

ALMA MATER STUDIORUM A.D. 1088
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI SCIENZE

Corso di Laurea in Scienze Geologiche

Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche ed Ambientali

Tesi di Laurea

Morfometria di forme carsiche in un possibile
landing site marziano.

Candidato:
Enrico Malfi

Relatore:
Jo De Waele

Sessione dicembre 2014
Anno Accademico 2014-2015

- *Dedicato a mia madre Fortunata, colei che ha voluto la mia laurea più di ogni altra persona e ha saputo sprenarmi fino al suo raggiungimento.*

INDICE

Abstract	7
1. Introduzione	7
1.1 Caratteristiche geologiche e stratigrafiche principali del pianeta Marte.....	10
1.2 Caratteristiche geologiche e stratigrafiche principali della zona studiata: Arabia Terra	14
2. Approfondimenti, metodologie di studio e analisi del cratere 12000088	17
2.1 Cratere 12000088 e sua suddivisione in aree diverse	18
2.2 Metodologia analitica morfometrica nell'ambiente marziano	22
2.3 Trattazione estensiva dei dati numerici e geomorfologici	24
2.3a) Approfondimento di alcuni aspetti morfologici del cratere	24
2.3b) Disquisizione dei risultati ottenuti dalle misure sulle doline	28
2.3c) Metodi statistici per lo studio dei dati ottenuti	30
2.3d) Confronto delle altezze assolute fra le doline di zone diverse e studio della fascia intermedia	36
2.4 Confronto del modello di diapirismo salino marziano con analogo terrestre	40
3. Conclusioni	43
Appendice	47
Appendice 1.....	47
Appendice 2	55
Appendice 3.....	58
Bibliografia	60
Bibliografia Immagini	61
Ringraziamenti	64

Abstract

A partire da alcune foto satellitari scattate al suolo marziano, si cerca di capire se alcune forme negative peculiari di forma rotondeggiante (presunte doline) osservate all'interno di un complesso di due crateri da impatto più grandi, possano testimoniare una forma di carsismo nelle rocce solfatiche sul pianeta rosso.

Questo fatto, se confermato, sarebbe di importanza fondamentale per la ricerca di forme di vita microbiologiche che potrebbero esistere in una zona di contatto tra acqua e solfati o in cavità sotterranee schermate dalle radiazioni cosmiche. Per potere verificare se le cavità rotondeggianti fossero di origine carsica o da impatto, sono state condotte molteplici misurazioni morfometriche delle forme sopracitate con particolare attenzione alla lunghezza degli assi in pianta e alla profondità delle depressioni. Alcune altre forme (creste variamente frastagliate) sono state studiate in quanto altra possibile testimonianza del carsismo ricercato.

1. Introduzione.



Figura 1- Autoscatto di Curiosity nel cratere di Gale.

La possibilità dell'esistenza della vita sul pianeta Marte, anche in forma microbiologica, affascina da sempre il genere umano. Solo a partire dal diciannovesimo secolo però si hanno le prime ricerche serie riguardanti questo ambito. Erano sostanzialmente esplorazioni ottiche per mezzo di un telescopio, con un potere risolvante nemmeno lontanamente comparabile a quello dei telescopi odierni. Le ricerche moderne includono nel repertorio dei metodi utilizzabili per la ricerca di forme di vita molteplici strumenti: foto satellitari, missioni con moduli spaziali atterrati (un esempio è il famosissimo "Curiosity"¹ arrivato a destinazione nell'agosto del 2012, Fig. 1), firme spettrali, possibilità di prelevare alcuni campioni e effettuare analisi in loco con i suddetti

¹ Lanciato come progetto più importante del MEP (Mars Exploration Program, divisione della NASA). Obiettivi principale del modulo sono lo studio degli elementi che sulla terra sono associati alla vita, come C, N, H, P, S, investigare la natura dei carbonati presenti sul suolo marziano, la composizione mineralogica, chimica ed isotopica delle rocce e dei terreni affioranti; raccogliere dati riguardanti l'evoluzione dell'atmosfera su lunghi periodi; raccogliere dati riguardanti il ciclo dell'acqua e della CO₂ su lunghi periodi.

rover, senza dimenticare la telescopica ottica che, nonostante non garantisca la definizione di una foto satellitare, è oggi estremamente potente. Per determinare la capacità del pianeta Marte di ospitare forme di vita ci si è concentrati negli ultimi anni nella ricerca di segnali che possano indicare la presenza, anche solo in un determinato momento della sua storia evolutiva, di acqua liquida. Inoltre è diventata molto importante anche l'analisi delle possibili firme biochimiche (*Boston et al., 2001*) lasciate da organismi microbiologici nel suolo e nelle rocce. Infine un altro ambito di studio importante riguarda i gas detti "biomarker", ovvero gas la cui presenza indica una probabile, ma non certa, bio-chemiosintesi. I principali sono CH₄ (metano), C₂H₆ (etano), e CH₃OH (metanolo).

La vita sulla Terra è stata possibile unicamente grazie alle grandi masse d'acqua disponibili. Nel ricercare forme di vita extraterrestri si tende a pensare, specie nell'ambito dello studio di altri oggetti celesti rocciosi, come Marte, Venere ed Europa (luna di Giove) che l'acqua in forma liquida sia essenziale per uno sviluppo della vita, almeno nella sua fase iniziale microbiologica².

Valutare la possibilità dell'esistenza di forme di vita alternative a quelle terrestri si intreccia dunque profondamente con il riuscire a dimostrare l'esistenza di serbatoi di acqua liquida, presenti o passati, nel pianeta di studio. Per quel che riguarda il pianeta rosso le prove della passata esistenza di acqua liquida in quantità non modesta è assodata ormai nel panorama scientifico: sono tantissime le pubblicazioni che studiano possibili linee di riva di laghi o addirittura mari, canali fluviali con qualche meandro ben sviluppato con relativi depositi fluviali (*Caleb et al., 2005; Quantin et al., 2005; Andrews & Lewis, 2011*).

Per quanto affascinanti possano essere gli scenari dipinti da queste scoperte, la possibilità di raccogliere campioni e quindi validare le ipotesi di vita microbiologica presente o passata su Marte, è limitatissima quindi bisogna partire per esigenza di praticità dallo studio dell' habitat più favorevole possibile iniziando dalle evidenze geochimiche conosciute (vedi tabella 1): in questa ottica verrà inviato nel 2030 un'altro rover in uno sforzo combinato di NASA ed ESA per raccogliere dati geologici, biologici e fisici per potere espandere le nostre conoscenze in materia. Un ambiente che potrebbe essere molto favorevole è quello di contatto tra acqua liquida e solfati parzialmente disciolti dalla stessa: studi sperimentali evidenziano che questi solfati abbassano il punto di congelamento di molto e una salamoia (liquido con concentrazioni altissime di ioni disciolti in esso) di

² Uno dei tanti testi che tratta del bisogno della vita di avere acqua allo stato liquido è stato scritto da Carl Sagan nel 1994 "*The search of Extraterrestrial Life*" in cui afferma: "*Life seems to need liquid water, which in turn seems to require planets ... We have every reason to believe that there are many water-rich worlds something like our own*".

solforati può rimanere stabile e non ghiacciare nelle condizioni marziane. Nella ricerca della vita su Marte si può dunque pensare che un validissimo ambiente di sviluppo sia quello dove queste soluzioni concentrate di solforati³ siano preservate dai raggi cosmici lasciati passare dalla sottilissima atmosfera marziana, ovvero sotto terra in fratture e cavità di vario tipo e formazione (Marnocha et al., 2010).

Organism	Energy Source	Temp. (C°)	Source
Desulfotalea psychrophila*	H ₂ (Chemo-lithotroph)	-1.8 – 19	Arctic marine sediments
Desulfotalea arctica	H ₂ (Chemo-lithotroph)	-1.8 – 26	Arctic marine sediments
Desulfobacter psychrotolerans	Acetate	-6 – 26.3	North Sea sediments
Desulfotomaculum reducens	Metal-reducing heterotroph	*	Heavy metal contam. sed.
Desulfotomaculum arcticum	Organics, H ₂ , amino acids, alcohols	26 – 46.5	Cold fjord sediments, Svalbard

Tabella 1- Lista di microorganismi chemiotrofici estremofili con meccanismi vitali incentrati sui solforati, trovati a temperature molto basse sulla Terra. Per analogia gli autori Chevrier, Ive e Marnocha (2010) ipotizzano che ve ne possano essere di simili su Marte.

Il rover dovrà dunque essere inviato in una zona interessante da un punto di vista dell'interazione solforati-acqua ed è per questo che si è scelto di studiare la zona di cui tratta questa tesi: all'interno di due grandi crateri da impatto meteoritico, parzialmente sovrapposti, si può notare una tipica zona dall'aspetto a bande concentriche che normalmente testimonia (nel caso in cui l'oggetto di studio sia la Terra e non Marte) la presenza di un diapiro salino in affioramento.

Per analogia si pensa dunque che le bande indichino anche sul suolo marziano un fenomeno di origini per lo meno simili. La stessa zona è fittamente cosparsa di strutture geomorfologiche peculiari: rotondeggianti e non dotate di bordi rialzati (cosa che normalmente è tipica dei crateri da impatto, anche se in alcune condizioni anch'essi possono non avere alcun rialzo nei pressi dei bordi).

