

## ANTICA RETE IDROLOGICA DI PETRA. STUDIO E RESTAURO NELL'OTTICA DELLA CONSERVAZIONE DEI BENI ARCHITETTONICI

### 1. INTRODUZIONE

L'area monumentale di Petra è inserita nel margine sinistro della *Rift Valley* nella Giordania centro-meridionale (RAIKES 1985). L'intera valle, di origine tettonica, insiste su formazioni (*Umm Ishri Sandstone*) quarzoarenitiche tardo cambriane di origine continentale. La morfologia dell'area ricalca l'assetto tettonico; in particolare, la depressione che contiene la città di Petra è bordata da alte scarpate su faglie connesse con il sistema attivo del Mar Morto. Le masse arenitiche sono scolpite dal dilavamento e dal *weathering* con forme arrotondate e pinnacoli. Molto più marcato è il modellamento lungo le reti di fratture, estremamente complesse, con la formazione di profondi "wadi". L'erosione eolica è circoscritta a particolari zone e con altezza non superiore al metro.

Sull'intera valle vi è una presenza ininterrotta di tracce antropiche a partire dal X-VIII millennio a.C. (primi insediamenti preistorici), al periodo di insediamento edomita (VIII-VII sec. a.C.), al periodo nabateo relativo alle tombe monumentali (dal VI sec. a.C. al II d.C.), sino al periodo romano (II sec. d.C.: conquista di Petra nel 106 sotto l'imperatore Traiano), bizantino, arabo e medievale. La parte maggiormente conosciuta è rappresentata da una serie di tombe e templi risalenti ad epoca nabatea, le cui strutture architettoniche sono state realizzate scolpendo direttamente le pareti rocciose, costituite da arenarie facilmente modellabili in antico ma soggette ad un continua erosione nel corso dei secoli.

Le rocce, che hanno permesso a Petra di diventare una delle più grandi città carovaniere del vicino oriente antico, rappresentano oggi l'elemento principale del degrado della città stessa. Recenti studi hanno evidenziato le principali cause di degrado dei monumenti che possono essere ricondotte a fenomeni di dilatazione-contrazione causati dalle forti escursioni termiche giornaliere. Le piogge battenti, i temporali e lo scorrimento delle acque lungo le facciate architettoniche contribuiscono in maniera significativa all'asportazione di materiale superficiale (Tav. Xa).

Questo fenomeno fu evitato dai costruttori nabatei attraverso la realizzazione di un'appropriata rete di canali e di vasche di raccolta costruiti nelle zone a monte e a margine delle opere monumentali. Questa complessa opera di ingegneria idraulica aveva il compito di assicurare una riserva di acqua alla città e di evitare il dilavamento dell'acqua lungo le superfici delle

tombe. Attualmente la rete idrologica di drenaggio e di raccolta delle acque piovane non svolge più la sua funzione in quanto interrotta per eventi tellurici, interrimento e crolli.

L'obiettivo generale del lavoro è di censire sul territorio la rete di canalizzazioni presenti nell'area archeologica di Petra e determinare quindi con precisione la funzionalità di ogni singolo elemento. Tale censimento è fondamentale per una corretta progettazione di un possibile intervento conservativo dell'area monumentale che ripristini correttamente il sistema idraulico. Lo studio ha previsto un'analisi geologica e petrografica dell'area di indagine e successivamente è stata avviata la costruzione di un modello tridimensionale, descrittivo della morfologia del territorio per una precisa visualizzazione spaziale della rete di canalizzazioni e per la determinazione dello stato di degrado. Attualmente il lavoro è incentrato sull'indagine specifica dell'area monumentale relativa alla Tomba Palazzo.

## 2. METODI DI INDAGINE E DI ELABORAZIONE

### 2.1 GIS relativo alle strutture idrauliche presenti sull'area di studio

Il censimento spaziale e funzionale della rete di canalizzazione è stato finalizzato all'esatta ricostruzione del sistema di cisterne e canalizzazioni. La possibilità di correlare spazialmente dati di diversa natura ed estensione, fondamentale per un'indagine integrata, è offerta dai Sistemi Geografici Informativi (GIS) (BURROUGH 1986), che consistono in un complesso processo metodologico per l'analisi e la gestione di dati territoriali. Le procedure principali per la realizzazione di un GIS sono l'acquisizione dei dati e la loro georeferenziazione, l'analisi e la gestione degli elementi territoriali, la restituzione dei risultati sotto forma di mappe tematiche. Il GIS, inoltre, offre la possibilità di gestire i dati in formato sia vettoriale che raster: i dati vettoriali vengono utilizzati per descrivere forme geometriche attraverso i loro elementi principali, e cioè i punti, le linee, i poligoni. Il formato raster, invece, è particolarmente indicato per rappresentare, mediante immagini, informazioni areali e cromatiche (foto aeree, immagini satellitari; COLOSI *et al.* 2000a).

Inizialmente il lavoro di ricerca, prima di essere applicato all'area complessa delle tombe reali, è stato sperimentato sul sito di Al-Habis, una collina rocciosa sede di tombe nabatee e di una fortezza crociata sita sempre all'interno della valle di Petra. Questa scelta è stata dettata, oltre che dalle ridotte dimensioni territoriali, anche dalla maggiore accessibilità del sito. Su quest'area si è messa a punto una serie di dispositivi per le riprese fotogrammetriche tridimensionali utilizzata poi sull'area monumentale delle tombe reali.

Il sito, oltre ad essere un ottimo test da un punto di vista scientifico-sperimentale, rappresenta dal punto di vista storico-archeologico un impor-



Fig. 1 – Petra – Al-Habis. Veduta frontale della collina rocciosa che ospitò nel periodo medievale una fortezza crociata. Sulla fronte sono visibili i resti delle tombe nabatee.

tante punto di partenza: i risultati ottenuti hanno permesso una migliore interpretazione e conoscenza delle varie fasi della sua occupazione a partire dal periodo preistorico fino a quello medievale in cui l'intera collina venne trasformata in una fortificazione crociata (Fig. 1) (VANNINI, NUCCIOTTI 2003). La ricognizione archeologica del sito ha permesso di individuare le principali aree funzionali dell'edificio e di stabilire una prima classificazione delle sue componenti topografiche, fornendo elementi per un'interpretazione del sito in più fasi costruttive.

