

**Ricerche topografiche a Shahr-i Sokhta: rapporto preliminare**  
**Giuseppe Ceraudo, Veronica Ferrari, Paola Guacci, Rosanna Montanaro**  
Università del Salento, Laboratorio di Topografia Antica e Fotogrammetria

**مطالعات توپوگرافیک در شهر سوخته: گزارش مقدماتی**

جوزپه چراودو، ورونیکا فراری، پائولا گواچی و روزانا مونتانارو

طی دو سال گذشته فعالیت‌های جدید باستان‌شناسی توسط گروه‌های باستان‌شناسی ایرانی و ایتالیایی در شهر سوخته انجام شده است. در این برنامه‌های پژوهشی تحقیقات جدیدی نیز در زمینه مطالعات جنومورفولوژی دشت هیرمند نیز صورت گرفته است. در این بررسی‌ها نقشه قابل اعتماد جدیدی با هدف بازسازی منظر باستانی شهر سوخته و تمامی دشت سیستان در دست تهیه است. داده‌های بدست آمده با استفاده از روش‌های سنتی همراه استفاده از ابزارهای جدید پژوهشی حاصله از تصاویر ماهواره‌ای و پهبادی منابع مطمئن و قابل اعتماد این تحقیقات توپوگرافیک می‌باشند. با آنکه این مطالعات در مراحل اولیه می‌باشند، در حال حاضر می‌توان نشانه‌های امیدوارکننده‌ای برای دستیابی به اهداف نهایی را مشاهده کرد.

*In the last two years, the site of Shahr-i Sokhta has been the object of new archaeological activities led by a joint Italian and Iranian team. The research programs included also a new topographical and geomorphological research over the plateau and the Hirmand Valley. It is planned to obtain a new trustworthy cartography both of excavated areas and of the entire plateau to reconstruct the ancient landscape of the valley. It will be achieved through both traditional and innovative tools: satellite and UAV images will represent a precious source for this topographical research and, although the research is at an early stage, it is possible to draw a promising guideline for the achievement of the scheduled goals.*

Le attività di ricerca condotte dal Laboratorio di Topografia Antica e Fotogrammetria dell'Università del Salento presso Shahr-i Sokhta sono state avviate nel 2017 con l'obiettivo di ricostruire il paesaggio antico della valle dell'Hirmand e di definire l'organizzazione planimetrica dell'intero pianoro del sito protostorico usufruendo di metodologie di indagine sia tradizionali che innovative. Il ricorso a strumenti e tecnologie non invasive di avanguardia ha lo scopo di arricchire il quadro delle informazioni archeologiche registrabili sul terreno, consentendo di affrontare nel modo più efficace le principali problematiche storico-archeologiche sulla trasformazione del sito e della sua organizzazione interna.

Lo svolgimento delle indagini muove, però, da due limiti principali che caratterizzano la documentazione topografica del sito: la mancanza di una cartografia archeologica finalizzata, adatta a contenere tutte le informazioni archeologiche e geo-ambientali relative al pianoro e la totale assenza di un repertorio aerofotografico.

Le prime attività condotte dal gruppo di ricerca sono state indirizzate principalmente al reperimento della documentazione edita, al fine di poter conoscere le principali caratteristiche del sito, della cartografia finora prodotta (carte topografiche, piante di scavo, carte tematiche), e allo svolgimento di brevi campagne di rilievo strumentale per il posizionamento delle aree di scavo e dei punti vertice della quadrettatura generale del pianoro (Fig. 1).

