di colore particolari, sugli elementi di maggior interesse e permettendo al telerilevatore di operare direttamente sul paleo-ambiente (Figure 253-254).

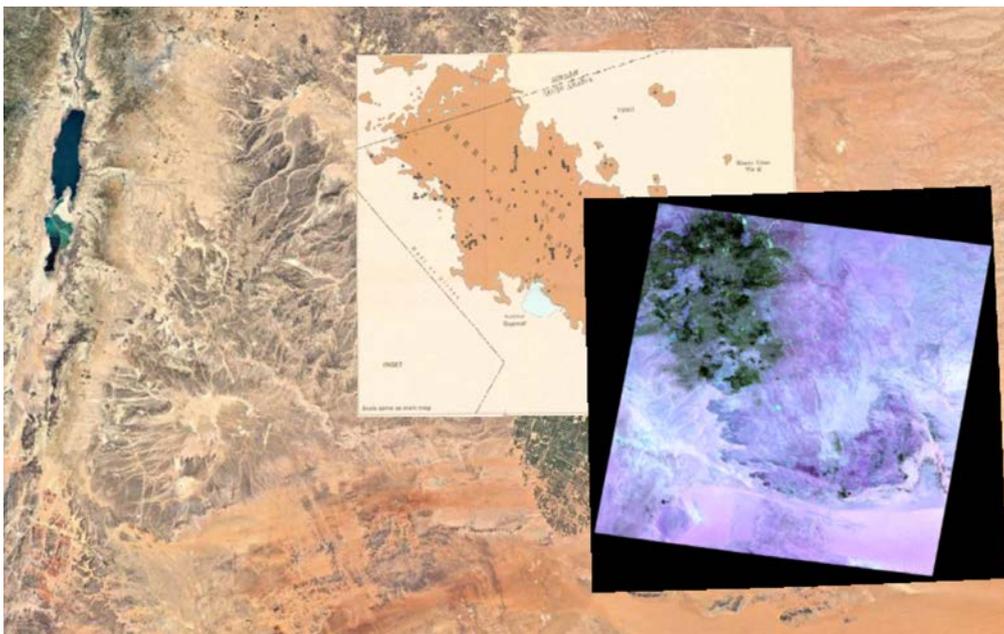


Figura 253: Definizione dettagliata della Harrat al-Harrah (colori dal marrone al nero) sulla base di una elaborazione a falsi colori (Landsat ETM, composizione delle bande 5-3-7 verde, blu, rosso).

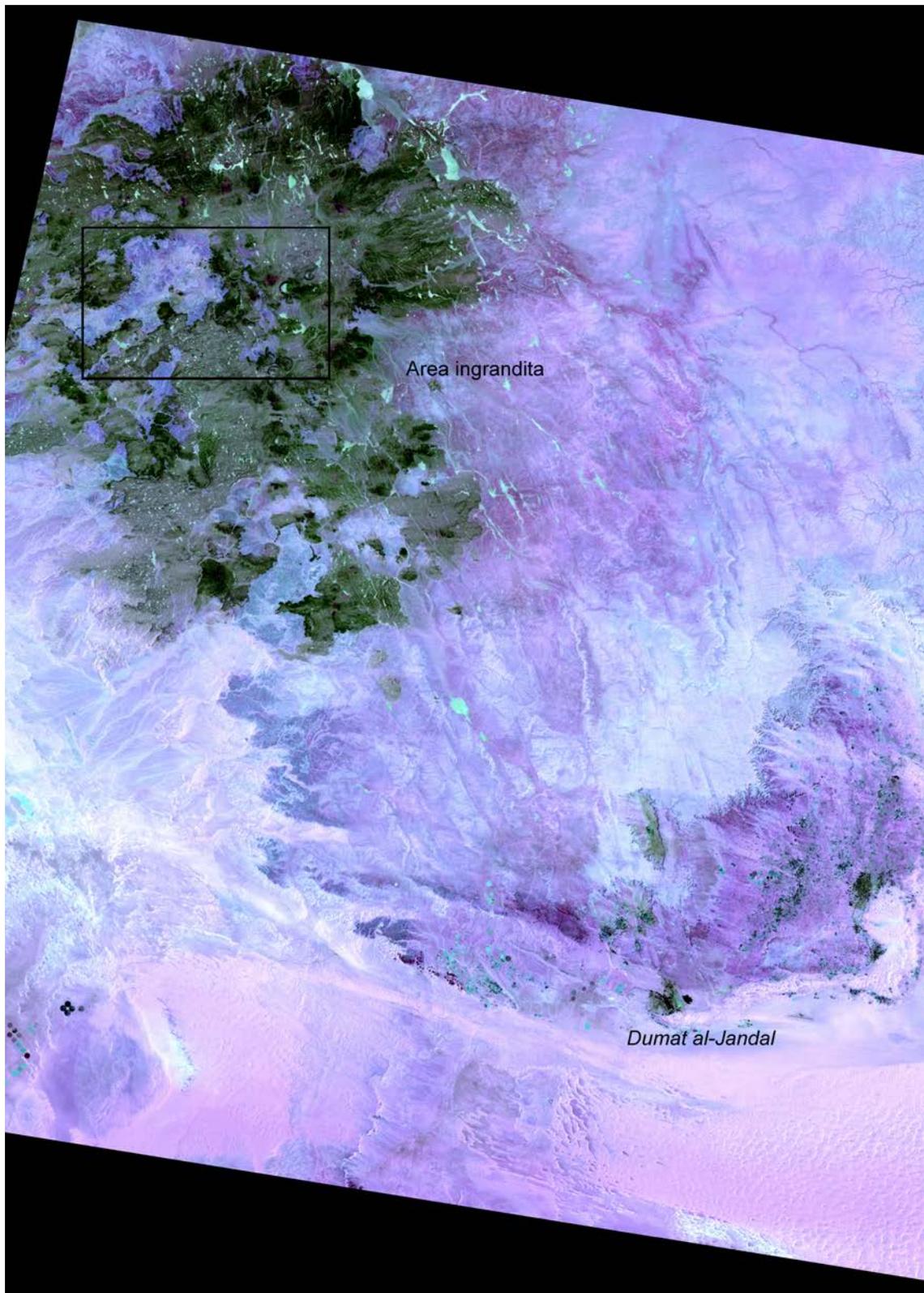


Figura 254: Landsat, composizione delle bande 5-3-7 verde, blu, rosso per la definizione di suoli vulcanici (colorazioni dal marrone al nero). Si distinguono, inoltre, i suoli argillosi e le sabkhas (gradazioni di celeste) e i suoli sabbiosi (gradazioni di viola) risultati da ruscellamento e deposizione eolica.

Una volta definiti con accuratezza i margini delle aree vulcaniche è possibile valutare quanto la distribuzione delle evidenze architettoniche di fatto combaci con i suoli vulcanici (Figura 255), e pertanto procedere alla loro ricerca e identificazione secondo un approccio predittivo e da remoto concentrando le analisi sulle aree potenzialmente valide ed evitando di disperdere la ricerca verso quei suoli infertili.

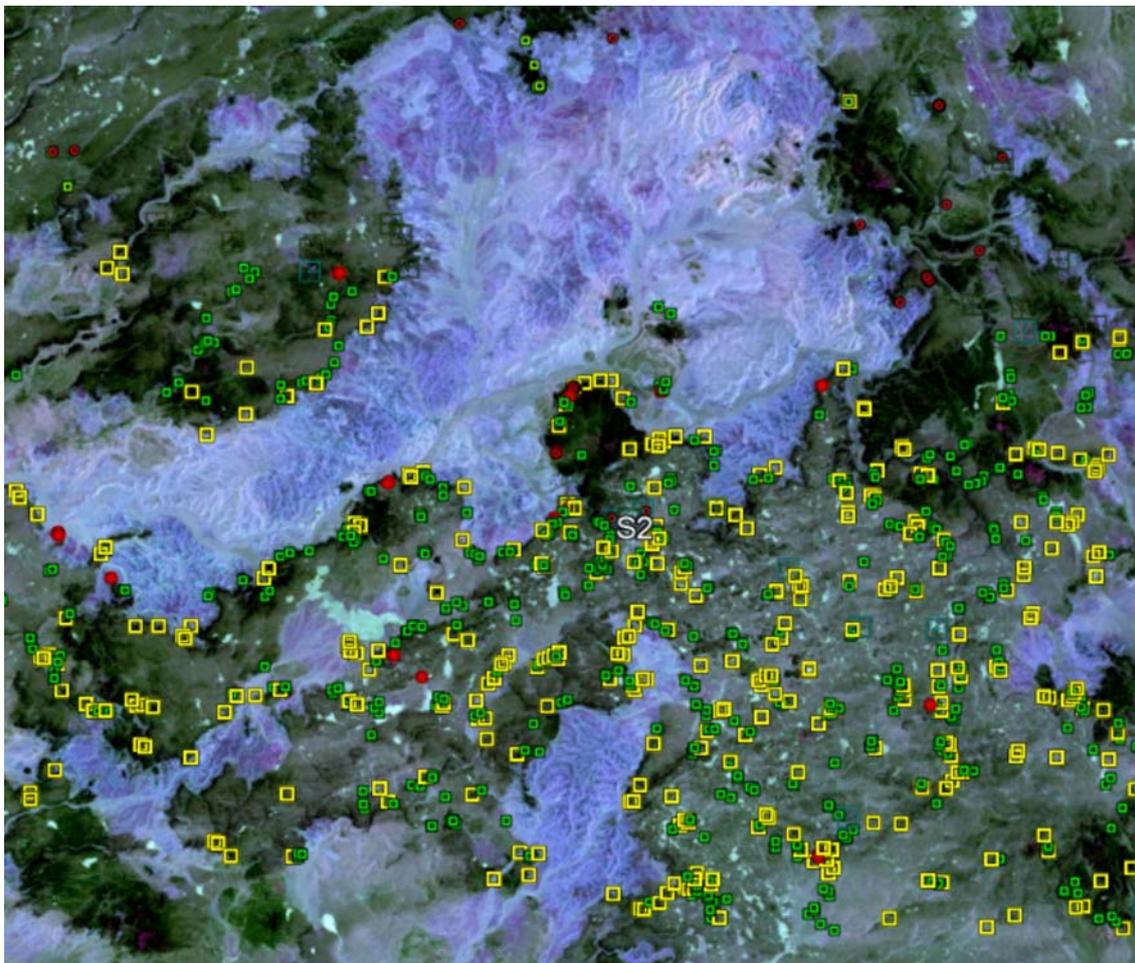


Figura 255: Dettaglio della Landsat-5-3-7 con la distribuzione dei siti archeologici neolitici esclusivamente lungo le aree caratterizzate da suoli di origine vulcanica.

Tale approccio, solo per la regione del Jawf, ha permesso di registrare oltre 15000 evidenze architettoniche (Figure 256-259) riferibili ai millenni tra l'8.000 e il 6.000 a.C., mostrando una capillare occupazione della regione mediante l'edificazione di architetture votate a uno sfruttamento intensivo basato sulla caccia e la raccolta. I suoli vulcanici, ricchi di potassio, appaiono dunque quale paleo-ambiente ideale per lo sviluppo di una flora e fauna abbondante, quale era appunto quella che caratterizzava l'Arabia durante l'ultimo periodo di *optimum* pluviometrico, determinando un paesaggio che attirò comunità antropiche non stanziali ma semi-permanenti, che hanno lasciato abbondanti tracce di agglomerati, *compounds*, strutture singole, tombe e *kites*, sotto forma di pseudo-architetture, ovvero sostanzialmente sotto forma di ripari, più o meno estesi e associati alle risorse, che non prevedono lo sviluppo di architetture dotate di elementi di copertura, ma che permettessero uno sfruttamento intensivo dell'ambiente.

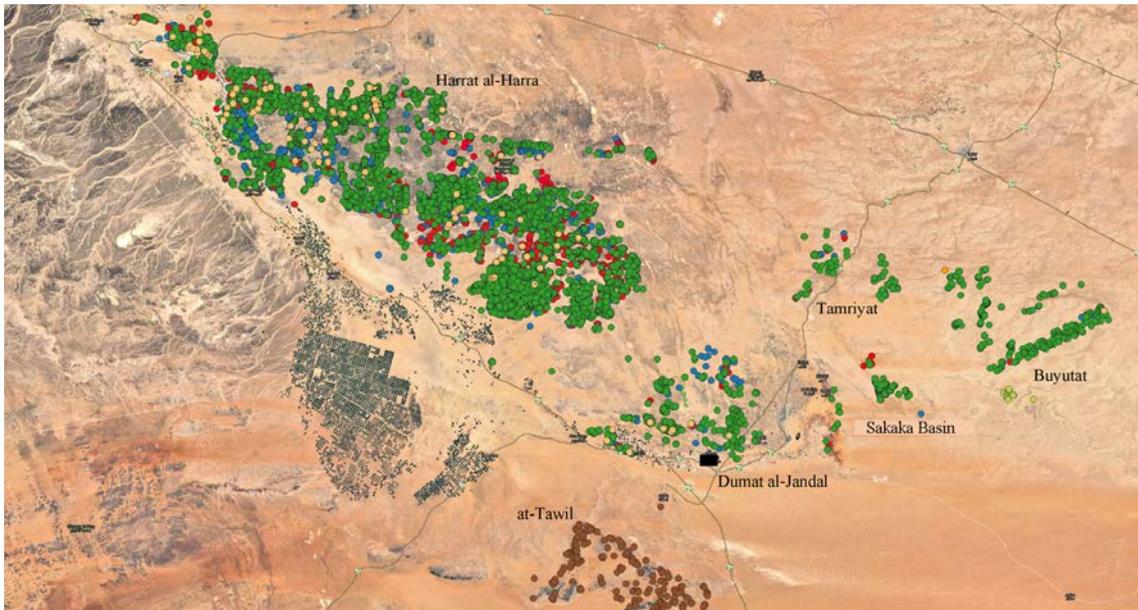


Figura 256: Campionatura generale delle evidenze archeologiche (neolitiche, età del bronzo ed epoca storica) dalla regione del Jawf al dicembre 2020. La Harrat si caratterizza per una quasi esclusiva frequentazione neolitica.

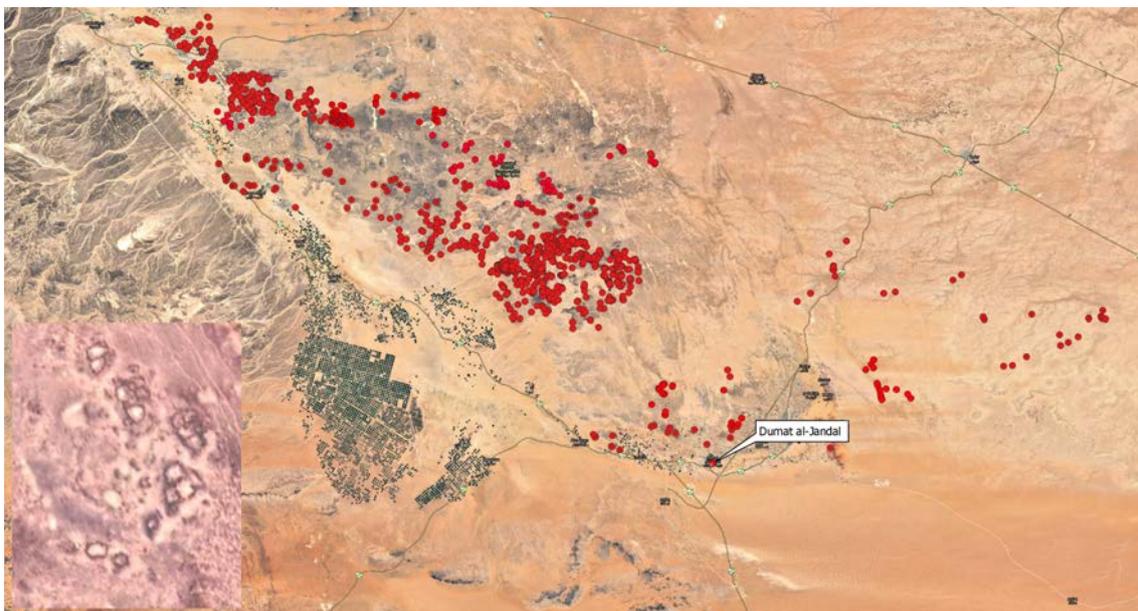


Figura 257: Distribuzione dei siti definiti proto o pseudo-villaggi.

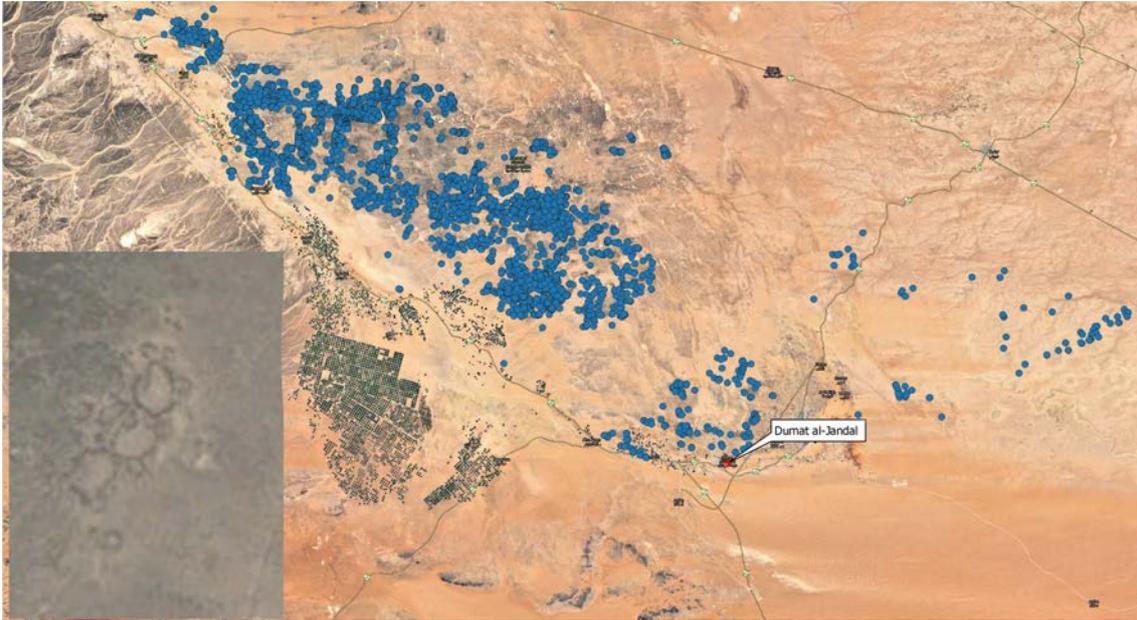


Figura 258: Distribuzione delle unità definite compound.

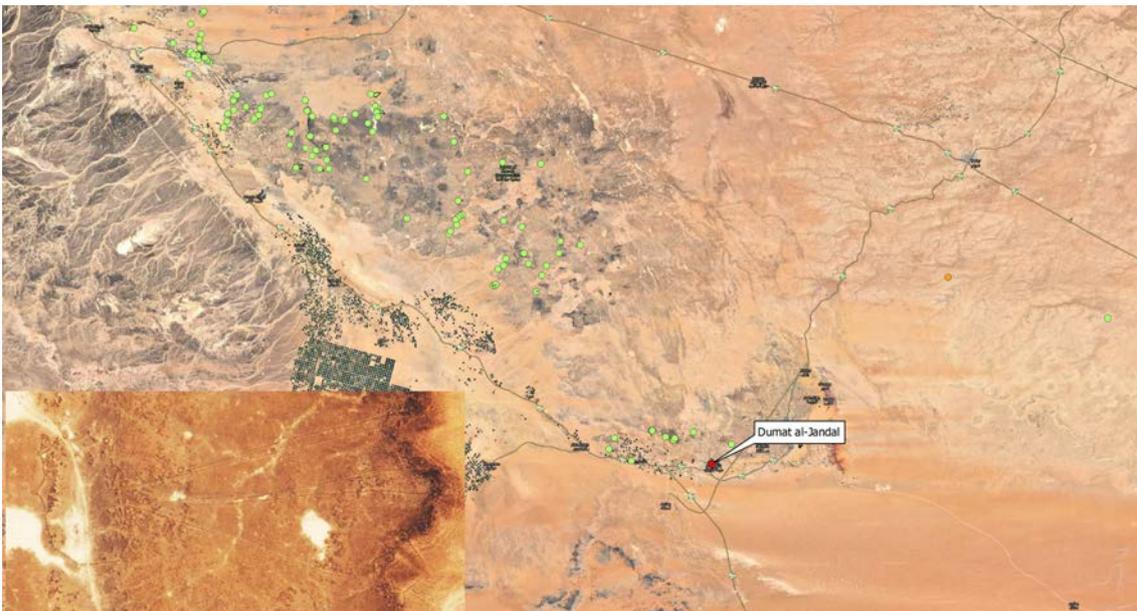


Figura 259: Distribuzione dei kites lungo le aree in questione.

La complessità dell'ambiente si percepisce sotto diversi punti di vista. Come si è detto, i suoli vulcanici hanno garantito uno strato ideale per lo sviluppo della vegetazione, in quanto fertili, ma i più favorevoli regimi di piovosità intercorsi ciclicamente negli ultimi 30 milioni di anni e i fenomeni di ruscellamento hanno determinato una intricata rete di corsi d'acqua e pozze d'acqua stagionali-*sabkhah* (soprattutto pozze, raramente veri e propri laghi) che finirono per dar vita alla perfetta cornice idrologica per il sostentamento di fauna e conseguente presenza delle comunità antropiche (Figure 260-261).

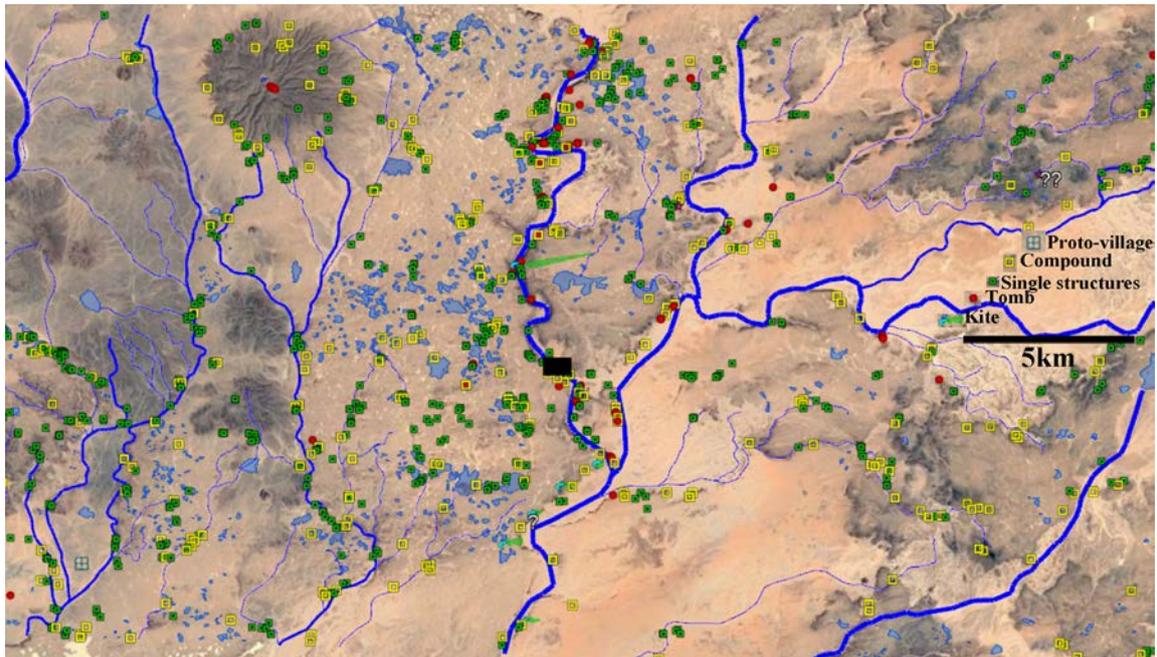


Figura 260: Dettaglio della mappatura della paleo-idrografia della Harrat al-Harrah in relazione alla distribuzione dei siti neolitici del Jawf.



Figura 261: Ripresa satellitare Kompsat 3a, a 50cm di risoluzione, per il rilevamento di dettaglio delle evidenze antropiche. In questo caso un agglomerato composto da compounds, strutture singole e tracce di segmenti murari prossimi alla micro sabkhah si dispiega su suoli vulcanici sopraelevati rispetto alla rete idrografica.

### 7.1.3 I qanāt, antichi acquedotti d'Arabia

Un *qanāt* (pl. *qanawāt*) è un canale o acquedotto sotterraneo, a profondità variabile, che si origina da una sorgente naturale o da un 'pozzo madre' e che con un gradiente estremamente

labile ma continuo è in grado di convogliare l'acqua fino a distanze superiori ai cento km (Figura 262).

Molte aree del Vicino Oriente antico sono solcate da lunghe e complesse canalizzazioni sotterranee, dall'Iran alla Siria e dalla Giordania a tutta la Penisola arabica, fino in Africa settentrionale e in Spagna, dove furono introdotti a seguito delle conquiste arabe. Ovverosia, si tratta del più efficace sistema di gestione della risorsa idrica in ambienti aridi, poiché è in grado di sfruttare la falda freatica e proteggere l'acqua dall'evaporazione.

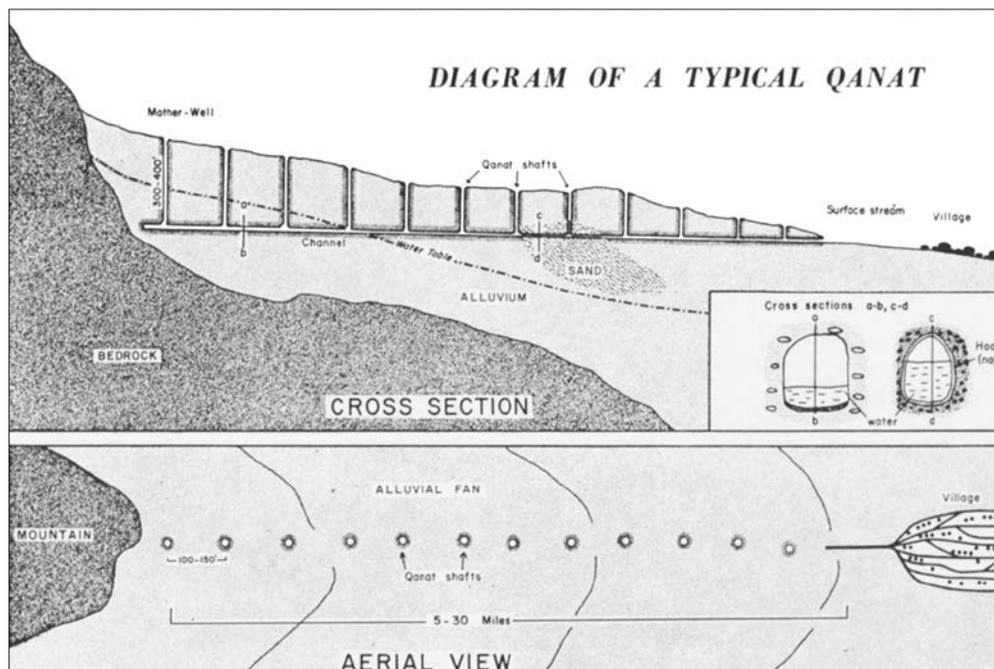


Figura 262: Schema semplificato della struttura di un qanāt (English 1968).

Sull'origine di tale ingegnoso artificio ancora si dibatte, poiché la loro datazione è estremamente complessa da stabilire, dato che raramente questi acquedotti sono accompagnati da iscrizioni e poiché il loro uso continuativo, talvolta sino ai giorni nostri, ha determinato un continuo processo di rimozione di detriti e, pertanto, di eventuali materiali datanti.

Per lungo tempo si è propeso per una loro origine iranica (English 1968), poiché è in quest'area che si determinò un loro maggiore utilizzo e poiché la più antica iscrizione che riferisce della costruzione di un *qanāt* risale a Sargon II (721-705 a.C.), sovrano neoassiro che sostiene di averne appreso la tecnica costruttiva dai Persiani, mentre era impegnato in una campagna militare nell'attuale Armenia (Lightfoot 1996, 2000). La grande diffusione dei *qanawāt* nel Vicino Oriente antico sarebbe dunque avvenuta sulla scia delle conquiste dei sovrani achemenidi che tra il VI e il IV secolo a.C. estesero i loro confini dall'Iran fino in Egitto e in Oman.

Ugualmente, un'ampia diffusione di tale tecnologia è documentata in epoche più recenti, dalla creazione delle province romane d'Oriente, tra il I e il IV secolo e poi ancora in epoca bizantina e islamica antica, in particolar modo tra la Siria e la Giordania e in Arabia centrale.