Una fitta rete di canalette di varia profondità e lunghezza si dirama sull'intera estensione del sito. Di particolare interesse è una lunga sequenza di canali scavati nella roccia che corrono lungo il perimetro esterno della parte alta della collina seguendone le pendenze naturali e sfociando in vasche di sedimentazione e in cisterne di varia ampiezza (Fig. 2).

La complessa morfologia, articolata in pianori distribuiti a diverse altezze e delimitati da ripide pareti rocciose, rende le strutture antiche presenti sulla collina fortemente caratterizzate da un complesso adattamento all'andamento morfologico del sito. La stretta relazione tra antropizzazione e geomorfologia ha reso importante la messa a punto di nuove metodologie



Fig. 2 – Esempio di canalizzazione scolpita nella roccia presente sul sito di Al-Habis. Le canalizzazioni terminavano in vasche di sedimentazione o in cisterne.

che hanno permesso una migliore interpretazione dei meccanismi funzionali delle strutture idrauliche.

La ricognizione geologica ed archeologica è stata svolta con il supporto tecnologico di un sistema DGPS per la georeferenziazione, all'interno del quale è stata inserita la cartografia della zona di studio. Il risultato di questa ricognizione è stata l'elaborazione di una prima mappa tematica delle strutture antropiche correttamente classificate, destinate successivamente ad una correlazione spaziale con le conformazioni geologiche dell'area. A questa

parte di lavoro è stata aggiunta una documentazione fotografica dettagliata e georeferenziata per ampliare la scarsa documentazione cartacea esistente.

Per l'implementazione del GIS, il lavoro sul territorio è stato organizzato in ricognizioni archeologiche, ricognizioni e analisi geologiche, rilievi topografici e fotogrammetrici. Successivamente sono state elaborate le mappe per la restituzione topografica, i modelli tridimensionali relativi al terreno ed alle canalizzazioni, l'archivio degli attributi e il database. All'interno del database sono stati inseriti sia i valori descrittivi del grado di efficienza e conservazione, sia i risultati provenienti dalle analisi petrografiche. Inoltre si è provveduto alla classificazione delle strutture idrauliche suddivise per funzione (vasche di sedimentazione, cisterne e canalizzazioni) e per fase storica.

### 2.3 Indagine geologico-petrografica

Le arenarie che caratterizzano la conformazione rocciosa dell'area sono contraddistinte da una composizione mineralogica dove è presente essenzialmente quarzo (Tab. 1) e da cementi di natura caolinitica, ematitica, gohetitica e più raramente calcitica. I cementi sono spesso coesistenti e disposti in plaghe generalmente monomineraliche. Le caratteristiche fisiche sono estremamente variabili in funzione della granulometria delle rocce, del tipo e quantità dei cementi (FRANCHI *et al.* 2004) (Tab. 2 e Figg. 3-4).

All'interno dell'area di indagine sono stati prelevati, in sequenza stratigrafica, 68 campioni che sono stati analizzati in diffrattometria a raggi X (Tab. 1), in microscopia ottica petrografica, in microscopia elettronica a scansione (morfologica e chimica in EDAX). Sono stati determinati i principali parametri fisici: peso di volume reale, peso di volume apparente (con picnometri a mercurio), coefficiente di imbibizione (in peso e volume), indice di saturazione (Tab. 2). Tali parametri sono stati rilevati su frammenti, appartenenti alla stessa zona, superficiali e prelevati ad una profondità attorno ai 20 cm. Inoltre su cinque parallelepipedo di circa 5 cm di spigolo, ricavati da uno stesso blocco di arenaria (un sesto è stato usato come controllo), sono stati sperimentati cinque consolidanti (Tab. 3):

A – estere etilico dell'acido silicico

B – resina acril siliconica in solvente organico

C – cacetato polivinilico

D – esafluoropropene-vinilidene in acetone

E – silicato di etile metil fenil polisilossano in *white spirit*

Su questi campioni sono stati determinati i parametri fisici prima e dopo i trattamenti; inoltre tramite SEM, su sezioni dei parallelepipedo, è stata misurata la profondità raggiunta dai consolidanti e la loro interazione con l'arenaria (Tab. 3). I dati analitici hanno permesso di identificare i principali processi di degrado delle arenarie, che, in estrema sintesi, possono essere così

Sample	Q	He	Gh	Ca	K
22	83	7	tr	tr	10
23	90	-	-		10
24	85	-	-	8	7
25	92	-	-	-	8
26	81	7	4	-	8
27	91	-	-	.	9
28	88	-	tr	.	12
29	85	12	-	-	3
30	82	10	3	-	5
31	87	-	-	5	8
32	83	-	-	13	4
33	92	-	.	-	8
34	90	tr	tr	-	10
35	80	tr	tr	15	5
36	83	8	2	-	7
37	82	-	-	14	4
38	87	5	tr	-	8
39	75	25	-	-	-
40	80	7	tr	10	3
41	92	-	-	-	8
42	90	-	-	-	10
43	85	-	-	-	15
44	92	tr	tr	-	8
45	88	-	-	5	7
46	80	17	3	-	-
47	88	9	3	-	tr
48	87	-	-	tr	13
49	95	-	.	.	5
50	92	tr	-	-	8
51	89	-	tr	-	1 [
52	70	26	4	-	tr
53	83	.	-		7

Tab. 1 – Q = Quartz; HE = Hematite; GH = Goethite; Ca = Calcite; K = Kaolinite.

riassunti: fenomeni di dilatazione-contrazione causati dalle forti escursioni termiche giornaliere che disarticolano i granuli di quarzo. Tali fenomeni sono risultati “attivi” per lo meno fino alla profondità di circa 10 cm. I parametri fisici (essenzialmente granulometria e porosità) ed i vari tipi di cementi influenzano ovviamente i fenomeni sopra citati. Per il solo effetto della gravità i singoli granuli di quarzo o aggregati più o meno consistenti vengono allontanati dalle superfici. Le piogge battenti e le acque ruscellanti contribuiscono in maniera significativa all’asportazione di materiale superficiale.