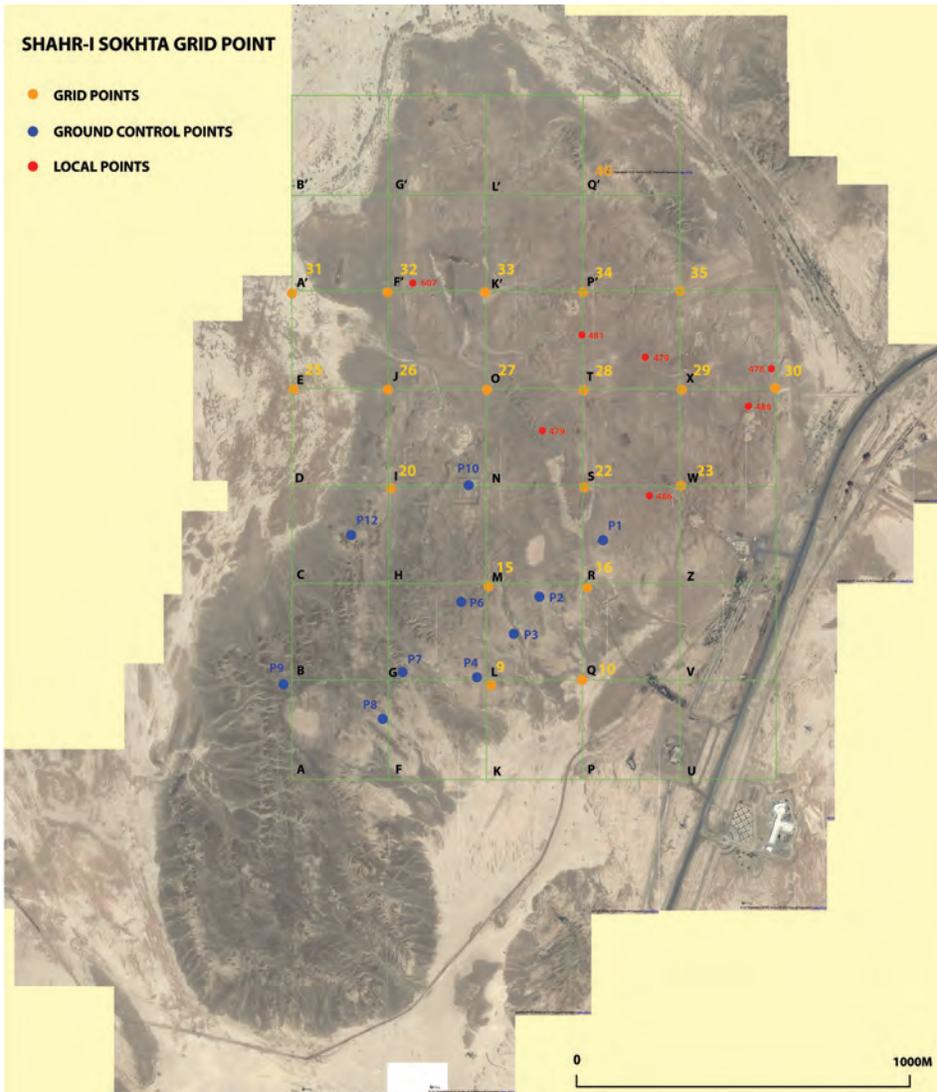


Fig. 1: quadrettatura generale del pianoro di Shahr-i Sokhta, in fase di aggiornamento.

Quanto alla cartografia disponibile per Shahr-i Sokhta, seppur preziosa nel primo tentativo di orientarsi all'interno di un sito non conosciuto, è risultata pressoché deficitaria, ad esempio, del dato archeologico (derivato dal posizionamento corretto delle aree di scavo e delle tracce visibili sul terreno) e di un dettaglio altimetrico ben definito, due elementi questi ultimi che caratterizzano le cartografie archeologiche finalizzate.

L'esigenza di creare una cartografia ad uso archeologico nasce, quindi, dalla necessità di dover sopperire alla mancanza di una vera e propria cartografia di tipo topografico, numerica, gestibile in ambiente GIS e quindi implementabile nel tempo.

Ma la difficoltà a reperire una cartografia di base che potesse rappresentare, come di consuetudine, il punto di partenza nella redazione della documentazione archeologica, rappresenta un ostacolo notevole. Come riscontrato in analoghe situazioni, un modo per ovviare a questa lacuna è l'acquisizione e l'elaborazione di immagini satellitari. L'uso di questo strumento di *remote sensing* è stato largamente usato in aree del Medio Oriente per la creazione di cartografie a grande scala adatte alla esatta localizzazione geografica di siti archeologici e per il posizionamento delle indagini archeologiche lì effettuate (Di Giacomo - Di Taranto - Scardozzi 2011).

L'uso delle immagini satellitari, però, non si limita a fornire solo un supporto cartografico. L'assenza o la difficoltà nel procurarsi immagini aeree di zone appartenenti a nazioni, dove l'accesso a questo tipo di materiale è notevolmente difficoltoso, risulta essere un grave limite per lo studio sistematico del paesaggio e per l'indagine topografica e geo-archeologica. Per questo scopo, a partire dagli anni '80, ma ancora di più dall'inizio del nuovo secolo (Campana 2004), è cresciuto notevolmente l'uso di immagini satellitari per l'osservazione della terra attraverso cui conoscere e indagare siti archeologici, ma anche intere regioni, con il fine di realizzare uno studio sulle dinamiche storiche, insediative ed evolutive del paesaggio in esame.

Per il sito di Shahr-i Sokhta e per il territorio circostante era stato riscontrato questo limite già durante le prime ricerche archeologiche italiane avviate nella regione del Sistan. Per questo, per poter intraprendere uno studio complessivo, anche di carattere morfologico e archeologico della valle dell'Hirmand e in complesso del Sistan meridionale, verso la fine degli anni '90 (Forte - Mozzi - Zocchi 1998) ci si è avvalsi di immagini satellitari ottiche Landsat TM che hanno fornito, nonostante la risoluzione spaziale modesta, una base promettente per una prima ricostruzione geo-archeologica della regione.