Più recentemente, il crescente interesse verso la mappatura di questi acquedotti in Arabia orientale, per la definizione delle dinamiche del popolamento degli inizi dell'Età del Ferro, ovvero un periodo che precede l'iscrizione di Sargon II di almeno tre secoli, sta dimostrando come tale tecnologia fosse già presente nelle aree alluvionali dell'Oman interno agli inizi del I millen-

nio a.C. (Magee 2005). Inoltre, la scoperta di nuovi *qanawāt* e un rinnovato interesse verso di essi in Arabia Saudita e negli Emirati Arabi Uniti lascia ipotizzare che la comparsa di tali acquedotti nel tempo non sia dovuta a fenomeni di trasmissione e diffusione tecnologica, ma di risposte contingenti e, verosimilmente, autonome l'una dall'altra, a un clima fortemente arido che non garantiva sufficiente acqua di superficie (Magee 2005; al-Sulaimani *et al.* 2007; al-Bassam e Zaiki 2016; Boucharlat 2016).

#### *Georeferenziazione e digitalizzazione di foto aeree a Dūmat al-Jandal*

Ciò che rende il *qanāt* un caso studio per questo manuale è la sua conformazione stessa, che prevede, oltre al 'pozzo madre', una serie continua di pozzetti o condotte secondarie verticali che dalla superficie scendono verso il canale sotterraneo. Tali fusti accompagnano il *qanāt* per tutta la sua lunghezza, poiché sono il risultato dello scavo del canale sotterraneo e permettono, inoltre, di convogliare l'acqua piovana verso il sottosuolo, dove è protetta dall'evaporazione, o al contrario estrarre acqua per il suo utilizzo. Considerato che la bocca di questi pozzetti può avere un diametro che va da un metro fino a due metri circa e che il loro numero può raggiungere le diverse centinaia, essi possono essere chiaramente distinguibili dall'alto e permettere l'identificazione di questi antichi acquedotti, che siano essi scavati nella roccia o all'interno di un ampio conoide alluvionale.

Il caso di Dūmat al-Jandal ben si presta poiché rappresenta un esempio di impiego di fotografia aerea storica eseguita negli anni '60 del secolo scorso (Figura 263), successivamente georeferenziata e ortorestituita, in un contesto abitativo ancora parzialmente libero dalla più recente urbanizzazione, che ha ormai obliterato gran parte dell'antico acquedotto a esclusione dei pozzi principali.



Figura 263: Ripresa aerea dell'oasi storica di Dūmat al-Jandal (1964).

Se si osservano nel dettaglio alcuni stralci della foto è ben chiara l'evidenza che qui interessa, ovvero una seria continua di pozzetti o saltuari pozzi maggiori che appaiono come aree circolari caratterizzate da una più o meno elevata 'ombra portata', che corrisponde all'ombra generata dal bordo rialzato dei pozzetti o dei pozzi, permettendo dunque un immediato riconoscimento dell'antico acquedotto (Figura 264).



Figura 264: Stralcio della foto aerea del '64 (in alto) e attuale condizione agrario/urbana (in basso).

Mediante tale approccio è dunque possibile ricostruire l'antica rete idraulica, tuttavia previa un'opportuna georeferenziazione della foto aerea, drappeggiata in ambiente GIS sovrapponeandola a una cartografia certa sulla base di punti riconosciuti e marcati da coordinate geografiche, e una non meno importante correzione geometrica delle distorsioni insite nella foto stessa (Fi-

gura 265). Sebbene questo processo di ortorestituzione possa determinare in piccola percentuale aree illeggibili (si veda al centro della foto in Figura 265 l'area oblunga grigio chiara priva di elementi), è possibile procedere con una dettagliata lettura dell'immagine, ora geometricamente corretta e orientata. Quel che emerge è un sistema di *qanawāt* composto da tre bracci maggiori che tagliano trasversalmente la valle agricola dell'oasi, un naturale bacino di raccolta delle acque stagionali di superficie, assieme a un numero di pozzi principali, in parte ancora oggi attivi, che nella maggior parte dei casi sono indipendenti, ma che in prossimità dei *qanawāt* fungono da cosiddetti 'pozzo madre' ovvero da sorgente per l'acqua che si andava a incanalare. L'intero complesso idraulico si estende lungo la vallata agricola dell'oasi a circoscrivere l'abitato antico che ruota attorno al castello di Mārid, un insediamento che dalla sua prima occupazione, in epoca neoassira (VIII-VII sec. a.C.), ha vissuto diverse fasi occupazionali (nabatea, romana, bizantina, islamica) più o meno estese ma che si protraggono fino a oggi.

Pertanto, resta l'interrogativo della datazione di tale complesso idraulico, rimasto irrisolto anche dopo la 'verità suolo'.

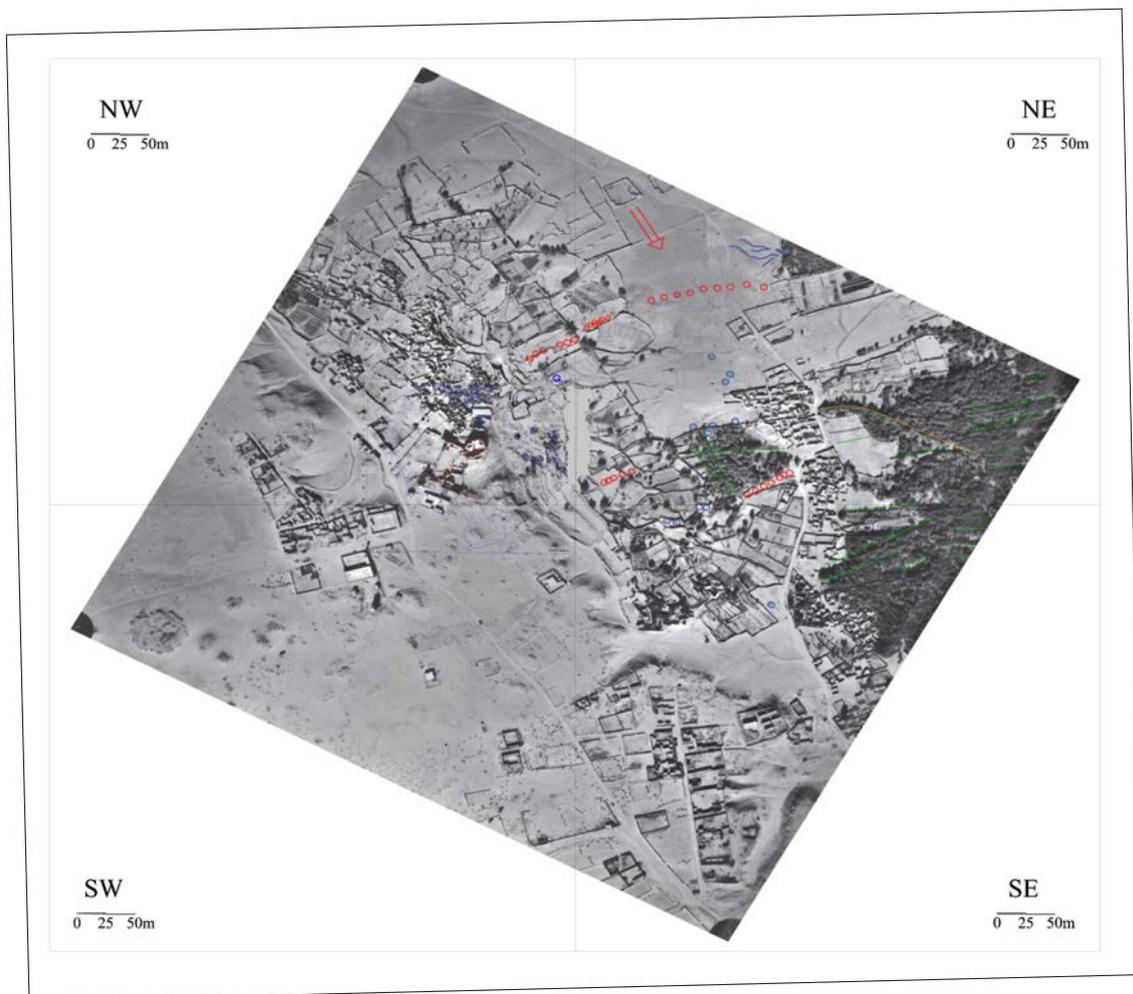


Figura 265: Foto aerea del '64 drappeggiata su reticolo cartografico e ortorestituita; in rosso le 'bocche' dei pozzetti; in blu i pozzi indipendenti e i 'pozzo madre'.

Infatti, tale procedimento di sovrapposizione e ‘stiratura’ della foto, ovvero ortorestituzione, eseguibile sia su piattaforme *open source* (*Google Earth*) sia mediante *softwares* più elaborati (*Photoshop-Idrisi*), permette di ottenere un elevato grado di attendibilità in merito alla localizzazione delle evidenze idrauliche da remoto ma necessita, in seguito, di un controllo a terra di eventuali resti ancora oggi visibili.

Il processo di ‘verità al suolo’ ha mostrato come tutti i pozzetti identificati da remoto siano ormai irrimediabilmente oblitterati. Al contrario, i ‘pozzo madre’ risultano ancora attivi e addirittura si presentano, in alcuni casi, parzialmente percorribili (Figura 266).

Nessun elemento datante è mai emerso e dato che ancora oggi tali pozzi siano sfruttati (si veda infatti quanto più bassa sia l’attuale falda acquifera rispetto all’ingresso antico del *qanāt*), non è possibile ipotizzare alcuna datazione, se non specificare che sia plausibile che tale acquedotto possa risalire sia all’epoca neoassira sia a quella nabatea o islamico antica, ovvero in quelle fasi in cui il Vicino Oriente ha visto il proliferare di tali opere.

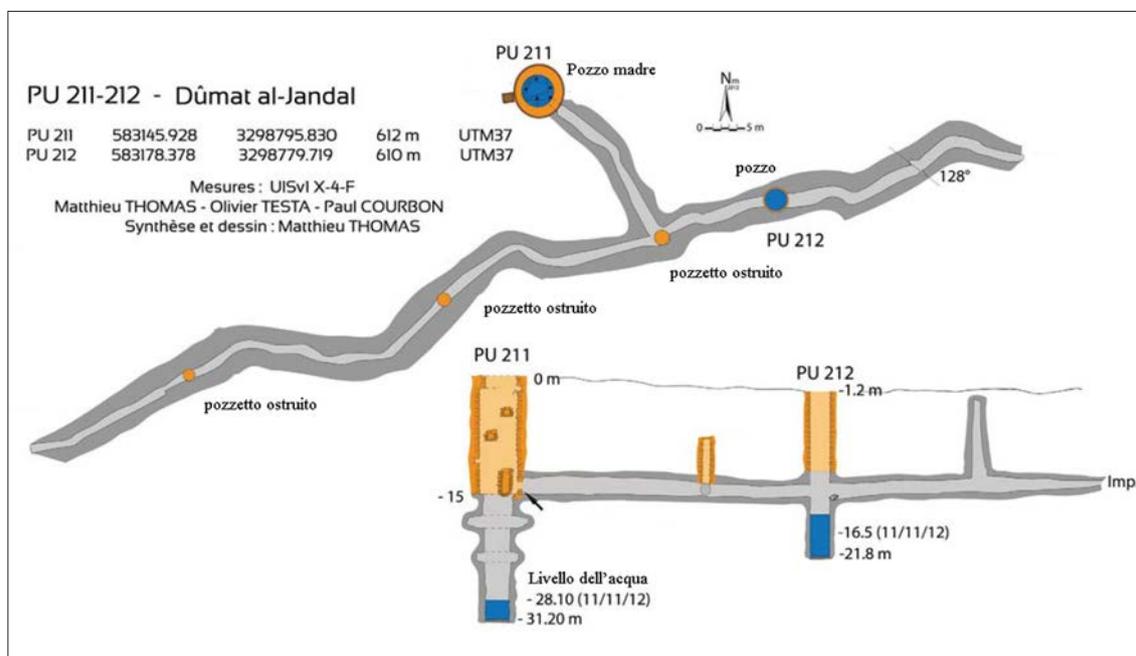


Figura 266: Mappatura al suolo di parte dell’acquedotto antico (Saudi-Italian-French archaeological Project at Dūmat al-Jandal) (Thomas et al. 2018).

#### 7.1.4 Suggestioni tra geomorfologia, archeoastronomia e toponomastica: il ‘monte della stella’ nel Grande Nefūd

La quinta campagna geomorfologica a Dūmat al-Jandal e nelle aree circostanti, eseguita nel novembre 2015 nell’ambito delle attività sul campo della Missione archeologica italiana in Arabia Saudita, è stata essenzialmente dedicata al rilevamento di Jebel Nejma (‘monte della stella’), lungo il quale diverse emergenze architettoniche di epoca neolitica, contemporanee alle più numerose evidenze della Harrat al-Harrah, erano state preliminarmente mappate da remoto (Figura 256, at-Tawīl formation).

Jebel Nejma è un vasto rilievo isolato che si erge su una pianura piatta e asciutta a circa 55 km a SO di Dūmat al-Jandal, a dominare l’intero settore settentrionale del Grande Nefūd. Essendo da un punto di vista geomorfologico un *inselberg* e quindi un punto paesaggistico cospicuo, ha attirato il nostro interesse topografico come sicuramente lo è stato in passato per le popolazioni in cerca di insediamenti riparati e di caccia.

*Evidenze topografico/altimetriche*

Dopo un'attenta analisi morfologica dell'altimetria dell'intera area, sono state individuate le principali cime collinari (Figura 267). La forma generale del rilievo è un poligono irregolare segmentato, che molto sorprendentemente assomiglia alla 'Costellazione del Cetus', la quarta costellazione più grande del cielo, una volta voltata verso il nord (ovvero letta in stile cartografico arabo medievale) (Figura 268). Di fatti, Cetus si trova nel primo quadrante dell'emisfero australe (SQ1) ed è ben visibile a latitudini comprese tra +70° e -90°.

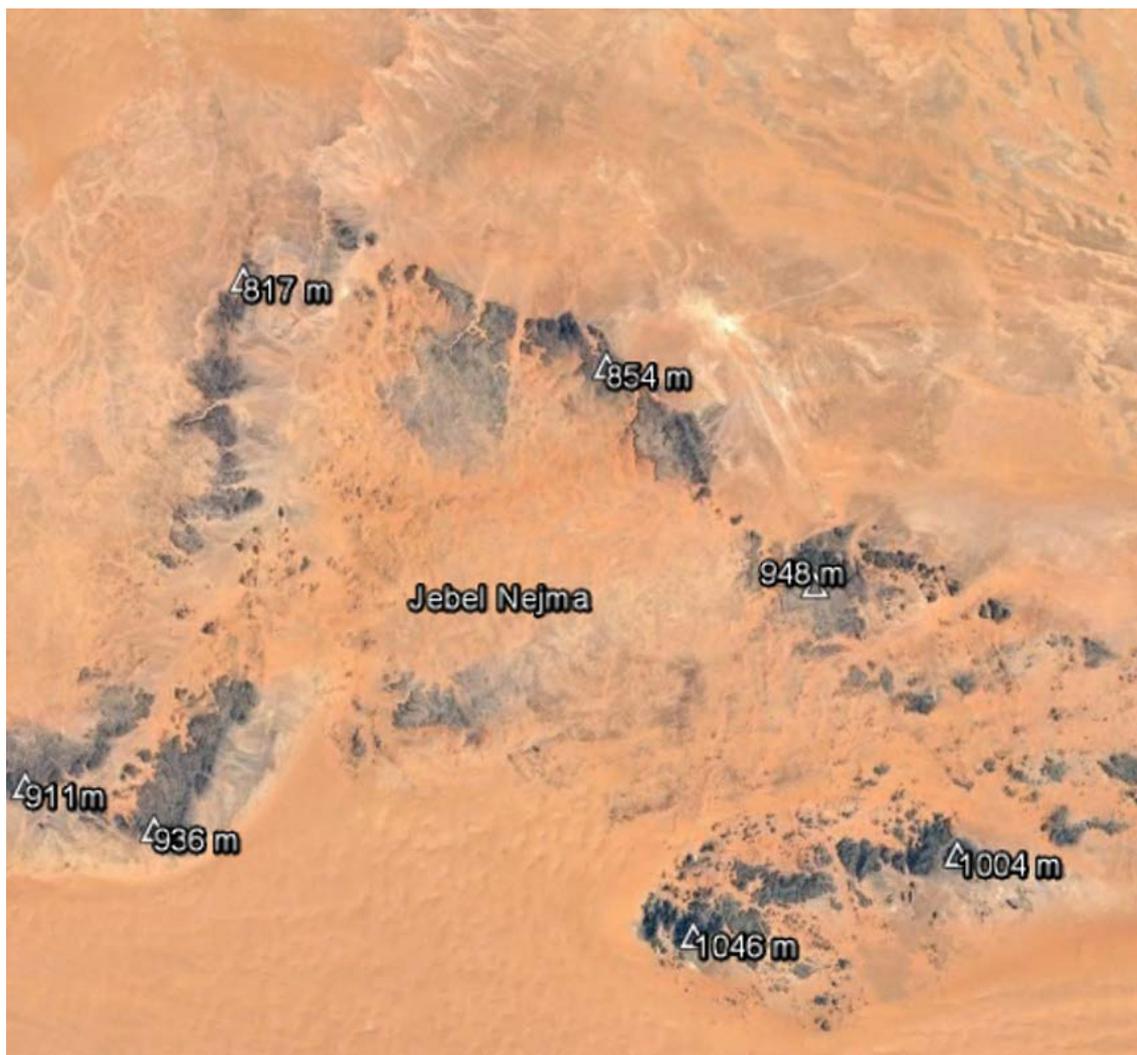


Figura 267: Il Jebel Nejma orientato a nord.

Nel dettaglio, le cime del rilievo principale del Jebel Nejma, distribuite lungo i suoi bordi, sono:

Picco di SE: coordinate 29°14'51.76"N, 39°39'58.27"E; elevazione 1004 m. Picco di S: coordinate 29°12'48.40"N, 39°31'39.19"E; elevazione 1046 m. Picco di SO: coordinate 29°16'1.60"N, 39°14'50.46"E; elevazione 936 m. Picco di W: coordinate 29°17'17.37"N, 39°10'48.20"E; elevazione 911 m. Picco di NO: coordinate 29°31'13.34"N, 39°17'50.39"E; elevazione 817 m. Picco di N: coordinate 29°28'35.01"N, 39°29'17.68"E; elevazione 854 m. Picco di E: coordinate 29°22'22.84"N, 39°35'42.92"E; elevazione 948 m.

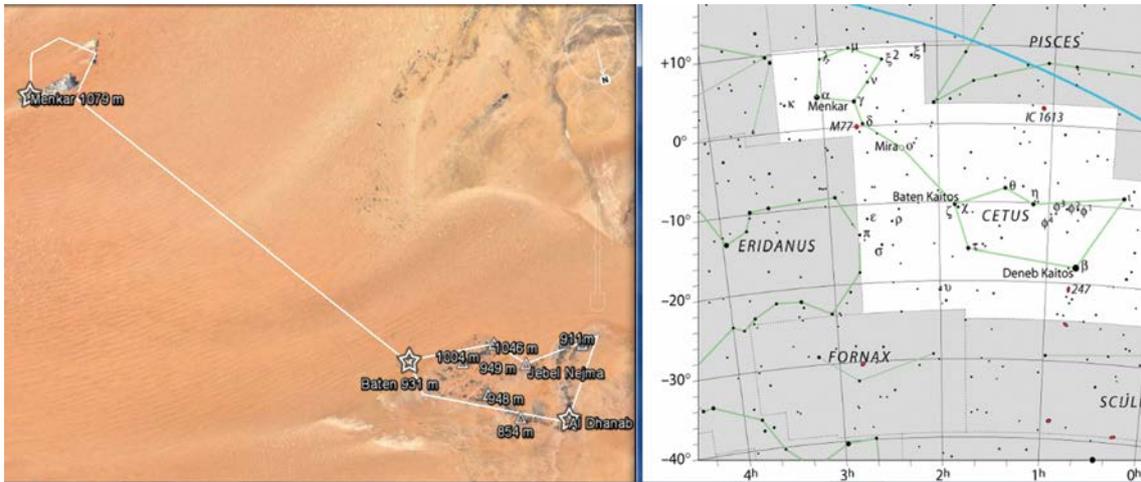


Figura 268: Il settore nordoccidentale del Nefūd orientato al sud a confronto con Cetus.

La loro posizione geografica ricorda dunque la posizione delle stelle di Cetus nel cielo. La vetta più alta nell'angolo più a nord-ovest, ben visibile da lontano, coincide con la stella più luminosa al-Dhanab/Deneb, mentre la stella Menkar corrisponde a un secondo e più piccolo *inselberg* che si erge solitario vicino all'oasi di Jubbah, a circa 200 km a sud-est dalla zona centrale del Jebel Nejma, proprio dove affiorano estese evidenze di comunità nomadi databili al Neolitico pre-ceramico del Nefūd, attorno a vasti paleo-laghi datati tra il X e VIII millennio a.C. (Loreto 2017: 57-59). Al di sopra di questo piccolo *inselberg* che prende il nome di Jebel Qaṭṭar (il 'monte circolare') (Figura 269) è adagiato un complesso di tombe antiche (la cui datazione oscilla tra il Neolitico e il Bronzo antico, V-III millennio a.C.), di cui la più grande, qui chiamata 'Tomba Reale', è completata da un *allée* d'ingresso di 30 m di lunghezza.

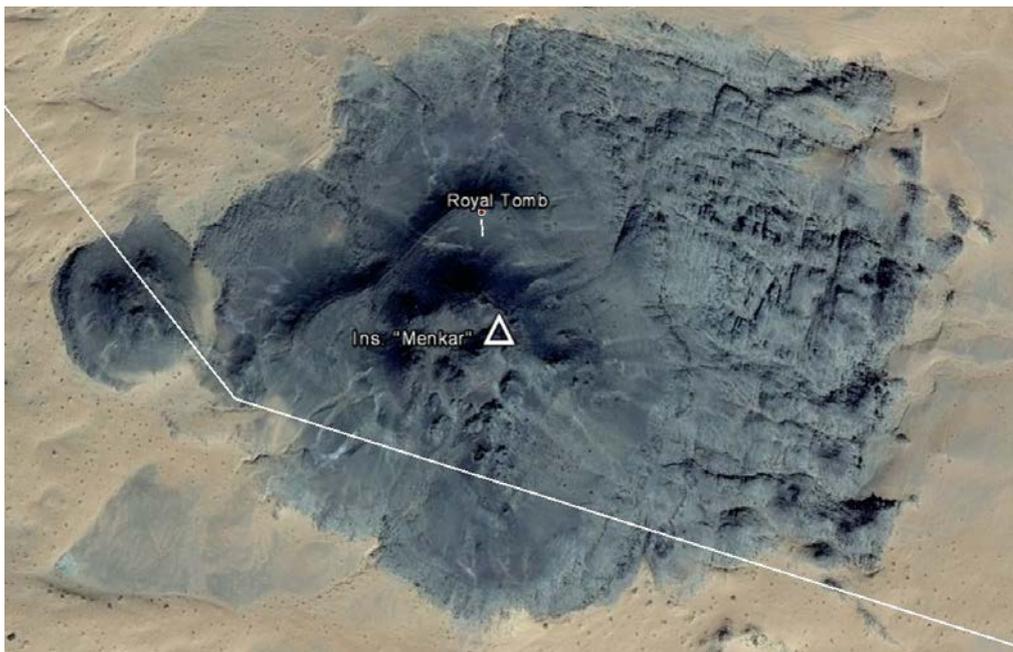


Figura 269: Inselberg presso il paleolago di Jubbah orientato al sud.

Ulteriori ricerche dovrebbero essere condotte su testi medievali o arabi più recenti per verificare se si conoscessero osservazioni e dati astronomici sulla Costellazione del Cetus e se, per caso, gli antichi geografi chiamassero la zona collinare di Jebel Nejma (il 'monte della stella') consapevolmente, in forza della sua presunta ma suggestiva analogia con un oggetto celeste.

#### *La 'verità terreno'*

Dal punto di vista geologico il Jebel Nejma è formato da rocce sedimentarie del Devoniano inferiore (Formazione DT Tawil, arenaria ferruginosa con ciottoli di quarzo), che sono la formazione più antica dell'intera area.

Una così lunga esposizione agli agenti atmosferici ha generato una profonda dissezione del rilievo, e una spessa crosta di vernice del deserto che ricopre tutti gli affioramenti, nonché un'ampia fascia di *glacis* ai piedi delle colline. Pertanto, l'aspetto del Jebel Nejma è molto particolare e senza dubbio attrae l'essere umano da millenni.

Di fatti, in queste condizioni geologiche e geomorfologiche si è sviluppato un ambiente adatto all'insediamento umano. In generale, le larghe fasce di *glacis* che delimitano quasi tutto il rilievo sono state scelte come luoghi per i *compound* (Figure 270-271), mentre le tombe solitamente giacciono su punti sopraelevati (Figure 272-273).



Figura 270: Esempio di struttura circolare su *glacis*.



Figura 271: Vista d'insieme di compound su glacis (immagine Ikonos montata su Google Earth).



Figura 272: Esempio di tomba a tumulo edificata su picco isolato.



Figura 273: Esempio di tomba a torretta.

Questo strettissimo rapporto, quasi esclusivo, tra localizzazione dei *compound* e *glacis* o relative morfologie, permette di stabilire una regola nella progettazione di un rilievo geoarcheologico, ovvero di tracciare una carta tematica preliminare evidenziando le fasce di *glacis* attorno ai rilievi e agli *inselberg* per raggiungere con mirata precisione, sul campo, le evidenze archeologiche preistoriche (Figura 274).



Figura 274: Percorso di groundtruthing lungo il glacis alla base del Jebel Nejma e classificazione delle evidenze del tipo compound, tombe ed eventuali petroglifi.

*Compound*, tombe circolari e *desert kites* (Figure 274-276) sono diffusi in una vasta area, costantemente adagiati nella loro tipica posizione geomorfologica, cioè *compound* su *glacis*, tombe su punti di maggior rilievo e *desert kites* su altipiani o rocce dalla superficie dolcemente inclinata.



Figura 275: Percorso di avvicinamento alle aree su altipiano dove sorgono i desert kites.



Figura 276: Esempio di porzione di 'testa' di un kite.

### 7.2 Yemen. Paleo-laghi e cacciatori-raccoglitori del Ramlat as-Sab'atayn: paleoambiente e insediamenti Olocenici

L'ampia area desertica del Ramlat as-Sab'atayn nello Yemen del nord al confine con l'Arabia Saudita, tutto attorno alla quale sono fioriti gli antichi regni agricoli Sudarabici, è stata a lungo considerata terra vuota e priva di interesse geoarcheologico (de Maigret 1996).

Tuttavia la disponibilità a partire dagli anni '90 di nuove immagini Landsat ETM e Spot, assieme a quelle declassificate russe Sojuz<sup>33</sup> (Figura 277) ha attratto l'attenzione e ha spinto ad approfondire la storia evolutiva ambientale dell'oggi inospitale regione negli anni in cui le prime spedizioni scientifiche europee avviarono un processo di svelamento sistematico della storia e della preistoria dello Yemen.