Altre forme di degrado, localmente anche molto intense, sono imputabili alla presenza di sali (halite, silvie, polihalite) in corrispondenza di fratture e diaclasi. Per quanto concerne l’origine di tali sali (il più abbondante e ubiqui-

Sample	Y	YS	P%	C.I.p%	C.I.v%	I.S.%
23 E	2,70	2,43	15,17	4,45	10,81	71,25
23 I	2,74	2,46	10,18	2,26	5,56	54,61
24 E	2,66	2,10	22,12	7,60	15,96	76,25
24 I	2,66	2,11	20,93	6,54	13,79	65,93
26 E	2,79	2,49	11,00	4,10	10,21	92,80
26 I	2,78	2,48	10,69	3,92	9,72	90,92
27 E	2,69	1,86	30,86	8,69	16,16	52,38
27 I	2,65	1,87	29,35	5,63	10,52	35,87
30 E	2,93	2,62	20,59	4,78	12,52	60,82
30 I	2,89	2,51	20,18	5,89	14,78	73,26
32 E	2,66	2,00	24,69	10,39	20,78	84,16
32 I	2,68	2,06	23,14	8,96	18,45	79,76
33 E	2,65	2,30	13,18	2,37	5,45	41,35
33 I	2,65	2,32	12,31	2,60	6,03	49,00
34 E	2,64	1,98	24,91	9,17	18,15	72,89
34 I	2,65	2,01	24,19	8,40	16,88	69,79
35 E	2,70	2,44	16,99	5,19	12,66	74,53
35 I	2,69	2,28	15,20	4,08	9,30	61,20
36 E	2,84	2,03	28,45	6,99	14,18	49,87
36 I	2,84	2,11	27,48	5,46	11,52	41,92
38 E	2,70	2,22	17,84	5,86	13,01	72,92
38 I	2,70	2,18	18,92	5,81	12,66	66,94
40 E	2,88	2,66	7,46	2,37	6,30	84,50
40 I	2,89	2,74	7,22	2,10	5,75	79,69
41 E	2,65	2,08	21,49	7,58	15,76	73,36
41 I	2,65	2,10	20,90	6,44	13,52	64,70
45 E	2,66	2,10	21,07	7,39	15,52	73,65
45 I	2,67	2,12	20,65	7,37	15,62	75,66
52 E	3,25	2,32	28,55	5,78	13,41	46,97
53 I	2,66	2,09	32,75	10,68	23,34	68,21

Tab. 2 – E = Outside Sample; I = Interior Sample; Y = density; Ys = bulk density; P% = porosity; C.I.p% = weight imbibition coefficient; C.I.v% = volume imbibition coefficient; I.S. = index of saturation.

	C.I. p%	C.I. v%	I.S. %	D. mm
W	10,68	23,33	68,21	
A	2,39	4,99	15,25	2,00
B	6,26	13,08	39,93	1,00
C	4,97	10,38	31,71	0,50
D	6,90	14,42	44,03	3,00
E	5,68	11,87	36,24	4,00

Tab. 3 – D = Depth of penetration found by sem; W = Control sample; per gli altri simboli cfr. Tab. 2.

tario è l'halite) esistono attualmente solo ipotesi: la più accreditata è quella dei sali "ciclici" depositati da aerosol provenienti dal Mar Morto, anche se recenti studi sul chimismo delle piogge (AL-KHASHMAN 2005) non hanno evidenziato un particolare arricchimento in ioni Na e Cl.

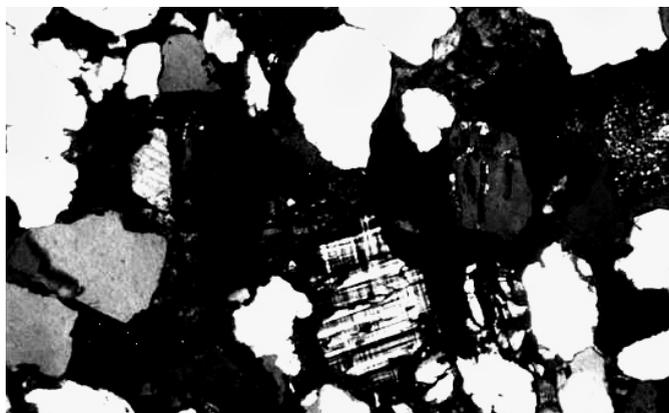


Fig. 3 – Microfotografia di sezione sottile caratteristica delle formazioni rocciose nelle quali sono state realizzate le strutture architettoniche di Petra (all'origine 5x).

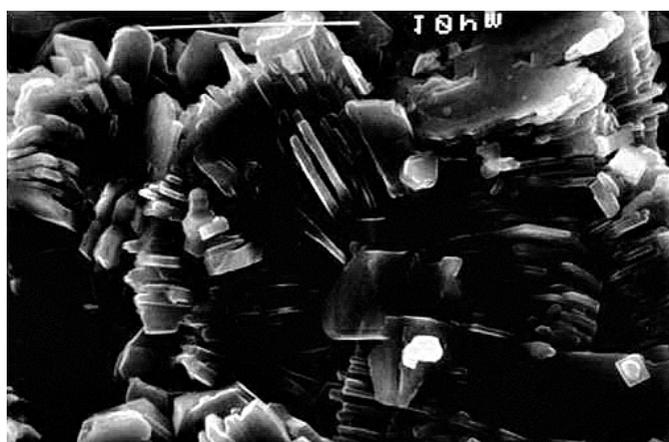


Fig. 4 – Aggregato costituito da cristalli di caolinite che costituiscono il "cemento" più usuale delle arenarie affioranti nell'area di Petra (SEM 4000x).

I consolidanti utilizzati nella sperimentazione di laboratorio hanno mostrato un buon comportamento per quanto riguarda la riduzione dei valori di quei parametri legati all'assorbimento di acqua. Non altrettanto efficace è invece apparsa la profondità di penetrazione. I controlli, condotti dopo un solo anno, sul trattamento di limitate porzioni di roccia (trattamento condotto con le identiche sostanze utilizzate in laboratorio) nella valle di Petra hanno evidenziato la loro totale inefficacia.