Dopo circa 30 anni, però, il livello piuttosto precario della documentazione cartografica e aerofotografica ha indotto ad una nuova acquisizione di immagini satellitari. In fase preliminare si è proceduto con una ricerca e valutazione della documentazione satellitare

disponibile che copre l'area del Sistan ed in particolare la valle dell'Hirmand. Tale vaglio ha preso in considerazione tutte le risorse acquisibili *in primis* in maniera gratuita. Tra queste, si annoverano le immagini Landsat 8, Landsat 7 ETM+, 4-5 TM<sup>1</sup>. Ci si è focalizzati anche nella ricerca di immagini satellitari ottiche Sentinel 2, di cui al momento sono disponibili solo due dataset<sup>2</sup>, e di immagini satellitari radar Sentinel 1. La revisione della documentazione satellitare fruibile ha tenuto conto ovviamente anche delle immagini fornite dai satelliti spia americani delle missioni CORONA, di cui sono disponibili 4 strisciate riferibili alle missioni KH- 4A (di 2,80 m di risoluzione a terra)<sup>3</sup> e KH-4B (di 1,80 m di risoluzione a terra)<sup>4</sup>.

Passando alle immagini satellitari commerciali, invece, si è riscontrata la disponibilità per l'area in oggetto di numerose immagini fornite dai sensori satellitari Quickbird, GeoEye 1, WorldView 1 e WorldView 2 di proprietà della Digital Globe<sup>5</sup>. Infine, la ricerca del catalogo di Airbus France ha mostrato la disponibilità di immagini ad alta risoluzione Pléiades e di una coppia stereoscopica SPOT 6.

Tra questa varietà di materiale si è scelto di acquisire, in questa prima fase, due immagini satellitari ad alta risoluzione Pléiades e la stereocoppia SPOT 6<sup>6</sup>.

Le immagini ad alta risoluzione Pléiades, già impiegate per fini archeologici (Malinverni *et al.* 2017), risultano essere particolarmente efficaci, grazie alla sensibilità del sensore, nel distinguere oggetti in ombra e nell'identificare elementi di colore chiaro in un ambiente particolarmente illuminato<sup>7</sup>. Inoltre, la loro alta risoluzione (di 0,5 m) permette di avere due immagini altamente dettagliate non solo del sito di Shahr-i Sokhta ma anche del territorio circostante, elemento del tutto innovativo in questo contesto geografico e utile per una fotointerpretazione che possa permettere di enucleare le aree di maggior interesse non solo all'interno dell'antica città ma anche nell'area circostante.

---

1. Le immagini sono fornite dal sito earthexplorer dell'USGS.

2. Le immagini Sentinel 2 disponibili hanno come data di acquisizione il 5/10/2018 e l'8/10/2018. Al momento dell'avvio di questo studio non erano state riscontrate scene Sentinel 2 che riprendevano la regione del Sistan meridionale. Per questo motivo, le immagini sono ancora in fase di acquisizione.

3. La data di ripresa è, rispettivamente, il 24/05/1965 e il 03/05/1965

4. La data di ripresa è per entrambe le strisciate il 26/05/1972. Questo materiale satellitare storico è ancora in fase di acquisizione.

5. Questo dataset di immagini è attualmente in corso di analisi per una successiva acquisizione ed elaborazione.

6. Le immagini satellitari Pleiades e le immagini stereo SPOT 6 sono state fornite da ESA (*European Space Agency*), come *Third Party Missions Data*.

7. Tale capacità è data dalla profondità del pixel di 12 bit.

In particolare, sono state acquisite due scene in modalità bundle fornite rispettivamente dal sensore Pléiades 1A, del 16/08/2012 e dal sensore Pléiades 1B del 25/08/2017<sup>8</sup> (Fig. 2). Entrambe sono composte da un'immagine pancromatica di 0,5 m<sup>9</sup> di risoluzione spaziale e di un'immagine multispettrale di 2,0 m<sup>10</sup>. Il lavoro di studio preliminare del materiale satellitare è iniziato con la scena fornita dal satellite Pléiades 1B. Il primo passo è stato quello di creare un'immagine *pan-sharpening* per unire l'informazione spaziale dell'immagine pancromatica con la risoluzione spettrale dell'immagine multispettrale. Tra i vari algoritmi disponibili per la creazione di un'immagine *pan-sharpening*, sono stati utilizzati, al momento, i seguenti metodi: Brovey, Gramschmidt, IHS e Principal Component (Lasaponara - Masini 2012) (Fig. 3). Ognuna di queste elaborazioni fornisce diverse informazioni che di volta in volta possono accentuare la risoluzione sul terreno e l'informazione multispettrale<sup>11</sup>. Come elaborazioni preliminari, si è anche cercato di combinare tra loro le bande (colour composite) per poter così enfatizzare elementi che possono indicare la presenza di evidenze archeologiche (Fig. 4).