Tali forme sembrano perfettamente sovrapponibili a zone terrestri con doline di origine carsica in luoghi aventi litologie saline e clima secco. La presenza di queste presunte doline implica la presenza di acqua liquida nel sottosuolo che avesse precedentemente scavato nella roccia: abbiamo dunque la perfetta situazione teorizzata poco fa nella quale si ha acqua a contatto con dei solforati (in questo caso sono dei solforati di Magnesio) schermata dalle radiazioni cosmiche grazie al fatto di essere acqua di falda e non affiorante in superficie.

Le specifiche stratigrafiche, geomorfologiche e litogenetiche del caso verranno trattate esaustivamente più avanti, ma è importante prima di tutto compiere un inquadramento geografico, stratigrafico e geologico

³ I più comuni su Marte sono i solforati di ferro e quelli di Magnesio a causa del fatto che la maggior parte della crosta del pianeta è formata da basalti tholeitici, ricchi di questi elementi che, venendo lisciviati in condizioni subacquee, mettono a disposizione questi cationi che vanno poi a concentrarsi e depositarsi con l'anione solforato (con forse un aiuto biologico a coadiuvare il processo).

prima del pianeta Marte in senso stretto, poi della zona trattata.

1.1 -Caratteristiche geologiche e stratigrafiche principali del pianeta Marte.

Marte è un pianeta roccioso e come tale è ovviamente composto principalmente da materiali quali silicati, carbonati, solfati e minerali metallici. Come la terra ha subito una differenziazione geochimica primaria di qualche tipo risalente a circa 4.5 miliardi di anni fa⁴, infatti sembra avere un nucleo più denso di Ferro e Nichel e una parte meno densa composta principalmente dalle rocce sopraccitate (*Stevenson, 2001*). Il nucleo interno, forse solido, e quello esterno liquido richiamano fortemente la struttura del nostro pianeta. Questa caratteristica è stata osservata grazie al "radio tracking" del *Mars Global Surveyor*⁵ che ha evidenziato un raggio che può variare dai 1520 ai 1840 Chilometri con un più che probabile strato esterno fuso, anche il mantello dovrebbe presentare una parziale anatessi (*Yoder et al. , 2003*).

La composizione della crosta marziana è stata studiata grazie a degli spettrometri in dotazione a sonde e *rover* (oltre che tramite lo studio di alcune meteoriti la cui provenienza è comunemente attribuita al pianeta rosso) e risulta avere come elementi principali ossigeno, silicio, magnesio, calcio, potassio, alluminio e ferro. Gli elementi secondari comprendono invece il cromo, lo zolfo, il sodio, il titanio e il Cloro. L'idrogeno è presente nel suolo sia come acqua ghiacciata sia come parte integrante di alcuni minerali idrati prettamente di tipo argilloso (*Foley, 2008*). Le litologie predominanti sono fondamentalmente ignee con particolare concentrazione di rocce mafiche basaltiche simili con quelle presenti tutt'oggi sulla terra in zone come le isole Hawaii (*Brown, 2012*) e in quantità decisamente minori, ma importanti, sedimentarie carbonatiche a strati la cui origine è ancora ampiamente dibattuta⁶.

Da un punto di vista geografico e fisiografico è famosa la dicotomia tra la zona più a nord e quella più meridionale del pianeta Marte (*Watters et al., 2007*): la prima, che costituisce circa un terzo della superficie totale disponibile, è un bacino depresso (3-6 chilometri più in basso rispetto al "continente" meridionale), relativamente piatto e senza eccessive

⁴ Marte come la Terra sembra avere avuto un campo magnetico dovuto alla convezione di celle magmatiche interne appartenenti al mantello o al nucleo esterno, ma a differenza del nostro pianeta questo meccanismo è rimasto attivo solo per qualche centinaio di milioni d'anni, forse a causa delle ridotte dimensioni del pianeta, forse per altri fattori ancora in via di approfondimento.

⁵ Il *Mars Global Surveyor* è una sonda spaziale statunitense lanciata nel 1996 e attiva fino al 2006 quando le comunicazioni hanno cessato di funzionare. La sua missione principale terminò nel 2001 e riguardava la mappatura di alcune zone marziane, scattò in seguito alcune foto al *rover* "Spirit" e ad altre sonde a loro volta in orbita.

⁶ Almeno una parte di questi depositi (carbonati di ferro e magnesio) potrebbero avere avuto origine a causa di fluidi idrotermali in concomitanza con attività vulcanica (*Morris et al.,2010*).

differenze da una sua zona all' altra se non quelle determinate da alcuni impatti meteorici con crateri molto grossi e profondi; mostra tracce di riciclo litosferico poiché non è butterato tanto quanto ci si aspetterebbe.

La zona più a sud invece è posta ad elevazione maggiore, ha uno spessore crostale maggiore (58 km contro i 32 di massima della zona nord) ed è caratterizzata da moltissimi crateri, sembra anche più antica da un punto di vista stratigrafico. L'origine di questa separazione netta è simile a quella tra crosta continentale e crosta oceanica presente sulla terra, ma la sua formazione è ancora molto dibattuta e varia fra più modelli che vanno dall'impatto con un unico corpo di grandi dimensioni, all'impatto di più corpi meteorici ad ipotesi di stampo geochimico-endogeniche⁷ ognuna aventi dati a favore e dati contro la propria verificabilità e accettabilità universale dal mondo scientifico. Altre caratteristiche interessanti del pianeta Marte sono l'abbondanza di vulcani (tra cui spicca il monte Olimpo, alto 11 chilometri) e le calotte glaciali polari conosciute fin da tempi insospettabili⁸ e costituite da CO₂ che gela e si deposita sotto forma di ghiaccio secco nelle zone di freddo maggiore.

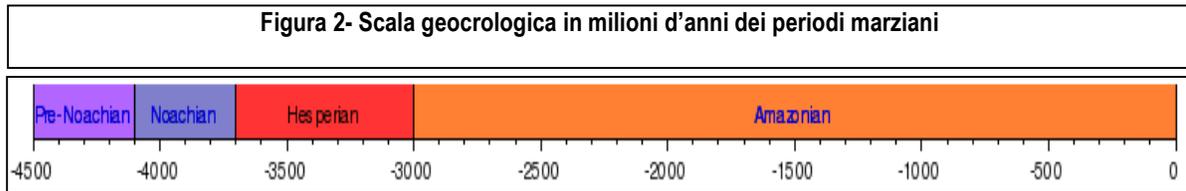
Parlando di Marte da un punto di vista più prettamente stratigrafico si hanno alcune peculiarità: la cronostratigrafia e la geocronologia stabilite per convenzione nello studio del pianeta sono profondamente diverse, non sono infatti contemplati gli eoni e le ere, ma solo i periodi e le epoche, senza nemmeno le età (perché rappresentano un periodo troppo breve per potere essere studiato in dettaglio con i pochi dati a disposizione). La suddivisione in periodi ed epoche è stata fatta tramite la mappatura a livello planetario e la suddivisione in unità di superficie⁹ in modo simile a come era stato fatto per la luna all'inizio degli anni sessanta. I periodi stabiliti per Marte sono tre: Noachiano, Hesperiano e Amazzoniano e riflettono momenti in cui le caratteristiche ambientali sono peculiarmente diverse con relativo cambio netto in litogenesi e geomorfologia (Fig. 2). Il Noachiano ha un età assoluta che varia dai 4100 ai 3700 milioni di anni fa ed è caratterizzato da un intenso bombardamento meteorico e dalla possibile presenza di acqua liquida in quantità abbondanti. E' stato chiamato così a causa della zona dove esso è meglio rappresentato la

⁷ A creare la dicotomia potrebbero essere stati processi simili a quelli che sulla terra causano la tettonica a placche, in particolare uno studio del 2005 evidenzia come sia possibile che nell'emisfero boreale ci fosse una persistente zona di *downwelling* e in quello australe una condizione altrettanto persistente di *upwelling*, formando di fatto una netta distinzione (Roberts & Zhong, 2006).

⁸ Le calotte polari marziane vennero identificate per la prima volta dall'astronomo e fisico tedesco Christiaan Huygens nel 1672.

⁹ Un'unità di superficie ("*Surface Unity*") è una porzione di terreno con caratteristiche di *texture*, albedo, proprietà spettrali e insiemi di geomorfologie che rendono la porzione stessa unica e peculiare. E' una metodologia particolare della mappatura geologica applicata a scala planetaria, valida per le volte in cui è impossibile, o quasi, condurre studi in prima persona in sito. Le unità vengono poi datate in un primo momento in maniera relativa, ovvero in relazione rispetto alle altre vicine, poi con tentativi di interpretazione e possibilmente qualche campione, si prova a fare inferenze sulla datazione assoluta (Greeley et al., 1990).

“Noachis Terra”, una zona d’altipiano ricca di crateri da impatto dentro il più grande bacino “Hellas”.



Le superfici Noachiane sono molto rugose e irregolari con forti similitudini con il suolo lunare. Le variazioni stratigrafiche sono composte per lo più da potenti banchi di ejecta (porzione di materiale espulso dalla crosta in seguito ad un corpo che colpisce il pianeta e ridepositato in seguito in sovrapposizione al resto del cratere) causati dall’impatto meteorico massivo del periodo dell’intenso bombardamento tardivo.