### 3. TOPOGRAFIA E DEM

Sull'area indagata è stata costruita una rete topografica di riferimento mediante l'impiego integrato di una stazione totale elettronica e di un GPS Differenziale (COLOSI *et al.* 2000b). Tale rete topografica è stata impiegata per la corretta georeferenziazione di tutti i rilievi eseguiti sul sito. Per quanto riguarda la collina di Al-Habis è stato realizzato un modello digitale del terreno (DTM) impiegando in acquisizione automatica una stazione computerizzata Trimble 5600 con un passo di campionamento di 1 punto ogni 10 m sull'asse orizzontale e di ca. 3 m sull'asse verticale. Le riprese di ogni singola stazione sono state georeferenziate mediante la rete topografica sopra descritta. Per la corretta definizione e descrizione di tutti i pianori presenti sull'area, che risultavano nascosti rispetto al punto di ripresa della stazione alla base della collina, i dati sono stati integrati con quelli provenienti da campagne di ripresa effettuate con GPS Differenziale utilizzato in modalità cinematica, con un passo di campionamento di ca. 1 punto ogni metro sul piano orizzontale. Per rendere i due set di dati omogenei nello stesso sistema di riferimento si è provveduto alla definizione di punti fiduciali sul terreno per eseguire corrette operazioni di georeferenziazione (Fig. 5).

Altro parametro molto importante nella raccolta dei dati cinematici è stato quello di tarare l'altezza dell'antenna sia all'inizio di ogni sessione lavorativa che alla fine per individuare il range di oscillazione dell'antenna entro cui tenere il dato (GABRIELLI 2001). Tale parametro ha permesso di calcolare le diverse posizioni che assumeva l'antenna in funzione dei diversi operatori che eseguivano il rilievo. Per fare la taratura si è proceduto nel seguente modo: all'inizio della sessione di misura è stato scelto un punto noto sul quale l'operatore doveva fare un'acquisizione test; successivamente la stessa misura veniva presa alla fine della sessione. Tale punto veniva utilizzato anche ad ogni cambio di operatore per ogni nuova sessione di lavoro. Questo sistema ha permesso di individuare quale fosse la precisione del GPS durante il periodo di raccolta dati e come questa, oltre che dalle oscillazioni dovute al rilievo, dipendesse anche dal numero e dalla posizione dei satelliti.

Dopo aver generato il DEM (*Digital Elevation Model*), si è rilevata la rete di canalizzazioni presenti sull'area; per alcuni tratti di canalizzazione è stato più agevole fare un rilievo con il GPS a causa delle condizioni geomorfologiche e di visibilità satellitare. In altre condizioni dove la morfologia del terreno impediva una corretta visibilità dei satelliti, si è deciso di fare il rilievo con la stazione totale (COLOSI *et al.* 2002; ANGELINI *et al.* 2007). Questa prima parte di lavoro si è resa necessaria per il posizionamento spaziale delle strutture idrauliche presenti e del loro censimento, ma anche per determinare il grado di efficienza idraulica rispetto alla conformazione del territorio sul quale insistono.

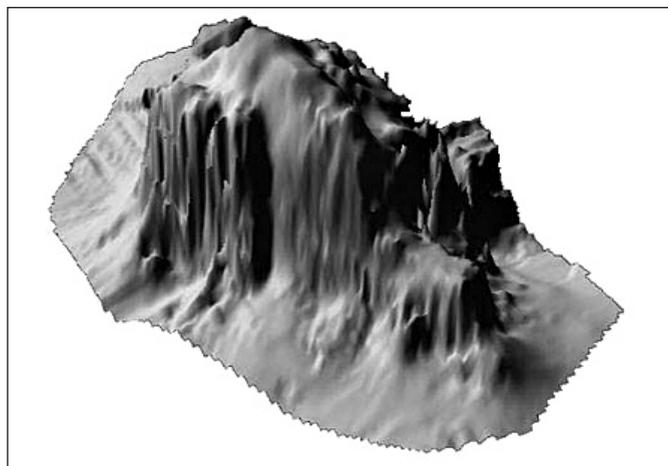


Fig. 5 – DTM della collina di Al-Habis ottenuto attraverso l'uso integrato di stazione totale e DGPS.

#### 4. FOTOGRAMMETRIA

##### 4.1 *Fotogrammetria terrestre*

La restituzione tridimensionale della forma geometrica di ogni singolo tratto di canaletta è stata invece ottenuta tramite una tecnica fotogrammetrica (CECCARONI, MENCI 2002). Sono state realizzate, a questo scopo, numerose riprese fotografiche dei soggetti con una strumentazione fotografica altamente professionale e calibrata; a scopo di sperimentazione i fotogrammi sono stati scattati mediante un sistema di rilevamento fotografico flessibile, facilmente trasportabile ed un protocollo di ripresa (Fig. 6).

I singoli fotogrammi sono stati, quindi, sottoposti ad un processo di georeferenziazione ed orientamento. Il procedimento consiste nel riconoscere ed associare i medesimi punti appartenenti ai singoli fotogrammi, con l'obiettivo di creare un modello geometrico semplificato, cioè una maglia di superficie, e una serie di fotografie orientate per determinare i punti 3D visibili su ogni singolo fotogramma ed inclusi nella maglia.

La finalità è di generare, a partire da un insieme irregolare di punti misurati manualmente da un operatore, dei nuovi punti attraverso un processo di misurazione automatica. Il sistema genera automaticamente una triangolazione su alcuni punti 3D da cui si possono interpolare punti che si proiettano in seguito su un'immagine di riferimento. Un metodo di autocorrelazione permette, successivamente, di ottenere "veri" punti tridimensionali per una correlazione automatica con le altre immagini sulle quali il medesimo punto