Accanto alla preliminare elaborazione delle immagini ad alta risoluzione; si è proceduto con la creazione di un DEM del plateau di Shahr-i Sokhta e dell'area circostante tramite il processamento delle immagini stereo SPOT 6 del 14/02/2016. Tale materiale è in formato bundle e presenta rispettivamente un'immagine pancromatica di 1,5 m<sup>12</sup> di risoluzione spaziale e un'immagine multispettrale di 6 m<sup>13</sup>. Sono state acquisite in modalità stereo e le due immagini (StereoA e StereoB) sono state elaborate usando i programmi ERDAS IMAGE<sup>®</sup> e ERDAS eATE<sup>®</sup>. Per poter ottenere un DEM con una risoluzione spaziale affidabile, è stata utilizzata l'immagine pancromatica. L'autocorrelazione delle immagini

---

8. La costellazione satellitare Pléiades è formata da due satelliti forniti di sensori ad alta risoluzione spaziale, Pléiades 1A, lanciato nel 2011 e Pléiades 1B, lanciato nel 2012. Seguono un'orbita eliosincrona e hanno una risoluzione temporale di 26 giorni.

9. L'immagine pancromatica è provvista di una sola banda in scala di grigio e copre una lunghezza d'onda che varia tra 0,47 e 0,83 mm.

10. L'immagine multispettrale è provvista di quattro bande spettrali che hanno le seguenti lunghezze d'onda: B0 (*blue*): 0,43-0,55 mm; B1 (*green*): 0,50-0,62 mm; B2 (*red*): 0,59-0,71 mm; B3 (*near-infrared*): 0,74-0,94 mm

11. La valutazione della migliore elaborazione è ancora in corso di studio.

12. L'immagine pancromatica prevede una sola banda in scala di grigio capace di coprire una lunghezza d'onda che varia tra 0,450 a 0,740 mm.

13. L'immagine multispettrale acquisisce quattro bande che coprono i seguenti spettri: *Blue* (0,455-0,5225 mm); *Red* (0,530-0,590 mm); *Green* (0,625-0,695 mm); *near-infrared* (0,760-0,890 mm).

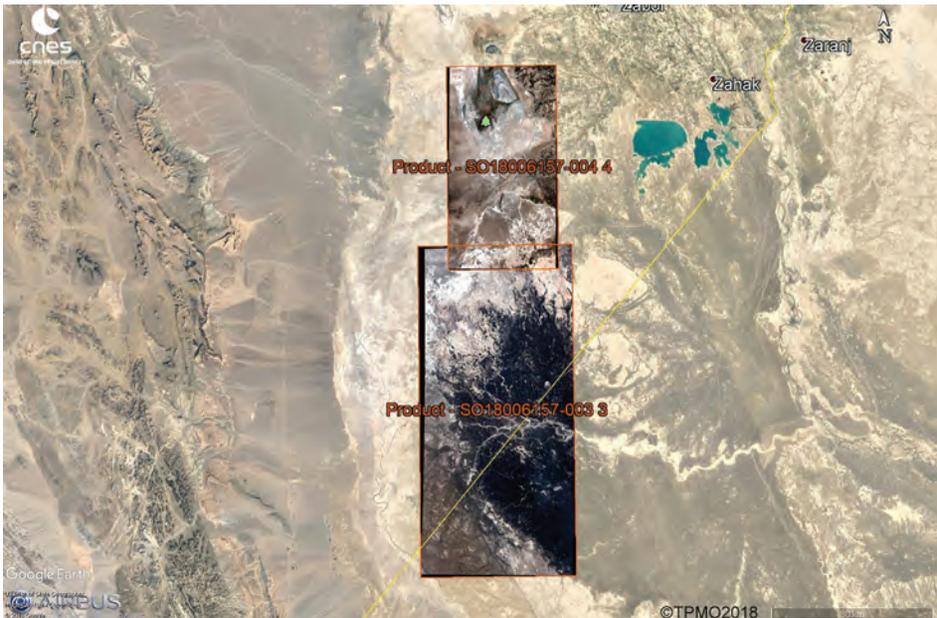


Fig. 2: posizionamento minuscolo delle immagini Pléiades acquisite.

con il terreno è stata eseguita tramite i Coefficienti Razionali Polinomiali (RCP)<sup>14</sup> che sono inclusi come informazione accessoria nel dataset delle immagini. Il software, dopo aver creato i punti in comune (tiepoints) tra le due immagini, produce un primo output (anaglypho) che mostra la sovrapposizione delle immagini stereo con i tiepoints segnalati (Fig. 5). La fase successiva ha previsto la creazione del DEM (Fig. 6), che, con la risoluzione di circa 5 m sul terreno, risulta essere il miglior DEM disponibile, al momento, sia per il sito protostorico che per il territorio circostante e che può certamente aiutare a ricostruire in maniera più accurata la trasformazione paesaggistica che ha interessato la valle dell'Hirmand<sup>15</sup>.

Accanto all'uso di immagini satellitari, parte del lavoro sta riguardando il post-processamento delle immagini aeree da Aeromobile a Pilotaggio Remoto (APR)<sup>16</sup>. Le

14. Gli RPC sono le informazioni circa le modalità di acquisizione delle immagini satellitari. Al momento sono state utilizzati questi dati in quanto non è stato possibile raccogliere tutti i *Ground Control Points* sul terreno utili per questa operazione.