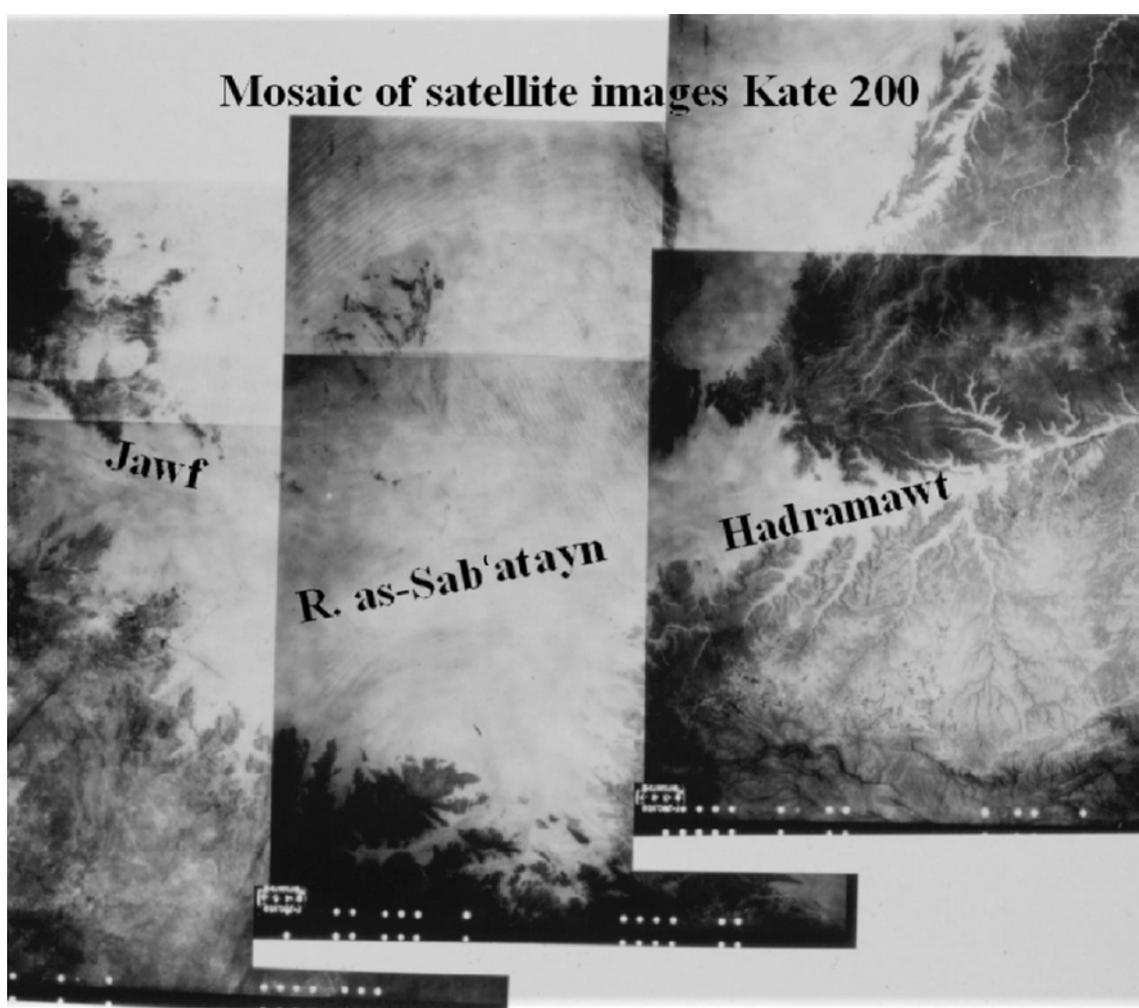


Figura 277: Mosaico analogico di 6 scene spaziali russe Kate 200 (Marcolongo 2004).

<sup>33</sup> Le immagini dei satelliti russi della serie Cosmos a orbita sub-polare divennero disponibili a partire dagli inizi degli anni '90, integrando su molte zone della superficie terrestre i dati più diffusi in occidente come quelli del Landsat e dello Spot. Le foto cosmiche Kate 200, registrate su pellicola nella banda del visibile, sono ad alta risoluzione spaziale (nominale 15 m) e ciascuna di esse copre un ampio segmento di terra (circa 59 000 km<sup>2</sup>). I prodotti KATE-200 possono essere sia dei positivi che dei negativi su pellicola di prima generazione, oppure delle stampe a varie scale.

### 7.2.1 Approcci pionieristici eppure ancora all'avanguardia

La semplice lettura dello schizzo orografico di Figura 278 attrae l'attenzione sul corso del wādī Jawf, attualmente endoreico, ma che a una più attenta interpretazione fisiografica e geomorfologica porta a suggerire l'esistenza, durante episodi umidi come l'Olocene medio, di un sistema idrografico unico, che potrebbe essere chiamato Jawf-Ḥaḍramawt (Figura 279), esteso su gran parte dello Yemen interno.

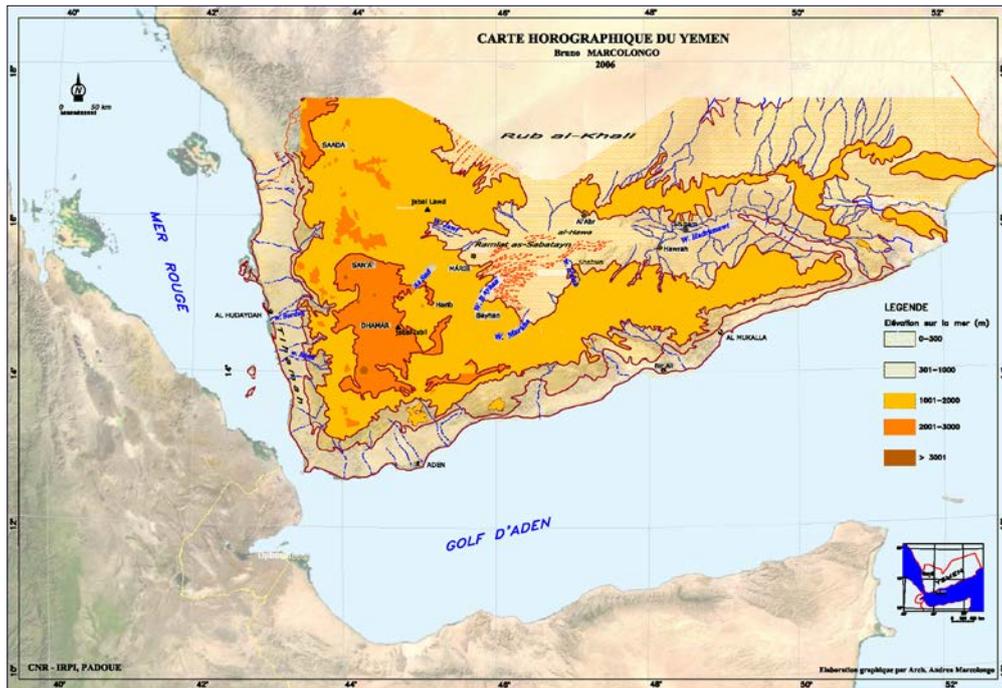


Figura 278: Carta orografica semplificata dello Yemen con indicazione dei principali corsi d'acqua (in blu) e paleo-corsi (in rosso tratteggiato) (Marcolongo 2007).

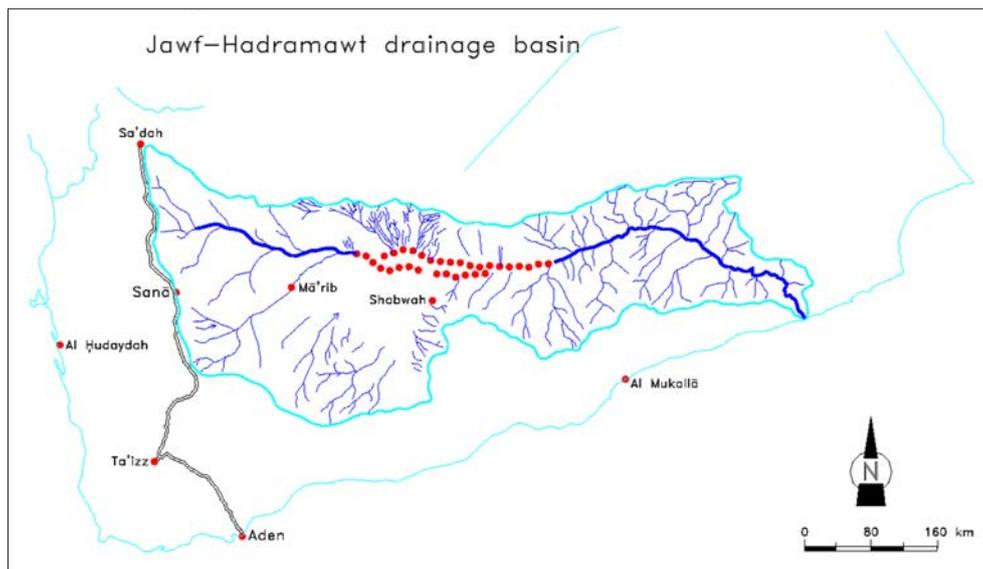


Figura 279: Fotointerpretazione semplificata del paleo-sistema idrografico Jawf-Ḥaḍramawt (Marcolongo 2004).

Questa unità geomorfologica, dapprima intuita a livello preliminare e successivamente dimostrata attraverso un approfondito studio di telerilevamento e ricognizione sul terreno (Figura 280), ha molto influenzato, con le sue ricche risorse idriche superficiali e sotterranee, la sua abbondante copertura vegetale e le sue vie di comunicazione, i modelli insediativi in epoca preistorica e storica.

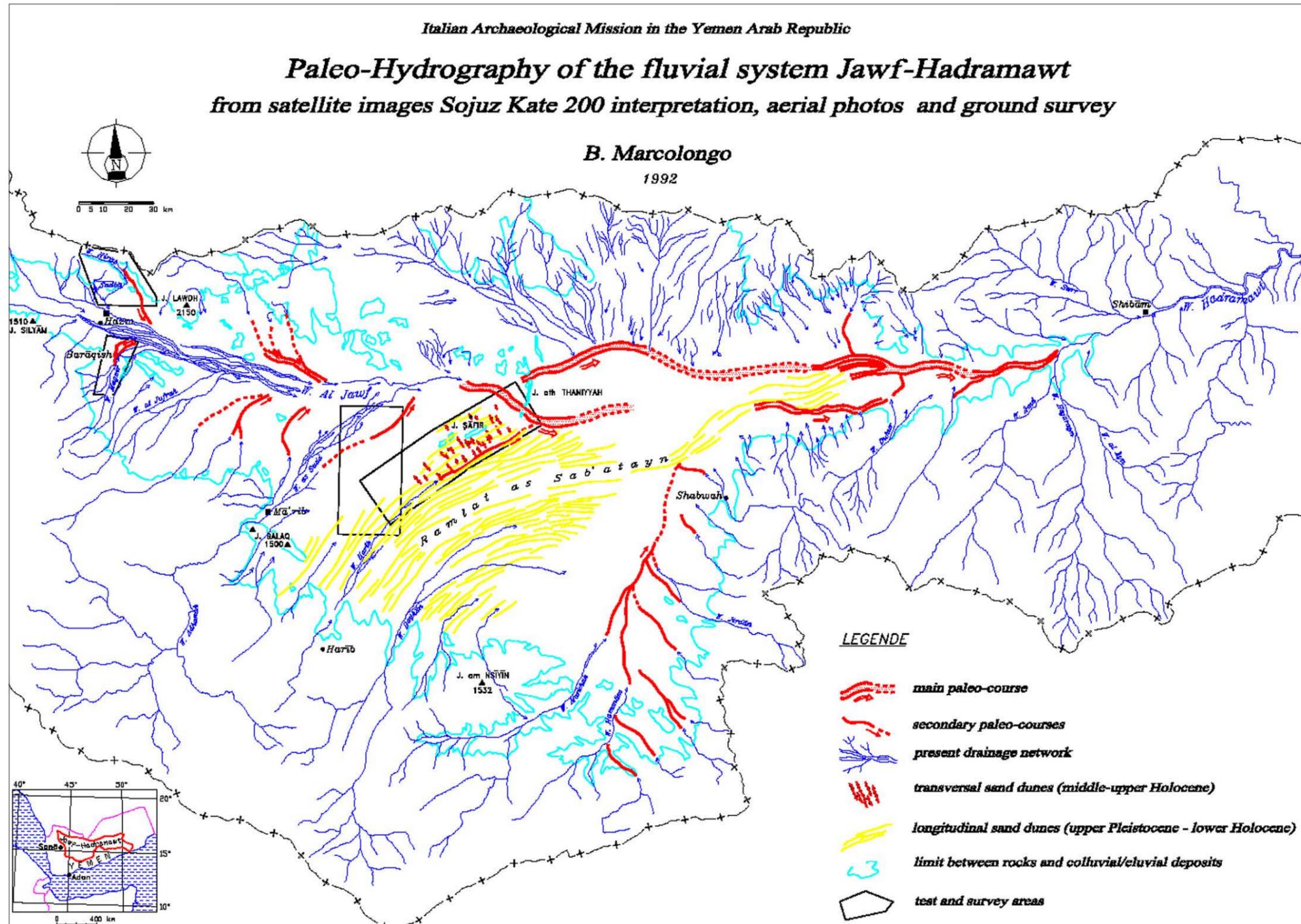


Figura 280: Carta paleo-idrografica del sistema Jawf-Hadramawt (Marcolongo 2004).

Va notato, infatti, che i maggiori regni di epoca storica dell'Arabia meridionale fiorirono per quasi un millennio proprio intorno al tratto centrale del corso Jawf-Ḥaḍramawt, dove in epoca preistorica si formò un grande paleo-lago, mentre in epoca storica ancora confluivano le acque provenienti dai corsi d'acqua che dalle montagne, con le piogge stagionali, scendevano a valle.

In questo grande bacino idrico, in cui appunto convergevano le acque dei numerosi wādī laterali come Markha, Bayhan o Dana, è stato possibile datare con precisione un solo periodo, risalente a circa 7.500 anni fa, attraverso l'analisi dei campioni litici e sedimentari, che corrisponde all'epoca preistorica neolitica ed è correlato al periodo di miglioramento climatico derivante dall'intensificarsi del monzone indiano. Il riempimento di questo lago sembra essere già iniziato intorno a 8.700 anni fa, per prosciugarsi poi all'alba dell'Età del Bronzo (3.000 a.C.), ma per molto tempo e anche adesso, le condizioni umide del suolo e del sottosuolo si sono conservate, alimentate dalle piogge stagionali che gonfiano i corsi d'acqua rovenienti dalle montagne, attirando così l'uomo e sostenendo le sue attività economiche e commerciali.

L'attenzione si è poi concentrata specificatamente su un tratto del paleo-Jawf qualche decina di km a monte del suo ingresso nella vallata dello Ḥaḍramawt, situato tra 46°15' e 47°15' longitudine est e 15°25' e 16°05' latitudine nord (Figura 281). Questa regione si è dimostrata una area chiave per comprendere l'evoluzione paleoambientale del grande bacino idrografico centrale dello Yemen alla fine del Quaternario.

I dati digitalizzati di due immagini Spot XS, elaborati con adeguato software (*GEOimage*), hanno permesso di produrre mappe 1:25.000 dell'area da rilevare con l'interpretazione delle depressioni interdunali (Figura 282).

Il riconoscimento dell'estensione dei depositi lacustri in relazione al sistema paleofluviale di Jawf-Ḥaḍramawt, fino ad allora sconosciuto, ha guidato una indagine geoarcheologica successiva (ottobre 1996).

Tre grandi gruppi di depressioni riconosciute sull'immagine sono stati controllati, il primo presso l'inselberg di Quruh Makhabi<sup>3</sup>, il secondo presso l'inselberg di al-Afalil e il terzo presso la grande depressione di al-Hawa. Nella zona di al-Hawa erano già stati identificati depositi di morfogenesi lacustre durante una ricognizione precedente (1993). Essi risultano localmente piegati e/o basculati, probabilmente in dipendenza a un episodio neotettonico o alla risalita di un diapiro (duomo salino mobile) legato ai complessi diapirici presenti sui bordi ovest e sud-est del Ramlat as-Sab'atayn.

Un paleocorso, evidente sulle immagini Spot a causa della sua alta riflettanza specifica, è stato ritrovato al suolo per la presenza di strette fasce di ghiaia e ciottoli fluviali arrotondati (litotipi del bacino idrografico Jawf) e di allineamenti di vegetazione, cespugli e arbusti (testimonianza di una corrente idrica sotterranea preferenziale). Tra le varie altre tracce di paleocorsi è importante quella ascrivibile al paleo-Markha che confluisce nella depressione di al-Hawa, tagliando nettamente le dune longitudinali dell'angolo SE dell'immagine. Questo rapporto geometrico discordante sta a indicare una prolungata attività fluviale del paleo-Markha, anche successiva alle prime fasi di inaridimento dell'area.

Analisi granulometriche sono state fatte su 4 campioni prelevati nei depositi paleo-lacustri (4, 9, 21, 24). I primi due sono essenzialmente dei limi con considerevole componente di sabbie fini, mentre gli ultimi due sono dei limi franchi senza frazioni significative di sabbia e argilla. Da ciò sembra quindi che il bordo settentrionale del paleo-lago fosse più profondo, con una franca sedimentazione lacustre, rispetto alla parte meridionale caratterizzata da sedimenti più terrigeni. Tale differenziazione potrebbe essere conseguenza dell'attività del ramo principale del paleocorso di Jawf-Ḥaḍramawt. Come è chiaro dalla Figura 281, la posizione e la distribuzione dei siti preistorici sembrano essere strettamente correlate al margine nord-orientale del paleo-lago, dove più abbondante doveva essere la disponibilità idrica.

Questo ultimo esempio appare oggi da un lato pionieristico e dall'altro quanto mai attuale, se si pensa che negli ultimi 10 anni diversi progetti internazionali hanno attivato una mappatura sistematica della Penisola arabica sotto l'egida del *Green Arabia Project*, volto a ricostruire il panorama ambientale preistorico di una regione che, come sin dai primi anni '90 del secolo scorso era chiaro, dovette un tempo apparire come un Eden lussureggiante.

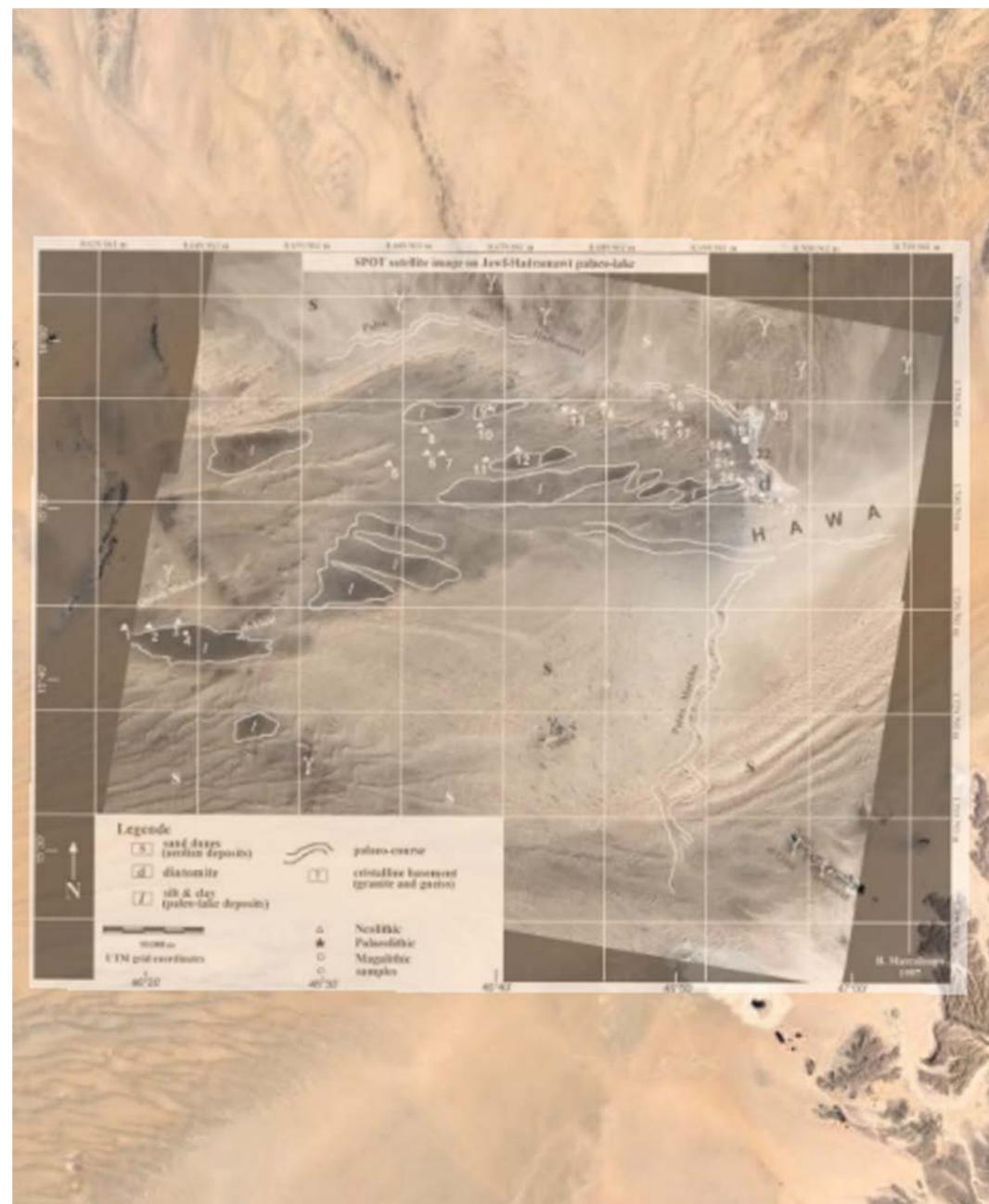


Figura 281: Area di approfondimento della ricerca sul paleo-ambiente del Ramlat as-Sab'atayn (Inizan, Lezine e Marcolongo 1998; Marcolongo 2004).

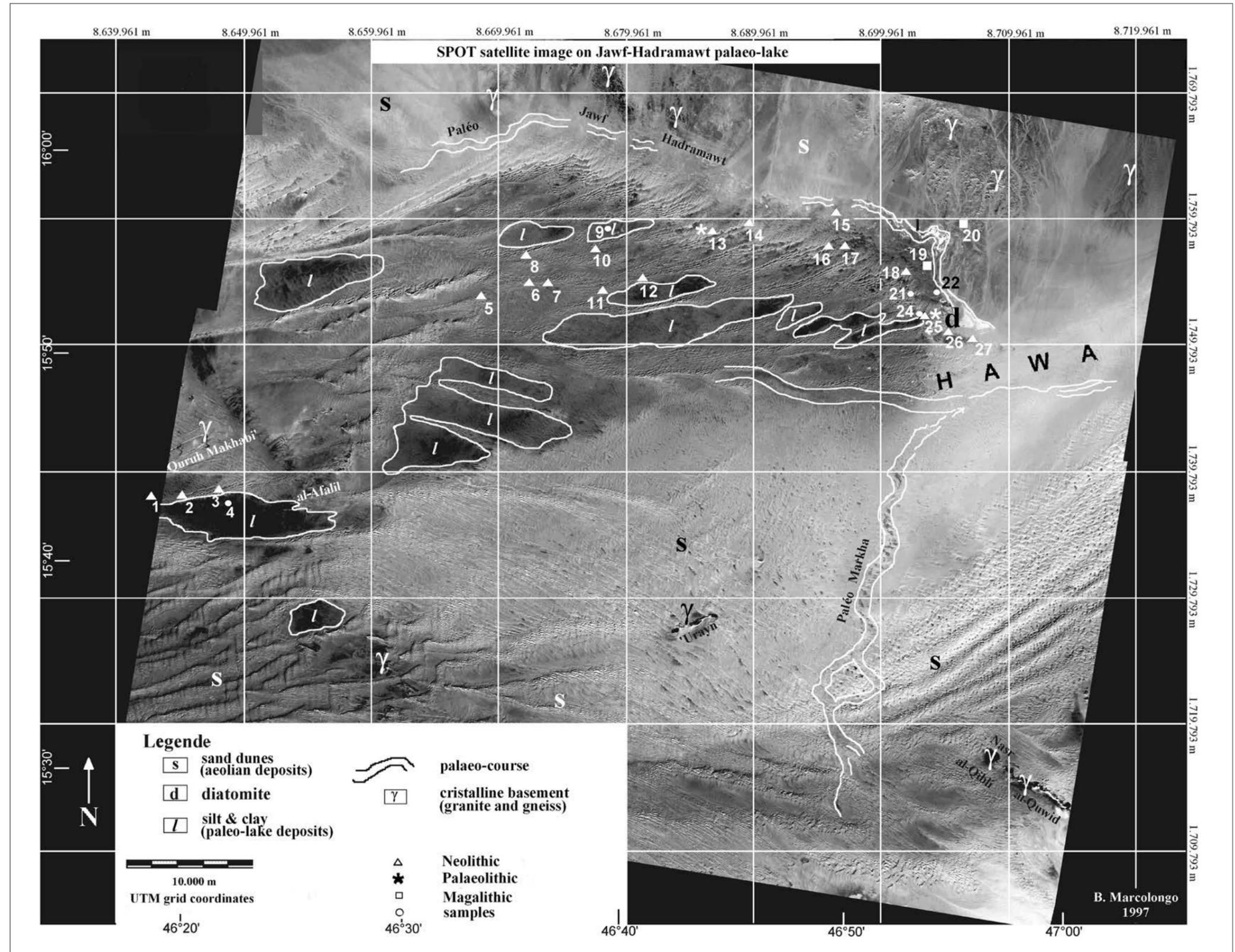


Figura 282: Interpretazione geoarcheologica al bordo NE del Ramlat as-Sab'atayn, sede di un antico lago alimentato dal paleo-Jawf, tratta da immagini SPOT XS georeferenziate ed elaborate (Inizan, Lezine e Marcolongo 1998; Marcolongo 2004).

## Bibliografia

- Agrawal, D.P., Kharakwal, J.S., Kusumgar, S. e Yadava, M.G. 1995. Cist Burials of the Kumaun Himalayas. *Antiquity*, 69(264): 550-554.
- Arthur, P. 1991. *Romans in Northern Campania*. Archaeological Monographs of the British School of Rome, 1, Londra.
- Arz, H.W., Lamy, F., Pätzold, J., et al. 2003. Mediterranean Moisture Source for an Early-Holocene Humid Period in the Northern Red Sea. *Science*, 300: 118-121.
- Awange, J. e Kiema, J. 2019. Light Detection and Ranging (LiDAR). In: *Environmental Geoinformatics. Environmental Science and Engineering*. Springer, Cham. doi.org/10.1007/978-3-030-03017-9\_21.
- Ayala, G., Cinti, M., Heathcote, J. et al. 2007. *Geoarchaeology. Using Earth Sciences to Understand the Archaeological Record*. English Heritage, Swindon.
- Baggio, P., Marcolongo, B. e Tusa, S. 1983. A Geomorphological Approach to Archaeological Researches. *Sumer*, 1(83): 214-218.
- Bajeot, J. 2017. *Predynastic Maadi in Context. The Research of the Italian Expedition Revisited (1977-1986)*. Studi di Preistoria Orientale, Vol. 4. Sapienza Università di Roma, Roma.
- Bajpai, V.N. 1989. Surface and Subsurface Evidence of Neotectonics and the Aquifer Disposition in Central Gangetic Alluvial Terrain of Kanpur-Unnao Region in Uttar Pradesh, India. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 17: 47-53.
- Ball, J. 1942. *Egypt in the Classical Geographers*. Government Press, Cairo.
- Barisano, E. e Marcolongo, B. 1987. Méthodes de prospection archéologique par télédétection. In: Miskovsky, J.-C. (ed.) *Géologie de la Préhistoire*. Géopré Éd., Parigi: 303-324.
- Barisano, E. e Marcolongo, B. 1993. Guida alla prospezione archeologica. *Sistema Terra*, 2(2): 44-47.
- al-Bassam, A. e Zaidi, F.K. 2016. *Underground Aqueducts Handbook*. Routledge, Londra.
- Betts, A.V.G. e Helms, S. 1987. The Desert 'Kites' of the Badiyah Esh-Sham and North Arabia. *Paléorient*, 13(1): 41-67.
- Bevan, A. e Lake, M. (edd.) 2016. *Intensities, Interactions, and Uncertainties: Some New Approaches to Archaeological Distributions. Computational Approaches to Archaeological Spaces*. Routledge, Londra.
- Beyer, L. 1981. A Climatic Classification for Geomorphological Purposes. *Géographie physique et Quaternaire*, 35(3): 287-300.
- Biagi P. 1994. A Radiocarbon Chronology for the Aceramic Shellmiddens of Coastal Oman. *Arabian Archaeology and Epigraphy*, 5: 17-31.
- Bondesan, A. (a cura di) 1998. *Il Sile*. Cierre Edizioni, Verona.
- Bondesan, A. (a cura di) 2003. *Il Brenta*. Cierre Edizioni, Verona.
- Bonora, G., Dall'Aglio, P.L., Patitucci, S. et al. 2000. *La Topografia antica*. CLUEB, Bologna.
- Boschi, F. 2020. *Archeologia senza scavo. Geofisica e indagini non invasive*. Bologna University Press, Bologna.
- Boschi, F. (ed.). 2016. *Looking for the Future, Caring for the past. Preventive Archaeology in Theory and Practice*. Bologna University Press, Bologna.
- Boucharlat, R. 2016. *Qanat and falaj: Polycentric and Multi-Period Innovations Iran and the United Arab Emirates as Case Studies*. In: Bassam e Zaidi 2016 (edd.) *Underground Aqueducts Handbook*. Routledge, Londra: 279-301.
- Bowman, I. 1926. The Analysis of Landforms: Walther Penck on the Topographic Cycle. *Geographical Review*, 16(1): 122-132.