Il Noachiano copre circa il 40% della superficie di Marte ed è ben

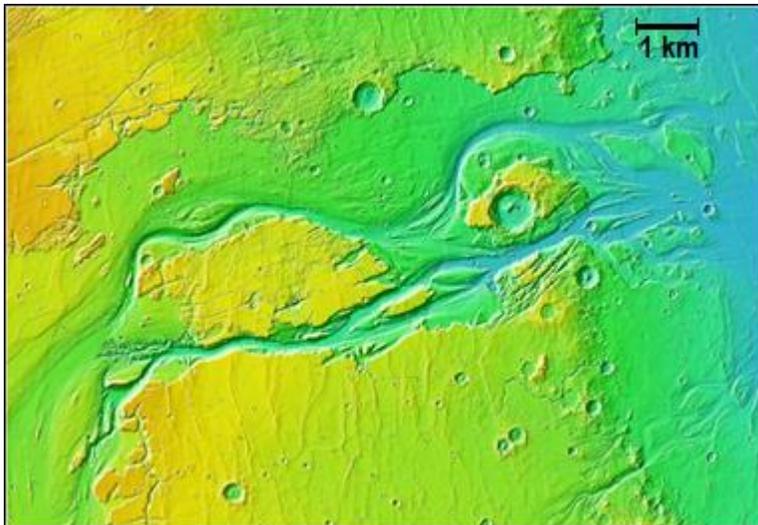


Figura 3- Outflow Channel con colori che indicano il livello altimetrico delle forme.

rappresentato nell’emisfero australe e boreale in quest’ultimo tramite grossi siti da impatto (*Tanaka et al., 2014*).

Dopo il Noachiano viene l’Hesperiano che dura dai 3700 ai 3000 milioni di anni fa. Il periodo Hesperiano è stato così soprannominato a causa della piana di Hesperia, una zona con densità di crateri da impatto da

bassa a moderata e alcune caratteristiche come probabili colate basaltiche e ampie piane modellate dal vento (*Tanaka et al., 2014*). Tutto il periodo è caratterizzato da diffusa attività vulcanica¹⁰ e inondazioni di proporzioni colossali che hanno scavato i famosi “*Outflow channels*” (Fig. 3) marziani. Questi sono canali lunghi diverse centinaia di chilometri e larghi dal chilometro in su. Sono stati lungamente studiati¹¹ ed

¹⁰ Durante l’Hesperiano si formano grandi vulcani a scudo, incluso il monte Olimpo.

¹¹ Angelo Secchi, famoso astronomo italiano individuò per primo i canali marziani descrivendoli come “linee apparenti sulla superficie del pianeta”. Tra il 1877 e il 1888 Giovanni Virgilio Schiapparelli studiò meglio questi

oggi si pensa che possano essersi formati a causa di flussi d'acqua molto potenti ed improvvisi¹², come quelli che si hanno in seguito ad un brusco scioglimento dopo un'epoca glaciale, quando enormi quantità di liquido diventano improvvisamente disponibili (Baker, 1982). È un momento di transizione dalle condizioni umide e calde del Noachiano al mondo freddo, secco e polveroso odierno. Si crede che il picco di abitabilità del pianeta si abbia proprio nell'Hesperiano, in queste condizioni climatiche intermedie. A causa dell'esteso vulcanismo e del relativo rilascio massivo di gas come acido solfidrico (H₂S) e anidride solforosa (SO₂) c'è una transizione fra le litologie da alterazione principale: da un'alterazione a base di fillosilicati argillosi come quello presente sulla terra ad una a base solfatica (Poulet et al., 2005). Risale a questo periodo dunque la formazione di corpi solfatici di grosse dimensioni. L'acqua diventa più rara e più acida proprio grazie alle interazioni e allo scambio gassoso con acido solfidrico e anidride solforosa (Tanaka et al., 2014). L'ultimo periodo è il cosiddetto

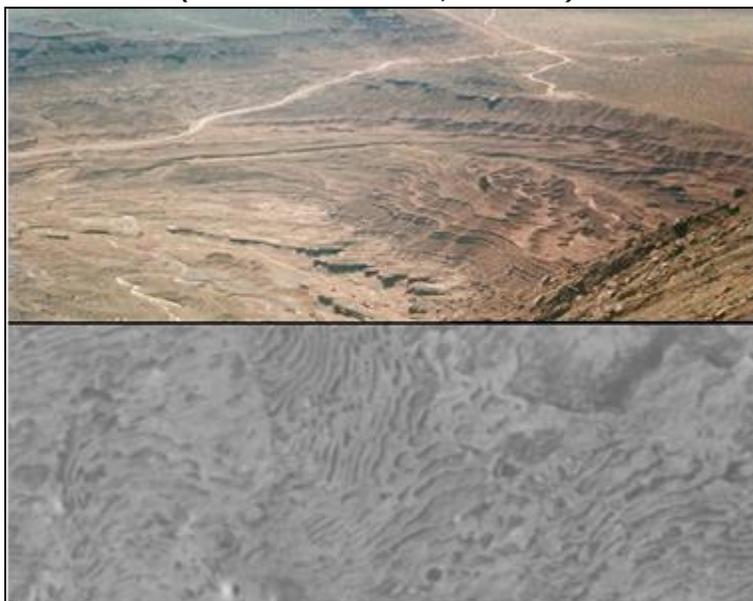


Figura 4- Sopra è visibile una foto della Monument Valley, USA. Sotto una ortofoto del suolo Marziano nel cratere studiato. Sono presenti strati molto simili.

Amazzoniano, il più lungo dei tre che va dai 3000 milioni di anni fino ad arrivare al giorno d'oggi. È caratterizzato da basso tasso di impatti di asteroidi e da condizioni climatiche fredde ed super aride. I motivi dell'improvviso cambio di rotta climatico alla fine dell'Hesperiano sono tutt'oggi motivo di dibattito. Essendo il periodo più recente è anche il più studiato ed grazie ad alcune geoforme rimaste

preservate è stato possibile studiare diverse caratteristiche del pianeta Marte come il movimento del ghiaccio dai poli, il tasso di erosione causato dal vento e anche ricostruire parzialmente la stratigrafia grazie a crateri da impatto e relativi *ejecta*.

canali e pubblicò il famosissimo libro "La vita su Marte", presumendo che essi dovessero essere stati scavati da acqua liquida e che quindi l'ambiente marziano sarebbe dovuto essere favorevole allo svilupparsi della vita stessa.

¹² Nell'Hesperiano si registra anche un netto assottigliamento dell'atmosfera che diventa meno capace di trattenere calore e dunque si ha un conseguente crollo delle temperature medie. L'acqua del sottosuolo ghiaccia creando una criosfera che, quando entra in contatto per ragioni tettoniche con zone a risalita di magma rilascia le quantità d'acqua necessarie affinché gli "outflow channels" vengano scavati. (Clifford, 1993).

1.2- Caratteristiche geologiche e stratigrafiche principali della zona studiata: Arabia Terra.

Arabia Terra è una grande regione contenuta nel quadrangolo Arabia¹³ a sua volta situato in una zona a nord di Marte sebbene non faccia parte della grande depressione detta *Vastitas Borealis*. E' densamente coperta di crateri e molto erosa: è infatti molto antica a livello stratigrafico e contiene rocce che vanno dal Noachiano all'inizio dell'Hesperiano.

Molte zone presentano chiari esempi di strati sovrapposti uno dopo l'altro ed esposti per erosione. L'origine di questi strati (Fig. 4) potrebbe essere vulcanica, eolica o per decantazione subacquea come i carbonati terrestri (McGill, 2000; Grotzinger & Milliken, 2012). Sono stati anche condotti studi di stampo tettonico che avrebbero identificato in Arabia Terra un sistema affine a quelli di retro-arco vulcanico (Anguita et al., 1997), caratteristica che aiuterebbe a ricostruire i processi crostali marziani e capire quando e per quanto abbia funzionato il meccanismo di tettonica delle placche sul pianeta.

Per quel che riguarda questo scritto è giusto spendere un po' di tempo a descrivere un tipo di cratere presente in Arabia Terra che è quello dove sono state condotte le misurazioni che verranno descritte nei prossimi capitoli: i crateri rigonfiati o "*Bulged Craters*" (Fig. 5).

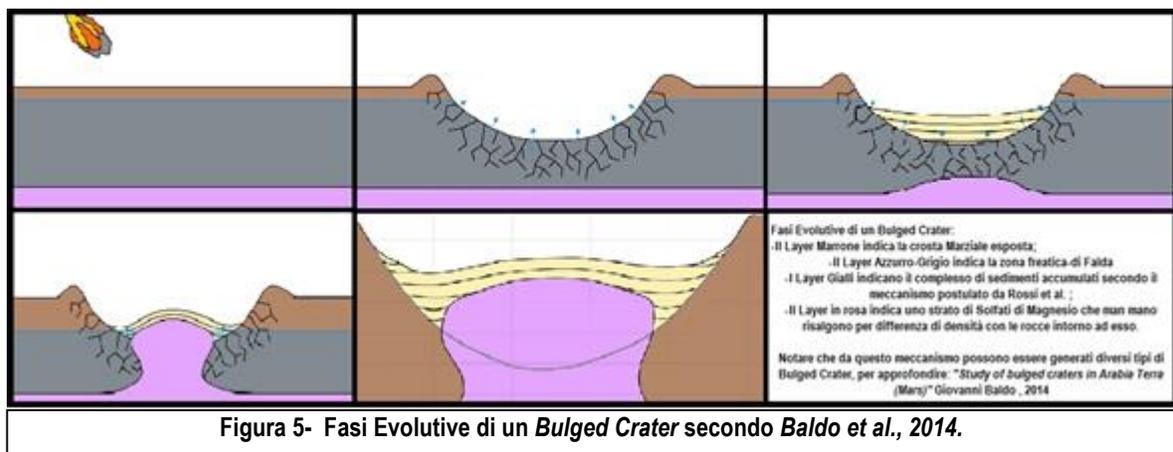


Figura 5- Fasi Evolutive di un *Bulged Crater* secondo Baldo et al., 2014.