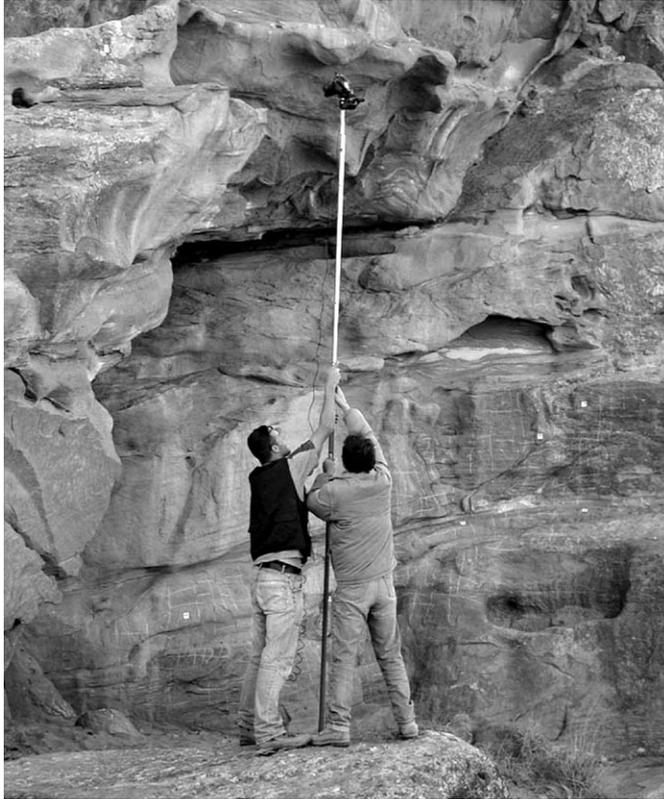


Fig. 6 – Le canalette difficili da raggiungere sono state fotografate con un sistema che abbina un’asta telescopica ad una camera digitale professionale. L’altezza massima che si può raggiungere è di 5 m.

è visibile. Attraverso tali modellazioni sarà possibile ricostruire virtualmente il sistema di canalizzazioni ed ipotizzare il percorso originario di deflusso delle acque per la valutazione dello stato di degrado, per la quantificazione e localizzazione delle parti mancanti della rete idrica (Figg. 7-8).

Per la generazione di questi modelli tridimensionali automatici e semiautomatici sono stati utilizzati due diversi software sviluppati dal laboratorio di ricerca MAP del CNRS<sup>1</sup>: il primo, ARPENTEUR (*Architectural Photogrammetry Network Tool for Education and Research*), sviluppato in Java e

<sup>1</sup> Nell’ambito del progetto “Antica rete idrologica di Petra. Studio e restauro nell’ottica della conservazione dei beni architettonici” è nata una collaborazione tra il CNR di Roma ed il CNRS francese per la restituzione tridimensionale delle canalizzazioni indagate.

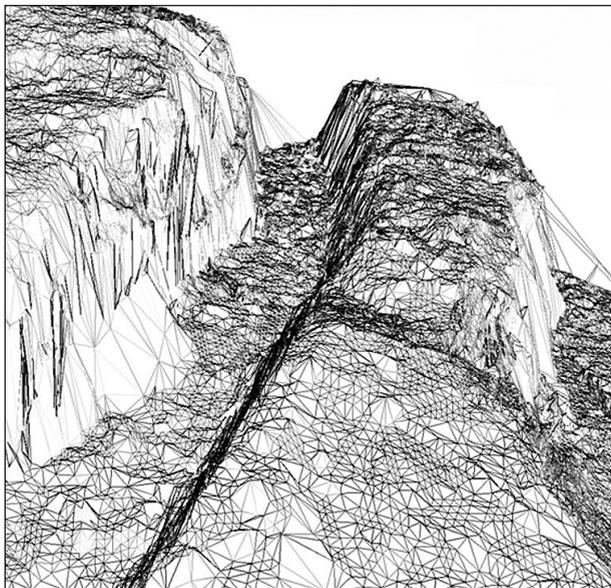


Fig. 7 – Modello triangolato di una canaletta del sito di Al-Habis attraverso l'autocorrelazione dei punti.

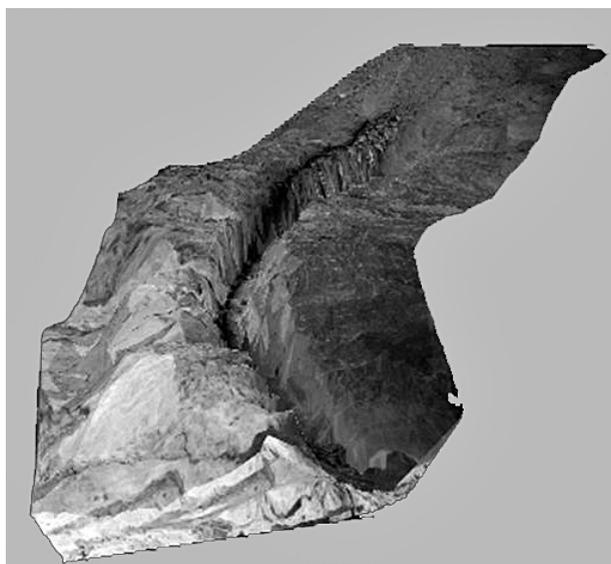


Fig. 8 – Modello tridimensionale completo di *texture* della medesima canaletta. Il modello è misurabile permettendo di calcolare la portata d'acqua attuale e in antico.

che utilizza la libreria JAI (*Java Advanced Imaging*), permette, attraverso una serie di semplici opzioni presenti nel programma, di ottenere numerose maglie di superficie in maniera semiautomatica relative all'oggetto fotografato; il secondo, ROMA (*Representation of Oriented Model for Arpenteur*), basato sul metodo I-MAGE (*Image processing and Measure Assisted by GEometrical primitive*), permette in maniera automatica di ottenere un modello triangolato completo di mesh sul quale è possibile effettuare delle misurazioni partendo da foto precedentemente orientate (DRAP *et al.* 2001, 2003).

Per ottenere il modello 3D delle canalette si è proceduto nel seguente modo: le canalette, dove possibile, sono state pulite per rendere la superficie d'indagine il più possibile nitida all'obiettivo della camera digitale. Sulla superficie ad una distanza nota è stata posizionata una serie di mire lungo tutta l'estensione della canaletta. Successivamente le mire sono state rilevate con la stazione totale e georeferenziate. In alcune parti della superficie sono stati fatti dei segni con del gesso per creare dei punti di riferimento per la prima correlazione manuale dei pixel sul fotogramma. Alla fine della preparazione sono state scattate le foto necessarie alla corretta determinazione del modello numerico descrittivo della singola canalizzazione. Tale modello è stato poi utilizzato per la determinazione della portata idrica dei tratti in cui l'efficienza volumetrica della struttura idraulica risultava compromessa dai crolli o degli interventi antropici avvenuti nel corso del tempo.