15. Il DEM generato e qui presentato è un primo tentativo atto a fornire un supporto geo morfologico affidabile, che sarà implementato con il proseguimento della ricerca.

16. Si ringrazia in questa sede la dott.ssa Media Rahmani, del gruppo di ricerca iraniano, per la concessione d'uso delle immagini aeree da lei realizzate.

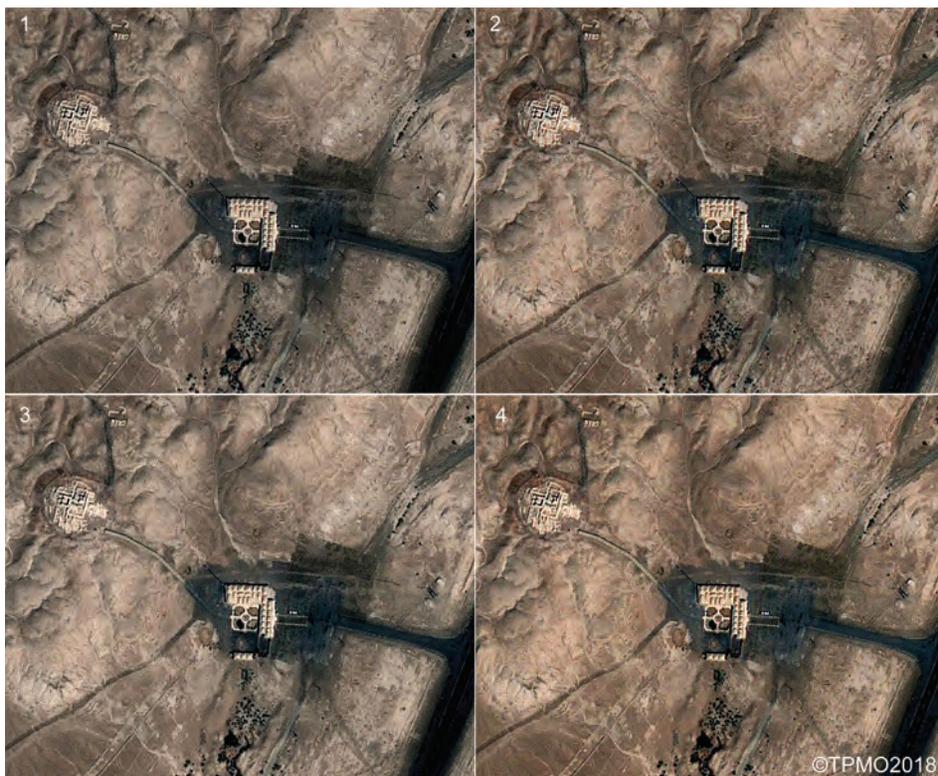


Fig. 3: elaborazione di *pan-sharpening*. (1) Brovey; (2) IHS; (3) Gram Schmidt; (4) *Principal Component*.



Fig. 4: *colour composite*. a sinistra colori naturali (RGB 321); a destra falsi colori (RGB 432)

immagini da APR utilizzate nel presente lavoro sono state recuperate da alcuni video che riprendono il pianoro di Shahr-i Sokhta: accanto alle aree abitative e produttive già scavate sono visibili numerose tracce archeologiche relative alla presenza di strutture

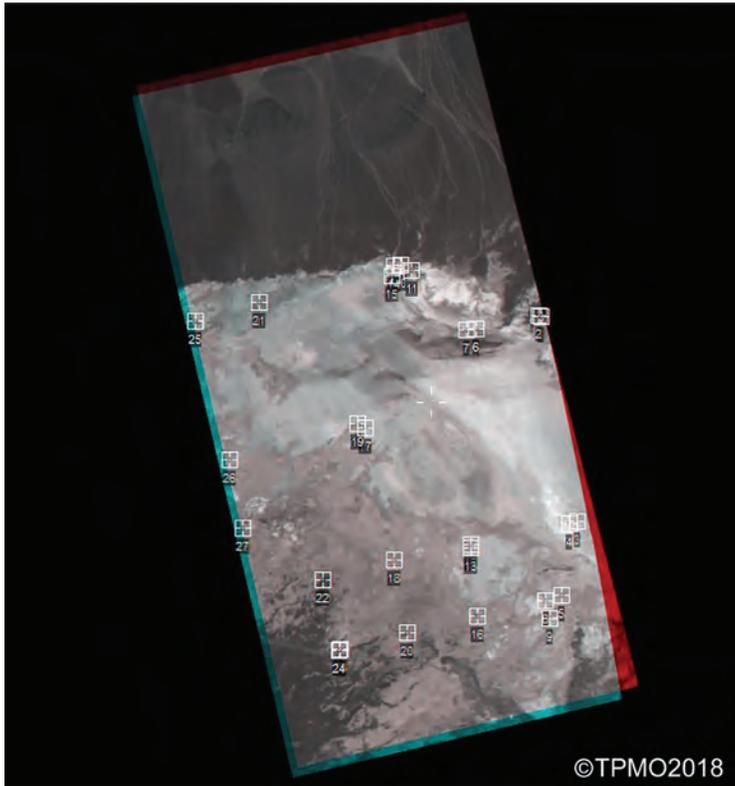


Fig. 5: anaglifo delle immagini stereo SPOT 6 con l'individuazione dei *tiepoints*.