- Bradford, J.S.P. 1957. *Ancient Landscapes*. Bell, Londra.
- Brancucci, G., Marin, V. e Salmonare, P. 2011. *Geomorfologia applicata*. Libreria Universitaria, Padova.
- Brivio A., Lechi G.M. e Zilioli, E. 1992. *Il telerilevamento da aereo e da satellite*. Carlo Delfino ed., Sassari.
- Büdel, J. 1950. *Das System der klimatischen Morphologie*. Dept. Geographentag Miinchen, Landshut.
- Büdel, J. 1981. *Klima-Geomorphologie*. Gebrüder Borntraeger, Berlino.
- Butzer, K.W. 2011. Geoarchaeology, Climate Change, Sustainability: A Mediterranean Perspective. *The Geological Society of America, Special Paper*, 476: 1-14.
- Cambi, F. 2011. *Manuale di archeologia dei paesaggi*. Carocci, Roma.
- Cambi, F. e Terrenato, N. 1994. *Introduzione all'archeologia dei paesaggi*. Carocci, Roma.
- Caneva, I., Marcolongo, B. e Palmieri, A. M. 1986. Prehistoric Settling and Natural Resources in the Geili Area (Soudan). In: Krause, M. (ed.) *Nubische Studien: Tagungsakten der 5 Internationalen Konferenz der International Society for Nubian Studies*, von Zabern, Magonza: 33-40.
- Caneva, I., Marcolongo, B. e Palmieri, A.M. 1995. Geoarchaeology at Maadi. A Short Note. *The Geological Survey of Egypt, Special Publication*, 70: 311-319.
- Capogrossi, L., Giardina, A. e Schiavone, A. 1978. *Analisi marxista e società antiche*. Editori Riuniti, Roma.
- Casana, J. 2008. Mediterranean Valleys Revisited: Linking Soil Erosion, Land Use and Climate Variability in the Northern Levant. *Geomorphology*, 101: 429-442.
- Casana, J. 2020a. Global Scale Archaeological Prospection Using CORONA Satellite Imagery: Automated, Crowd-Sourced, and Expert-led Approaches. *Journal of Field Archaeology*, 45(1): 89-100.
- Casana, J. 2020b. Remote Sensing-Based Approaches to Site Morphology and Historical Geography in the Northern Fertile Crescent. In: Lawrence, D., Altaweel e M., Philip, G. 2020 (edd.) *New Agendas in Remote Sensing and Landscape Archaeology in the Near East*, Studies in Honour of Tony J. Wilkinson. Archeopress, Londra: 154-174.
- Casana, J. e Cothren, J. 2008. Stereo Analysis, DEM Extraction and Orthorectification of CORONA Satellite Imagery: Archaeological Applications from the Near East. *Antiquity*, 82: 732-749.
- Casana, J. e Cothren, J. 2013. The CORONA Atlas Project: Orthorectification of CORONA Satellite Imagery and Regional-Scale Archaeological Exploration in the Near East. In: Comer, D.C. (ed.) *A Primer on Space Archaeology: In Observance of the 40<sup>th</sup> Anniversary of the World Heritage Convention*. SpringerBriefs in Archaeology, 5, New York: 31-41.
- Cassola Guida, P. e Corazza, S. 2007. Sedegliano (UD). Scavi nel castelliere (2006). *Notiziario della Soprintendenza per i Beni Archeologici del Friuli Venezia Giulia*, 1: 164-166.
- Ceraudo, G. 2013. Aerial Photography in Archaeology. In: Corsi, C., Slapšak, B. e Vermeulen, F. (edd.) *Good Practice in Archaeological Diagnostics*. Springer, Londra: 11-30.
- Clarke, D. 1973. Archaeology: the Loss of Innocence. *Antiquity*, 47: 6-18.
- Clarke, G. 1957. *Archaeology and Society. Reconstructing the Prehistoric Past*. Routledge, Londra.
- Cleuziou, S., Inizan, M. L. e Marcolongo, B. 1992. Le peuplement pré- et protohistorique du système fluviale fossile du Jawf-Hadramawt au Yémen. *Paléorient*, 18(2), pp. 5-30.
- Cliff, A.D. e Ord, J.K. 1973. *Spatial Autocorrelation*. Pion, Londra.
- Cordova, C.E., Brown, A.G. e Rosen, A.M. 2017. Geoarchaeology, Environment and Societal Stability: Karl W. Butzer's Legacy. *Geoarchaeology International Journal*, 32: 3-5.
- Costi A., Lazzaro, L., Marcolongo, B. e Visentin, J. 1992. *La centuriazione romana fra Sile e Piave nel suo contesto fisiografico*. CNR, Padova.

- CreMASchi, M. 2005. *Manuale di Geoarcheologia*. Laterza, Roma.
- CreMASchi, M. e Rodolfi, G. 1991. *Il Suolo*. La Nuova Italia Scientifica, Roma.
- Dall'Aglio, P.L. 2011. Topografia antica, Geoarcheologia e discipline paleoambientali. *Journal of Ancient Topography*, 21: 7-24.
- Dallaporta, A., Filippi, G.G. e Marcolongo, B. 1996. Cercando Kampilya. *Asiatica Venetiana*, 1: 223-226.
- Dal Zovo, C., González-García, A.C. e Seoane-Veiga, Y. 2014. Orientation of Bronze Age Mounds in Mongolian Altai Mountains. *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, 14(3): 223-232.
- Davis, W.M. 1899. The Geographic Cycle. *Geographical Journal*, 14: 481-504.
- Davis, W.M. 1922. Peneplains and the Geographical Cycle. *The Geological Society of America*, 33(3): 587-98.
- De Martonne, E. 1951. *Traité de Géographie physique. Tome II. Le Relief du Sol*. Armand Colin Éd., Parigi.
- English, P.W. 1968. The Origin and Spread of Qanats in the Old World. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 112(3): 170-181.
- Farinetti, E. 2012. *I paesaggi in archeologia: analisi e interpretazione*. Carocci, Roma.
- Fowler, M.J.F. 2013. Declassified Intelligence Satellite Photographs. In: Hanson, W.S. e Oltean, I.A. (edd.) *Archaeology from Historical Aerial and Satellite Archives*. Springer, Londra: 47-66.
- Francfort, H.P. 1986. Preliminary report 1983-84: Archaeological and Environmental Researches in the Gagar Plains. *Man and Environment*, 10: 97-100.
- Garrard, A. e Harvey, C.P.D. 1981. Environment and Settlement during the Upper Pleistocene and Holocene at Jubba in the Great Nafud, Northern Arabia. *Atlatl*, 5: 137-148.
- Gentelle, P. 1986. Landscapes, Environment and Irrigation: Hypothesis for the Study of 3<sup>rd</sup> and 2<sup>nd</sup> Millenniums. *Man and Environment*, 10: 101-110.
- Gerasimov, I.P. e Meshcheryakov, J.A. (edd.) 1967. *Il rilievo della Terra: morfostruttura e morfoscultura*. Jzd-vo Nauka, Mosca.
- Giorgi, E. (a cura di) 2009. *In profondità senza scavare. Metodologie di indagine non invasiva e diagnostica per l'archeologia*. BraDypUS, Bologna.
- Gogte, V.D. 2003. Discovery the Ancient Port of Chaul. *Man and Environment*, 28(1): 67-79.
- Goldberg P. e Macphail R.I. 2006. *Practical and Theoretical Geoarcheology*. Blackwell, Oxford.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M. et al. 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sens Environment*, 202: 18-27.
- Groucutt, H. S. e Petraglia M.D. 2012. The Prehistory of the Arabian Peninsula: Deserts, Dispersals, and Demography. *Evolutionary Anthropology*, 21: 113-125.
- Gupta, S.P. 1996. *The Indus-Sarasvatī Civilization: Origins, Problems and Issues*. Pratibha Prakashan Ed., New Delhi.
- Gürbüz, K. e Gül, M. 2005. Evolution of and Factors Controlling Eocene Sedimentation in the Darende-Balaban Basin, Malatya (Eastern Turkey). *Turkish Journal of Earth Sciences*, 14: 311-335.
- Harrower, M.J. 2016. *Water Histories and Spatial Archaeology: Ancient Yemen and the American West*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Hartung, U. 2013. Some Remarks on the Chronological Position of the Predynastic Settlement at Maadi (Egypt) and its Relations to the Southern Levant. *Paléorient*, 39(1): 177-191.
- Hereher, M.E. 2014. The Lake Manzalah of Egypt: an Ambiguous Future. *Environmental Earth Sciences*, 72: 1801-1809.
- Holzer, A., Avner, U., Porat, N., et al. 2010. Desert Kites in the Negev Desert and Northeast Sinai: Their Function, Chronology and Ecology. *Journal of Arid Environment*, 84: 806-817.

- Hritz, C. 2010. Tracing Settlement Patterns and Channel Systems in Southern Mesopotamia Using Remote Sensing. *Journal of Field Archaeology*, 35(2): 184- 203.
- Hritz, C. 2014. Contributions of GIS and Satellite-based Remote Sensing to Landscape Archaeology in the Middle East. *Journal of Archaeological Research*, 22(3): 229-276.
- Inizan, M. L., Lezine, A. M., Marcolongo, B., et al. 1998. Paléolacs et peuplements holocènes du Yemen : le Ramlat As-Sabat'ayn. *Paléorient*, 23(2): 137-149.
- al-Jahwari, N., Kennet, D., Priestman, S. e Sauer, E. 2018. Fulayj: a Late Sasanian Fort on the Arabian Coast. *Antiquity*, 92: 724-741.
- Jennings, R.P., Singarayer, J., Stone, E.J., et al. 2015. The Greening of Arabia: Multiple Opportunities for Human Occupation of the Arabian Peninsula during the Late Pleistocene Inferred from an Ensemble of Climate Model Simulations. *Quaternary International*, 382: 181-189.
- Kennedy, D. 2012. Kites – New Discoveries and a New Type. *Arabian Archaeology and Epigraphy*, 23: 145-155.
- Lawler, A. 2014. In Search of Green Arabia. *Science*, 365: 994-997.
- Lawrence, D., Altaweel, M. e Philip, G. 2020 (edd.). *New Agendas in Remote Sensing and Landscape Archaeology in the Near East*, Studies in Honour of Tony J. Wilkinson. Archeopress, Londra.
- Lézine, A.-M., Saliège, J.-F., Robert, C., et al. 1998. Holocene Lakes from Ramlat as-Sab'atayn (Yemen) Illustrate the Impact of Monsoon Activity in Southern Arabia. *Quaternary research*, 50: 290-299.
- Lightfoot, D.R. 1996. Syrian Qanat Romani: History, Ecology, Abandonment. *Journal of Arid Environments*, 33: 321-336.
- Lightfoot, D.R. 2000. The Origin and Diffusion of Qanats in Arabia: New Evidence from the Northern and Southern Peninsula. *The Geographical Journal*, 166(3): 215-226.
- Lillesand T.M. e Kiefer R.W. 1994. *Remote Sensing and Image Interpretation*. Wiley, New York.
- Loreto, R. 2012. New Neolithic Evidence from the al-Jawf Region: an Outline of the Historical Development of Dūmat al-Jandal. *Proceedings of the Seminar for Arabian Studies*, 43: 213-224.
- Loreto, R. 2017. *Alle origini degli Arabi. Un viaggio nell'archeologia dell'Arabia Saudita*. Mondadori, Milano.
- Loreto, R. 2018a. Dūmat al-Jandal, the Emerging of a North Arabian Oasis in the Pre-Islamic Era. The Nabataean Period and the Pottery Evidence from the Residential Area. *ARAM PERIODICAL*, 30(1/2): 403-420.
- Loreto, R. 2018b. Between Bimah (BMH2) and Ra's al-Ḥadd (HD21). Notes on the 2014-2016 Excavation Seasons in the Framework of the Project 'Ichthyophagoi Their Culture and Economy. Landscape and People During the Iron Age in Coastal Oman'. *Journal of Oman Studies*, 19: 19-63.
- Loreto, R. 2020. A Late Iron Age Settlement at Wādī Banī Ḥalīd. First Season of the Joint Omani-Italian Archaeological Project. *Arabian Archaeology and Epigraphy*, 31(2): 365-392.
- Magee, P. 2005. The Chronology and Environmental Background of Iron Age Settlement in Southeastern Iran and the Question of the Origin of the Qanat Irrigation System. *Iranica Antiqua*, 40: 217-231.
- de Maigret, A. 1996. *Arabia Felix. Un viaggio nell'archeologia dello Yemen*. Rusconi, Milano.
- de Maigret, A., Azzi, C., Marcolongo, B. et al. 1989. Recent Pedogenesis and Neotectonics Affecting Archaeological Sites in North Yemen. *Paléorient*, 15(1): 239-243.
- Maitland, P. 1927. The 'Works of the Old Men' in Arabia. *Antiquity*, 1: 196-203.
- Malekandathil, P. 2020. *Maritime India. Trade, Religion and Polity in the Indian Ocean*. Primus Books, Delhi.
- Mantovani F. e Marcolongo B. 1995. Impiego di immagini telerilevate in geomorfologia. *Annali dell'Università di Ferrara (Nuova Serie), Sezione Scienze della Terra*, 6(1): 1-8.
- Marathe, A. 2004-2005. Contribution of the Deccan College to the Study of Prehistoric and Historical Archaeology of Konkan. *Bulletin of the Deccan College Post-Graduate and Research Institute*, 64/65: 21-26.

- Marcolongo, B. 1983. Late Quaternary Nile and hydrology of the Khartoum-Sabaloka region (Sudan). *Origini*, 12: 39-46.
- Marcolongo, B. 1987. Natural Resources and Palaeoenvironment in the Tadrart Acacus: the non Climatic Factors Determining Human Occupation. In: Barich, B.E. (ed.) *Archaeology and Environment in the Libyan Sahara, The excavations in the Tadrart Acacus 1978-1983*, British Archaeological Revue (B.A.R.) International Series, 368: 269-282.
- Marcolongo, B. 1988. Esempi di impiego di immagini da satellite a scopi archeologici. Contenuto semantico delle informazioni ottenute da satellite nelle ricerche archeologiche. *Télétection et Cartographie Thématique en Archéologie, Notes et Monographies Techniques C.R.A.*, 18: 171-202.
- Marcolongo, B. 1992. Evolution du paléo-environnement dans la partie orientale du Delta du Nil depuis la transgression flandrienne (8.000 B.P.) par rapport aux modèles de peuplement anciens. *CRIPEL*, 14: 23-32.
- Marcolongo, B. 1994. Le périmètre irrigué, grenier de l'antique Yathil, et le déplacements du wâdi Majzir. *Saba*, 1: 60-62.
- Marcolongo, B. 1996. Modelli di utilizzo delle risorse idriche nello Yemen interno dall'età del Bronzo al periodo Sudarabico. *Arabia Antiqua, Serie Orientale*, 70: 179-187.
- Marcolongo, B. 1997. Les systèmes irrigués de Baraqish. In: AA.VV. *Yémen: au pays de la reine de Saba. Catalogue de l'Exposition de l'Institut du Monde Arabe 10/97 - 02/98 au Louvre*. Louvre Éd., Parigi: 32-38.
- Marcolongo, B. 1998. Geoarchaeological Observations in Doab plain (Uttar Pradesh-India), through Advanced Remote Sensing Methodology. *Venetian Academy of Indian Studies Series*, 2/98: 15-31.
- Marcolongo, B. 2000. Elaborazione e interpretazione di immagini da satellite IRS-1D per una ricostruzione paleoambientale della pianura friulana. Sistemi di centuriazione romana e paleoidrografia. In: AA.VV. *Il laboratorio paesistico del Parco dei Castellieri. Un progetto di valorizzazione territoriale*. Rapporto inedito. Università degli Studi di Udine.
- Marcolongo, B. 2001 (ed.). *Proceedings of the First International Symposium on Kampilya project*. CNR, Padova.
- Marcolongo, B. 2002. Geoarchaeology and Palaeoenvironment Evolution of the Merv Plain. In: Rossi-Osmida G. (ed.) *Margiana Gonur-depe Necropolis*, Centro Studi e Ricerche Ligabue, Venezia: 56-68.
- Marcolongo, B. 2003. Geoarchaeological Survey in the Valley of Lakes – Gobi Region in Mongolia. *Italia-Mongolia*, 1: 12-19.
- Marcolongo, B. 2004. Geomorphology Applied to Archaeology in Yemen. In: Antonini, S., Shohlan, A. e Arbach, M. (edd.) *Sabaeen Studies: Archaeological, Epigraphical and Historical Studies in honour of Yusuf Abdallah, Alessandro de Maigret and Christian J. Robin on the Occasion of their 60th Birthdays*, I.U.O., Napoli - Sana'a: 10-43.
- Marcolongo, B. 2007. Environnement Géologique du Yémen. In: Inizan, M.L. e Rachad, M. (edd.) *Art Rupestre et Peuplements Préhistoriques au Yémen*, CEFAS, Sana'a: 39-45.
- Marcolongo, B. e Barisano, E. 2000. Télétection et Archéologie: concepts fondamentaux, état de l'art et exemples, Non-Destructive Techniques Applied to Landscape Archaeology. In: Pasquinucci, M. e Trément, F. (edd.) *The Archaeology of Mediterranean Landscapes*, 4, Oxbow Books, Oxford: 15-30.
- Marcolongo, B. e Gogte, V. 2005. *Economic and Cultural Relations of Italy with India in Ancient Times: an Integrated Geo-archaeological Approach along Konkan Coast*. Rapporto inedito. Dekkan College, Pune.
- Marcolongo, B. e Gunchinsuren, B. 2007. The Joint Italian-Mongol Geoarchaeological Project in the Valley of Lakes, Gobi Altayn Region (Bayankhongor aimag, Bogd soumon). *Purâtattva*, 37: 20-38.
- Marcolongo B. e Mantovani F., 1997. *Photogeology. Remote Sensing Application in Earth Science*. Science Publ., Enfield.
- Marcolongo, B. e Mascellani, M. 1978. Immagini da satellite e loro elaborazioni applicate alla individuazione del reticolato romano nella pianura veneta. *Archeologia Veneta*, 1: 131-146.

- Marcolongo, B. e Morandi-Bonacossi, D. 1997. L'abandon du système d'irrigation qatabanite dans la vallée du wadi Bayhan (Yémen) : analyse géo-archéologique. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 325: 79-86.
- Marcolongo, B. e Mozzi, P. 1993a. Il caso del Turkmenistan: come ricostruire la paleogeografia. *Sistema Terra*, 2(2): 48-50.
- Marcolongo, B. e Mozzi, P. 1993b. Il contesto fisiografico dei siti protostorici della valle di Sumbar (Turkmenistan): una applicazione tematica e cartografica delle foto cosmiche Sojuz ad alta risoluzione. *Atti del XXIX Convegno Nazionale Associazione Cartografica Italiana*, Boll. A.I.T., 87/88: 25-34.
- Marcolongo, B. e Mozzi, P. 1997. Osservazioni geo-archeologiche lungo i bordi della catena montuosa dei Kopet Dagh orientali (Turkmenistan), basate sull'uso di immagini satellitari. In: Rossi-Osmida, G. (ed.) *Turkmenistan. Esplorazioni e Ricerche*, Vol. XVI, Centro Studi e Ricerche Ligabue, Venezia: 49-61.
- Marcolongo, B. e Mozzi, P. 1998. Outline of Recent Geological History of the Kopet-Dagh Mountains and the Southern Kara-Kum, The Archaeological Map of the Murghab Delta. Preliminary Reports 1990-1995. In: Gubaev, A., Koshelenko, G. e Tosi, M. (edd.) *The Archaeological Map of the Murghab Delta. Preliminary Reports 1990-95*. Reports and Memoirs, Series Minor, 3, Roma: 1-14.
- Marcolongo, B. e Mozzi, P. 2001. Holocene Geomorphological Evolution of the Eastern Kopet Dag Piedmont Plain: a Preliminary Geoarchaeological Perspective. *Archaeological News*, 7: 38-40.
- Marcolongo, B., Ninfo, A. e Simone, M. 2006. Valle d'Agredo: a Palaeoenvironmental and Geoarchaeological Reconstruction Based on Remote Sensing Analysis. *Proceedings of the 2nd International Conference on Remote Sensing in Archaeology From Space to Place*, CNR, Roma: 297-301.
- Marcolongo, B. e Palmieri, A.M. 1983. Environment, Water Supply and Cultural Development at Arslantepe (Malatya, Turkey). *Origini*, 12(2): 619-628.
- Marcolongo, B. e Palmieri, A.M. 1988. Environmental Modification and Settlement Conditions in the Yala Area (Yemen). In: de Maigret, A. (ed.) *The Sabaean Archaeological Complex in the Wadî Yalâ (Eastern Hawlân at-Tiyâl, Republic of Yemen)*. Reports e Memoirs, 21, ISMEO, Roma: 45-53.
- Marcolongo, B. e Palmieri, A.M. 1990. Paleoenvironment History of Western Al-A'rus, The Bronze Age Culture of Hawlân At-Tiyâl and Al-Hadâ (Republic of Yemen). In: de Maigret, A. (ed.) *The Bronze Age Culture of Hawlân at-Tiyâl and Al-Hadâ (Republic of Yemen). A First General Report*. Reports and Memoirs, 24, ISMEO, Roma: 137-144.
- Marcolongo, B. e Palmieri, A.M. 1992. Paleoenvironment and Settlement Pattern of the Tihâmah Coastal Plain (Republic of Yemen). *Yemen*, 1: 117-123.
- Marcolongo, B., Palmieri, A.M. e Simone, M. In stampa. The physical-environment context of the Malatya plain. In: Di Nocera, G.M. (ed.) *Highland Landscapes: settlement patterns in the Upper Euphrates Region. Archaeological Survey Project in the Malatya plain*. Collana Arslantepe, Marcella Frangipane (ed.), Sapienza Università di Roma.
- Marcolongo, B., Pilli, A. e Marcolongo, A. 2001. *Elaborazione e interpretazione di immagini da satellite IRS-1D per una ricostruzione paleoambientale della Pianura Friulana. Sistemi di centuriazione romana e paleoidrografia. Il Laboratorio paesistico del Parco dei Castellieri. Progetto di valorizzazione territoriale*. Rapporto inedito. Università degli Studi di Udine, Regione Friuli-Venezia Giulia.
- Marcolongo, B. e Surian, N. 1993. Observations préliminaires du contexte géomorphologique de la plaine alluviale du Nil en amont de la 3ème cataracte en rapport avec les sites archéologiques. *Genava, Nouvelle Série*, 41: 33-34.
- Marcolongo B. e Surian, N. 1997a. Satellite, aereo e GPS nella ricostruzione del Nilo quaternario e dei suoi rapporti con gli insediamenti antichi (Sudan settentrionale). *Atti della 1ª Conferenza Nazionale delle Associazioni Scientifiche per le Informazioni Territoriali e Ambientali, SIFET - AIC- AMFM - AIT*, Parma: 471-476.
- Marcolongo, B. e Surian, N. 1997b. Kerma : les Sites Archéologiques de Kerma et Kadruka dans leur Contexte Géomorphologique. *Genava, Nouvelle Série*, 45: 119-123.

- Marcolongo, B. e Tosi, M. 1995. Il fiume scomparso. La Sarasvati nell'età del Bronzo: da disastro ecologico a fonte di salvazione. *Saecularia Nona*, 12: 93-101.
- Marcolongo B., Vangelista F. e Verga F. 1999. Interpretazione di immagini per uno studio archeologico nell'area di Tharros (Sardegna). In: Acquaro, E., Marcolongo, B., Vangelista, F. e Verga, F. (edd.) *Il porto Buono di Tharros, Studi e Ricerche sui Beni Culturali, Monumenti Fenici 1*. Agorà Ed., La Spezia: 9-31.
- Marcolongo, B. e Zaffanella, G.C. 1987. Evoluzione paleoidrografica della Pianura Veneta Atesino-Padana. *Athesia*, 1: 31-67.
- Mantovani F., Marcolongo B. 1995. Impiego di immagini telerilevate in geomorfologia. *Annali dell'Università di Ferrara (Nuova Serie), Sezione Scienze della Terra*, 6(1): 1-8.
- McClure, H.A. 1976. Radiocarbon Chronology of Late Quaternary Lakes in the Arabian Desert. *Nature*, 263: 755-756.
- McClure, H.A. 1978. *Ar Rub' al Khali*, in *Quaternary Period in Saudi Arabia. Vol. 1 and 2*. Springer-Verlag, Vienna - New York: 252-263.
- McHugh, W.P., McCauley, J.F., Haynes, C.V. et al. 1988. Paleorivers and Geoarchaeology in the Southern Egyptian Sahara. *Geoarchaeology*, 3: 1-40.
- Menghin, O. e Amer, M. 1932. *The Excavations of the Egyptian University in the Neolithic Site at Maadi: First Preliminary Report (Season 1930-31)*. Misr-Sokkar Press, Cairo.
- Menghin, O. e Amer, M. 1936. *The Excavations of the Egyptian University in the Neolithic Site at Maadi. Second Preliminary Report (Season 1932)*. Government Press, Cairo.
- Misra, V.N. 1994. Indus Civilization and the Rgvedic Sarasvati. In: Parpola, A. e Koskikallio, P. (edd.) *South Asian Archaeology*, Suomalainen Tiedeakatemia, Helsinki: 511-525.
- Morandi Bonacossi, D. e Iamoni, M. 2012. The Early History of the Western Palmyra Desert Region. The change in the Settlement Patterns and the Adaptation of Subsistence Strategies to Encroaching Aridity: a First Assessment of the Desert-Kite and Tumulus Cultural Horizons. *Syria*, 89: 31-58.
- Mozzi, P., Ortolani, R., Ragazzi, F. e Vinci I. 1996. *I suoli di Piombino Dese e Trebaseleghe*. ESAV, Giunta Regionale del Veneto, Padova.
- Negre, J., Muñoz, F. e Barceló, J.A. 2018. A Cost-Based Ripley's K Function to Assess Social Strategies in Settlement Patterning. *Journal of Archaeological Method and Theory*, 25: 777-794.
- Pal, Y., Shahai, B., Sood, R.K. e Agrawal, D.P. 1984. Remote Sensing of the Lost Sarasvati River. In: Lal, B.B. e Gupta, S.P. (edd.) *Frontiers of the Indus Civilization*. Books e Books, New Delhi: 491-498.
- Panizza, M. 2001. Geomorphosites: Concepts, Methods and Examples of Geomorphological Survey. *Chinese Science Bulletin*, 46, suppl. Dec.: 4-6.
- Panizza, M. e Piacente, S. 2003. *Geomorfologia Culturale*. Pitagora Ed., Bologna.
- Panizza, M. e Piacente, S. 2008. Geomorphology and Cultural Heritage in Coastal Environments. *Geografia fisica e dinamica quaternaria*, 31: 205-210.
- Parkash, B. e Kumar, S. 1991. Indogangetic Basin. In: Tandon, S.K., Pant, C.C. e Casshyap, S., (edd.) *Sedimentary Basins of India; Tectonic Context*, Gyanodaya Prakashan, Nainital. Kumaun University, Department of Geology, Kumaun: 147-170.
- Peña-Monné, J.L., Rubio-Fernández, V., Sampietro-Vattuone, M.M. et al. 2020. Relict Slopes and Palaeovalleys at Taracena-Guadalajara (central Spain): Geomorphological and Palaeogeographical Interpretation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 540/2. doi.10.1016/j.yebeh.2019.106855.
- Petraglia, M.D. e Rose, J.I. 2009. *The Evolution of Human Populations in Arabia. Paleoenvironments, Prehistory and Genetics*. Springer, Dordrecht - Heidelberg - Londra - New York.
- Philip G., Donoghue D., Beck A. et al. 2002. CORONA Satellite Photography: an Archaeological Application from the Middle East. *Antiquity*, 76: 100-117.