Sono caratterizzati da un rigonfiamento nel loro centro che si forma in maniera dinamica e in maniera lenta, non è dunque un tipo di morfologia che viene create dall'impatto, ma un insieme di caratteristiche che tendono ad evidenziarsi in zone crostali predisposte a questo fenomeno. L'origine di queste forme è ancora al centro dei dibattiti della comunità scientifica, ma

¹³Il quadrangolo Arabia fa parte della serie di trenta quadrangoli che è stata usata per mappare Marte dall'USGS (United States Geological Survey) ed è contraddistinto dal numero 12.

vi sono sostanzialmente tre ipotesi, una più classica, una proposta da qualche anno e infine quella che questo scritto va ad esplorare:

- Erosione a causa di venti che circolano in maniera concentrica lungo le pareti del cratere;

- Effusione di fluidi dal sottosuolo e accrezione relativa a causa dell'accumulo dei materiali portati in carico da essi;

- Risalita di un corpo evaporitico che in precedenza era confinato da uno strato più denso che non gli permetteva di subire diapirismo e che dopo l'impatto è stato "liberato" cominciando di fatto a formare il *bulged crater* (Baldo et al., 2014).

Il sistema di doppio cratere su cui si andranno a compiere le misure delle presunte doline presenta proprio tracce di quello che potrebbe essere un diapiro attivatosi dopo l'impatto dell'asteroide. Precedentemente la differente pressione litostatica su un ipotetico livello di falda avrebbe spremuto fuori del liquido che portava in carico una certa quantità di sedimenti dalle fratture ("*Brittle Zone*") e che, risalendo, avrebbe lasciato un drappo di questi sedimenti che sarebbe diventato la superficie di base del cratere¹⁴ (Baldo et al., 2014).

Il cratere di studio è numerato 12000088 ed è stato recentemente studiato (Baldo et al., 2014) proprio come possibile "*landing site*" del rover di cui si parlava precedentemente. Questo perché oltre al probabilissimo diapiro¹⁵ già interessante da un punto di vista geomorfologico e geochimico, sembrano essere presenti oltre ai soliti crateri da impatto tipici di Arabia Terra, anche dei crolli correlati ad una possibile attività carsica, fatto che se confermato renderebbe il posto molto appetibile per una ricerca di vita microbiologica extraterrestre. Il carsismo e i processi carsici su Marte sono stati molteplici studiati e vi sono vari esempi, dentro e fuori l'area di cui si sta trattando in questa sede. Alcuni autori hanno rilevato molteplici morfologie carsiche¹⁶ che ricordano moltissimo quelle presenti sul suolo terrestre e tramite l'analisi approfondita delle immagini MRO-HIRISE¹⁷ hanno dimostrato l'esistenza di possibili processi dissolutivi e corrosivi nei confronti delle rocce. Questi

¹⁴ Probabilmente in concomitanza a questo processo, veloce ma non istantaneo, si ha avuto la ricaduta di polveri e materiali sottili espulsi come ejecta nel momento dell'impatto, andando a creare delle lamine alla base del cratere, lamine poi potenzialmente rimaneggiate dai fluidi in risalita.

¹⁵ Sono state condotte delle analisi spettrali sulla zona che è risultata essere composta in maggioranza da Solfati di Magnesio (kieserite, $MgSO_4 \cdot H_2O$). La presenza di solfati idrati non deve stupire ed è stata lungamente studiata da vari autori (Chipera & Vaniman, 2007).

¹⁶ Chiamate più diplomaticamente "Karst-like".

¹⁷ HiRISE (High Resolution Imaging Science Experiment) è una fotocamera adatta a scattare foto ad alta risoluzione ed è montata sull' MRO il Mars Reconnaissance Orbiter, oltre ad immagini adatta allo studio della superficie marziana, ha fotografato i vari rover atterrati.

processi sono stati ampiamente attivi reagendo in maniera differenziale a seconda del tipo di minerale, della granulometria e dell'alterabilità che i fluidi incontravano. Questi autori suggeriscono che la probabilità che vi sia stata acqua liquida in grado di avviare processi carsici in alcune zone è altissima (*Baioni et al., 2009*).

In un altro lavoro è stato studiato un duomo salino kieseritico, dello stesso tipo di quello qui trattato (*Baioni et al., 2012*).

2. Approfondimenti, metodologie di studio e analisi del cratere 12000088.

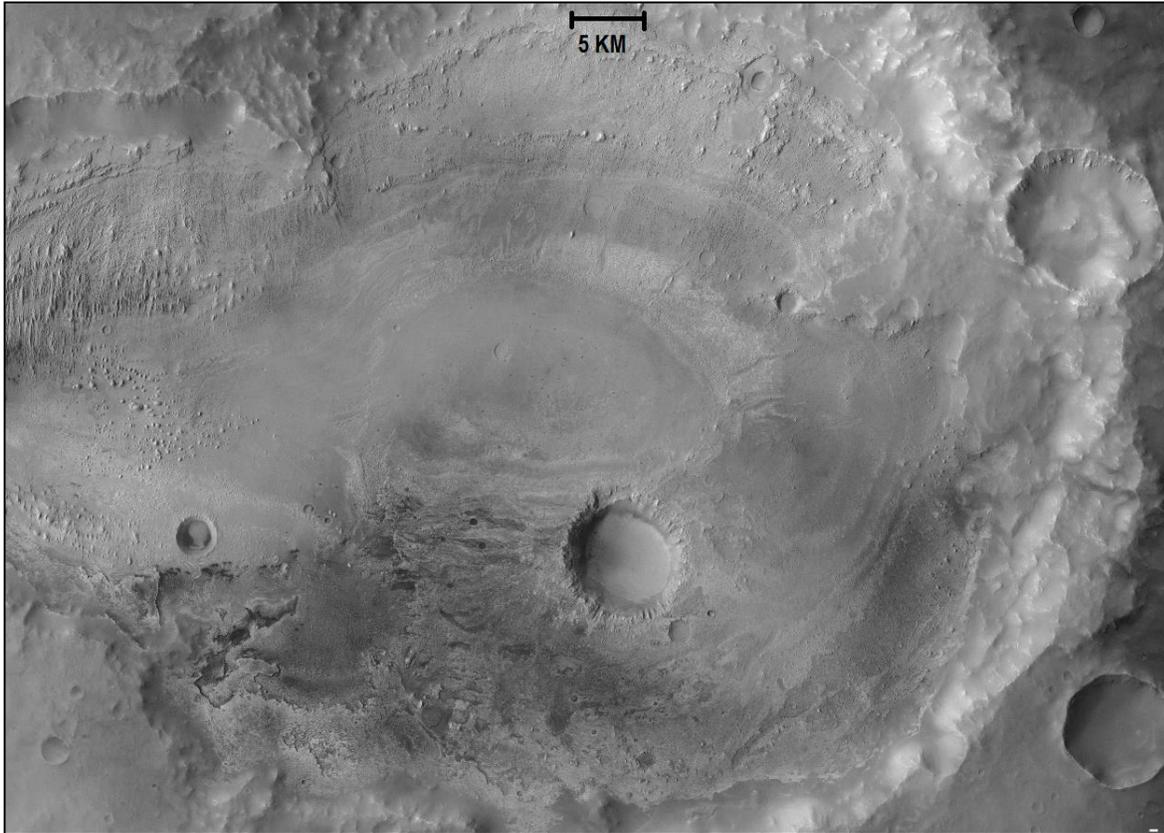


Figura 6- Il Cratere 12000088. Si nota subito che è composto da un impatto più recente, a sinistra, e uno più antico, a destra. Ha poi al suo interno tutta una serie di altri piccoli crateri.

E' opportuno iniziare con una descrizione generale dell'area di interesse. Il Cratere 12000088 è un sistema di due crateri¹⁸ parzialmente sovrapposti fra loro (Fig. 6). Un primo impatto con un asteroide di dimensioni maggiori rispetto a tutti gli altri caduti nella stessa regione ha scavato il corpo principale, centrale. In un secondo momento un corpo di dimensioni minori si è schiantato a sinistra del primo arrivando così alla forma attuale (sono presenti svariati altri crateri più piccoli e recenti).

Fin dal primissimo colpo d'occhio è possibile notare delle bande più chiare grigio-bianche che si alternano con bande più scure, ed entrambe tendono a formare un sistema concentrico che potrebbero indicare un diapiro salino in risalita.

Ingrandendo l'immagine e arrivando più nel dettaglio si possono notare

¹⁸ La misura dei semiassi del cratere equivalente (ovvero la somma dei due crateri minori) è di 52 Km per quel che riguarda il semiasse minore, e più di 60 Km per quel che riguarda quello maggiore. I semiassi maggiori e minori del cratere più grande sono rispettivamente 52 e 50 Km, quelli del cratere minore 30 e 30 km.

delle zone più densamente corrose dalla presunta attività carsica e zone invece meno butterate e più lisce. Il cratere sembra manifestare una variazione molto rapida e inaspettata di caratteristiche geologiche e geomorfologiche: in poche decine di chilometri si passa da erosione eolica che si manifesta sottoforma di molteplici *yardangs*¹⁹, ma anche di monti e monoliti più resistenti che si stagliano sul resto della pianura, a forme carsiche o *karst-like*. Per ottenere dati statisticamente più significativi la zona verrà dunque divisa in più parti ed analizzata in maniera indipendente anche per vedere come varia la profondità e la dimensione delle geforme carsiche presenti al variare delle altre caratteristiche legate al suolo.