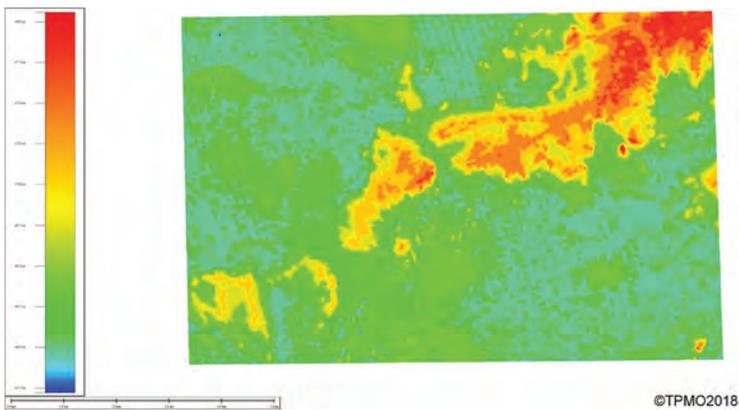


Fig. 6: DEM del pianoro di Shahr-i Sokhta.

sepolte (Fig. 7). In particolare, su alcuni fotogrammi, si rilevano in traccia ampie aeree non indagate della città antica in corrispondenza di settori scavati, quali quelli che si sviluppano intorno al cosiddetto “*Trademarket*” o nei pressi del “*Central Quarter*”. Le tracce sono tutte classificabili come tracce da alterazione nella composizione del terreno, essendo derivate dal disfacimento del mattone crudo e dunque dell’argilla con cui essi sono realizzati (Fig. 8). La restituzione fotogrammetrica di precisione delle numerose tracce archeologiche, individuate su immagini aeree acquisite da drone, sta contribuendo ad aggiornare ed integrare la planimetria generale del sito.

Il post-processamento delle immagini da APR ha previsto innanzitutto l’estrpolazione dai video di singoli fotogrammi, aventi una fascia di sovrapposizione tale da permettere un loro montaggio in sequenza.

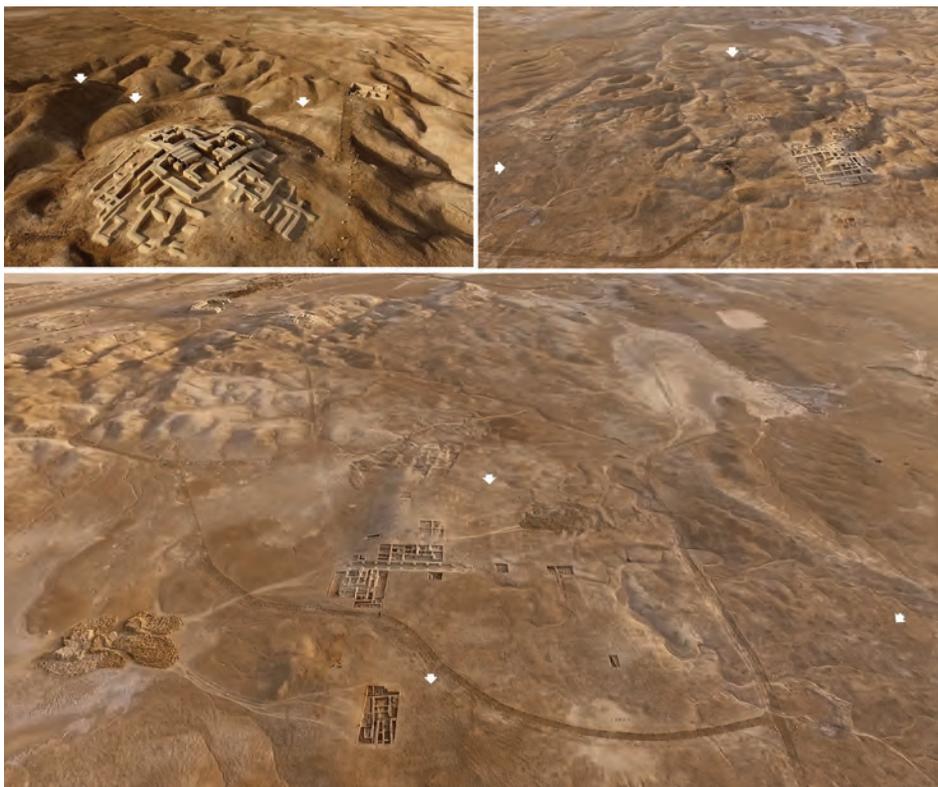


Fig. 7: pianoro di Shahr-i Sokhta. le Freccie indicano tracce di strutture sepolte nelle aree limitrofe ad alcuni settori di scavo.