- Picalause, V., Cauwe, N., Lemaitre, S., et al. 2004. Desert-Kites of the Hemma Plateau (Hassake, Syria). *Paléorient*, 30(1): 89-99.
- Quilici Gigli, S. 2004. *Introduzione alla topografia antica*. Il Mulino, Bologna.
- Regoli, E. 2003. Da paesaggio naturale a paesaggio misurato. Le prime forme di suddivisione del suolo in Italia; La centuriazione romana. In: Bussi, R. (a cura di) *Misurare la terra: centuriazione e coloni nel mondo romano. Catalogo della Mostra*. Franco Cosimi Panini, ARBE, Modena.
- Renfrew, C. e Bahn, P. 2019. *Archaeology. Theory, Methods and Practice*. Thames and Hudson, Londra.
- Rowley, T., Giardino, J.R., Granados-Aguilar, R. et al. 2015. Periglacial Processes and Landforms in the Critical Zone. *Developments in Earth Surface Processes*, 19: 397-447.
- Salzani, L. e Vitali, D. 2002. Gli scavi archeologici nel podere Forzello a San Basilio di Ariano Polesine. *PADUSA*, 38: 115-138.
- Sanlaville, P. 1992. Changements climatiques dans la péninsule Arabique durant le Pléistocène supérieur et l'Holocène. *Paléorient*, 18: 5-25.
- Savigear, R.A.G. 1965. A Technique of Morphological Mapping. *Annals of the Association of American Geographers*, 55(3): 514-538.
- Schneider, A.E. 1961. *Theoretical Geomorphology*. Springer-Verlag, Göttingen.
- Schulz, E. e Whitney, J.W. 1986. Upper Pleistocene and Holocene Lakes in the an-Nafud, Saudi Arabia. *Hydrobiologia*, 143: 175-190.
- Singh, I.B. e Bajpai, V.N. 1989. Significance of Syndepositional Tectonics in Facies Development, Gangetic, Alluvium Near Kanpur, Uttar Pradesh. *Geological Society of India*, 34(1): 61-66.
- Singh, I.B., Bajpai, V.N., Kumar, A. e Singh, M. 1990. Changes in the Channel Characteristics of Ganga River During Late Pleistocene - Holocene. *Geological Society of India*, 36(1): 67-73.
- Smith, S.L. 2020. Drones over the 'Black Desert': The Advantages of Rotary-Wing UAVs for Complementing Archaeological Fieldwork in the Hard-to-Access Landscapes of Preservation of North-Eastern Jordan. *Geosciences*, 10(11): 426. doi.org/10.3390/geosciences10110426.
- al-Sulaimani, Z.Kh., Helmi, T. e Nash, H. 2007. The Social Importance and Continuity of *Falaj* Use in Northern Oman. *Proceedings of the International History Seminar on Irrigation and Drainage, 2-5 May 2007*. Open Research Exeter, Teheran: 1-17.
- Terrenato, N. 1992. La ricognizione della Val di Cecina: l'evoluzione di una metodologia di ricerca. In: Bernardi, M. (a cura di) *Archeologia del paesaggio*. All'Insegna del Giglio, Firenze: 561-596.
- Thomas, H., Kennedy, M., Dalton, M. et al. 2021. The Mustatils: Cult and Monumentality in Neolithic North-Western Arabia. *Antiquity*, 95: 605-626.
- Thomas, M., Testa, O. e Courbon, P. 2018. A Preliminary Study of Wells and Qanâts. In: Charloux, G. e Loreto, R. (edd.) *DÛMA III. The 2012 Report of the Saudi-Italian-French Archaeological Project at Dûmat al-Jandal, Saudi Arabia*. Saudi Commission for Tourism and Antiquities, King Fahd National Library Cataloging, Riyadh: 93-134.
- Thompson, M.W. 1977. *General Pitt-Rivers: Evolution and Archaeology in the Nineteenth Century*. Moonraker Press, Bradford-on-Avon.
- Tosco, F. 2009. *Il paesaggio storico. Le fonti e i metodi di ricerca*. Laterza, Bari.
- Tosi, M. 1975. Distribution and Exploitation of Natural Resources in Ancient Oman. *Journal of Oman Studies*, 1: 187-206.
- Tricart, J. e Cailleux, A. 1956. *Introduction à la Géomorphologie Climatique*. CDU-SEDES, Parigi.
- Trigger, B. 2014. *A History of the Archaeological Thought*. Cambridge University Press, Cambridge.

- Viganoni, L. e Galluccio, F. (edd.) 2007. *Le rappresentazioni del mondo. Elementi di cartografia*. Università di Napoli L'Orientale, Napoli.
- Wallace, C.A., Dini S.M. e al-Farasani, A.M. 1997. *Geological Map of al-Jawf Quadrangle, Sheet 29D, Kingdom of Saudi Arabia*. Ministry of Petroleum and Mineral Resources, Deputy Ministry for Mineral Resources, Riyadh.
- Wilkinson, T.J. 2003. *Archaeological Landscapes of Ancient Near East*. University of Arizona Press, Tucson.
- Wheatley, D. 1995. Cumulative Viewshed Analysis: a GIS-based Method for Investigating Intervisibility, and its Archaeological Application. In: Lock, G.R. e Stancic, G. (edd.) *Archaeology and geographical information systems: a European perspective*. Taylor & Francis, Londra: 171-185.
- Wheatley, D. e Gillings, M. 2005. *Spatial Technology and Archaeology. The Archaeological Applications of GIS*. CRC Press, Boca Raton.
- Zarins, J. e al-Badr, H. Archaeological Investigation in the Souther Tihâma Plain II (Including Sihi, 217-107 and Sharja 217-172), 1405/1985. *Atlat*, 10: 36-57.
- van Zeist, W., e de Roller, G.J. 1993. Plant Remains from Maadi, a Predynastic Site in Lower Egypt. *Vegetation History and Archaeobotany*, 2(1): 1-14.



## Sitografia

<https://bhuvan-app3.nrsc.gov.in/data/download/>

Portale dell'*Indian Space Research Organisation* (ISRO) e del *National Remote Sensing Centre* indiano (NRSC), che contiene un voluminoso archivio di dati con accesso libero registrati sull'India e aree limitrofe durante varie missioni spaziali e da varie piattaforme satellitari.

Ottimo motore di ricerca di intuitiva comprensione e facilità di utilizzo.

Ultimo accesso 15 ottobre 2022.

<https://earthexplorer.usgs.gov/>

Portale dello *United States Geological Survey* (USGS) di fondamentale importanza per la copertura a livello mondiale di numerosissimi dati di vario tipo (immagini multispettrali, pancromatiche, termiche, radar etc.), consultabili e scaricabili (purtroppo non sempre con accesso libero), attraverso un programma applicativo di consultazione cartografica di grande potenza.

Uno dei migliori *browser* di intuitiva comprensione e facilità di utilizzo.

Ultimo accesso 15 ottobre 2022.

<https://earth.esa.int/eogateway/catalog/spot-1-to-7-full-archive-and-tasking-and-spotmaps-2-5-dataset>

Portale della *European Space Agency* (ESA), che contiene l'archivio completo della copertura multispettrale e pancromatica dei satelliti francesi Spot-6 e Spot-7.

Dati a pagamento visionabili e acquisibili attraverso un ottimo motore di ricerca.

Ultimo accesso 15 ottobre 2022.

<http://glcf.umiacs.umd.edu/index.shtml>

Portale del *Department of Geographical Sciences* della *University of Maryland*, che rende disponibili a ricercatori e studiosi molti casi di studio e applicazioni di dati spaziali in campo ambientale, attraverso il proprio progetto intitolato *The Global Land Cover Facility* (GLCF). Eccellente programma di consultazione cartografica interattiva, accompagnato da una nutrita libreria.

Ultimo accesso 15 ottobre 2022.

<https://www.glovis.usgs.gov/>

Portale del *Global Visualization Viewer* (GloVis) messo a punto dallo *United States Geological Survey*. Uno dei migliori e più completi portali di ricerca e acquisizione parzialmente libera di un gran numero di dati registrati da svariate piattaforme spaziali.

Ultimo accesso 15 ottobre 2022.

<https://intelligence-airbusds.com/en/4871-geostore-ordering>

Portale della società europea *Airbus Defence and Space*.

Tutte le immagini sono ad elevata risoluzione geometrica (Pléiades 0,5m; Spot 1,5m; Terra SAR-X 1,5m) e sono acquisibili solo a pagamento.

Ultimo accesso 15 ottobre 2022.

<https://isro.gov.in/Spacecraft/cartosat-3>

Portale dell'*Indian Space Research Organisation/Dept. of Space* (ISRO).

Solo dati ad elevata risoluzione ripresi dal satellite indiano Cartosat-3 e informazioni tecniche su altri satelliti posti in orbita dall'India nel corso degli anni sono disponibili a pagamento sul sito.

Ultimo accesso 15 ottobre 2022.

<https://idt2.regione.veneto.it/idt/webgis/viewer?webgisId=47>

Geo-portale dei dati territoriali della Regione Veneto

Eccellente motore di ricerca cartografico interattivo per visionare e scaricare gratuitamente numerose coperture aerofotogrammetriche di foto pancromatiche zenitali, riprese dal 1929 al 2013 sul Veneto, otti-

me per interpretazioni multitemporali relative all'uso del suolo e alla pressione antropica sull'ambientale. Ultimo accesso 15 ottobre 2022.

<https://satimagingcorp.com/satellite-sensors/>

Portale della società privata *Satellite Imaging Corporation*, che fornisce l'accesso a uno dei migliori archivi di immagini multispettrali e pancromatiche ad elevatissima risoluzione lineare geometrica a terra (fino a 30 cm di Pléiades Neo e WorldView-4), tutte acquisibili a pagamento.

Ultimo accesso 15 ottobre 2022.

<https://usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-declassified-data-declassified-satellite-imagery-1>

Portale dell'*Earth Resources Observation and Sciences Center* (Eros) dello *United States Geological Survey* che offre un utile archivio di immagini militari de-classificate a pagamento, riprese tra il 1960 e il 1972, quali le foto Corona, Argon e Lanyard.

Questo tipo di dati è particolarmente utile per indagini multitemporali a medio-alta risoluzione su aree non ancora trasformate da una intensa urbanizzazione.

Ultimo accesso 15 ottobre 2022.

## Indice delle figure

Ogni carta, ripresa satellitare o foto aerea, come consuetudine iconografica, si intende orientata avente il nord sempre verso l'alto, tranne diversamente specificato.  
Nell'eventualità che illustrazioni di competenza altrui siano riprodotte in questo volume, l'editore è a disposizione degli aventi diritto che non si sono potuti reperire.

### 1. Introduzione

**Fig. 1.** Ecumene di Anassimandro di Mileto (VI sec. a.C.). Viganoni e Galluccio (edd.) 2007

**Fig. 2.** Ecumene di *Google Earth* (XXI sec d.C.) (*Google Earth*)

**Fig. 3.** Esempio di combinazione di dati satellitari e da campo. In alto a sinistra, immagine satellitare Pléiades ad alta risoluzione (50 cm di dettaglio) dell'area urbana del sito di wādi banī Ḥālid (WBK1), Oman, I sec. a.C. – IV sec. d.C.; in basso, il profilo altimetrico del *tell* di WBK1 ottenuto mediante elaborazione da *Google Earth*; in alto a destra, vista da nord di WBK1 (Missione de "L'Orientale" nel Sultanato dell'Oman, Sharqiyah)

**Fig. 4.** Esempio di tre differenti composizioni a falsi colori delle bande (da sinistra a destra: 1-3-5; 3-5-7; 7-5-3) di una stessa immagine Landsat, realizzate per evidenziare depositi sabbiosi, copertura vegetale e affioramenti di arenarie. Oasi di Dedān, odierna al-‘Ula, Arabia Saudita (Missione archeologica italiana nel Regno dell'Arabia Saudita)

**Fig. 5.** 'Sentiero degli Spiriti' costituito da un allineamento di 54 *cairns* allungato per 180 m da SE a NW sulla sommità della 'Grande Montagna Sacra' nei Gobi Altai in Mongolia, in prossimità del tumulo dell'Età del Bronzo di Puntsag Oboo (foto B.M.)

**Fig. 6.** Particolare del deserto interno yemenita, il Ramlat as-Sab‘atayn, con un dettaglio dell'area del wādi Marḥa cuore dell'antico regno di Awsān (VIII-VII sec. a.C.). L'elaborazione Landsat ETM a falsi colori, bande 3-5-7 (in basso), a dispetto dell'apparente paesaggio uniforme percepito a colori naturali su immagine Ikonos da *Google Earth* (in alto), rivela la reale paleo idrografia oggi coperta da strati di accumulo sabbioso eolico (elaborazione Landsat R.L.)

### Parte I

#### 2. La Geomorfologia

**Fig. 7.** Coni vulcanici di ceneri del Quaternario in un'area posta a una decina di km a NW di Mārib, Yemen (*Google Earth*)

**Fig. 8.** Tipico paesaggio 'trappico' nello Yemen centrale in prossimità di Madīnat Al-Ahḡūr (foto B.M.)

**Fig. 9.** Paesaggio 'trappico' nello Yemen centrale, in prossimità di Madīnat Al-Ahḡūr, osservato da satellite (*Google Earth*)

**Fig. 10.** Paesaggio della parte centrale del Ramlāt as Sab‘atayn osservato da satellite con chiare evidenze dei depositi eolici (dune longitudinali) e tracce del paleoalveo Jawf-Ḥadramawt (*Google Earth*)

**Fig. 11.** Campo di *yardangs* nel Dunhuang Yardang National Geopark (Provincia di Gansu, Cina) (Xinhua/Fan Peishen)

**Fig. 12.** 'Ciclo erosivo normale' di W.M. Davis (R.L. e B.M. rielaborato da Davis 1899, 1922)

**Fig. 13.** Evoluzione di un reticolo idrografico, dopo un fenomeno di sollevamento generalizzato e uniforme, negli stadi evolutivi di: a) 'gioinezza', b) 'maturità', c) 'senescenza', secondo Davis modificato da Scheidegger (R.L. e B.M. rielaborato da Scheidegger 1961)

**Fig. 14.** Superficie della Terra con le principali 'geotessiture'. Immagine su proiezione cilindrica di Mercatore, prodotta nel 2000 dal *World Data Center for Marine Geology and Geophysics* partendo da una base digitale di dati di elevazione acquisiti dalla prima *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). Nella fascia di latitudini centrali sono evidenziate le grandi catene orogenetiche in varie tonalità di rosso (quali le Montagne Rocciose-Cordigliera delle Ande, le Alpi-Dinaridi-Himalaya), le aree di 'cratone' (cratone del Kaapvaal in Sudafrica), le dorsali oceaniche in verde-mare (atlantica e pacifica)

**Fig. 15.** *The Grand Hogback* (Colorado, USA) ripreso su immagine Ikonos di *Google Earth*. Esso è costituito da una cresta rocciosa lunga più di 140 km della *Mesaverde formation* a circa 230 km ad occidente di Denver (*Google Earth*)

- Fig. 16.** *The Grand Hogback* ripreso da foto aerea obliqua da SE a NW. Si noti la ‘pendenza posteriore’ del dorso, formata dalla superficie di uno strato arenaceo resistente all’erosione, mentre la ‘pendenza anteriore’ opposta, detta anche scarpata, è costituita da un pendio che incide l’intero pacco di strati alternati arenaceo-calcarei (più duri) e argilloso-marnosi (più teneri) (*coloradomtn.edu*)
- Fig. 17.** Schema descrittivo di un paesaggio tabulare con strutture a *mesa*, *cuestas* e profonde incisioni a *canyon* (R.L. e B.M.)
- Fig. 18.** Tipico paesaggio tabulare a *mesa* e *cuestas* nell’altopiano interno dell’Etiopia, vicino ad Amba Alagi, ripreso da *Google Earth*
- Fig. 19.** Schema di pieghe anticlinali e sinclinali (R.L. e B.M.)
- Fig. 20.** Rilievo anticlinale di Murri (Nord Oman), costituito da strati calcareo-arenacei del Cretaceo (foto R.L.)
- Fig. 21.** Vallata sinclinalica nella Contea di San Bernardino in California, con alternanza di strati arenacei, argilloso-marnosi e tufacei (Pubblico Dominio)
- Fig. 22.** Modello di reticolo dendritico (R.L. e B.M.)
- Fig. 23.** Reticolo di drenaggio dendritico del wādī Ḥaḍramawt (Yemen), sviluppato sull’omonimo *plateau* calcareo-arenaceo del Mesozoico (*Google Earth*)
- Fig. 24.** Alto bacino idrografico dendritico di un corso d’acqua himalayano (montagne del Ladakh) (<https://www.ignant.com/2018/05/25/yuri-andries-photographs-ladakh-a-land-of-many-names/>)
- Fig. 25.** Modello di reticolo parallelo e sub-parallelo (R.L. e B.M.)
- Fig. 26.** Reticolo di drenaggio sub-parallelo su sedimenti del Paleogene nel Dofār, al confine tra Yemen e Oman (*Google Earth*)
- Fig. 27.** Modello di reticolo a traliccio (*trellis*) (R.L. e B.M.)
- Fig. 28.** Reticolo di drenaggio a traliccio sviluppato negli strati calcarei del Triassico della *Bay of Fundy* (Nuova Scotia, Canada) (<https://educationhub/112129043709583/posts/dendritic-drainage-pattern-trellis-drainage-pattern-and-radial-drainage-pattern/286548916267594/>)
- Fig. 29.** Modelli radiali centrifugo e centripeto (R.L. e B.M.)
- Fig. 30.** Grande struttura circolare (da impatto?) con diametro di oltre una decina di km, a circa 13 km a Nord-Ovest di Mabar (Yemen) nella serie vulcanica ‘trappica’ del Cenozoico. Le incisioni dei corsi d’acqua partendo dall’orlo sommitale scendono sia verso la depressione centrale coltivata (centripeti) sia verso la base esterna del rilievo (centrifughi) (*Google Earth*)
- Fig. 31.** Caldere nella Harrat al-Harrah (Arabia Saudita) con vistosi reticoli radiali centrifughi e minori reticoli centripeti (*Google Earth*)
- Fig. 32.** Modello di reticolo anulare (R.L. e B.M.)
- Fig. 33.** La *Richat Structure* di Oudane (Mauritania, 20,9° lat. Nord, 11,6° long. Ovest), da immagine Landsat ETM a falsi colori, con reticolo chiaramente anulare. Questa imponente struttura geologica circolare che affiora nel deserto del Sahara è una anticlinale circolare decapata dal diametro di almeno 50 km. Quarziti del Paleozoico costituiscono gli strati resistenti che delimitano tutto attorno la struttura stessa (elaborazione Landsat B.M.)
- Fig. 34.** Modello di reticolo strutturale rettangolare (R.L. e B.M.)
- Fig. 35.** *Adirondack Mountains* da *Google Earth* mostrano un reticolo di drenaggio strutturale, impostato lungo linee di faglia e frattura più erodibili, tra di loro perpendicolari (*Google Earth*)
- Fig. 36.** Esempio di reticolo di drenaggio (in questo caso dendritico) di 4° ordine, che illustra la classificazione gerarchica dei singoli rami secondo il sistema di ordinamento di Horton-Strahler (elaborazione di R.L. e B.M. da Horton modificato da Strahler 1952)
- Fig. 37.** Esempio di reticolo di drenaggio (in questo caso dendritico) di 12° ordine, che illustra la classificazione gerarchica dei singoli rami secondo il sistema di ordinamento di Shreve (Shreve 1967)
- Fig. 38.** Tipi di delta evoluti in presenza di azione crescente delle correnti tidali (costiere) e dei processi di trasporto fluviali, tra di loro contrastanti (R.L. e B.M.)
- Fig. 39.** Delta digitato complesso (*anche detto ‘a piede d’uccello’*) del Missisipi (Louisiana, USA) attualmente attivo, su composizione a falsi colori di immagine Landsat ETM. Molto evidente il materiale in sospensione sversato in mare dai vari bracci del fiume (in colore bianco-celeste più o meno marcato) (*United States Geological Survey*)
- Fig. 40.** Il vecchio apparato deltizio Quaternario inattivo del Mississippi (in rosso verso terra) è un tipico esempio di delta lobato nonché di processo avulsivo, ovvero di costante modifica di un ambiente deltizio (*United States Geological Survey*)

- Fig. 41.** Schema della struttura geologica del delta complesso Quaternario antico e attuale del Mississippi (R.L. e B.M.)
- Fig. 42.** Delta cuspidato del Po attualmente attivo, con notevole materiale fine in sospensione portato dai vari rami e riversato in mare. Le correnti tidali (costiere) hanno una direzione rotatoria in senso antiorario (*Google Earth*)
- Fig. 43.** Delta-estuario del Gange-Bramaputra con apporto di enormi quantità di materiale fluviale in sospensione ed elevata attività di accrescimento (*Google Earth*)
- Fig. 44.** Estuario asimmetrico del Fiume Congo, con chiaro accrescimento del lobo di sinistra (meridionale) a causa di persistenti correnti tidali con andamento antiorario (*Google Earth*)
- Fig. 45.** Processo di formazione di una *sabkha* costiera (R.L. e B.M.)
- Fig. 46.** Tipico esempio di *sabkha* costiera alla radice di Ras al-Hamra, Oman (*Google Earth*)
- Fig. 47.** *Shell midden sites* in relazione alla *sabkha* di Ras al-Hamra (Oman) (modificata da Biagi 1994)
- Fig. 48.** Localizzazione dei maggiori *ergs* attualmente attivi e relitti (massimo dell'ultimo glaciale Würmiano 18.000 anni fa) ([https://throughthesandglass.typepad.com/through\\_the\\_sandglass/2014/11/hypno\\_pompic-dunes.html](https://throughthesandglass.typepad.com/through_the_sandglass/2014/11/hypno_pompic-dunes.html), modificato da R.L. e B.M.)
- Fig. 49.** Le tre tipologie di deserto (sabbioso-*erg*, petroso-ciottoloso-*serir*, roccioso-*hamāda*) che si incontrano collegate al Jebel Nejma, posto a una sessantina di km a sud-ovest di Dūmat al-Jandal (Arabia Saudita). Il litotipo prevalente del rilievo è costituito da arenarie grossolane continentali del Devoniano a stratificazione incrociata, di colore marrone-rossiccio e grigio-scuro, appartenenti al 'Ghuwar Member' della 'Tawil Formation'. È utile sottolineare come gli affioramenti arenacei siano coperti da uno straterello alterato di 'vernice del deserto' che li fa apparire di colore grigio-scuro o quasi nero come gli espandimenti di lava basaltica della Harrat al-Harrah. Sotto il profilo dell'interpretazione di immagini questo fenomeno è ben conosciuto come 'convergenza tonale' di superfici o masse rocciose aventi diversa natura (*Google Earth*)
- Fig. 50.** Diagramma triangolare con i campi di esistenza dei singoli tipi di dune (R.L. e B.M.)
- Fig. 51.** Formazione dei vari sistemi di dune semplici e complessi in presenza della sola azione eolica (deflazione e accumulo) e della disponibilità di sabbia. Si noti che le dune complesse a forma stellata prevedono la concomitante presenza di molto materiale e di venti sufficientemente violenti da direzioni variabili, mentre le 'barcane', le dune mobili più comuni e tipiche delle aree desertiche, sono formate da venti unidirezionali anche con limitato apporto costante di granelli sabbiosi (R.L. e B.M.)
- Fig. 52.** Principali tipologie dunari (R.L. e B.M.)
- Fig. 53.** Schema strutturale di una barcaana (R.L. e B.M.)
- Fig. 54.** Barcane mobili nella *Valley of Lakes* ai piedi della 'Grande Montagna Sacra' (*Ikh Bogd Uul*) in Mongolia, riprese da *Google Earth*. Evidente la direzione del vento prevalente da NW (alto a sinistra) verso SE (basso a destra) (*Google Earth*)
- Fig. 55.** Enormi dune longitudinali nel deserto di Ramlat as-Sab'atayn (Yemen), lunghe diverse decine di km. Il loro profilo trasversale NO-SE mostra che si elevano fino a una cinquantina di metri sul letto interdunale (*Google Earth*)
- Fig. 56.** Dune trasversali della lunghezza di 1-2 km, con creste elevate di qualche metro rispetto alla base. Il loro profilo trasversale da NW verso SE mostra chiaramente la successione ravvicinata delle creste che si ergono di qualche metro sulla base topografica pendente dolcemente verso SE (*Google Earth*)
- Fig. 57.** Dune a forma stellata e complessa di cospicua altezza al centro (circa una cinquantina di metri) rispetto alla lunghezza complessiva dei bracci (qualche centinaio di metri) (*Google Earth*)
- Fig. 58.** Sistemi irrigui antichi ed attuali a monte della città di Mārib (Yemen), che hanno improntato le forme del paesaggio con una fitta serie di canali adacquatori principali e secondari, delimitanti la parcellizzazione agraria, ripresi da immagine di *Google Earth*
- Fig. 59.** I vari sistemi di centuriazione romana che coprono l'intera pianura veneto-friulana hanno guidato tutti i successivi sviluppi agrari, viari e insediativi (Marcolongo e Mascellani 1978)
- Fig. 60.** Stralcio di immagine Landsat ETM sulla pianura ad est del F. Brenta, elaborata per evidenziare il regolare e fitto sistema del 'graticolato romano' ancor oggi esistente (Marcolongo e Mascellani 1978)
- Fig. 61.** Paesaggio dell'Oman centrale osservato da piattaforma satellitare (immagine Ikonos). Ofioliti cretacei 'O' (*Samaïl ophiolite nappe*) poco riflettenti, rocce carbonatiche neogeniche 'C' altamente riflettenti e complesso dunare 'D' mediamente riflettente (*Google Earth*)

- Fig. 62.** 'Zone morfoclimatiche' attuali (Büdel 1950: 65-100): 1-zona glaciale; 2-zona subpolare di dissezione intensa (elevata incisione valliva); 3-zona di taiga di dissezione in ambiente di 'permafrost'; 4-zona extratropicale di dissezione debole; 5-zona subtropicale di morfogenesi mista (ambiente di tipo mediterraneo); 6-zona subtropicale di morfogenesi mista (regione dei monsoni); 7-zona arida ad inverni freddi con alterazione superficiale ed evoluzione verso *glacis* e *pediments*; 8-zona arida calda di conservazione delle superfici planiziali antiche e di proseguo dei processi di spianamento per azione di spandimento fluvio-eolico; 9-zona peritropicale di spianamento intenso; 10-zona intertropicale di spianamento parziale (Büdel 1950: 65-100)
- Fig. 63.** 'Zone morfoclimatiche della Terra basate sulla presenza o meno di vegetazione e sui suoi effetti geomorfologici (Tricart e Cailleux 1956: fig. 40)
- Fig. 64.** Classificazione climatica a scopi geomorfologici proposta da L. Beyer: 1-zona subpolare di soliflusso e di frantumazione della roccia a causa del ghiaccio ('debris' crioclastico); 2-zona temperata di azione modico-fluviale e di forme relitte; 3-zona subtropicale di ruscellamento diffuso e di corsi d'acqua stagionali (wadi); 4-zona paratropicale di azione eolica e 'reg'; 5-zona tropicale di dilavamento laminare e 'inselbergs'; 6-zona equatoriale di scivolamento franoso e di vallate (Beyer 1981)
- Fig. 65.** Lobi di soliflusso in condizioni di saturazione dello strato superficiale, che scivola sul basamento roccioso impermeabile, Garry Island, Northwest Territories, Canada (Rowley *et al.* 2015)
- Fig. 66.** Foto della Muela de Carravieja nell'area di Taracena-Guadalajara (Spagna centrale), che mostra la presenza di pendii relitti e paleo valli quaternarie in zona temperata, prodotto di una situazione climatica precedente all'attuale (Peña-Monné *et al.* 2020)
- Fig. 67.** La Muela de Carravieja su immagine Ikonos di *Google Earth*
- Fig. 68.** Tipico paesaggio in zona subtropicale con ruscellamento diffuso (*sheet runoff*) e locali *wadi* e profonde incisioni di ruscellamento concentrato (*gullies*) vicino a Tirunelveli nel Tamil Nadu (India del Sud). Sullo sfondo si erge la catena montuosa di Agasthyamalai, che fa parte dei Ghat occidentali e rappresenta un ostacolo per la penetrazione del monzone proveniente dal Kerala (sullo sfondo) nel Tamil Nadu (davanti) ([https://www.wikiwand.com/it/Clima\\_dell%27India](https://www.wikiwand.com/it/Clima_dell%27India))
- Fig. 69.** Foto di *reg* (*serir*) nell'Adrar, zona paratropicale con prevalente azione eolica in Mauritania (<https://fr.wikipedia.org/wiki/Reg>)
- Fig. 70.** La stessa zona di *reg* nell'Adrar ripresa da piattaforma satellitare in *Google Earth*
- Fig. 71.** *Inselbergs* granitici in zona tropicale nelle vicinanze di Bangalore (Karnataka, India) (foto B.M.)
- Fig. 72.** *Inselbergs* granitici (forme tondeggianti verde chiaro) in un'area di densa vegetazione tropicale poco a Sud di Bangalore (*Google Earth*)
- Fig. 73.** Zona equatoriale con il vasto bacino idrografico dendritico (oltre 7.000.000 kmq) del Rio delle Amazzoni (*United States Geological Survey*)
- Fig. 74.** Processi geomorfologici endogeni ('costruttori') ed esogeni ('distruttori'), tra di loro in continua competizione (R.L. e B.M.)
- Fig. 75.** Schema del processo di erosione-trasporto-deposizione da monte a valle di un corso d'acqua (R.L. e B.M.)
- Fig. 76.** Tipico profilo longitudinale di un corso d'acqua (R.L. e B.M.)
- Fig. 77.** Paesaggio della regione della Batinah Nord osservato da piattaforma satellitare (immagini Ikonos). Tc (rocce carbonatiche del Terziario), Olal (alluvioni antiche), Ral (alluvioni recenti) (*Google Earth*)
- Fig. 78.** Erosione di costa rocciosa con falesia in arretramento (R.L. e B.M.)
- Fig. 79.** Sulle sponde del 'Fiume Oceano'. Insediamento protostorico lungo la scogliera di Bimah, Oman settentrionale, con esposizione tidale della piattaforma erosa (R.L.)
- Fig. 80.** Deriva litorale ('*longshore drift*') (R.L. e B.M.)
- Fig. 81.** Tipologia delle principali forme di accumulo di materiale fine sabbioso lungo la costa (R.L. e B.M.)
- Fig. 82.** Classico esempio di 'tombolo' doppio che unisce il M. Argentario alla terraferma, delimitando una laguna al cui centro sorge la città di Orbetello (*Google Earth*)
- Fig. 83.** Spettacolare 'fungo' da corrosione eolica nel deserto del Salar de Uyuni (Bolivia) (<https://fr-academic.com/dic.nsf/frwiki/1825808>)
- Fig. 84.** 'Tafone' di Capo d'Orso (Palau, Sardegna) (<https://it.wikipedia.org/wiki/Tafone>)
- Fig. 85.** Modello di trasporto eolico di particelle più o meno fini e di elementi più grossolani (R.L. e B.M.)
- Fig. 86.** Distribuzione mondiale dei depositi di 'loess' distinti per modalità genetiche in 'CR mode' (provenienza da area glaciale continentale), 'MR mode' (provenienza da area montuosa) e 'MRD mode' (provenienza da area desertica) (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001282521930114X>)

**Fig. 87.** Paesaggio con *loess* nei pressi di Hunyuan, Datong (Provincia di Shanxi, Cina) ([https://en.wikipedia.org/wiki/File:Loess\\_landscape\\_china.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Loess_landscape_china.jpg))

**Fig. 88.** Potente coltre di depositi di 'loess' attorno a Hunyuan da *Google Earth*

## Parte I

### 3. Il Telerilevamento

**Fig. 89.** Sintesi per l'uso ottimale di determinate immagini in funzione delle caratteristiche dell'unità geomorfologica (Mantovani e Marcolongo 1995)

**Fig. 90.** Sintesi per l'uso ottimale di determinate immagini in funzione delle loro caratteristiche spettrali nel campo della geomorfologia climatica (Mantovani e Marcolongo 1995)

**Fig. 91.** Immagini *radar* SIR B sul deserto occidentale egiziano, con un articolato reticolo di paleo drenaggio ('*radar rivers*' in grigio scuro) oggi sepolto sotto vari metri di sabbie eoliche (elaborazione *radar* SIR B B.M.)