Alla conclusione del lavoro di riprese fotogrammetriche relativo ai pianori e alle canalette che occupano le zone sommatali della collina, è stata rilevata dal punto di vista sia topografico che fotogrammetrico l'insieme della rete idrica nabatea e quella riutilizzata in periodo crociato (Al-Habis). Sono state inoltre rilevate le cisterne ed un apparato di controllo dei flussi di scorrimento delle acque venuto alla luce durante i lavori di rilievo.

#### 4.2 Fotogrammetria aerea

La complessità della morfologia del territorio in tutta la valle di Petra, e in particolare le dimensioni delle tombe monumentali, hanno imposto di mettere a punto un sistema di ripresa fotogrammetrico agile ed economico che permettesse di integrare tutti gli elementi cartografici non disponibili in maniera dettagliata (i pianori dove erano presenti resti murari non documentati), di determinare gli andamenti morfologici del terreno in zone non raggiungibili con il GPS o con la stazione totale e di documentare lo stato di degrado delle parti architettoniche delle tombe reali.

Lo strumento è composto da un dispositivo meccanico controllato elettronicamente per l'alloggiamento di una camera digitale. Tale dispositivo permette l'orientamento della camera di ripresa di un angolo di 180° sulla verticale e di 360° sul piano orizzontale. Il tutto è collegato ad un pallone aerostatico frenato in grado di arrivare ad un'altezza di 200 m. Lo scatto e

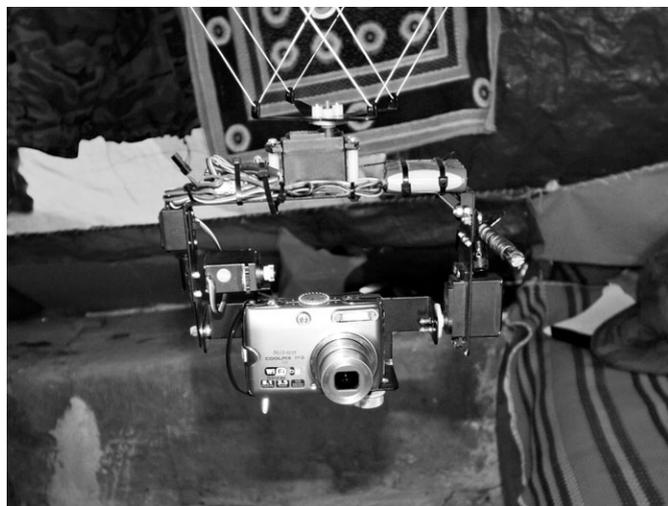


Fig. 9 – Veduta specifica del dispositivo radiocomandato Picavet.

l'orientamento della camera digitale sono controllati da un sistema remoto telecomandato da terra (ANGELINI *et al.* 2007) (Fig. 9). Tale sistema è stato applicato in due modalità di cui la prima è relativa allo scatto di ortofoto per una descrizione qualitativa dell'area archeologica mentre la seconda riguarda la determinazione volumetrica del degrado presente sulle strutture architettoniche. Per la produzione delle ortofoto il lavoro è stato organizzato disponendo una serie di mire a terra per una prima georeferenziazione delle riprese aeree. Successivamente da ogni singolo fotogramma rettificato, è stata riconosciuta un'altra serie di punti fiduciali su strutture ben visibili sul territorio acquisendone le loro coordinate spaziali. Tali coordinate sono intervenute nel calcolo di ortorettifica dei fotogrammi elaborati. Per una corretta definizione del mosaico e per evitare che le sovrapposizioni presentassero delle discontinuità tra i fotogrammi, sono stati calcolati e utilizzati i parametri per la resa metrica della fotocamera impiegata.

Per l'analisi del degrado abbiamo sperimentato l'uso di riprese di coppie fotogrammetriche lungo tutta la superficie della facciata architettonica della Tomba Palazzo (Fig. 10; Tav. Xb). Considerata come la tomba monumentale tra le più importanti da un punto di vista storico e delle dimensioni di tutta la valle di Petra (larga 45 m e alta più di 50 m), rappresenta un *unicum* architettonico nella sua complessità costruttiva. L'edificio, mutilo nella parte alta, per i due piani visibili è scolpito nella roccia mentre al terzo piano è completamente edificato, in una zona alle spalle della quale la conformazione rocciosa presenta una rientranza, utilizzata per la realizzazione di una vasca



Fig. 10 – Foto aerea da pallone aerostatico frenato di tutta la fronte attualmente visibile della Tomba Palazzo; si noti la differenza costruttiva tra la parte alta e bassa dell'edificio e del processo di degrado scatenato dal dilavamento delle acque sulla superficie architettonica.

per la captazione delle acque piovane. Con il passare dei secoli tale struttura ha subito un fenomeno di interramento e quindi le acque piovane non più drenate hanno spinto i sedimenti contro la parete architettonica facendola parzialmente crollare. In tempi passati un limitato intervento di restauro dell'antica canalizzazione ha diminuito l'impatto delle acque vadose ma non lo ha annullato. Interventi efficaci dovranno prendere in considerazione l'intero bacino imbrifero a monte della tomba per evitare ulteriori danni. Oltre alle riprese effettuate, sono stati acquisiti dati con la stazione totale per una corretta georeferenziazione delle riprese fotogrammetriche e per evitare errori di orientamento e traslazione sul modello numerico complessivo.

Per la generazione del modello numerico si è utilizzato un software dedicato (*Photomodeler 6.0*) che permette di visualizzare le nuvole di punti sulle quali applicare la texture di riferimento. L'interfaccia del programma permette di caricare i dati relativi ai GCP (*Ground Control Point*) ossia i punti presi sulla facciata architettonica per orientare correttamente il set di



Fig. 11 – Modello tridimensionale relativo alla parte sommitale destra della Tomba Palazzo. Da tale modello sarà possibile censire lo stato di degrado della tomba al fine di un possibile intervento di restauro.

fotogrammi ed evitare che si creino errori di scala e di misura. Successivamente i fotogrammi vengono caricati a coppie, sulle quali avviene la correlazione manuale dei punti. Maggiore è il numero dei punti che vengono generati e migliore sarà la resa finale del modello. Il vantaggio di tale sistema consiste nel triangolare manualmente i punti correlati permettendo di selezionarli in maniera razionale ed evitare che programmi di sintesi del modello possano rovinare le superfici create (Fig. 11). Successivamente il modello generato viene elaborato da software dedicati (ARPENTEUR e ROMA) per ottenere nuvole di punti più fitte e modelli triangolati più reali che permettano di effettuare degli studi più precisi relativi alle superfici (Tav. Xc). Tali nuvole di punti hanno reso possibile una mappatura quantitativa dello stato di conservazione attuale e la creazione di sezioni longitudinali e trasversali dell'edificio finalizzati a progetti di restauro e recupero.