2.1 –Cratere 12000088 e sua suddivisione in aree diverse.

Quando ci si occupa di suddividere una porzione di superficie topografica

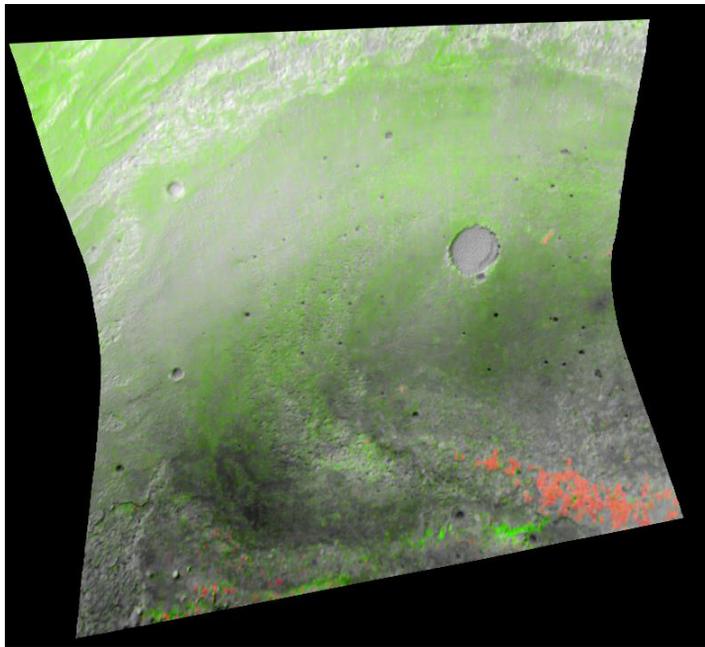


Figura 7- In verde la zona a prevalenza di Solfati di Magnesio, in rosa zona a fillosilicati. Immagini prelevate grazie ad un TES, *Thermal Emission Spectrometer* chiamato THEMIS.

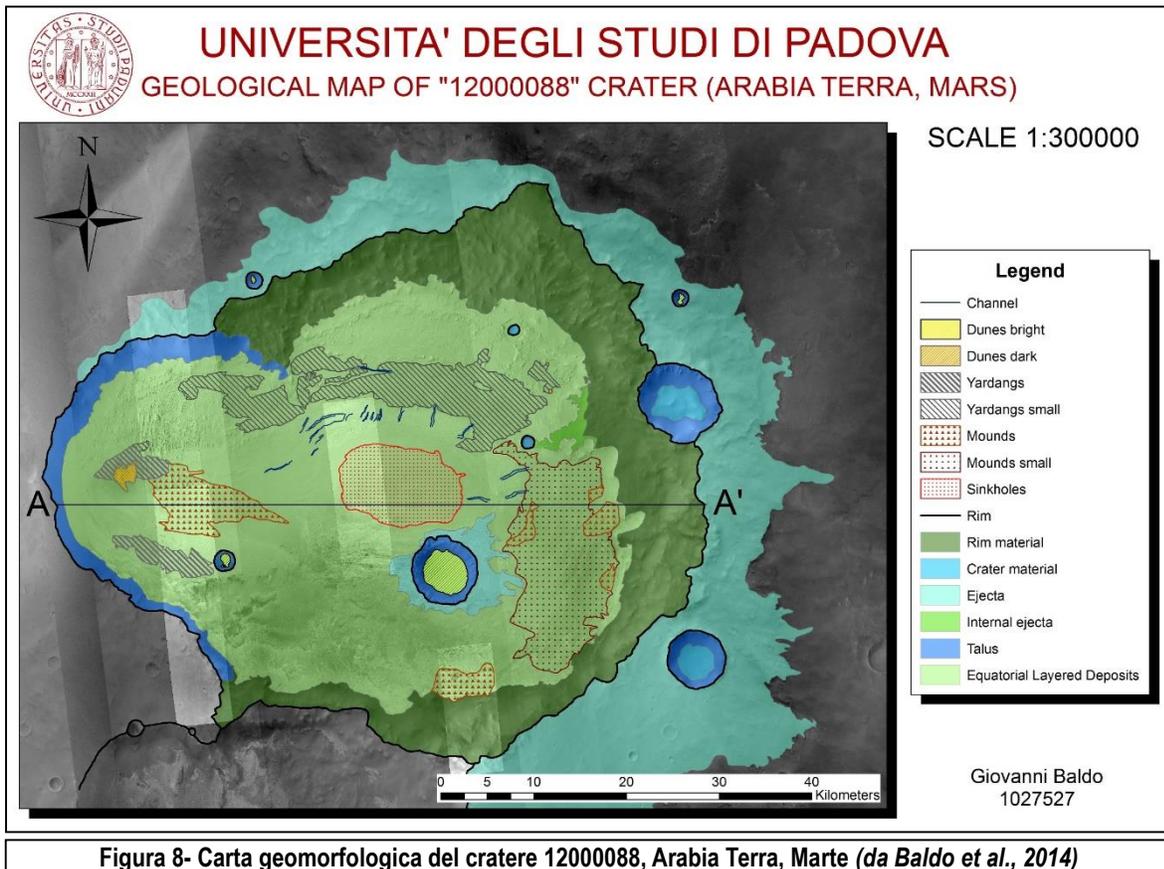
tramite foto satellitare bisogna prima di tutto scegliere secondo quale criterio farlo. Nel caso in cui gli scatti ritraggano zone difficilmente raggiungibili e quindi dalle quali è difficile prelevare campioni o nelle quali è arduo condurre una campagna di rilevamento, il metodo migliore di suddivisione è quello geomorfologico²⁰. L'analisi geomorfologica prevede la divisione in aree di studio a seconda delle forme prevalenti in esse. Bisogna innanzitutto distinguere la zona dell'impatto iniziale, più

grande, da quella dell'impatto secondario, più ristretta. Ci sono poi zone che presentano prevalentemente forme montuose distribuite lungo fasce, e alcune altre che hanno una forte presenza di *yardangs* di grandi e piccole dimensioni. Sembra siano presenti anche dei canali e di sicuro si possono notare molti lineamenti che si intersecano fra loro, ma non è possibile

¹⁹ Le *Yardangs* sono collinette composte prevalentemente di materiali coesivi, siano essi terreni addensati o rocce vere e proprie, la cui elongazione verticale è di molto superiore a quella orizzontale. Si formano a causa dell'abrasione portata dalle particelle di sabbia e limo in sospensione eolica e per successiva deflazione del materiale compromesso. Si formano in zone con scarsità d'acqua e con forti venti unidirezionali.

²⁰ Questo non significa che si debbano trascurare i dati di diverso tipo. Per esempio nel caso oggetto di studio si hanno a disposizione anche analisi spettrali delle litologie prevalenti, allegati in Figura 7.

capire da quale processo derivino (sono comunque più giovani della formazione del cratere sennò sarebbero stati oblitterati dall'impatto). Secondo Baldo nella parte più a nord ovest sarebbero presenti alcune dune eoliche (*Baldo et al, 2014*), tuttavia se da una parte è vero che si possono notare caratteristiche di trasporto trattivo eolico in più di una zona, quella indicata dal suddetto autore potrebbe non essere così facilmente risolvibile da un punto di vista morfogenetico: alcune di quelle che vengono indicate come dune potrebbero essere in realtà *yardangs* tutte orientate secondo la stessa direzione (forse a causa del fortissimo vento unidirezionale, l'onda d'urto, causato dall'impatto dell'asteroide secondario?). Una mappa dettagliata della suddivisione in aree del cratere è qui allegata (Fig. 8 e 9).



Per quanto riguarda le zone a monti, a *yardangs*, le presunte zone a dune individuate da Baldo²¹ e i possibili canali del cratere, si può dire ben poco. Per potere estrarre un dato vicino all'oggettività scientifica bisogna analizzare un gran numero di geoforme parametrizzandone i caratteri principali e questo è stato possibile sui presunti crolli-doline presenti in gran

²¹ L'autore indica come zona di duna il complesso indicato in mappa, forse un po' in dubbio, sia una serie di riempimenti di crateri, invece più chiari anche grazie alla presenza di ripple eolici dentro essi. La foto è stata ridimensionata per esigenze di impaginazione per cui le scale delle due mappe, entrambe 1:300.000, non coincidono in maniera perfetta.

numero. La loro concentrazione risulta molto elevata, sebbene con caratteristiche differenti, in due zone in particolare: a sud nella zona soprannominata "*heavy-layered*" (poiché fittamente stratificata) vi sono innumerevoli aperture rotonde il cui interno scuro denota una certa profondità. Hanno la tendenza ad essere o molto circolari o avere sistemi di crolli che causano forme particolari. In questa parte del cratere si hanno le doline con semiassi più lunghi.

Nel centro della foto si può notare un altro luogo dove il carsismo salino è diffusissimo. Ivi sono presenti tantissime forme di svariate dimensioni, ma complessivamente più piccole e decisamente meno profonde rispetto a quelle sopra trattate.