**Fig. 92.** Sintesi per l'uso ottimale di determinate immagini in funzione delle loro caratteristiche temporali nel campo della geomorfologia dinamica (Mantovani e Marcolongo 1995)

**Fig. 93.** Ambiti ottimali di applicazione nei diversi indirizzi geomorfologici (Mantovani e Marcolongo 1995)

**Fig. 94.** Tipi di sensori passivi (R.L. e B.M.)

**Fig. 95.** *Imaging Radar* (R.L. e B.M.)

**Fig. 96.** LiDAR (rielaborato da Awange e Kiema 2019)

**Fig. 97.** Bande spettrali del Landsat-8 nel visibile e nel vicino-medio infrarosso (sensore OLI) e nel lontano infrarosso (sensore TIRS) con le relative risoluzioni geometriche a terra. Da ricordare che le immagini Landsat-8 sono *open source* (<https://earthexplorer.usgs.gov/>)

**Fig. 98.** Bande spettrali dello Spot-7 nel visibile e nell'infrarosso vicino con relative risoluzioni geometriche a terra. È interessante notare che la banda 'pancromatica' ha una risoluzione spinta di 1,5 m, che si presenta molto interessante per studi locali di geoarcheologia su aree ridotte (<https://www.intelligence-airbusds.com/imagery/constellation/spot/>)

**Fig. 99.** Bande spettrali di IRS-R2, che porta a bordo il sensore avanzato LISS-4 (due bande nel visibile e una nell'infrarosso vicino, con buona risoluzione geometrica a terra ricampionata a 5 m, ottimale per uno studio sul contesto fisico-ambientale di un sito archeologico) (<https://earth.esa.int/eogateway/missions/resourcesat-2>)

**Fig. 100.** Bande spettrali di IRS-Cartosat-4, lanciato il 27 novembre 2019 da ISRO (Indian Space Research Organisation) (<https://www.isro.gov.in/Spacecraft/cartosat-3>, <https://bhuvan-app3.nrsc.gov.in/data/download/>)

**Fig. 101.** Immagine Cartosat-3 ad elevatissima risoluzione (0,25 m) sull'area del Khalifa International Stadium, Qatar (*Google Earth*)

**Fig. 102.** Satelliti posti in orbita eliosincrona con sensori SAR-*Synthetic Aperture Radar* per lo studio delle risorse terrestri (etichette in grigio per satelliti non più attivi) ([https://earth.esa.int/documents/10174/3166029/Vilnius\\_radar\\_general.pdf](https://earth.esa.int/documents/10174/3166029/Vilnius_radar_general.pdf))

**Fig. 103.** Lunghezze d'onda (bande di frequenza) e risoluzione spaziale dei vari sensori SAR ([https://earth.esa.int/documents/10174/3166029/Vilnius\\_radar\\_general.pdf](https://earth.esa.int/documents/10174/3166029/Vilnius_radar_general.pdf))

**Fig. 104.** Bande SAR. La banda L con  $\lambda = 25$  cm, risulta particolarmente adatta a ricerche di carattere geoarcheologico ([https://earth.esa.int/documents/10174/3166029/Vilnius\\_radar\\_general.pdf](https://earth.esa.int/documents/10174/3166029/Vilnius_radar_general.pdf))

**Fig. 105.** DTM (Digital Terrain Model) ricostruito mediante 'nuvola di punti' con 'Airborne Lidar'. La scala cromatica blu-verde-giallo-rosso corrispondente a una energia del rilievo progressiva

**Fig. 106.** Piattaforme e sensori (R.L. e B.M.)

**Fig. 107.** Piattaforme + sensori più diffusi: vantaggi e svantaggi (R.L. e B.M.)

**Fig. 108.** Fase deduttiva di collegamento tra 'indicatori di superficie' (in questo caso 'crop marks') e strutture archeologiche sepolte ([https://www.researchgate.net/figure/The-influence-of-subsurface-archaeological-remains-on-the-vegetation-growth-and-the\\_fig2\\_315797574](https://www.researchgate.net/figure/The-influence-of-subsurface-archaeological-remains-on-the-vegetation-growth-and-the_fig2_315797574), modificata da B.M.)

**Fig. 109.** Porzione di immagine Aster a falsi colori (bande 3-2-1) (Marcolongo, Vangelista e Verga 1999)

**Fig. 110.** Interpretazione spinta fino alle fasi di 'classificazione' (categorie di 'Elementi morfologici' ed 'Elementi archeologici') e 'deduzione' ('Strutture archeologiche sepolte' e 'Cimosa interna laguna antica') sull'area dell'antico porto di Tharros (Marcolongo, Vangelista e Verga 1999)

**Parte II**

- Fig. 111.** Delta del Po. Esempio di sovrapposizione di stralcio della Carta su immagine Ikonos ad elevata risoluzione da *Google Earth* (immagine Ikonos del dicembre 2017). L'interpretazione della struttura e della tessitura del fitto mosaico di particelle agrarie (dimensioni, orientamento e tonalità) permette di riconoscere le antiche linee di costa, i vecchi bracci fluviali e più in generale lo sviluppo della paleoidrografia tarδοquaternaria del Po (Marcolongo e Zaffanella 1987)
- Fig. 112.** Sito portuale etrusco di San Basilio su immagine Ikonos ad elevata risoluzione di *Google Earth*, a ridosso di una antica linea di costa (fascia di particelle agrarie ad andamento NNE-SSO) attiva fino al VII-VI a.C. (*Google Earth*)
- Fig. 113.** Area dell'immagine precedente con il contesto paleoambientale del sito portuale etrusco di San Basilio (posto al centro del margine inferiore). È evidenziato lo spostamento della linea di costa verso Est dal XII secolo a.C. all'alto medioevo attraverso la cartografia delle successive linee di costa corrispondenti a fasce sabbiose dunari più o meno erose (Marcolongo e Zaffanella 1987)
- Fig. 114.** Stralcio della porzione meridionale della Carta della Paleoidrografia tarδο-quaternaria della Pianura Veneta e Delta del Po, settore est, ricostruita con l'impiego di immagini telerilevate (Landsat-5ETM, foto aeree) (Marcolongo e Zaffanella 1987)
- Fig. 115.** Legenda della carta tematica 'Paleoidrografia Tarδοquaternaria della Pianura Veneta sud Occidentale' (Figure 113-116), ricostruita con l'impiego di immagini telerilevate (Landsat 5 ETM, foto aeree) (Marcolongo e Zaffanella 1987)
- Fig. 116.** Stralcio della porzione meridionale della Carta della Paleoidrografia tarδο-quaternaria della Pianura Veneta e Delta del Po, settore ovest, ricostruita con l'impiego di immagini telerilevate (Landsat-5ETM, foto aeree) (Marcolongo e Zaffanella 1987)
- Fig. 117.** Copertura aerofotogrammetrica, Istituto Geografico Militare IGM del 1949 e relativa foto aerea pancromatica zenitale in bianco e nero (Regione Veneto, 'Geoportale dei dati Territoriali', anteprima foto 1949igm\_12\_92(<https://idt2.regione.veneto.it/idt/webgis/viewer?webgisId=47>))
- Fig. 118.** Il wādī Surdūd nell'ambito del generale sistema idrografico e geologico dello Yemen (Marcolongo 2007)
- Fig. 119.** Dettaglio della parte nord della Tihama, con l'area del wādī Surdūd oggetto dell'indagine. Landsat-5ETM multispettrale impiegata nelle analisi telerilevate dei primi anni '90 (elaborazione Landsat B.M.).
- Fig. 120.** Carta telerilevata del panorama paleo-costiero della foce del wādī Surdūd. I puntini in rosso identificano la distribuzione dei siti archeologici in prossimità di *sabkha* e laguna (Marcolongo e Palmieri 1992)
- Fig. 121.** Il wādī Surdūd e la costa nord della Tihama in una Landsat-7ETM elaborata a falsi colori (bande 1, 3, 7) (elaborazione Landsat R.L.)
- Fig. 122.** Corrispondenza tra una odierna Landsat-7ETM a falsi colori e il rilievo di dettaglio del 1991 (Marcolongo e Palmieri 1992, elaborazione Landsat R.L.)
- Fig. 123.** Shell midden dominato da un'abbondanza di campioni di *Terebralia palustris* (Marcolongo e Palmieri 1992)
- Fig. 124.** Tombe a torretta da al-Ayn, Oman (III millennio a.C.) (foto R.L.)
- Fig. 125.** Parte settentrionale della costa della Batinah (Landsat) (Missione de "L'Orientale" nel Sultanato dell'Oman, Sharqiyah)
- Fig. 126.** Dettaglio della lettura geomorfologica da remoto dell'area in questione eseguita su una ripresa Kompsat 3a ad elevata risoluzione (50 cm di dettaglio) e relativo profilo altimetrico (elaborazione carta R.L. e B.M.)
- Fig. 127.** Dettaglio degli affioramenti Tl e delle emergenze archeologiche (elaborazione carta R.L. e B.M.)
- Fig. 128.** Dettaglio della necropoli 4, la più meridionale, dove si distinguono circa 70 tombe. In basso, RGB di parte delle alluvioni ghiaiose antiche terrazzate, in alto il suo corrispettivo CIR (Missione de "L'Orientale" nel Sultanato dell'Oman, Sharqiyah)
- Fig. 129.** Carta archeologica, da QuantumGIS, con indicazione delle evidenze di diversa natura telerilevate (elaborazione GIS R.L.)
- Fig. 130.** Antichi porti citati nel *Periplus Maris Erythraei* (Marcolongo e Gogte 2005)
- Fig. 131.** Principali porti del Konkan agli inizi del periodo storico tra cui spicca *Semulla* (attuale Chaul) (Marcolongo e Gogte 2005)

- Fig. 132.** Muro fortificato lungo l'antica riva del fiume Kundalika, oggi spostatosi di alcune centinaia di metri più a Sud (Marcolongo e Gogte 2005)
- Fig. 133.** Il muro fortificato si estende per più di 500 m attraverso la fitta vegetazione (Marcolongo e Gogte 2005)
- Fig. 134.** Banchina portuale (Marcolongo e Gogte 2005)
- Fig. 135.** Porcellana cinese *blue on white* (Marcolongo e Gogte 2005)
- Fig. 136.** Antichi collegamenti viari del porto di Chaul con i siti buddisti dell'entroterra (Marcolongo e Gogte 2005)
- Fig. 137.** Grotta buddista con rilievo di *stupa* ad Agrav, nell'entroterra di Chaul (Marcolongo e Gogte 2005)
- Fig. 138.** Grotta buddista di Agrav nell'entroterra di Chaul (Marcolongo e Gogte 2005)
- Fig. 139.** Carta topografica di dettaglio alla scala 1:50.000 dell'area di studio, con il sito dell'antico porto di Chaul, oggi interrato e lontano oltre 1 km dalla sponda destra del fiume Kundalika (Marcolongo e Gogte 2005)
- Fig. 140.** Lavori di costruzione di una banchina d'attracco del porto nuovo di Chaul. L'antico sito di Chaul si trova ubicato nella piantagione di palme da cocco, che si delinea sullo sfondo ai piedi delle colline con le grotte buddiste di Agrav (Marcolongo e Gogte 2005)
- Fig. 141.** Immagine a fasi colori Aster georeferenziata e ritagliata sopra l'area di studio. In rosso le superfici a densa copertura vegetale, mentre nelle varie tonalità di celeste sono rappresentate principalmente zone umide a maggiore (scure) o minore (chiare) imbibizione e zone collinari con scarsa vegetazione (Marcolongo e Gogte 2005)
- Fig. 142.** Valori altimetrici dell'area investigata ricavati da dati SRTM (scala cromatica dell'elevazione in m) (Marcolongo e Gogte 2005)
- Fig. 143.** Rappresentazione prospettica obliqua dell'immagine Aster drappeggiata sopra il rilievo (Marcolongo e Gogte 2005)
- Fig. 144.** Elaborazione 3D con ArcGis che mette in evidenza la fascia depressa (paleo-canale) grossomodo parallela alla costa con direzione SSE-NNO tra l'antico porto di Chaul e il mare (Marcolongo e Gogte 2005)
- Fig. 145.** La fascia depressa al centro della ricostruzione 3D con ArcGis, attuale testimonianza del paleo-canale che costituiva lo sbocco a mare dell'antico porto di Chaul. La vista prospettica è ripresa da SSE verso NNO (Marcolongo e Gogte 2005)
- Fig. 146.** Evoluzione quaternaria del Nilo a monte della 3ª Cataratta (Marcolongo e Surian 1997a)
- Fig. 147.** A sinistra immagine Spot e a destra interpretazione generale delle varie tracce paleoidrografiche in rapporto ai siti di Kerma e Kadruka (Marcolongo e Surian 1997a)
- Fig. 148.** Stralcio dell'immagine Spot ('stretch' + falsi colori) sulla piana di Kerma (Marcolongo e Surian 1997b)
- Fig. 149.** Interpretazione di dettaglio dell'evoluzione del corso del Nilo nella piana del sito di Kerma (Marcolongo e Surian 1997b)
- Fig. 150.** Stralcio dell'immagine Spot ('stretch' + falsi colori) sulla piana di Kadruka (Marcolongo e Surian 1997b)
- Fig. 151.** Interpretazione di dettaglio dell'evoluzione del corso del Nilo nella piana del sito di Kadruka (Marcolongo e Surian 1997b)
- Fig. 152.** Siti pre-dinastici del Basso Egitto (van Zeist e de Roller 1993)
- Fig. 153.** Composizione a falsi colori di Landsat-5ETM (elaborazione Landsat B.M.)
- Fig. 154.** Interpretazione geomorfologica, che riporta la litologia semplificata dell'area di Maadi e le principali morfologie dovute alla morfogenesi fluviale. Tra i depositi del Quaternario 'Older Alluvium' include limi, sabbie e ghiaie deposte principalmente dal Nilo e in subordine dai suoi tributari, mentre a 'Younger Nile' appartengono a sedimenti medio-olocenici solo del Nilo (Caneva, Marcolongo e Palmieri 1987)
- Fig. 155.** Interpretazione geomorfologica sovrapposta su immagine Ikonos di *Google Earth* (Caneva, Marcolongo e Palmieri 1987)
- Fig. 156.** Legenda della carta tematica 'Esquisse Géomorphologique de la partie la plus orientale du Delta du Nil' (Marcolongo 1992)
- Fig. 157.** Porzione orientale della carta tematica 'Esquisse Géomorphologique de la partie la plus orientale du Delta du Nil' (Marcolongo 1992)
- Fig. 158.** Porzione occidentale della carta tematica 'Esquisse Géomorphologique de la partie la plus orientale du Delta du Nil' (Marcolongo 1992)

- Fig. 159.** Carta tematica drappeggiata sopra immagini Ikonos di *Google Earth* (Marcolongo 1992)
- Fig. 160.** Delta del Nilo secondo Strabone (circa 20 a.C.) (Ball 1942: 69)
- Fig. 161.** Wādī banī Ḥālid e la porzione più orientale della catena al-Ḥajar (elaborazione Landsat R.L.)
- Fig. 162.** Carta geoarcheologica del wādī banī Ḥālid, con indicazione del bacino idrografico e dei siti archeologici da esso dipendenti (elaborazione in ambiente QuantumGIS) (Missione de “L’Orientale” nel Sultanato dell’Oman, Sharqiyah)
- Fig. 163.** La piana alluvionale lungo la quale sorgono i siti antichi (in primo piano WBK1, sito dell’Età del Ferro Tarda databile a partire dal IV sec. a.C.) e alcuni dei villaggi odierni. Sullo sfondo ben si apprezza la morfoscultura sinclinalica dove la *Muqal Cave* da vita al vitale corso d’acqua wādī banī Ḥālid (foto R.L.)
- Fig. 164.** DEM (*Digital Elevation Model*) della piana alluvionale lungo la quale sorgono i siti antichi e alcuni dei villaggi odierni (R. Bottiglieri)
- Fig. 165.** Il sito fortificato di WBK1 visto dalla sponda sinistra del wādī banī Ḥālid (foto R.L.)
- Fig. 166.** Rilievo planimetrico di WBK1 eseguito mediante Stazione Totale sul campo (Missione de “L’Orientale” nel Sultanato dell’Oman, Sharqiyah)
- Fig. 167.** Il corso superiore del wādī banī Ḥālid con, all’estrema sinistra, WBK2 (foto G. Vaccaro)
- Fig. 168.** Immagine *Pléiades* pancromatica ad altissima risoluzione che mostra la piana alluvionale con WBK1 e WBK2 (al quale è associata una diga artificiale) (Missione de “L’Orientale” nel Sultanato dell’Oman, Sharqiyah)
- Fig. 169.** Fotointerpretazione del contesto idrografico di WBK2 da immagine *Ikonos* montata su *Google Earth* (Missione de “L’Orientale” nel Sultanato dell’Oman, Sharqiyah)
- Fig. 170.** La diga ciclopica che sbarra il tributario di destra del wādī banī Ḥālid nella piana alluvionale (foto R.L.)
- Fig. 171.** Fotointerpretazione del contesto idrografico di WBK2 da immagine *Ikonos* montata su *Google Earth* (Missione de “L’Orientale” nel Sultanato dell’Oman, Sharqiyah)
- Fig. 172.** *Inlet* o imbocco a monte del *falāj* che intercettava le acque del wādī banī Ḥālid per convogliarle verso WBK2 (foto R.L.)
- Fig. 173.** Il prosieguo del *falāj* che immette le acque del wādī banī Ḥālid entro il complesso agrario di WBK2 (foto R.L.)
- Fig. 174.** Il prosieguo del *falāj* che immette le acque del wādī banī Ḥālid entro il complesso agrario di WBK2 (foto R.L.)
- Fig. 175.** Il prosieguo del *falāj* che immette le acque del wādī banī Ḥālid ora entro una serie di bacini di raccolta (foto R.L.)
- Fig. 176.** Telerilievo di WBK2 su stralcio di immagine *Pléiades* pancromatica (Missione de “L’Orientale” nel Sultanato dell’Oman, Sharqiyah)
- Fig. 177.** Le sorgenti a monte del wādī banī Ḥālid (foto R.L.)
- Fig. 178.** Diga artificiale a monte della piana irrigua (foto R.L.)
- Fig. 179.** Esempio di odierno *falāj* (foto R.L.)
- Fig. 180.** Villaggi odierni attorno a palmeto sostenuto da *falāj* (foto R.L.)
- Fig. 181.** Paleoidrografia Quaternaria della piana indo-gangetica (Marcolongo e Tosi 1995)
- Fig. 182.** Porzione di immagine IRS 1D-PAN sulla piana del Doab. Nell’angolo in alto a destra il piano alluvionale attuale del Gange. La scena è attraversata nella parte alta dal corso del Burhiganga Nadi (Vecchio Ganga), a cui è riconducibile l’ampio meandro relitto a forma di ferro di cavallo posto più a Sud. L’intera idrografia con le varie paleoforme mostra chiaramente una tendenza di spostamento del deflusso verso NE (elaborazione IRS 1D-PAN B.M.)
- Fig. 183.** Interpretazione geo-archeologica della piana del Doab attorno al sito di Drupad Kila/Kampilya (Marcolongo 1998, 2001)
- Fig. 184.** Dettaglio dell’interpretazione geoarcheologica centrato su Drupad Kila (Marcolongo 1998, 2001)
- Fig. 185.** Drupad Kila su Irs 1D PAN (Marcolongo 1998, 2001)
- Fig. 186.** Planimetria del sito (Marcolongo 1998, 2001)
- Fig. 187.** Ikh Bogd Uul (foto B.M.)
- Fig. 188.** La Grande Montagna Sacra (foto B.M.)
- Fig. 189.** Itinerario, su immagine Landsat ETM a falsi colori, della prima spedizione congiunta Italo-Mongola CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche) - MAS (Accademia delle Scienze) nella vallata dei Laghi, ai piedi della ‘Grande Montagna Sacra’ (Gobi Altayn) (Marcolongo 2003)

- Fig. 190.** Immagine Landsat-7ETM a colori falsati. Il lago di Orog (*Orog Nuur*) è ben riconoscibile poco sopra al centro della scena (colore blu scuro). In colore pastello sono evidenziate le coltri nevose della catena dei Gobi Altayn (elaborazione Landsat B.M.)
- Fig. 191.** Interpretazione geoarcheologica attorno a Orog Nuur (Marcolongo 2003)
- Fig. 192.** Necropoli scoperta durante la spedizione congiunta CNR-MAS nell'agosto 2002 all'estremità sud-occidentale del lago Orog Nuur, partendo da una interpretazione geo-archeologica preliminare su immagini Landsat-7ETM e radar ERS-SAR (Marcolongo 2003)
- Fig. 193.** Sito CNR-MAS 1 scavato nell'agosto 2003 (sullo sfondo, verso nord, l'Orog Nuur) Il tumulo ad anello o *khirigsuur* era circondato da un recinto rettangolare in pietra (Marcolongo 2003)
- Fig. 194.** Grande necropoli di *khurgans* 'Xiongnu' sul *glacis* di Dund Argalaut Nuruu, centrata a N 45° 29' 26.3", E 99° 39' 12.6" ad Est di Bayansair (Marcolongo e Gunchinsuren 2007)
- Fig. 195.** Immagine radar ERS SAR. La chiazza scura è il lago di Bayansair Nuuru, che mostra tutta una serie di variazioni di linee di costa lungo il suo bordo orientale. I tumuli sono distribuiti lungo la vallata del piccolo immissario che alimenta il lago (Marcolongo e Gunchinsuren 2007)
- Fig. 196.** Tomba satellite con resti di cavallo (Marcolongo e Gunchinsuren 2007)
- Fig. 197.** Frequenti motivi graffiti: Gobi *ibex* (*Capra sibirica hagenbecki*) e 'argali' (*Ovis ammon mongolica*) (Marcolongo e Gunchinsuren 2007)
- Fig. 198.** Stralcio dell'immagine Sojuz KFA 1000 con la delimitazione dell'area più umida estesa in senso NO-SE attraverso i territori dei Comuni di Castelfranco, Piombino Dese, Trebaseleghe, Camposampiero, Scorzè, Noale e Mirano (Marcolongo, Ninfo e Simone 2006)
- Fig. 199.** Tracciato sulla elaborazione di una ripresa Aster, che descrive in modo più aggiornato agli inizi del 2002 l'uso del suolo nell'area dello studio (Marcolongo, Ninfo e Simone 2006)
- Fig. 200.** Andamento dei dossi sabbiosi, espressione degli alvei del Brenta tardiglaciale, che segnano in modo caratteristico il territorio della Valle d'Agredo, ripresi da fonte bibliografica (Bondesan 1998, 2003). Essi definiscono tra l'altro delle strette e allungate depressioni interdosso che guidano il corso dei principali fiumi di risorgiva della zona, quali il Dese, il Marzenego e il Musone Vecchio. La ramificazione più sviluppata e continua risulta essere quella che taglia trasversalmente i Comuni di Piombino Dese, Trebaseleghe e Scorzè. Questa forma positiva del rilievo che, seppur debolmente, segna un piatto paesaggio di pianura, deve essere identificata con l'asse longitudinale della storica Valle d'Agredo, entità fisiografica rimasta radicata per lungo tempo nella memoria dell'uomo (Marcolongo, Ninfo e Simone 2006)
- Fig. 201.** Sviluppo del microrilievo con le isoipse generate automaticamente da un opportuno *software* (Idrisi) a partire dalle quote puntuali della cartografia numerica digitale della Regione del Veneto alla scala 1:5.000. Risulta evidente la localizzazione dell'abitato di Trebaseleghe sulla sommità del dosso sabbioso ora citato, delimitato lateralmente da fasce di terreni più fini di antica esondazione fluviale (Marcolongo, Ninfo e Simone 2006)
- Fig. 202.** Limiti delle antiche centuriazioni che hanno improntato attraverso i tempi l'area investigata, così come si evidenziano sulla foto cosmica Sojuz (Marcolongo, Ninfo e Simone 2006)
- Fig. 203.** Stralcio della idrografia secondaria nell'area di Trebaseleghe, da cui appare evidente l'impronta che l'antica suddivisione agraria ha lasciato nel paesaggio attraverso il controllo dell'andamento della rete di canali di irrigazione e drenaggio. Ad una lettura attenta emerge che il graticciato romano è relativamente più rarefatto e disgregato in corrispondenza della culminazione del dosso Piombino Dese-Trebaseleghe-Scorzè, che ha esercitato nel tempo una maggiore attrazione sugli insediamenti, tradottasi in una concentrazione di centri abitati e industriali e vie di comunicazione, solo parzialmente giustapposti al reticolo di base (Marcolongo, Ninfo e Simone 2006)
- Fig. 204.** Schema dei principali sistemi di centuriazione romana presenti nella pianura friulana. Si noti che le suddivisioni centuriate non si sviluppano a Sud della romana Via Postumia, laddove le acque di 'risorgiva' di numerosi 'fontanili' danno origine a tutto un fitto reticolo idrografico (Marcolongo 2000)
- Fig. 205.** Immagine IRS-1D PAN (risoluzione a terra 5m), ritagliata sul foglio n. 87 'Palmanova' della Carta Tecnica Regionale del Friuli-Venezia Giulia, che copre un'area a cavallo della 'fascia delle risorgive', delimitante l'alta pianura con il fitto reticolo centuriato dalla bassa pianura con parcellizzazione agraria irregolare e caotica (Marcolongo 2000)
- Fig. 206.** Interpretazione di dettaglio della IRS-1D PAN, secondo lo schema prima illustrato, che evidenzia i *limites* centuriati regolari (20 *actus*) dell'agro a Nord della Via Postumia (linea viola grosso modo al

centro della foto, che taglia la pianura con direzione da Nord-Ovest verso Sud-Est) e la sua assenza nella porzione più meridionale (Marcolongo 2000)