## 5. CONSIDERAZIONI FINALI

Tutto il lavoro relativo al progetto si propone, attraverso il GIS, di contribuire ad una migliore contestualizzazione delle tombe monumentali, ad una migliore conoscenza storica e ad un'interpretazione del monumento stesso.

Lo strumento del GIS, così strutturato, sarà anche utile sia per l'elaborazione di progetti di recupero finalizzati al restauro delle superfici architettoniche relative nel caso specifico alla Tomba Palazzo, sia, più in generale, come studio campione per futuri progetti di restauro della rete idraulica presente, al fine di evitare che il dilavamento dell'acqua possa continuare a degradare le tombe costruite nella roccia.

Inoltre, lo studio ed il censimento di tale importante opera di ingegneria idraulica consentiranno di comprendere meglio come si siano sviluppati i processi insediativi del territorio. Dunque l'eventuale ripristino di tutto il sistema idrico, considerando l'acqua come elemento sociale, permetterebbe di comprendere meglio lo sviluppo e l'insediamento moderno in funzione di quello antico.

Nelle ambizioni del progetto di studio, oltre al restauro ed alla conoscenza, è presente quella di produrre un modello esplorabile nell'ottica della fruizione. Il set di dati opportunamente organizzato potrà essere utilizzato per scopi di turismo virtuale attraverso la costruzione di modelli numerici tridimensionali in grado di riprodurre fedelmente gli edifici relativi alla valle di Petra, permettendo una navigazione virtuale all'esterno ed all'interno delle strutture architettoniche.

Riteniamo opportuno comunque soffermarci su alcuni aspetti metodologici incontrati durante lo svolgimento di questo lavoro di ricerca. Si è dovuto anzitutto sperimentare e sviluppare diverse tecniche di rilievo di dati geometrici di natura geologica e di natura antropica in situazioni particolarmente complesse sia dal punto di vista climatico che da quello ambientale. La complessità della morfologia (profondi wadi, strettissimi sentieri, pareti rocciose molto ripide) e la difficile situazione climatica (elevate temperature, forti raffiche di vento, notevole presenza di sabbia e polvere) ci hanno impedito di utilizzare approcci standard (laser scanner terrestri o i più tradizionali rilievi topografici). Inoltre i chiari motivi economici, che oggi gravano sulla quasi totalità dei lavori nel campo della ricerca, hanno indirizzato il nostro impegno a mettere a punto una serie di strumentazioni idonee ad essere trasportate sui luoghi di studio evitando le spese di spedizione e trasporto.

Il secondo punto che ha richiesto molto impegno è stato quello di rendere omogenei e quindi confrontabili ed integrabili, laddove possibile, i dati di diversa natura provenienti dai vari metodi utilizzati. A questo scopo è stato molto utile eseguire la sperimentazione sul sito archeologico di Al-Habis. Questo lavoro preliminare ci ha permesso di effettuare una continua operazione di verifica della bontà del modello sviluppato, sia per quanto riguarda la restituzione morfologica sia per la quantizzazione delle portate.

Per quanto riguarda invece la Tomba Palazzo, il nostro approccio al modello reale è risultato non ottimale perché la difficoltà orografica della parte monumentale in rapporto con il territorio circostante risultava essere

molto più complessa. Dal punto di vista morfologico ed idrico, il sito di Al-Habis risulta essere un sistema isolato e la collina è completamente scollegata da tutte le altre alture presenti sul territorio. Questa è stata infatti una delle cause che l'hanno trasformata in una fortezza per il controllo del territorio. Nel caso della Tomba Palazzo il monumento risulta un tutt'uno con la catena montuosa che ha alle sue spalle (la formazione calcarea Naur).

Per tale motivo si rende quindi necessario uno studio più approfondito sulla conformazione morfologica dell'area su scala quasi regionale, procedendo alla definizione di tutti i possibili bacini imbriferi presenti sul territorio a monte della tomba monumentale e tutti i possibili percorsi dell'acqua verso valle. Per avviare questo studio è nostra intenzione procedere ad un'attenta analisi dell'area indagata mediante l'impiego di immagini satellitari SAR per ottenere un DEM complessivo dell'area. Solo a quel punto il nostro sistema integrato a diverse scale di rilievo potrà dare delle risposte esaustive alle problematiche proposte.

ROBERTO GABRIELLI, ANDREA ANGELINI  
Istituto per le Tecnologie Applicate ai Beni Culturali  
CNR – Roma

ROBERTO FRANCHI  
Istituto di Geodinamica e Sedimentologia  
Centro Studi Archeologici "CESAR"  
Università di Urbino

PIERRE DRAP  
CNRS – MAP UMR 694  
School of Architecture, Marseilles

## BIBLIOGRAFIA

- AL-KHASHMAN O.A. 2005, *Ionic composition of water precipitation in the Petra region, Jordan*, «Atmospheric Research», 78, 1-12.
- ANGELINI A., COLOSI F., GABRIELLI R., FENTRESS E., FILIPPONE C. 2007, *Tecniche speditive per la ricostruzione tridimensionale dell'area archeologica di Villamagna*, «Archeologia e Calcolatori», 18, 141-158.
- BURROUGH P.A. 1986, *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment*, Oxford, Clarendon Press.
- CECCARONI F., MENCINI L. 2002, *Fotogrammetria digitale*, in C. BIAGINI (ed.), *Information Technology ed automazione del progetto*, Firenze, Firenze University Press, 115-138.
- COLOSI F., COSTANTINI A., GABRIELLI R., PIRO S., SANTORO P. 2000a, *Lo studio del territorio impiegando diverse metodologie d'indagine: il caso della valle del Tevere*, «Archeologia e Calcolatori», 11, 171-188.
- COLOSI F., GABRIELLI R., MASCELLANI M., ROSE D. 2000b, *Applicazione integrata di stazione totale e DGPS per il micro rilievo di dettaglio di un sito di interesse archeologico – Colle Breccioso (Borghose, RI)*, in Z. STANČIĆ, T. VELJANOVSKI (eds.), *Computing Archaeology for Understanding the Past. CAA 2000. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology. Proceedings of the 28<sup>th</sup> Conference (Ljubljana 2000)*, BAR International Series 931, Oxford, Archaeopress, 9-12.