Suddivisione in Zone del cratere 12000088

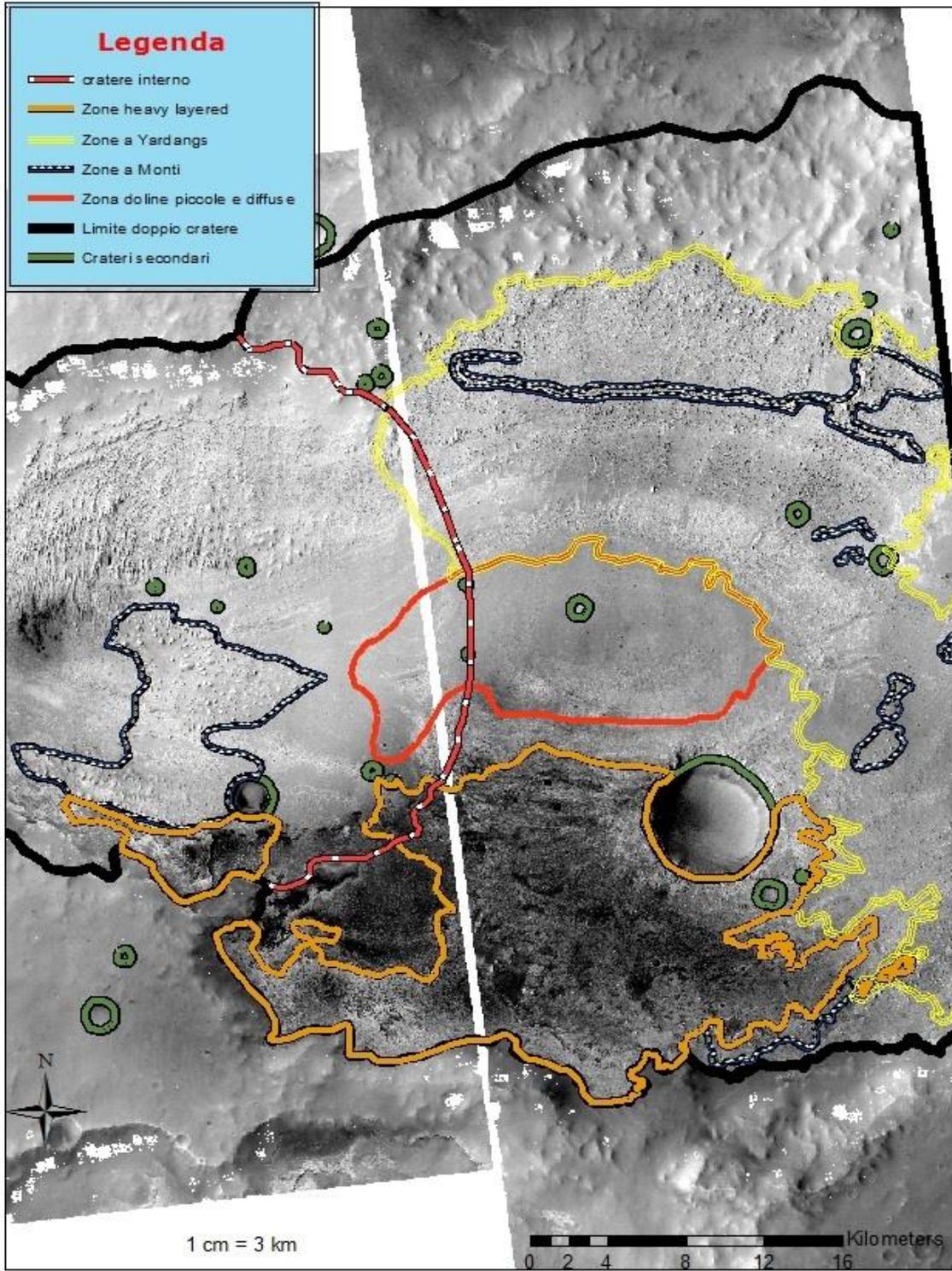


Figura 9- Mappa Suddivisione in zone. Impostata su ArcMap durante la scrittura di questa tesi, la suddivisione delle zone è stata rivista rispetto al lavoro di Baldo et al., 2014 per meglio focalizzarsi sulla tematica del carsismo. Scala 1:300.000. Freccia del Nord posta in basso per esigenze di visibilità.

2.2 –Metodologia analitica morfometrica nell’ambiente marziano.

Studiando una porzione di territorio esterna al pianeta Terra ci si imbatte in alcune differenze determinanti per la procedura di studio da tenere bene a mente. E’ bene dunque anticipare la spiegazione metodologica vera e propria con un’introduzione di termini e concetti utili nel telerilevamento di superfici marziane.

I parametri di latitudine e longitudine sono essenzialmente gli stessi. La latitudine avrà lo 0° all’equatore, mentre per la longitudine si usano convenzioni di stampo storico²². Nell’esaminare le foto satellitari tipo MRO si ha a disposizione un parametro detto di “*Solar Longitude*” che sostanzialmente indica il passare delle stagioni²³ e di conseguenza la posizione relativa di Marte rispetto al Sole, misurato in gradi avendo come punto 0° l’equinozio d’inverno. Sempre per quel che riguarda i dati legati al sole si trovano il “*Sub-solar azimuth*” e l’ “*incidence angle*”, entrambi importantissimi per il tipo di ricerca svolta in questa tesi. Il primo è l’angolo in gradi cominciato a misurare dalla posizione delle ore tre di un orologio, in maniera oraria, tra la direzione dei raggi solari e l’immagine acquisita, sostanzialmente dice da dove arrivano i raggi luminosi. Il secondo è più banalmente l’altezza del sole sull’orizzonte, utile per poter calcolare l’altezza o la profondità di oggetti tridimensionali aiutandosi con l’ombra che essi proiettano.

Altri due importanti caratteristiche di una foto satellitare sono l’ “*emission angle*” e lo “*scaled pixel width*”. Il primo è il valore in gradi dell’angolo che si forma tra la sorgente dello scatto e il centro dell’immagine: normalmente è 0°, ma può avere valori leggermente diversi. Il secondo indica semplicemente il potere risolvibile della foto (la sua risoluzione geometrica): un pixel è pari ad una quantità di spazio oltre la quale due oggetti vicini non sono distinguibili l’uno dall’altro.

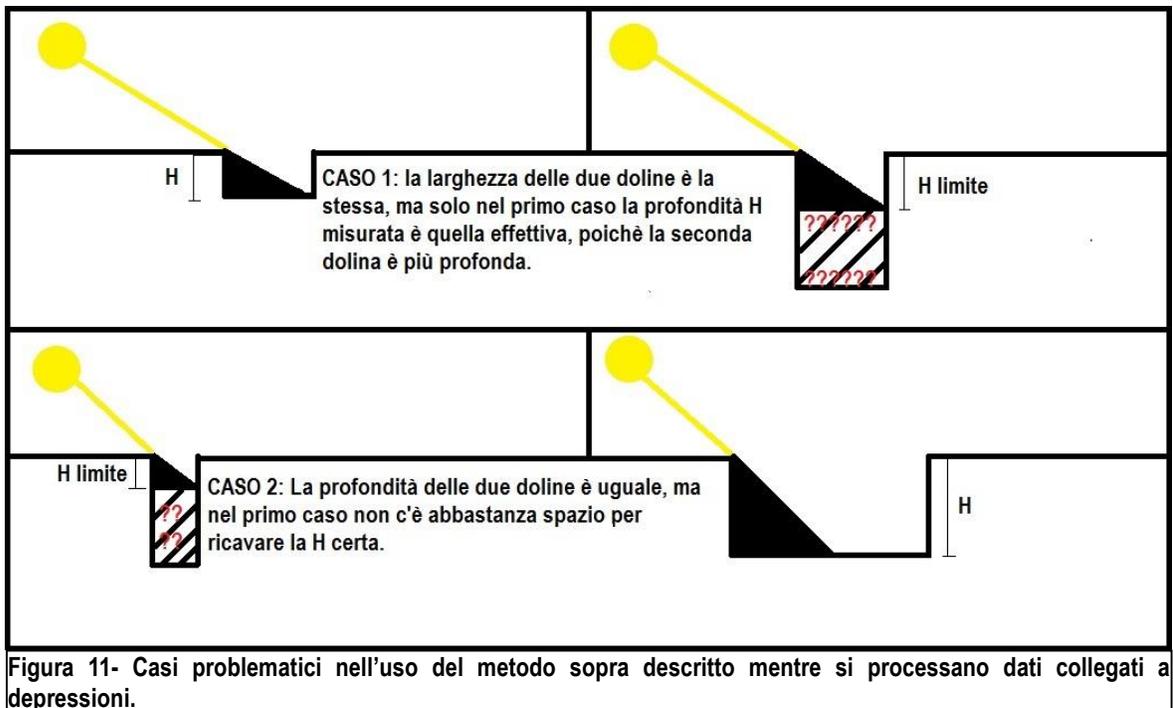
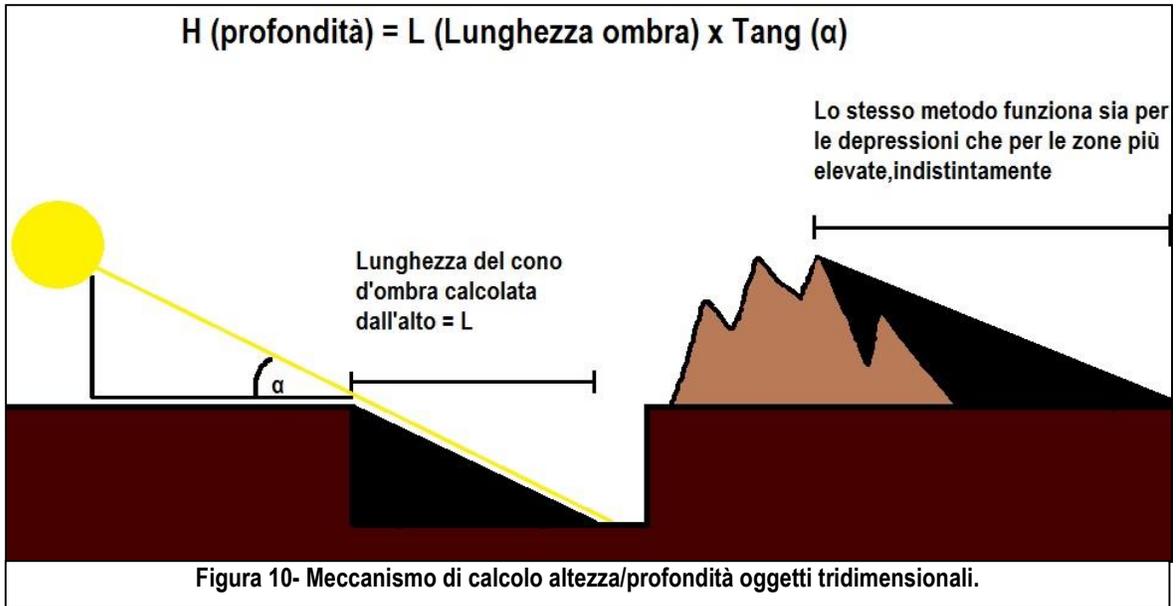
Una volta definiti questi parametri di base si può passare alla disamina del metodo d’analisi attuato nella morfometria di queste forme carsiche. Si è voluto misurare il semiasse maggiore, il semiasse minore, e la lunghezza di ogni ombra (dove fosse possibile) nella direzione di provenienza dei raggi solari. E’ quasi sempre possibile ricavare valori di profondità tramite i sopracitati parametri e grazie alla formula (Fig. 10):