- Fig. 207.** Ingrandimento su una porzione della pianura friulana. In giallo, celeste e rosso i *limites* della centuriazione coincidenti rispettivamente con partizioni agrarie, canali e rete viaria; in viola le tracce di rotte fluviali e paleoalvei. Lungo la Via Postumia sono allineati i principali centri abitati attuali (Marcolongo 2000)
- Fig. 208.** Il castelliere del Bronzo medio (1.700 a.C.) di Sedegliano, frazione di Gradisca in provincia di Udine, ben identificabile al centro dell'immagine IRS-1D PAN (cerchio scuro). Esso è uno tra i siti fortificati protostorici del Friuli meglio conservati (Marcolongo 2000)
- Fig. 209.** Interpretazione del contesto paleoambientale del castelliere di Sedegliano (cerchio verde), con particolare riguardo alla paleoidrografia (in viola). Il castelliere è ubicato su un microrilievo della piana in posizione protetta, sovrastante due correnti di deflusso idrico superficiale (viola) che convergono verso sud (Marcolongo 2000)
- Fig. 210.** Fig. 210. Mappa semplificata della tettonica della Turchia con indicazione delle maggiori strutture e placche (Gürbüz e Gül 2005)
- Fig. 211.** Carta idrogeologica e geomorfologica della piana di Malatya (Missione Archeologica Italiana nell'Anatolia Orientale, Archivio MAIAO-Sapienza, Marcolongo e Palmieri 1983)
- Fig. 212.** Carta delle sorgenti, elaborata in ambiente GIS Idrisi, sovrapposta alla carta geologica semplificata (1 'giallo' = rocce sciolte-depositi alluvionali e detritici-; 2 'marrone chiaro' = rocce sedimentarie eterogenee -flysch-; 3 'verdino' = rocce carbonatiche compatte; 4 'rosa' = rocce ignee effusive e metamorfiche meno compatte; 5 'viola' = rocce ignee intrusive e effusive e rocce metamorfiche compatte) dimostra questo stretto controllo esercitato dalla litologia sulla localizzazione delle emergenze di acqua sotterranea (Missione Archeologica Italiana nell'Anatolia Orientale, Archivio MAIAO-Sapienza, Marcolongo, Palmieri e Simone - in stampa)
- Fig. 213.** Fotocosmica Sojuz KFA 1.000 (Missione Archeologica Italiana nell'Anatolia Orientale, Archivio MAIAO-Sapienza, Marcolongo, Palmieri e Simone - in stampa)
- Fig. 214.** Stralcio della fotocosmica Sojuz KFA 1.000 sopra la piana di Malatya (quadrante NO) (Missione Archeologica Italiana nell'Anatolia Orientale, Archivio MAIAO-Sapienza, Marcolongo, Palmieri e Simone - in stampa)
- Fig. 215.** Piana di Malatya. Tracce di una antica centuriazione romana conservate nella struttura regolare della parcellizzazione agraria, in un contesto altrimenti irregolare e disorganizzato (Missione Archeologica Italiana nell'Anatolia Orientale, Archivio MAIAO-Sapienza, Marcolongo, Palmieri e Simone - in stampa)
- Fig. 216.** Piana di Malatya. Tracce di paleoalvei rivelate da strutture meandriche della parcellizzazione agraria (Missione Archeologica Italiana nell'Anatolia Orientale, Archivio MAIAO-Sapienza, Marcolongo, Palmieri e Simone - in stampa)
- Fig. 217.** Strutture circolari (B=Büyük Tepe e K=Küçük Karamildan) con marcata variazione di riflettanza rispetto al contesto circostante (Missione Archeologica Italiana nell'Anatolia Orientale, Archivio MAIAO-Sapienza, Marcolongo, Palmieri e Simone - in stampa)
- Fig. 218.** Il rilievo di Büyük Tepe ripreso durante la ricognizione (*groundtruthing*) (Missione Archeologica Italiana nell'Anatolia Orientale, Archivio MAIAO-Sapienza, Marcolongo, Palmieri e Simone - in stampa)
- Fig. 219.** Il rilievo di Küçük Karamildan ripreso durante la ricognizione, con fortezza romana sulla sommità (Missione Archeologica Italiana nell'Anatolia Orientale, Archivio MAIAO-Sapienza, Marcolongo, Palmieri e Simone - in stampa)
- Fig. 220.** Organizzazione del mosaico particellato attorno alla struttura ovale di Arslantepe (Missione Archeologica Italiana nell'Anatolia Orientale, Archivio MAIAO-Sapienza, Marcolongo, Palmieri e Simone - in stampa)
- Fig. 221.** La collina di Arslantepe (Missione Archeologica Italiana nell'Anatolia Orientale, Archivio MAIAO-Sapienza, Marcolongo, Palmieri e Simone - in stampa)
- Fig. 222.** Stralcio della foto cosmica Sojuz KFA 1000 georeferenziata su cui è identificato il sito n. 18 Furuncu höyük (UTM X=452307, Y=4242861; Lat/Long N 38° 19' 57,4" E 38° 27' 15,5") (Missione Archeologica Italiana nell'Anatolia Orientale, Archivio MAIAO-Sapienza, Marcolongo, Palmieri e Simone - in stampa)
- Fig. 223.** La morfologia del sito dai rilievi di campagna (Missione Archeologica Italiana nell'Anatolia Orientale, Archivio MAIAO-Sapienza, Marcolongo, Palmieri e Simone - in stampa)
- Fig. 224.** Stralcio della foto cosmica Sojuz KFA 1000 georeferenziata su cui è identificato il sito n. 16 Muhlisin Tepe (UTM X = 443818, Y = 4249465; Lat/Long N 38° 23' 29,9" E 38° 21' 24") (Missione

- Archeologica Italiana nell'Anatolia Orientale, Archivio MAIAO-Sapienza, Marcolongo, Palmieri e Simone – in stampa)
- Fig. 225.** La morfologia del sito dai rilievi di campagna (Missione Archeologica Italiana nell'Anatolia Orientale, Archivio MAIAO-Sapienza, Marcolongo, Palmieri e Simone – in stampa)
- Fig. 226.** Stralcio della foto cosmica Sojuz KFA 1000 georeferenziata su cui è identificato il sito n. 17 Küçük Karamildan Tepe (UTM X = 448324, Y = 4246489; N 38° 21' 54,3", E 38° 24' 30,5") (Missione Archeologica Italiana nell'Anatolia Orientale, Archivio MAIAO-Sapienza, Marcolongo, Palmieri e Simone – in stampa)
- Fig. 227.** La morfologia del sito dai rilievi di campagna (Missione Archeologica Italiana nell'Anatolia Orientale, Archivio MAIAO-Sapienza, Marcolongo, Palmieri e Simone – in stampa)
- Fig. 228.** Stralcio della foto cosmica Sojuz KFA 1000 georeferenziata su cui è identificato il sito n. 45 Barmazli Tepe (UTM X = 455374, Y = 4240929; N: 38° 18' 55,3' E: 38° 29' 22,3') (Missione Archeologica Italiana nell'Anatolia Orientale, Archivio MAIAO-Sapienza, Marcolongo, Palmieri e Simone – in stampa)
- Fig. 229.** La morfologia del sito dai rilievi di campagna (Missione Archeologica Italiana nell'Anatolia Orientale, Archivio MAIAO-Sapienza, Marcolongo, Palmieri e Simone – in stampa)
- Fig. 230.** Stralcio della foto cosmica Sojuz KFA 1000 georeferenziata su cui è identificato il sito n. 72 Soğuk Pinar (UTM X = 479213, Y = 4250945; N: 38° 24' 23,4' E: 38° 45' 42,9').
- Fig. 231.** La morfologia del sito dai rilievi di campagna (Missione Archeologica Italiana nell'Anatolia Orientale, Archivio MAIAO-Sapienza, Marcolongo, Palmieri e Simone – in stampa)
- Fig. 232.** Stralcio della foto cosmica Sojuz KFA 1000 georeferenziata su cui è identificato il sito di Cakılı Mevkii/Area B (UTM X = 479213, Y = 4250945; N 38° 21' 49,7' E 38° 36' 02,2') (Missione Archeologica Italiana nell'Anatolia Orientale, Archivio MAIAO-Sapienza, Marcolongo, Palmieri e Simone – in stampa)
- Fig. 233.** La morfologia del sito dai rilievi di campagna (Missione Archeologica Italiana nell'Anatolia Orientale, Archivio MAIAO-Sapienza, Marcolongo, Palmieri e Simone – in stampa)
- Fig. 234.** Il risultato grafico dell'applicazione della tabella a tutti i singoli *pixel* dell'immagine genera una carta delle pendenze (Missione Archeologica Italiana nell'Anatolia Orientale, Archivio MAIAO-Sapienza, Marcolongo, Palmieri e Simone – in stampa)
- Fig. 235.** Istogramma di NDVI per Karakaya (Marcolongo, Palmieri e Simone – in stampa)
- Fig. 236.** Istogramma di NDVI per il terreno (Marcolongo, Palmieri e Simone – in stampa)
- Fig. 237.** Carta dell'indice di vegetazione. Nella porzione centrale della piana di Malatya si addensano le classi con un elevato indice di copertura vegetale e pertanto le zone meno propense all'erosione. La parte più orientale e la fascia collinare e montuosa sono invece caratterizzate da valori di NDVI molto bassi con una marcata predisposizione all'erosione (Missione Archeologica Italiana nell'Anatolia Orientale, Archivio MAIAO-Sapienza, Marcolongo, Palmieri e Simone – in stampa)
- Fig. 238.** Firme spettrali delle classi di uso del suolo considerate (Marcolongo, Palmieri e Simone – in stampa)
- Fig. 239.** Carta dell'uso del suolo (Missione Archeologica Italiana nell'Anatolia Orientale, Archivio MAIAO-Sapienza, Marcolongo, Palmieri e Simone – in stampa)
- Fig. 240.** Carta delle litologie (Missione Archeologica Italiana nell'Anatolia Orientale, Archivio MAIAO-Sapienza, Marcolongo, Palmieri e Simone – in stampa)
- Fig. 241.** Istogramma delle classi di propensione all'erosione (Marcolongo, Palmieri e Simone – in stampa)
- Fig. 242.** Carta finale di suscettibilità all'erosione (Missione Archeologica Italiana nell'Anatolia Orientale, Archivio MAIAO-Sapienza, Marcolongo, Palmieri e Simone – in stampa)
- Fig. 243.** Aree della Penisola arabica analizzate nel capitolo (R.L. e B.M.)
- Fig. 244.** Mosaico di Landsat ETM multispettrali elaborate a falsi colori (Missione archeologica italiana nel Regno dell'Arabia Saudita)
- Fig. 245.** Dettaglio della ripresa Landsat ETM multispettrale elaborata a falsi colori (Missione archeologica italiana nel Regno dell'Arabia Saudita)
- Fig. 246.** Mosaico di riprese Digital Globe GeoEye USGS (*Google Earth*)
- Fig. 247.** Tigilliti in banchi calcarei del Terziario dal Nefūd settentrionale (foto R.L.)
- Fig. 248.** Stratigrafia di un paleo-lago del Nefūd settentrionale, datato tra i 10.000 e gli 8.000 anni fa, composta da banchi di diatomiti (in bianco) che sigillano depositi argillosi grigio-verdi (foto R.L.)
- Fig. 249.** Sito neolitico di Aşfān in fase di raccolta sistematica dei manufatti litici in selce, tra cui un raschiatoio, due lame e un nucleo in fase di lavorazione (foto R.L.)
- Fig. 250.** L'area della Harrat al-Harrah, sulla destra del wādī aṣ-Şirḥān, come appare a colori naturali (RGB) (*Google Earth*)

- Fig. 251.** Estensione generale della Harrat al-Harrah sulla base della carta geologica (*Saudi Geological Survey*)
- Fig. 252.** Estensione generale della Harrat al-Harrah con la sovrapposizione degli stralci delle carte geologiche di dettaglio che descrivono la completa geologia della regione (*Saudi Geological Survey*)
- Fig. 253.** Definizione dettagliata della Harrat al-Harrah (colori dal marrone al nero) sulla base di una elaborazione a falsi colori (Landsat ETM, composizione delle bande 5-3-7 verde, blu, rosso) (Missione archeologica italiana nel Regno dell'Arabia Saudita)
- Fig. 254.** Landsat, composizione delle bande 5-3-7 verde, blu, rosso per la definizione di suoli vulcanici (colorazioni dal marrone al nero). Si distinguono, inoltre, i suoli argillosi e le *sabkhah* (gradazioni di celeste) e i suoli sabbiosi (gradazioni di viola) risultati da ruscellamento e deposizione eolica (Missione archeologica italiana nel Regno dell'Arabia Saudita)
- Fig. 255.** Dettaglio della Landsat-5-3-7 con la distribuzione dei siti archeologici neolitici esclusivamente lungo le aree caratterizzate da suoli di origine vulcanica (Missione archeologica italiana nel Regno dell'Arabia Saudita)
- Fig. 256.** Campionatura generale delle evidenze archeologiche (neolitiche, età del bronzo ed epoca storica) dalla regione del Jawf al dicembre 2020. La Harrat si caratterizza per una quasi esclusiva frequentazione neolitica (Missione archeologica italiana nel Regno dell'Arabia Saudita)
- Fig. 257.** Distribuzione dei siti definiti proto o pseudo-villaggi (Missione archeologica italiana nel Regno dell'Arabia Saudita)
- Fig. 258.** Distribuzione delle unità definite *compound* (Missione archeologica italiana nel Regno dell'Arabia Saudita)
- Fig. 259.** Distribuzione dei *kites* lungo le aree in questione (Missione archeologica italiana nel Regno dell'Arabia Saudita)
- Fig. 260.** Dettaglio della mappatura della paleoidrografia della Harrat al-Harrah in relazione alla distribuzione dei siti neolitici del Jawf (Missione archeologica italiana nel Regno dell'Arabia Saudita)
- Fig. 261.** Ripresa satellitare Kompsat 3a, a 50cm di risoluzione, per il rilevamento di dettaglio delle evidenze antropiche. In questo caso un agglomerato composto da *compounds*, strutture singole e tracce di segmenti murari prossimi alla micro *sabkhah* si dispiega su suoli vulcanici sopraelevati rispetto alla rete idrografica (Missione archeologica italiana nel Regno dell'Arabia Saudita)
- Fig. 262.** Schema semplificato della struttura di un *qanāt* (English 1968)
- Fig. 263.** Ripresa aerea dell'oasi storica di Dūmat al-Jandal (1964) (foto aerea, non ortorestituita, per gentile concessione di Hussein al-Khalifa)
- Fig. 264.** Stralcio della foto aerea del '64 (in alto) e attuale condizione agrario/urbana (in basso) (foto aerea per gentile concessione di Hussein al-Khalifa a confronto con stralcio da *Google Earth*)
- Fig. 265.** Foto aerea del '64 drappeggiata su reticolo cartografico e ortorestituita: in rosso le 'bocche' dei pozzetti; in blu i pozzi indipendenti e i 'pozzo madre' (foto aerea per gentile concessione di Hussein al-Khalifa; processo di stretching eseguito su *Google Earth* e importato su Quantum GIS)
- Fig. 266.** Mappatura al suolo di parte dell'acquedotto antico (Saudi-Italian-French archaeological Project at Dūmat al-Jandal) (Thomas *et al.* 2018)
- Fig. 267.** Il Jebel Najma orientato a Nord (elaborazione Base Camp e *Google Earth* trasferita in Quantum GIS, R.L e B.M.)
- Fig. 268.** Il settore nordoccidentale del Nefūd orientato al Sud a confronto con Cetus (elaborazione Base Camp e *Google Earth* trasferita in Quantum GIS, R.L e B.M.)
- Fig. 269.** *Inselberg* presso il paleolago di Ġubbah orientato al Sud (elaborazione Base Camp e *Google Earth* trasferita in Quantum GIS, R.L e B.M.)
- Fig. 270.** Esempio di struttura circolare su *glacis* (R.L.)
- Fig. 271.** Vista d'insieme di *compound* su *glacis* (immagine Ikonos montata su *Google Earth*)
- Fig. 272.** Esempio di tomba a tumulo edificata su picco isolato (foto R.L.)
- Fig. 273.** Esempio di tomba a torretta (foto R.L.)
- Fig. 274.** Percorso di *groundtruthing* lungo il *glacis* alla base del Jebel Nejma e classificazione delle evidenze del tipo *compound*, tombe ed eventuali petroglifi (elaborazione Base Camp e *Google Earth* trasferita in Quantum GIS)
- Fig. 275.** Percorso di avvicinamento alle aree su altopiano dove sorgono i *desert kites* (elaborazione Base Camp e *Google Earth* trasferita in Quantum GIS)
- Fig. 276.** Esempio di porzione di 'testa' di un *kite* (foto R.L.)
- Fig. 277.** Mosaico analogico di 6 scene spaziali russe Kate 200 (Marcolongo 2004)

- Fig. 278.** Carta orografica semplificata dello Yemen con indicazione dei principali corsi d'acqua (in blu) e paleo-corsi (in rosso tratteggiato) (Marcolongo 2007)
- Fig. 279.** Fotointerpretazione semplificata del paleo-sistema idrografico Ġawf-Ḥaḍramawt (Marcolongo 2004)
- Fig. 280.** Carta paleo-idrografica del sistema Ġawf-Ḥaḍramawt (Marcolongo 2004)
- Fig. 281.** Area di approfondimento della ricerca sul paleo-ambiente del Ramlat as-Sab'atayn (Inizan, Lezine e Marcolongo 1998; Marcolongo 2004)
- Fig. 282.** Interpretazione geo-archeologica al bordo NE del Ramlat as-Sab'atayn, sede di un antico lago alimentato dal paleo-Ġawf, tratta da immagini Spot XS georeferenziate ed elaborate (Inizan, Lezine e Marcolongo 1998; Marcolongo 2004)



## Glossario

**Alofita.** Pianta terrestre che vive in terreni ricchi di sale, come le mangrovie che abbondano in lagune o lungo spiagge di mari.

**Ampiezza (banda).** L'ampiezza della banda dello spettro elettromagnetico registrata nelle immagini telerilevate, misurata dalla larghezza di banda propria di un determinato sensore.

**Anticlinale (rilievo).** Piega degli strati rocciosi con la convessità rivolta verso l'alto e quindi con al nucleo gli strati più antichi. Essa è il risultato degli sforzi compressivi o tangenziali che nel corso del tempo deformano plasticamente le rocce.

**Atmosfera.** Miscuglio di gas che avvolge la terra e nel quale è presente umidità che contribuisce a dare vita a fenomeni biologici e meteorologici, determinando forze esogene.

**Avulsione.** Processo di formazione di un canale o di un meandro da un vecchio braccio ora inattivo. Più specificatamente in geologia sedimentaria e geomorfologia fluviale, l'avulsione è il rapido abbandono di un canale fluviale e la formazione di un nuovo percorso di deflusso.

**Azimut/azimutale (ripresa).** L'azimut è la coordinata orizzontale angolare espressa dall'arco che si forma partendo convenzionalmente dal punto cardinale nord fino all'oggetto di osservazione, muovendosi in senso orario. Un punto che si trovi esattamente a nord avrà una coordinata azimutale di 0° (o 360°), a est di 90°, a sud di 180°, a ovest di 270°.

**Banda (spettrale).** Intervallo, nello spettro elettromagnetico, definito da due diverse lunghezze d'onda, o frequenze. I dati telerilevati sono normalmente registrati nella 'banda visibile' (radiazione a cui l'occhio umano è sensibile, con lunghezza d'onda compresa nell'intervallo tra 0.4 e 0.7  $\mu\text{m}$ ), nella 'banda dell'infrarosso vicino' o 'fotografico/riflesso' (con lunghezza d'onda da 0.7 a 1.3  $\mu\text{m}$  circa), nella 'banda dell'infrarosso medio' o 'riflesso' (con lunghezza d'onda da 1.3 a 6  $\mu\text{m}$  circa), nella 'banda dell'infrarosso lontano' o 'termico/emesso' (banda spettrale che si riferisce all'intervallo di lunghezza d'onda tra 7 e 15  $\mu\text{m}$ ) e

infine nelle varie 'bande di frequenza radar' di ordine centimetrico (in particolare 'banda C' 5,20-7,69 cm per la copertura vegetale e 'banda L' 19,3-76,9 per la litologia).

**Barcana.** Duna mobile asimmetrica a forma di ferro di cavallo, con pendenza più dolce sopravvento e più ripida sottovento. Essa si forma in condizioni di vento unidirezionale di debole intensità.

**Barcanoide (dorsale).** Dorsale mobile a cresta ondulata trasversale alla direzione di un vento unidirezionale, formata da una serie di barcane unite tra di loro in cui le braccia si collegano e diventano coalescenti. La loro evoluzione porta alla formazione di 'dune trasversali' quando la quantità di sabbia a disposizione è ancora maggiore e si succedono come se fossero delle onde con dei corridoi tra una dorsale e l'altra.

**Biostasia.** Situazione ambientale di equilibrio tra suolo, clima e vegetazione che rallenta o limita i processi erosivi.

**Bradisismo.** Lento movimento locale della crosta terrestre, diretto dall'alto al basso (*b. positivo*) o dal basso verso l'alto (*b. negativo*). Classico è il fenomeno ciclico di bradisismo osservato nei Campi Flegrei a partire dal IV sec. d.C. grazie allo studio delle altezze dei fori di litodomi sulle tre colonne ancora erette del 'Serapeo' di Pozzuoli, che ha permesso di ricostruire le oscillazioni del livello del mare dovute al sollevamento o abbassamento del suolo per cause endogene (vulcanesimo).

**Canyon.** Forma strutturale a vallata, o profonda incisione con pareti ripide, modellata da agenti esogeni quali fiumi o torrenti che scavano il loro letto in formazioni per lo più tabulari.

**Cimosa (lagunare).** Orlo, striscia terminale in genere. In geomorfologia, fascia di transizione tra una laguna e l'entroterra.

**Conoide alluvionale (o di deiezione).** Corpo sedimentario con forma a ventaglio generato da un accumulo di sedimenti alluvionali o clastici, ovvero detriti di natura e dimensioni diverse.

**Contrasto** (parametro). Contrasto o differenza tonale e/o cromatica tra i singoli elementi (*pixels*) di una immagine telerilevata. Il contrasto può essere aumentato con una operazione di *stretching*, che estende l'istogramma delle riflettanze su tutti i possibili 256 livelli di grigio. Questa operazione di stiramento dell'istogramma avviene sulla base di una funzione di trasformazione ('lineare', 'logaritmica' ecc.).

**Convettivo** (movimento). In fisica la convezione è un tipo di trasporto, assente nei solidi e trascurabile per i fluidi molto viscosi, causato da un gradiente di pressione e dalla forza di gravità e caratterizzato da moti di circolazione interni al fluido. La convezione permette al motore interno della Terra di muovere le rocce: ciò che è caldo e profondo, perciò leggero, sale; mentre ciò che è freddo e superficiale, più denso e pesante, scende.

**Corrasione**. Azione erosiva propria del modellamento terrestre determinata da particelle solide, trasportate dal vento, che levigano superfici rocciose. È particolarmente attiva quando granuli duri, per esempio di quarzo, agiscono su rocce tenere, quali arenarie a cemento calcareo. Le rocce vengono così variamente smerigliate e lisce e possono assumere forme insolite e curiose (vedi 'funghi'), che dipendono, oltre che dal diverso grado di compattezza della roccia, anche dalla velocità del vento e dalla sua direzione.

**Cratone**. Porzione rigida della crosta terrestre che per centinaia di milioni di anni non ha subito modificazioni tettoniche significative. Queste piattaforme continentali stabili si contrappongono agli 'orogeni' molto instabili e deformabili, che danno vita alle catene montuose spesso lungo i bordi delle grandi placche.

**Cuesta** (costa). Scarpatina o rilievo monoclinale costituito da un lato da una fronte ripida (scarpatina) e dall'altro da un tabulato a debole pendenza. Il versante più ripido ('versante di testata' o a 'reggipoggio') è caratterizzato dalle teste di strato, mentre il versante meno inclinato ('versante di faccia' o a 'franapoggio') è costituito da una superficie litostrutturale, la cui pendenza corrisponde all'inclinazione degli strati.

**Deflazione**. In geologia indica l'azione di trasporto di granuli esercitata dal vento in ambien-

te continentale. Nello specifico la deflazione consiste nel sollevamento e nell'asportazione dei singoli frammenti prodotti dalla disgregazione fisica delle rocce, che in questo modo vengono continuamente messe a nudo subendo la degradazione meteorica, soprattutto per termoclastismo.

**Diapiro**. Tipo particolare di struttura tettonica che si origina, in forma di pieghe anticlinali, per l'intrusione di masse di materiali litoidi più o meno plastici (spesso salgemma o anche argille), le quali, col progredire del movimento, possono determinare la lacerazione della piega originaria. Esso è costituito da una massa rocciosa semifusa, originata in una zona di fusione parziale del mantello superiore e risalita attraverso le rocce sovrastanti più recenti e più pesanti.

**Dinamica crostale**. Mobilità della crosta terrestre che assieme alla porzione del mantello esterno o rigido forma la litosfera. Secondo la teoria della tettonica a placche la litosfera è suddivisa in una ventina di zolle o placche di dimensioni molto varie, caratterizzate da margini di diverso tipo. Le placche si muovono lentamente (alcuni cm/anno) sull'astenosfera (fascia del mantello terrestre, compresa tra 100 e 300 km di profondità, in cui le rocce sono parzialmente fuse), trascinate passivamente dai moti convettivi presenti.

**Debris**. Detrito, derivante dal disfacimento delle rocce. Un *debris flow* (colata detritica) è costituito da un miscuglio di due fasi, una solida e una liquida, ovvero da acqua, fango, sedimenti e spesso detriti legnosi, che si propaga con elevata velocità all'interno di un canale naturale inciso in un versante alla base di pareti rocciose.

**Diastrofia** (diastrofismo). In geologia, complesso delle deformazioni e delle dislocazioni meccaniche subite dagli strati rocciosi dopo la loro formazione attraverso ripiegamenti e faglie.

**Eliosincrona** (orbita). Si dice eliosincrona un'orbita geocentrica avente altezza e inclinazione tale da permettere il sorvolo di un satellite sopra a ogni dato punto della superficie terrestre sempre alla stessa ora solare locale. In questo modo l'illuminazione solare sulla superficie terrestre risulta essere la stessa per ogni rivoluzione, cosa che aiuta l'osservazio-

ne essendo le condizioni di luce grosso modo invariate orbita dopo orbita.

**Endogeno.** Che ha origine nell'interno di un corpo o di un sistema (contrapposto a esogeno). Fenomeni endogeni, in geologia, sono fenomeni rilevabili sulla superficie terrestre ma che si originano entro la crosta terrestre, ascrivibili ad azioni di forze denominate per l'appunto endogene, dipendenti dalla costituzione stessa del sottosuolo. Tali fenomeni, in modo diretto e indiretto, si risolvono in spostamenti di masse creando dislivelli, in opposizione alle forze esogene che tendono invece a livellare la superficie terrestre.

**Emissività (radianza).** In telerilevamento è il rapporto, per ogni intervallo dello spettro elettromagnetico, tra la radianza emessa dalla superficie investigata e quella che alla stessa temperatura assoluta emetterebbe il corpo nero. Nelle riprese all'infrarosso termico la emissività è data dalla radiazione emessa nella parte dello spettro relativa alle onde lunghe.

**Erg.** Deserto sabbioso caratterizzato dalla presenza di vari tipi di dune. In genere gli *erg* sono situati ai margini di altre distese desertiche, in quanto formati da materiali fini trasportati lontano dal vento.

**Esogeno.** Fenomeno che trae origine dall'esterno di un corpo. Fenomeni endogeni in geologia hanno sede sulla superficie terrestre o nelle zone immediatamente prossime a essa e ne modellano la morfologia con azioni e forze contrapposte a quelle endogene.

**Eustatismo (eustatico).** In geologia, è il fenomeno di innalzamento o abbassamento a scala globale del livello medio dei mari, non dipendente cioè da fenomeni locali quali la subsidenza. Lungo le coste esso causa indietreggiamenti e avanzamenti del mare rispetto alla costa, chiamate rispettivamente regressioni o trasgressioni marine.

**Faglia.** Frattura della massa rocciosa accompagnata da uno spostamento relativo di una parte rispetto all'altra. Il piano di faglia, che rappresenta la superficie in corrispondenza della quale i due lati di una roccia fratturata si spostano, può essere verticale o inclinato. Il tipo più comune è quello verticale o subverticale.

**Fascio (laser/*swath*).** Il fascio laser è costruito da radiazioni di un'unica frequenza (raggi monocromatici) e una precisa intensità. I raggi che lo costituiscono presentano una natura ordinata costituiti da onde che nello spazio e nel tempo sono sempre in fase tra loro ed esattamente uguali.

**Firma (spettrale).** Radiazione riflessa da una superficie in funzione della lunghezza d'onda registrata. Diversi tipi di superficie come l'acqua, il terreno spoglio o la vegetazione riflettono la radiazione in maniera differente in vari canali, così da poter essere identificati su base radiometrica nelle immagini multispettrali.

**Flatiron.** In geomorfologia *flatiron* (ferro da stiro) è una forma di versante triangolare con pendenza ripida, creata dall'erosione differenziale agente su strati molto inclinati e resistenti, sovrapposti a strati più soffici. Alla fine del processo di formazione i *flatirons* hanno una larga base e una faccia a triangolo che si restringe verso l'alto fino a un punto (vertice) sommitale.

**Forma (parametro).** Geometria di un oggetto individuato sull'immagine telerilevata, che può essere classificata in regolare o irregolare e può avere varie dimensioni. Alcune forme tipiche del paesaggio sono facilmente individuabili e di conseguenza identificabili sulla base della loro stessa geometria, al di là della loro specifica firma spettrale (conoidi di deiezione, delta bilobati, doline, barcane ecc.).

**Fungo (erosione eolica).** Tipici della azione erosiva (corrasione) sono i cosiddetti funghi, spuntoni rocciosi a forma di lastra appoggiata alla sommità di un supporto. Essi si generano in seguito alla maggiore azione erosiva dovuta ai grani più grossi che il vento riesce appena a sollevare da terra e che corrodono quindi gli ostacoli solo nella loro parte inferiore, mentre i grani più fini colpiscono e intaccano la parte più alta con minore incisione.