Fig. 8: esempio di traccia da alterazione nella composizione del terreno.

Ciononostante, è stato possibile effettuare alcune operazioni che rientrano nel campo della modellazione 3D *image based* che realizza, per definizione, misure e modelli 3D da immagini digitali. In primo luogo, i fotogrammi estrapolati dai video sono stati mosaicati attraverso un software di photomerging che consente di sviluppare, a partire dai fotogrammi sovrapposti, un modello tridimensionale dell'area ripresa, in questo caso il settore di scavo denominato "*Monumental Area*".

Il procedimento di realizzazione di un modello 3D consta di tre passaggi fondamentali: nuvola di punti: l'unione dei fotogrammi avviene attraverso l'individuazione di tutti i punti omologhi presenti sui fotogrammi, che il software rileva in maniera automatizzata in corrispondenza dell'area di ricoprimento laterale (*overlap*), stimata solitamente intorno al 60% tra un fotogramma e l'altro (Fig. 9.1). Tale processo crea automaticamente una *sparse pointscLOUD* e, successivamente, una *dense pointscLOUD* sulla quale poter elaborare il modello 3D texturizzato.

mesh: dalla *dense pointscLOUD* si procede con l'unione di vertici, spigoli e facce che definiscono la forma di un oggetto creando una maglia di poligoni che permetterà di meglio definire l'elaborato digitale.

texture: con la fase di texturing, le immagini a colori sono mappate sul modello poligonale creato (mesh), ovvero sulla superficie geometrica 3D (Fig. 9.2).

Il modello realizzato è correttamente riposizionato nello spazio attraverso l'ausilio di *Ground Control Points* (e quindi delle tre coordinate X,Y,Z), battuti sul campo con Stazione Totale. L'utilizzo di GCP consente di poter estrapolare un'ortofoto perfettamente georiferita (Fig. 9.3). La possibilità di avere in maniera così speditiva un'ortofoto georeferenziata, e dunque riversabile e gestibile in ambiente GIS, consente in maniera altrettanto veloce di poter vettorializzare le tracce individuate, o anche la stessa area di scavo se di questa non si disponesse la relativa planimetria, realizzando una caratterizzazione delle strutture altrettanto speditiva.

Dall'ortofoto georiferita, e quindi sfruttando la quota (Z) assegnata ad ogni singolo GCP, è possibile ricavare un DEM con curve di livello, create ad equidistanza gestibile (in questo caso a distanza di m 0.5 tra un'isoipsa e l'altra. Quindi in rosso è l'area più elevata corrispondente alla parte alta del tepe su cui fu costruito l'edificio; in azzurro le aree ad altimetria più bassa. Si constata che le aree in rosso più chiaro (a N del tepe)

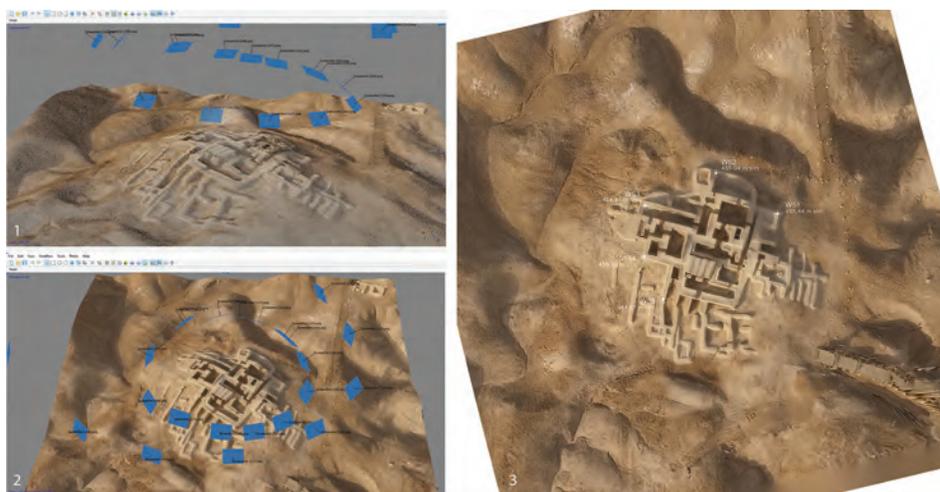


Fig. 9: post-processamento delle immagini da drone: dalla nuvola di punti (1) al modello texturizzato (2) per l'elaborazione di un'ortofoto georiferita (3).

sono caratterizzate da un'altimetria costante, favorevole dunque ad una loro occupazione. Questo dato è maggiormente visibile attraverso la creazione di un *pathprofile*, attraverso cui è possibile visualizzare il profilo altimetrico dell'area. Infatti le foto aree mostrano per questo settore ancora non scavato edifici in traccia (Fig. 10). Emerge che l'area occupata dalla cosiddetta "Monumental Area" era evidentemente più grande, o comunque affiancata da altre strutture che allo stesso modo occupavano le parti più alte del tepe ad altimetria costante.