$$H = L \times \tan(\alpha)$$

Equazione 1- Equazione che permette di ricavare la profondità di un oggetto tridimensionale misurandone l'ombra e l'angolo di incidenza con i quali la luce colpisce la superficie.

²² Per Marte il primo meridiano venne definito nel 1830 dagli astronomi tedeschi W. Beer e J. Mädler. La convenzione venne poi portata avanti da G. Schiaparelli che usò quel punto come lo 0 longitudinale della sua mappa.

²³ Il pianeta rosso ha ovviamente un sistema di stagioni che ha effetti simili per quel che riguarda l’irraggiamento solare nei poli e infatti come precedentemente accennato, sono presenti delle calotte glaciali, anche se composte di ghiaccio secco principalmente.



Nel caso di una depressione avente un'ombra che occupi tutto lo spazio disponibile, si può solo calcolare una profondità minima possibile. Più è grande una forma carsica più sarà ovviamente profonda qualora la sua ombra ricoprisse l'intera area (vedere Figura 11).

Le misurazioni sono state condotte in due maniere complementari: nel catalogare forme di una certa dimensione e quindi facilmente distinguibili, è stato usato lo strumento "metro" del programma ArcGIS. Quando si è avuto a che fare con geoforme i cui limiti tendevano, a grande scala, a confondersi con lo sfondo, è stato effettuato un conteggio dei pixel²⁴.

2.3- Trattazione estensiva dei dati numerici e geomorfologici.

2.3 a)- Approfondimento di alcuni aspetti morfologici del cratere.

Sfruttando ArcMap, ArcScene, ArcCatalog e con l'aiuto di un foglio Excel è stato possibile elaborare una grande quantità di dati e sovrapporli alle foto studiate. In più avendo a disposizione i dati georeferenziati e i DEM²⁵ della zona è stato possibile tracciare alcuni profili altimetrici sia su grande che su media scala (Fig.12). Su piccola scala il profilo altimetrico di molte doline risulta essere conico (cosa difficilmente possibile), probabilmente il programma non riesce a processare una piccola mole di dati e ricavarne interpolazioni coerenti. Eseguendo un profilo longitudinale dell'intero cratere, è evidente il profilo bulged di quest'ultimo. Un grosso rigonfiamento asimmetrico occupa la quasi interezza della zona. Il primo profilo proposto è stato marchiato con le lettere A e

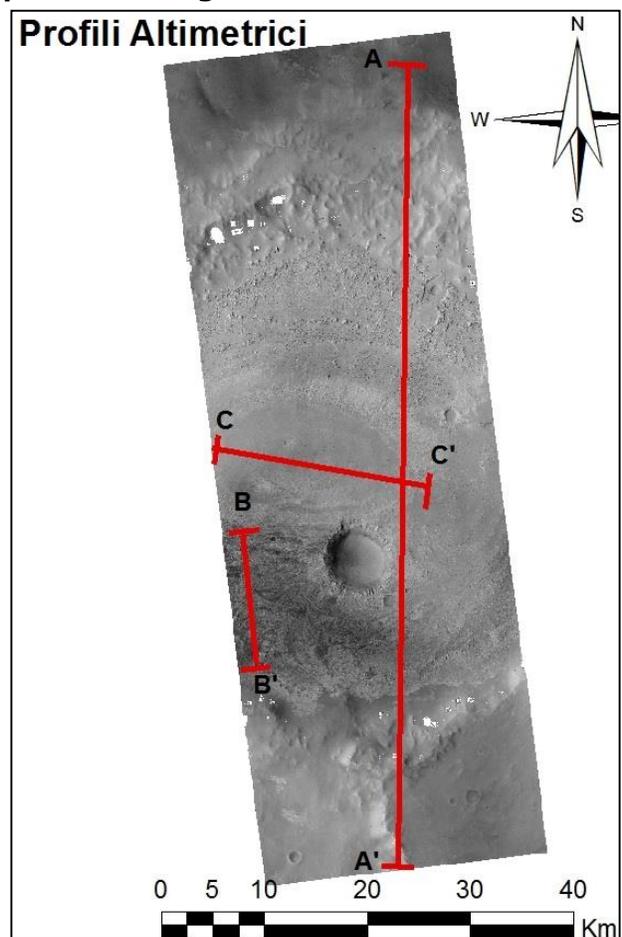


Figura 12- Serie di profili altimetrici utili a comprendere meglio la morfologia del terreno dentro il cratere.

²⁴ Avendo il valore di scaled pixel width il procedimento si risolve ad una banale moltiplicazione del numero dei pixel contati come facenti parte della forma studiata per il numero sopracitato: $L = (N. \text{Pixel} \times \text{SPW})$.

²⁵ *Digital Elevation Model*. Si associa ad ogni pixel una quota assoluta. Differisce dal DTM (*Digital Terrain Model*) che viene ricostruito grazie alle isoipse poiché include l'altitudine di oggetti non facenti strettamente parte del geoide come alberi o edifici.

A' (Fig. 13) .

Taglia longitudinalmente il cratere e può aiutare a meglio visualizzare il rigonfiamento centrale dato dal diapiro che risale e interseca la superficie topografica. Inizialmente il profilo sale fino a raggiungere un picco che coincide con il bordo nord del complesso craterico, si ha poi una brusca discesa²⁶ fino a toccare un minimo che potrebbe rappresentare la base altimetrica cui giaceva il cratere prima che il fenomeno di diapirismo deformasse in maniera profonda la zona. Proseguendo si possono notare dei picchi relativi che si scostano dalla altezza media di anche 100-200 metri: sono la zona montuosa riportata nella mappa nella figura 10. Andando ancora oltre si nota una lenta ma costante risalita e una forma a cupola, che rappresenta ad oggi la più forte prova di diapirismo nella zona, è infatti una morfologia tipica del fenomeno; c'è quindi un altro minimo altimetrico prima di una brusca salita che è il bordo Sud del cratere stesso.

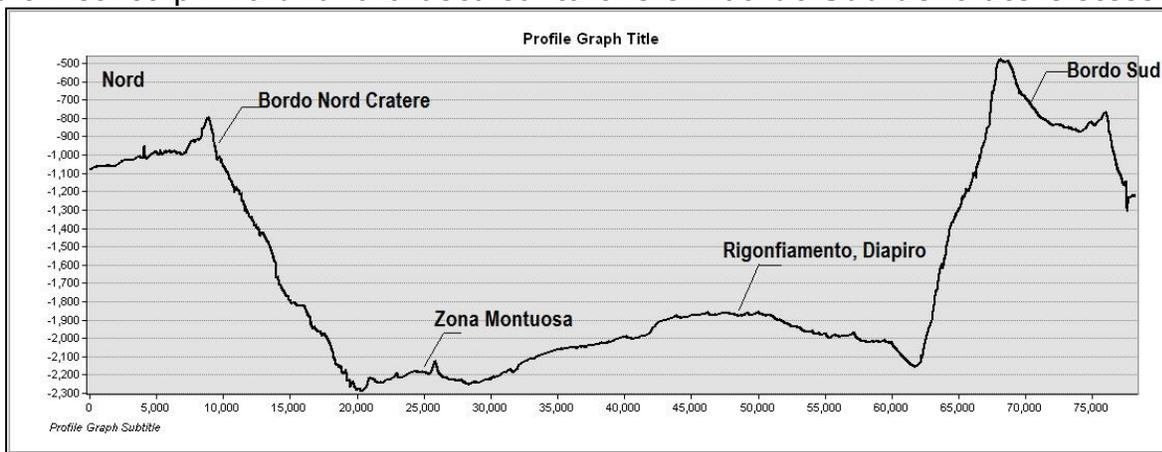


Figura 13- Profilo A-A' longitudinale dell'intero cratere, realizzato con ArcMap.