**Geotessitura.** Unità più generali e più remote del rilievo a scala mondiale come i continenti (Eurasia), gli scudi prevalentemente cristallini (africano, canadese), le aree montuose prodotte da antiche orogenesi (caledoniana, ercinica) ecc. Unità legate prevalentemente a eventi endogeni solitamente pre-mesozoici. La loro conformazione

generale non è stata modificata e non è modificabile dagli agenti esogeni, che operano secondo scale spazio-temporali molto minori.

**Glacis.** Superficie di accumulo detritico con leggera pendenza, raccordante il versante montuoso con il fondovalle alluvionale.

**Grabben.** Termine derivante dalla letteratura scientifica tedesca che indica, in geologia strutturale, una fossa tettonica, ovvero una porzione di crosta terrestre sprofondata a causa della componente verticale di movimenti lungo faglie dirette (o distensive).

**Grazing** (angolo di). Angolo tra la linea sensore-oggetto telerilevato e la tangente alla superficie terrestre nel punto dell'oggetto. Esso è complementare all'angolo di incidenza, misurato tra il raggio sensore-oggetto e la verticale nel punto oggetto.

**Gullies.** Profonde incisioni erosive in formazioni normalmente sedimentarie friabili, frutto di un ruscellamento intenso.

**Hamāda.** Tipo di deserto roccioso con aree consistenti in terreni aridi, brulli, altopiani rocciosi e con presenza di pietrisco dalle forme aguzze. La superficie desolata visibile è costituita spesso dal substrato affiorante, ma anche da sedimenti cementati dai sali depositati dall'evaporazione dell'acqua.

**Hogback** (o 'schiena di maiale'). Cresta lunga e stretta, espressione topografica a livello regionale di affioramenti di rocce sedimentarie, a letti alternati di strati duri (calcari e arenarie) e strati più teneri (come scisti, argille e marne), con giacitura fortemente inclinata.

**Horst.** Termine proveniente dalla letteratura scientifica tedesca, con cui in geologia strutturale si identifica un pilastro tettonico, ovvero una porzione di crosta terrestre relativamente rialzata a causa di un sistema di faglie dirette in regime tettonico distensivo.

**Idrosfera.** L'involucro acqueo formato da mari, fiumi, laghi e acque sotterranee, che avvolge la Terra in modo incompleto e discontinuo. Ad esse vanno aggiunte le masse idriche allo stato solido come ghiacciai e calotte polari e quelle allo stato gassoso, come il vapore acqueo atmosferico.

**Inselberg.** *Inselberg* o *Monadnock* è un rilievo roccioso isolato a forma di cupola, prevalentemente granitico, che si erge bruscamente dalla pianura circostante. È caratterizzato da pendii molto ripidi, senza vegetazione, soprattutto in regioni a clima caldo-umido.

**Intervallo spettrale.** Intervallo di lunghezze d'onda dello spettro elettromagnetico, proprio di una banda specifica, o del canale di ricezione usato dal sensore.

**Iperspettrale.** Le tecniche del telerilevamento hanno avuto una evoluzione esponenziale grazie al progresso tecnologico, con la nascita dei sensori iperspettrali per piattaforme aeree o satellitari. Disporre di un numero superiore di bande, come nel caso degli strumenti iperspettrali, permette di ottenere firme spettrali quasi continue nello spettro o poter analizzare più dettagliatamente anche piccole porzioni dello spettro elettromagnetico.

**Isorientazione.** Parallelismo degli elementi costitutivi la tessitura di un determinato oggetto, come per esempio l'isorientazione dei singoli fenocristalli di minerali in una roccia scistosa, o le striature (graffi o solchi) dovute all'abrasione glaciale su rocce montonate.

**Landform.** Termine anglosassone traducibile con 'unità morfologica territoriale' intesa in senso lato. Secondo Savigear (1965) *landform* è una ben definita porzione della superficie terrestre con caratteristiche morfologiche peculiari, dovute a un processo prevalente agente su un litotipo e una struttura specifici.

**Litosfera.** Crosta terrestre e mantello superiore formano la litosfera, avente consistenza rigida, chimismo sialico (silicio e alluminio prevalenti, oltre a ferro, calcio, sodio, potassio e magnesio) e uno spessore variabile tra 75 km circa sotto gli oceani a un centinaio di km sotto i continenti.

**Litotipo.** Tipo di roccia formato da una certa aggregazione e mescolanza di minerali e/o altri elementi presenti in proporzioni variabili. Tra gli elementi che formano un litotipo, oltre ai cristalli, che sono l'assoluta maggioranza, vi sono i resti di organismi fossilizzati e altri materiali biologici, come per esempio in alcuni tipi di rocce sedimentarie, e i frammenti di

altre rocce preesistenti, come in brecce e conglomerati.

**Loess.** Deposito eolico di colore giallastro, non stratificato, costituito in prevalenza da particelle silteose a spigoli vivi di quarzo, calcite, mica, minerali femici, idrossidi di ferro e minerali argillosi. La genesi del *loess* è legata all'accumulo di questo pulviscolo finissimo che è trasportato dal vento nelle regioni steppiche e circumdesertiche, dove la vegetazione erbacea ostacola le correnti aeree nelle vicinanze del suolo e trattiene allo stesso tempo le particelle medesime.

**Lunghezza d'onda.** Il parametro fondamentale delle onde elettromagnetiche è la lunghezza d'onda, definita come distanza tra gli apici di due creste successive, ovvero tra due ventri successivi. A seconda della lunghezza d'onda si distinguono diversi tipi di dati, quali le onde nel visibile e nell'infrarosso vicino e medio ( $\lambda \leq 3\mu\text{m}$ ) dette anche luce riflessa, infrarosso termico lontano e onde radar. L'atmosfera risulta sufficientemente trasparente solo ad alcuni intervalli di lunghezza d'onda chiamati finestre atmosferiche. Solo le onde elettromagnetiche all'interno di queste finestre possono, dopo essere riflesse o emesse dalla superficie terrestre, attraversare l'atmosfera per essere rilevate da appositi sensori.

**Mesa.** Rilievo tabulare (strati a giacitura orizzontale) con sommità piatta o debolmente ondulata, isolato ed elevato sulla pianura circostante e bordato su tutti i lati da scarpate ripide

**Monoclinale.** Rilievo derivante da rocce stratificate con assetto inclinato. Sotto l'aspetto tettonico, la monoclinale è una piega a gradino in strati rocciosi sedimentari (flessura).

**Morfoclimatica (zona).** Area caratterizzata da forme del paesaggio associate a specifiche condizioni climatiche.

**Morfogenesi.** In geologia la morfogenesi è la formazione delle strutture e dei rilievi della crosta terrestre, dovuti a cause diverse.

**Morfografico.** Aspetto morfologico descritto in termini grafici.

**Morfometrico.** Studio quantitativo delle forme del rilievo terrestre, con lo scopo di associare misure o indici numerici alle forme fisiche e

ai fenomeni che si presentano sulla Terra, occupandosi non soltanto delle misurazioni di lunghezze, altitudini, aree ecc. ma anche di ottenere, mediante opportune operazioni su tali dati, altri indici numerici (indici morfometrici quale per esempio il rapporto tra altitudine massima ed estensione di un massiccio montuoso).

**Morfoscultura.** Unità particolari del rilievo come, per esempio, i monti (Monte Bianco), le valli (valle dell'Adige), gli edifici vulcanici (Etna), i bacini lacustri (lago di Garda), i delta fluviali (delta del Po), ma anche un singolo versante, un terrazzo fluviale, una falesia, un cordone morenico, una frana, una dolina, una duna. Possono essere connesse a eventi endogeni post-paleozoici, ma anche prodotte o comunque modificate da cause esogene recenti.

**Morfostruttura.** Unità del paesaggio terrestre a scala regionale, come le catene montuose (Alpi, Appennini), gli archi insulari (arcipelago indonesiano), le regioni depresse (valle del Reno, mar Rosso, Great Rift Valley), i grandi altopiani (Columbia Plateau, altopiano del Deccan). Unità generate da eventi post-paleozoici a prevalente componente endogena. Il loro aspetto originario è in linea di massima preservato e solo parzialmente modificato dagli agenti esogeni, in relazione alle differenti scale spazio-temporali in cui agiscono le due componenti.

**Multispettrale.** Registrazione dell'energia riflessa o emessa da una superficie in più bande dello spettro elettromagnetico, attraverso sensori di vario tipo. Un sensore multispettrale passivo è uno strumento in grado di registrare la quantità di energia riflessa di oggetti della superficie terrestre nelle diverse lunghezze d'onda dello spettro elettromagnetico (generalmente visibile e infrarosso). Il sensore multispettrale restituisce quindi un'immagine multibanda e consente, attraverso l'analisi della risposta spettrale nelle diverse bande acquisite, di estrarre informazione territoriale e produrre accurate mappe tematiche con l'utilizzo di opportuni classificatori.

**Nadir/nadirale (ripresa).** Relativamente a un punto P della Terra, il Nadir è il punto situato all'intersezione con la sfera celeste della semiretta condotta verticalmente verso il basso dal punto di osservazione. Ripresa aerea o da

piattaforma satellitare con asse verticale o nadirale.

**Nappa.** In geologia nappa o falda di ricoprimento è costituita da un largo corpo roccioso laminare che è stato sospinto per vari km (2-5 km) al di sopra di altre formazioni rocciose lungo una faglia inversa (compressiva) dalla sua posizione tettonica originale. Tipica catena montuosa a falde di ricoprimento sono le Alpi.

**Orogenesi.** In geologia, insieme dei processi e dei fenomeni che danno luogo alla formazione di una catena montuosa. È un fenomeno che si è ripetuto più volte nel corso della storia geologica della Terra, interessando vaste porzioni della crosta terrestre che sono state piegate, fagliate per compressione, metamorfosate e compenstrate da rocce ignee, costituendo estesi corrugamenti con una notevole complessità interna.

**Pancromatico.** Si dice pancromatico un materiale sensibile a tutte le lunghezze d'onda dello spettro del visibile, sintetizzate per comodità nelle tre bande ottiche del blu, verde e rosso. Una immagine pancromatica telerilevata da un sensore registra l'intero campo del visibile, normalmente riprodotto con 256 livelli di grigio.

**Pediment.** Superficie di erosione della parte alta di una debole pendenza concava ( $0,5^{\circ}$ - $7,0^{\circ}$ ) che circonda un rilievo montuoso in zone aride. La parte bassa del *pediment*, detta 'piedmont', è costituita da conoidi alluvionali coalescenti di accumulo (*bajada* in aree climatiche secche).

**Pedogenesi.** Insieme dei processi fisici, chimici e biologici che, partendo dalla disgregazione delle rocce e attraverso l'aumento del tenore di sostanza organica e la migrazione delle sostanze chimiche disciolte nelle acque sia superficiali sia profonde, porta allo sviluppo e alla formazione dei suoli.

**Penepiano.** In geologia, secondo la teoria dei cicli di erosione, lo stadio finale cui tenderebbe, a causa dell'erosione subaerea, ogni rilievo o insieme di rilievi, trasformandosi, dopo un lunghissimo periodo, anche di parecchi milioni di anni, in una zona pianeggiante, percorsa da incisioni fluviali, talora con rilievi residui formati dalle rocce più dure e resistenti. Il processo completo sarebbe possibile solo in climi

tropicali secchi, mentre in quelli umidi la presenza di una densa vegetazione proteggerebbe il terreno.

**Piattaforma continentale.** La piattaforma continentale è il prolungamento della massa continentale al di sotto del livello del mare, il cui orlo più esterno (linea di demarcazione di un continente) può distare anche centinaia di chilometri dal perimetro costiero. La piattaforma normalmente termina nel punto in cui il pendio di uno strato aumenta fortemente la sua inclinazione. Il fondale marino che segue questo punto di 'rottura' è anche chiamato scarpata continentale, la quale a sua volta termina nella parte più bassa degli oceani, detta anche piana abissale.

**Piega.** Struttura di una massa rocciosa che si origina per incurvamento e flessione di una superficie o di un gruppo di superfici sovrapposte. Il fenomeno del piegamento può interessare diversi tipi di rocce, tuttavia, i suoi effetti sono visibili meglio nelle rocce sedimentarie stratificate.

**Pixel** (*picture element*). Elemento minimo risolto individualmente in un'immagine. Unità di misura che determina la risoluzione geometrica del dato telerilevato.

**Pluricursale.** Fiume o corso d'acqua il cui ampio letto è solcato da una rete di due o più canali relativamente stabili e con sinuosità variabile, in genere meandriformi e interconnessi fra loro. Le pendenze dei canali sono bassissime ( $\leq 0,1\%$ ). Le zone che dividono i rami non sono barre ma porzioni di piana alluvionale con dimensioni maggiori rispetto alla larghezza dei canali stessi.

**Polarimetrico.** Che concerne la polarimetria, avente per oggetto la misurazione del grado di polarizzazione della luce. Un radar polarimetrico è un radar in grado di sfruttare la componente trasversale delle onde elettromagnetiche, cioè la polarizzazione della radiazione elettromagnetica, come i radar meteorologici e i radar ad apertura sintetica (*Synthetic Aperture Radar SAR*) usati tra l'altro per lo studio dei diversi litotipi.

**Radiometria.** Campo che si occupa dello studio della misurazione fisica della radiazione elettromagnetica, inclusa la luce visibile.

**Reg.** Detto anche *serir*, è un tipo di deserto caratterizzato da materiale ghiaioso e in subordine sabbioso. Il vento, tramite un'azione di deflazione, rimuove dalla superficie le particelle più fini, facendo emergere dal suolo quelle più grossolane (situate più in profondità), come formazioni ghiaiose.

**Relitto** (climatico). In ambito geologico, si usa il termine relitto per indicare strutture o rocce sopravvissute a processi geologici distruttivi. Struttura che è l'espressione sopravvissuta di una morfogenesi avvenuta in condizioni climatiche differenti dalle attuali. Nella dinamica dei versanti il termine indica frane e/o fenomeni franosi inattivi che si sono sviluppati in condizioni climatiche e/o geomorfologiche diverse da quelle attuali.

**Resistasia.** Condizione evolutiva dell'ambiente tipica delle zone prive di vegetazione (per esempio delle zone a clima arido o glaciale), in cui le azioni erosive prevalgono sulla pedogenesi, con la conseguente formazione di notevole quantità di materiale detritico.

**Retrodiffusione** (*backscattering*). In fisica con il termine anglosassone *backscatter* o *backscattering* s'intende la diffusione all'indietro (radiazione di ritorno), ossia la riflessione di energia raggiante (onde o segnali) che torna indietro nella stessa direzione da cui proviene, con un angolo di diffusione di 180 gradi. Tipica retrodiffusione è quella del segnale radar, che una volta emesso dal sensore telerilevato colpisce la superficie del terreno e viene rinviato al sensore origine per la registrazione.

**Risoluzione laser** (*footprint*). Nel caso di *laser scanner* l'invio di impulsi laser, con passi angolari costanti orizzontali e verticali, produce una griglia di misura regolare detta *footprint* dalla cui densità dipende la risoluzione del rilievo effettuato. All'interno del cono *footprint*, viene rilevata la riflettanza media del punto per determinarne la distanza dalla sorgente e ricostruire così la forma tridimensionale dell'oggetto investigato.

**Risoluzione spettrale.** È definita dalla larghezza delle bande spettrali in cui l'immagine è registrata. Solitamente dipende dal numero di bande spettrali del sensore. Ad esempio, il sensore Landsat-7 ha 7 bande spettrali (senso-

re ETM *Enhanced Thematic Mapper*), di cui alcune nello spettro infrarosso, altre in quello del visibile, con una risoluzione complessiva tra 0,07 e 2,1  $\mu\text{m}$ . Altro esempio è il sensore iperspettrale Hyperion montato a bordo dell'Earth Observing-1, con 220 bande spettrali che vanno da 0,4 a 2,5  $\mu\text{m}$ , con una risoluzione spettrale compresa tra i 0,10 e 0,11  $\mu\text{m}$  per banda.

**Risoluzione radiometrica.** È definita dal numero di diverse intensità della radiazione che il sensore è in grado di distinguere all'interno di ciascuna banda. Solitamente questo valore spazia tra gli 8 e i 14 bit, che corrispondono rispettivamente a 256 e 16384 livelli di grigio per ogni banda.

**Risoluzione temporale.** È definita dall'intervallo temporale (ore, giorni ecc.) che un satellite o un aereo impiega per sorvolare nuovamente un determinato punto della superficie terrestre. Questa risoluzione può essere aumentata utilizzando costellazioni di satelliti. Molto utile per discriminare cambiamenti morfologici o vegetativi in una determinata regione.

**Ruscellamento.** In geologia lo scorrimento superficiale e sub-superficiale dell'acqua in un terreno semi-saturo durante o subito dopo un evento piovoso.

**Sabkha.** Distesa di sale o depressione incrostata di sale che si incontra comunemente lungo le coste del Nordafrica e della Penisola arabica. Le *sabkha* sono generalmente delimitate da dune di sabbia e presentano un letto morbido, poco cementato ma impermeabile, a causa delle periodiche inondazioni ed evaporazioni. L'elevata concentrazione di acqua di mare e la capillare scomparsa delle acque sotterranee portano alla formazione di depositi di gesso, calcite e aragonite. Il termine *sabkha* è usato anche in genere per ogni area pianeggiante in ambiente desertico con presenza di minerali e sali evaporitici.

**Saltazione.** Azione di trasporto eolico delle particelle detritiche e sabbiose a cui il vento fa compiere un salto tanto più lungo quanto minori sono le loro dimensioni. I materiali più grossolani, quali ciottoli o grossi granuli sabbiosi, vengono invece trasportati per rotolamento sulla superficie terrestre e si accumulano in depressioni preesistenti.

**Scudo continentale.** Grande area stabile di bassorilievo della crosta terrestre, costituita da rocce cristalline del Precambriano. L'età di queste rocce è in tutti i casi superiore a 540 milioni di anni e la datazione radiometrica ha rivelato che alcune risalgono a 2-3 miliardi di anni. Le aree di scudo in generale sono considerate nuclei continentali (per esempio lo 'scudo canadese', lo 'scudo amazzonico', lo 'scudo baltico' o 'finnoscandinavo' ecc.).

**Serir.** Deserto ciottoloso, così chiamato nel Sahara (vedi 'reg').

**Sinclinale** (vallata). Piega degli strati rocciosi con la concavità rivolta verso l'alto e quindi con al nucleo gli strati più recenti. Essa è il risultato degli sforzi compressivi o tangenziali che nel corso del tempo deformano plasticamente le rocce.

**Soliflusso** (flussione del suolo). Tipico fenomeno di movimento di sedimenti superficiali saturi d'acqua, che scivolano lentamente lungo il versante al di sopra di un letto di rocce impermeabili.

**Spettrale** (firma). Vedi 'firma spettrale'.

**Stereoscopia.** La percezione del rilievo di un oggetto in conseguenza della visione binoculare, dovuta al meccanismo fisiologico che porta, nei lobi occipitali del cervello, all'elaborazione e alla fusione delle immagini che si formano nelle retine dei due occhi. La stereoscopia (raramente detta anche stereofotografia o stereografia) è una tecnica di realizzazione e visione di immagini, disegni, fotografie e filmati, atta a trasmettere una illusione di tridimensionalità, analoga a quella generata dalla visione binoculare del sistema visivo umano. In telerilevamento si utilizza lo stereoscopio per l'interpretazione di foto aeree stereoscopiche zenitali, che presentano di solito una copertura comune del 60% nella direzione di volo e del 10% tra strisciate adiacenti.

**Struttura** (parametro). Nell'interpretazione delle immagini telerilevate la struttura è data dall'organizzazione spaziale e dalla geometria dei singoli oggetti della tessitura. Si parla in questo caso di struttura grossolana, regolare, irregolare ecc.

**Tabulare.** In geologia, struttura di quelle forme ad altopiano in cui i terreni superficiali poggiano

in genere sopra un basamento costituito da rocce che non sono state soggette a piegamenti.

**Tafone.** Cavità, di dimensioni variabili, presente soprattutto in rocce granulari come l'arenaria, con pareti lisce. I tafoni si possono trovare in ogni zona del mondo, ma sono particolarmente comuni nelle zone marittime, nelle zone aride e nei deserti. L'origine dei tafoni può essere ascritta all'erosione eolica (corrasione), all'erosione dovuta al sale, a differenze nella coesione interna e nella permeabilità della roccia, alla durata del periodo secco fra diversi periodi umidi. I tafoni piccoli sono talvolta chiamati alveoli e l'erosione corrispettiva è anche detta alveolare.

**Talus** (scarpata). Nella terminologia geologica e geografica, il termine indica le scarpate e gli scoscendimenti detritici, che si generano per sfacelo delle pareti rocciose o dei terreni di trasporto, specialmente alluvionali.

**Tangenziale** (movimento). Movimento di traslazione e/o dislocazione tangente alla massa interessata.

**Tessitura** (parametro). Nell'interpretazione delle immagini telerilevate la tessitura è data dall'organizzazione dei *pixels* formanti un singolo oggetto individuato. Si parla in questo caso di tessitura omogenea, eterogenea, fine o grossolana ecc.

**Tettonica.** Ramo della geologia che studia la struttura e le proprietà della crosta terrestre, nonché la sua evoluzione nel tempo. In particolare la tettonica descrive, cercando di trovarne le cause, fenomeni come l'orogenesi, la crescita e il rafforzamento dei corpi rocciosi e dei cosiddetti cratoni e il modo in cui le placche che compongono lo strato esterno della Terra interagiscono tra loro.

**Tidale** (piana, ambiente). In sedimentologia, si definisce piana di marea o piana tidale un ambiente sedimentario in cui la sedimentazione è controllata dal flusso e riflusso della marea. Le piane di marea si sviluppano lungo coste basse, a debole inclinazione, con elevata escursione di marea, nelle quali quindi l'innalzamento e l'abbassamento del livello marino comporta sommersione ed esposizione ciclica di ampie estensioni di territorio.

- Tombolo.** Il tombolo è una formazione sabbiosa, più o meno ampia, che in genere assume la forma di un cordone di sabbia che congiunge uno scoglio o una piccola isola, detta per questo isola tidale con la terraferma. Si crea col movimento delle onde sul fondale e talvolta può sparire e poi ricomparire nel giro di pochi giorni.
- Tonale** (convergenza). In telerilevamento tonalità simile presentata nelle varie bande da oggetti o superfici aventi natura diversa. Per una loro eventuale discriminazione è necessario approfondire oltre alla analisi spettrale quella geometrico-strutturale.
- Tono** (parametro). Nell'interpretazione di immagini telerilevate il tono o tonalità di un dato oggetto individuato è dato dal valore medio di grigio dei *pixels* che lo compongono, o dal colore 'puro' (tinta) percepito legato a un ristretto spettro di emissione.
- Trap.** Grande colata di basalto a giacitura sub-orizzontale di vario chimismo, che via via si è appilata nel corso delle ere.
- Trasgressione** (marina). Evento geologico durante il quale il livello del mare si innalza rispetto alla terra e la linea costiera ingredisce verso terreni più elevati (ingressione), allagando di conseguenza zone in precedenza scoperte.
- Trellis.** Reticolo fluviale a traliccio che si sviluppa secondo incisioni lunghe e parallele unite tra loro da tratti perpendicolari.
- Vernice del deserto.** Patina lucida composta da minerali argillosi e ossidi di manganese e ferro, formatasi per via della deflazione eolica combinata con l'alterazione chimica e l'acqua di rugiada. Nel deserto essa si accresce molto lentamente e uno spessore millimetrico può essere vecchio di oltre 2.000 anni.
- Vettoriale** (movimento). Grandezza fisica caratterizzata da una direzione, un verso e una intensità, descritta quindi da un vettore, in contrapposizione a una grandezza scalare, che è caratterizzata solamente dall'intensità (numero chiamato appunto scalare).
- Wādī.** Letto di un torrente, talora un canyon o canalone, in cui scorre un corso d'acqua a carattere non perenne, effimero e/o stagionale. Si incontra generalmente nelle regioni desertiche, per esempio nel Sahara o nei deserti della Penisola arabica.
- Yardang.** Lunga cresta rocciosa, tipica forma erosiva dovuta all'azione eolica in ambiente desertico, allungata con la parte più scoscesa sopravvento e quella rastremata sottovento.



IL TORCOLIERE • Officine Grafico-Editoriali d'Ateneo

UNIVERSITÀ DI NAPOLI L'ORIENTALE  
prodotto nel mese di gennaio 2023

Questo *Manuale di geoarcheologia. Un approccio geomorfologico da remoto* intende offrirsi come strumento di formazione e conoscenza a quanti, studenti universitari, ricercatori e cultori della materia, intendano approfondire lo studio dell'ambiente considerato come contenitore delle testimonianze del passato nella sua perenne evoluzione di forme e di risorse.

Esso raccoglie l'esperienza acquisita sul campo, nel corso di vari decenni di attività di ricognizione e scavo, da parte dei suoi Autori in Italia e in numerosi paesi del Vicino e Medio Oriente, del centro Asia e del nord Africa. Ricerche sostenute e condotte sempre con l'ausilio di un punto prospettico privilegiato, quale quello offerto dalle varie immagini telerilevate riprese con sensori differenti da piattaforme aeree e satellitari in periodi temporali successivi, la cui interpretazione è stata sempre confrontata con le osservazioni dirette, ovvero con la cosiddetta 'verità terreno'.

Proprio questa stretta integrazione tra paesaggio, risorse del territorio ed emergenze antropiche più o meno antiche costituisce l'elemento portante del libro, declinato attraverso numerosi ed esaustivi esempi di analisi in vari ambienti dell'area mediterranea, del Vicino Oriente e dell'Asia che vedono applicato un approccio teorico ampiamente illustrato nella prima parte del volume.

L'augurio è che il produttivo connubio tra tecnologia avanzata e cultura diventi una comune attitudine tra le giovani generazioni di futuri studiosi e che l'esperienza maturata in questo settore da parte degli scriventi venga raccolta e implementata, raggiungendo nuovi traguardi e più fruttuosi risultati.

ROMOLO LORETO è archeologo e Professore Associato per l'insegnamento di Archeologia e storia dell'arte del Vicino Oriente antico presso l'Università di Napoli L'Orientale e di Archeologia della Penisola arabica per la Scuola di Specializzazione Interateneo Beni Archeologici "Tra Oriente e Occidente" (Università di Napoli L'Orientale - Università di Salerno). Dal 2002 al 2010 ha collaborato agli scavi della Missione archeologica italiana nello Yemen, a Barāqish e Tamna'. Dal 2011 dirige le Missioni archeologica e di restauro italiane nel regno dell'Arabia Saudita con il patrocinio de "L'Orientale", del Ministero degli Affari Esteri e della Cooperazione Internazionale, del Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca, della "The Barakat Trust" e del Saudi Ministry of Culture. Dal 2013 dirige la Missione archeologica de "L'Orientale" nel Sultanato dell'Oman nella regione della Sharqiya North e dal 2014 co-dirige la Missione subacquea nel Mar Rosso a Ummluj, per conto de "L'Orientale" e del Saudi Ministry of Culture. È autore e co-autore di oltre 100 pubblicazioni scientifiche e cinque monografie sull'archeologia e la storia della Penisola arabica.

BRUNO MARCOLONGO, geologo e Primo Ricercatore presso il Consiglio Nazionale delle Ricerche, è attualmente associato all'Istituto di Scienze del Patrimonio Culturale di Roma e da oltre 45 anni svolge studi in campo geoarcheologico e geoambientale. Partecipa dal 1976, come esperto del Ministero degli Affari Esteri e della Cooperazione Internazionale, all'organizzazione e direzione di numerose missioni di esplorazione e scavo in vari paesi del Vicino e Medio Oriente (Turchia, Iraq, Siria, Yemen, Oman, Arabia Saudita, Egitto, Libia) e del centro Asia (Turkmenistan, Mongolia). È stato esperto a Bruxelles per la Comunità Europea negli anni '80 e '90 dello sviluppo della ricerca in campo ambientale e geoarcheologico con tecnologie avanzate. Ha diretto una missione geoarcheologica del Ministero degli Affari Esteri e della Accademia delle Scienze di Ulaanbaatar in Mongolia (2000-2014). Frequenta inoltre da lungo tempo l'India, legato da collaborazioni con il Deccan College di Pune, l'Archeological Survey of India e l'Ecole Française d'Extrême Orient di Pondicherry. Per molti anni è stato infine docente a contratto presso le Università di Udine e di Padova nel settore del Telerilevamento per l'Ambiente e l'Archeologia. È autore e co-autore di oltre 150 pubblicazioni scientifiche e di due libri di testo universitario su fotogeologia e applicazione del telerilevamento alle scienze della terra.