I fotogrammi che hanno restituito un alto numero di *soil-marks* sono stati variamente trattati con l'apposizione di particolari filtri fotografici, al fine di enfatizzarne le tracce (Fig. 11). Le tracce visibili su fotogrammi verticali sono state vettorializzate in ambiente GIS (Fig. 12); mentre quelle visibili su immagini oblique, non vettorializzabili, sono state utilizzate per documentare semplicemente le aree che maggiormente restituiscono tracce. In questo modo, è possibile mappare le zone più interessanti sulle quali realizzare in futuro programmati voli fotogrammetrici da APR.

Tutte le informazioni acquisite sia da immagini satellitari sia da immagini realizzate da drone, costituiscono la prima base del GIS di Shahr-i Sokhta. Sebbene il lavoro sia ancora

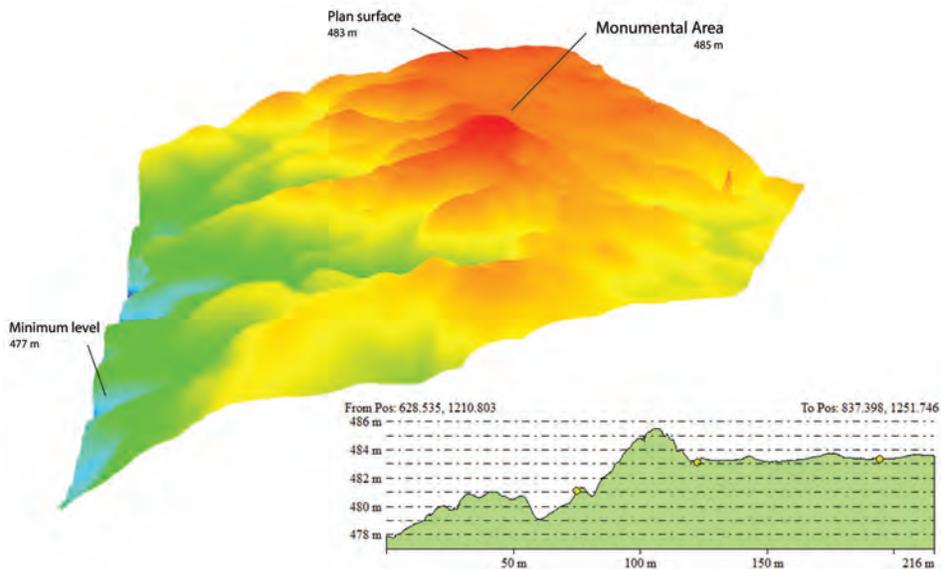


Fig. 10: DEM della cosiddetta *Monumental Area* con *pathprofile* relativo.

agli inizi, è stato possibile al momento mappare non soltanto i settori di scavo ma anche le aree che hanno maggiormente restituito evidenze di strutture sepolte. Tale mappatura, in corso di aggiornamento, rappresenta una base per la pianificazione e l'orientamento delle future attività di ricerca. Queste saranno indirizzate nell'acquisizione di nuove immagini satellitari, in particolare di una stereo coppia satellitare con miglior risoluzione spaziale da cui poter ricavare maggiori informazioni dell'area antropizzata migliorando così il prodotto DEM finale; nella programmazione dei primi voli aerofotogrammetrici a bassa quota, poiché le immagini utilizzate per queste prime elaborazioni non contengono alcun tipo di parametro indispensabile per le operazioni di post-processamento del dato.

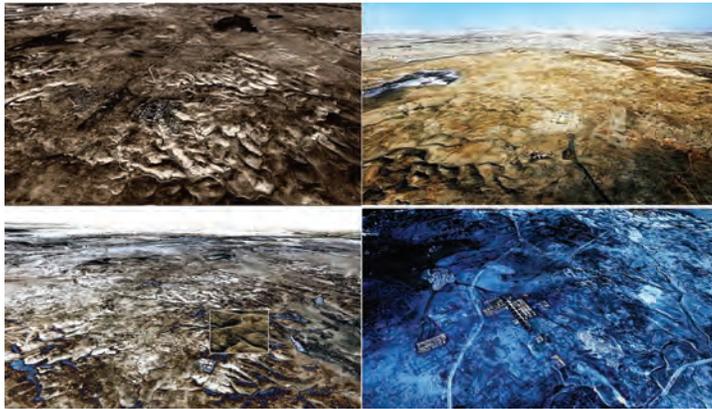


Fig. 11: esempi di applicazione di filtri fotografici (elaborazione G. Murro).



Fig. 12: vettorializzazione delle tracce visibili nei pressi del cosiddetto "Trademark".