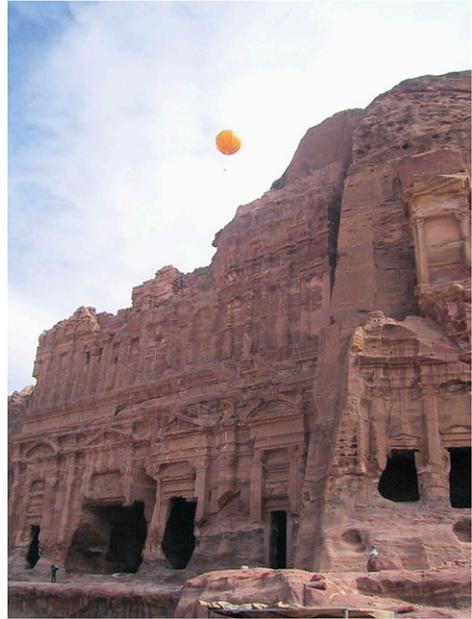
- COLOSI F., GABRIELLI R., PELOSO D., ROSE D. 2002, *Impiego del Differential Global Positioning System (DGPS) per lo studio del paesaggio antico: alcuni esempi rappresentativi*, «Archeologia e Calcolatori», 14, 177-197.
- DRAP P., GRUSSENMEYER P., GAILLARD G. 2001, *Simple photogrammetric methods with Arpenteur. 3-d plotting and orthoimage generation: the I-MAGE process*, in CIPA 2001 International Symposium (Potsdam University 2001), ISPRS International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XXXIV – 5/C7, ISSN 1682-1750, 47, 54.
- DRAP P., SGRENZAROLI M., CANCIANI M., CANNATA G., SEINTURIER J. 2003, *Laser scanning and close range photogrammetry: Towards a single measuring tool dedicated to architecture and archaeology*, in CIPA XIX International Symposium (Antalya 2003), 629-634.
- FRANCHI, R., SAVELLI, D., MORETTI E. 2004, *Petra and Beida (Jordan): Two adjacent archaeological sites deeply integrated in an impressive geomorphologic landscape*, XXXII International Geological Congress (Florence 2004), Scientific Sessions, vol. 1, 138.
- GABRIELLI R. 2001, *Introduzione all'uso dei GPS in archeologia*, in S. CAMPANA, M. FORTE (eds.), *Remote Sensing in Archaeology*, Firenze, All'insegna del Giglio, 1-25.
- RAIKES T. 1985, *The Character of Wadi Araba*, in A. HADIDI (ed.), *Studies in the History of Jordan*, Avon, Bath Press, vol. 2, 95-101.
- VANNINI G., NUCCIOTTI M. 2003, *Fondazione e riuso dei luoghi forti nella Transgiordania crociata. La messa a punto di un sistema territoriale di controllo della valle di Petra*, in R. FIORILLO, P. PEDUTO (eds.), *III Congresso Nazionale di Archeologia Medievale (Salerno 2003)*, Firenze, All'Insegna del Giglio, vol. 1, 520-525.

#### ABSTRACT

The Petra monumental site is located on the left rim of the Rift Valley in central-southern Jordan. The entire valley, which is tectonic in origin, rests on Late Cambrian quartzarenite rock formations of continental origin. Past research conducted by our team has allowed us to identify the following main causes of the weathering processes: thermal expansion and shrinkage of rocks caused by the great differences in day and night temperatures contribute to the loosening of quartz grains and lead to rock disruption. Heavy rainfall and above all surface runoff contribute significantly to the removal of weathered materials from the surface. Other forms of decay are caused by the presence of salts along the fractures. Both fieldwork and laboratory analyses performed in the past in a climate chamber have demonstrated that the products usually used in conventional restoration work are not very effective, due to the "extreme" climate and the chemical and physical characteristics of the rocks.

This risk had been hypothesized by the Nabataean builders of these monuments, who succeeded in mitigating its effects by setting up an efficient network of drains and rainwater collection cisterns upslope from the monumental structures. Moreover, these complex hydraulic engineering projects also ensured an adequate water supply for the local population. Today, this drainage system is no longer operational, as it has been blocked by both the accumulation of debris and collapses caused by landslides and earthquakes.

The project proposes the realization of a GIS aimed at acquiring complete knowledge of the man-made structures and hydraulic system underlying the routes of the canalizations and identifying the cisterns. This work is meant to contribute a valid support aimed at the restoration, which will involve several different disciplines, including the geological and chemical analysis of the rocks, the topography and the 3D photogrammetry.



- Tav. X – a: Petra. Il dilavamento dell'acqua lungo le superfici rocciose rappresenta una causa evidente del degrado delle facciate architettoniche (GABRIELLI *et al.*, p. 323).
- b: Petra. Tomba Palazzo. Immagine relativa al momento di acquisizione dei dati: il pallone sorvola la parte alta del monumento più difficile da riprendere. Per assicurare una copertura completa dell'edificio ogni 2 secondi è stato effettuato uno scatto (GABRIELLI *et al.*, p. 336).
- c: Petra. Tomba Palazzo. Il modello tridimensionale superiore è stato ottenuto attraverso la correlazione manuale dei punti e delle superfici (3500 punti) con Photomodeler 6.0. Il modello ottenuto elaborato opportunamente con ARPENTEUR e ROMA dà origine ad una nuvola di punti molto più fitta rispetto a quella iniziale (modello inferiore) (GABRIELLI *et al.*, p. 338).