Il secondo profilo è quello con le iniziali B e B' (Fig. 14). La sua traccia è stata scelta per poter meglio comprendere l'andamento altimetrico della zona fittamente stratificata. In essa sono presenti sia alcuni crateri da impatto sia alcuni presunti crolli dovuti al carsismo²⁷.

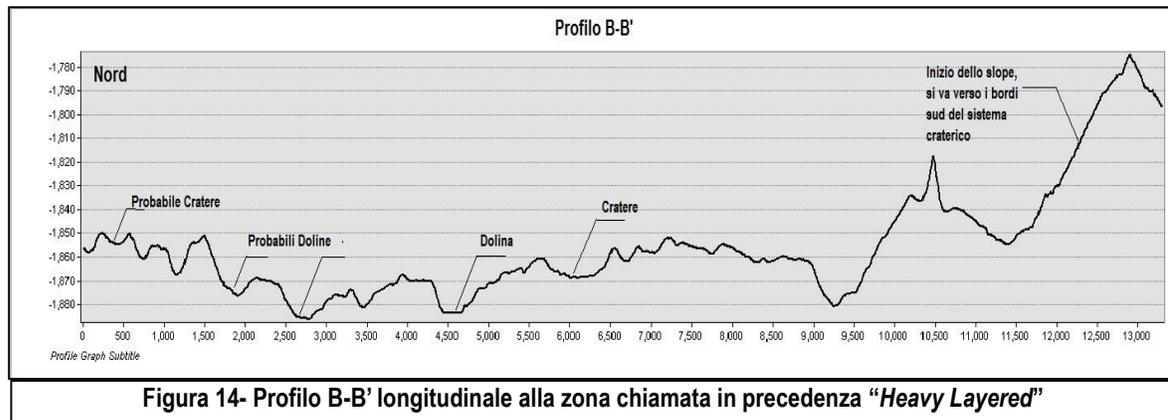
In foto questa differenza si può notare grazie alla forma geometrica e a dei particolari legati al colore, infatti se è presente un bordo consistente (segno per eccellenza dell'origine meteorica della geofoma studiata) si potrà notare una fascia omogeneamente più chiara, tendente al bianco inanellata attorno al sito d'impatto. Il profilo inizia da una parte più interna a nord e si dirige verso una più esterna a sud, fino a toccare la scarpata.

²⁶ Baldo nel suo lavoro del 2014 "*Study of bulged craters in Arabia Terra (Mars)*" analizza in maniera più approfondita lo slope, i bordi e i sedimenti di ejecta del cratere, che in questa sede sono tenuti meno in considerazione.

²⁷ Non per forza un carsismo post-impatto. Per il buon fine della ricerca sarebbe sufficiente riuscire ad essere moderatamente sicuri che o prima o dopo nella storia geologica della zona vi sia stata acqua liquida in contatto con i solfati, poco importa se questo contatto è avvenuto in precedenza, contemporaneamente o successivamente allo schianto dell'asteroide che ha dato inizio alla fase diapirica del luogo.

Si inizia con un motivo sinusoidale a causa di quelli che sono presumibilmente o piccoli crateri o grandi doline alternati fra loro. Da poco oltre la metà del tracciato la situazione cambia e si passa a una superficie relativamente piatta e senza scabrezza particolare. Verso la fine come appena detto c'è una significativa crescita di quota a causa del pendio che porta al bordo più a sud. Nella disamina delle varie forme non va dimenticata la difficoltà ulteriore presente in un pianeta privo di atmosfera come Marte: alcuni crateri da impatto possono non presentare i classici bordi rialzati in alcune specifiche condizioni. Nel nostro caso questo può avvenire a causa di uno scioglimento massivo dello strato di evaporiti che porta alla formazione di grandi cavità sotterranee che però non raggiungono la superficie topografica. Quando un asteroide di piccole o medie dimensioni impatta contro un terreno che ha solo qualche decina di metri di roccia solida a sostenere l'urto, può non riuscire a reggere lo sforzo e opporre la resistenza necessaria alla formazione di un vero e proprio cratere da impatto. In questi casi la roccia si "buca" e il profilo che si ottiene da tale fenomeno è molto simile a quello di una dolina²⁸.

La validità dei dati forniti da questo fenomeno relativi a questo particolare studio non è compromessa poiché si sta ricercando una possibile interazione fra acqua e solfati e sia che essa si esprima sotto forma di carsismo superficiale che di profondità l'interazione effettivamente c'è, inoltre il meteorite che buca la crosta tende a fermarsi (avendo perso



potenza nel primo impatto) al normale livello imposto dal carsismo della zona.

Il terzo e ultimo profilo (iniziali C e C') è frutto di un'idea di Baldo che ha evidenziato nel suo lavoro come la risalita del diapiro sia più nitida nel caso in cui si tracci un profilo latitudinale all'interno della zona centrale, più ricca di crolli e doline (Fig. 15). Il fatto che questa proiezione si quella che meglio mette in evidenza un rigonfiamento diapirico non implica che sia anche la zona più alta in assoluto, primato che spetta all' *heavy layered*.

²⁸ Il meccanismo spiegato è stato largamente studiato sia sulla terra sia su altri pianeti (Martellato et al., 2012)



Si inizia con una serie di piccoli incavi di origine molto probabilmente carsica che punteggiano il profilo nel primo tratto in salita, la forma a cupola si chiude verso i tre quarti del tracciato quando incontra un improvviso e notevole innalzamento delle quote dovuto a una zona localmente montuosa.

Una grande difficoltà nello studio morfometrico di queste geoforme è stata distinguere quelle più piccole con diametro dai 3-4 pixel in giù: non è infatti possibile affermare con certezza la loro genesi. Nella maggior parte dei casi in mancanza di sicurezza sono state tralasciate, ma quelle che più assomigliavano per profilo, profondità e colore a dei crolli carsici sono state segnate nel progetto ArcMAP come "elementi non risolvibili o dubbi". Nel conteggio della densità di punti che è stato fatto e verrà presentato più avanti, anche esse sono state incluse.

Sono numericamente almeno il doppio di quelle misurate e si concentrano nella zona centrale e in quella "heavy-layered".

Ve n'è qualcuna anche nella fascia intermedia fra le aree sopracitate, ma in quantità decisamente minore. All'interno dello studio compiuto si è pensato opportuno di analizzare meglio proprio la fascia intermedia che si colloca tra il perimetro centrale e quello diffusamente stratificato: sono presenti una serie di rugosità e piccole creste che assomigliano molto a pattern corrosivi. Essi potrebbero rappresentare, nel caso in cui l'altezza di queste creste fossero abbastanza uniformi (all'interno dello stesso ordine di grandezza) il livello erosivo di base dal quale il carsismo è iniziato, per poi trovare vie preferenziali di deflusso e lasciare quasi inalterate le asperità in questione.

Dove è stato possibile è stato misurato tramite profilo altimetrico la quota assoluta delle singole doline e delle singole creste. Questo non sempre è stato possibile a causa di forme troppo piccole o difficilmente riproducibili dal programma (risoluzione troppo bassa per determinare con esattezza un'altezza affidabile). E' bene ricordare che all'interno del cratere tutti i dati altimetrici sono negativi in quanto si è sotto all'ellissoide di riferimento marziano.

2.3b) -Disquisizione dei risultati ottenuti dalle misure sulle doline.

Le tabelle contenenti i dati rilevati sono allegate in appendice per questioni di spazio e formattazione del testo.

Nell'analisi degli elementi misurati si è adoperato come parametro principale di lunghezza il semiasse minore, perché più significativo nel determinare l'appartenenza di una geoforma ad una famiglia piuttosto che ad un'altra²⁹.

Dai dati ricavati sperimentalmente si possono compiere una serie di osservazioni:

1) Il numero di presunte doline misurate nella zona più interna, che è quella della risalita di diapiro è maggiore a quello di ogni altro punto della mappa. Con un numero di 116 forme misurate più 301 incerte o non risolvibili, comunque presenti, si arriva ad una densità di forme carsiche su chilometro quadro³⁰ pari a 2,73 (417 doline / 152.8 Km²).

Questo numero è effettivamente molto alto se paragonato alle altre aree principali: quella *heavy-layered* si ferma ad un 0.51 dol/Km² (175 dol / 345.1 Km², numero forme incerte o non risolvibili pari a 102) e quelle a *yardangs* addirittura a 0.03 dol/Km² (18 dol / 603.7 Km², numero forme incerte o non risolvibili pari a 0).

2) Sembrano esserci dalle due alle quattro famiglie principali di forme carsiche.

Le prime, piccole e diffuse sono per lo più all'interno della zona centrale e il loro alto numero e relativa esiguità in termini di lunghezza del semiasse minore le distinguono nettamente dalle seconde, presenti nella zona *heavy-layered*, aventi semiassi minori più estesi e profondità più elevata. Ci sono poi le zone unclassified, quelle *yardangs* e *mounds* hanno meno dati e sembrano essere correlabili ad una delle due famiglie principali. Per fare un confronto più obiettivo fra le misure e per poterle visualizzare meglio sono state inserite in due grafici tramite l'uso di Excel (Fig. 16 e 17).

²⁹ Il semiasse maggiore infatti potrebbe essere il risultato di più crolli collegati fra loro e non rappresentare dunque un'unica forma, mentre il semiasse minore più difficilmente si presta ad errori di questo tipo.

³⁰ La misurazione delle aree è stata fatta con lo strumento "misura poligonale" di ArcGis.

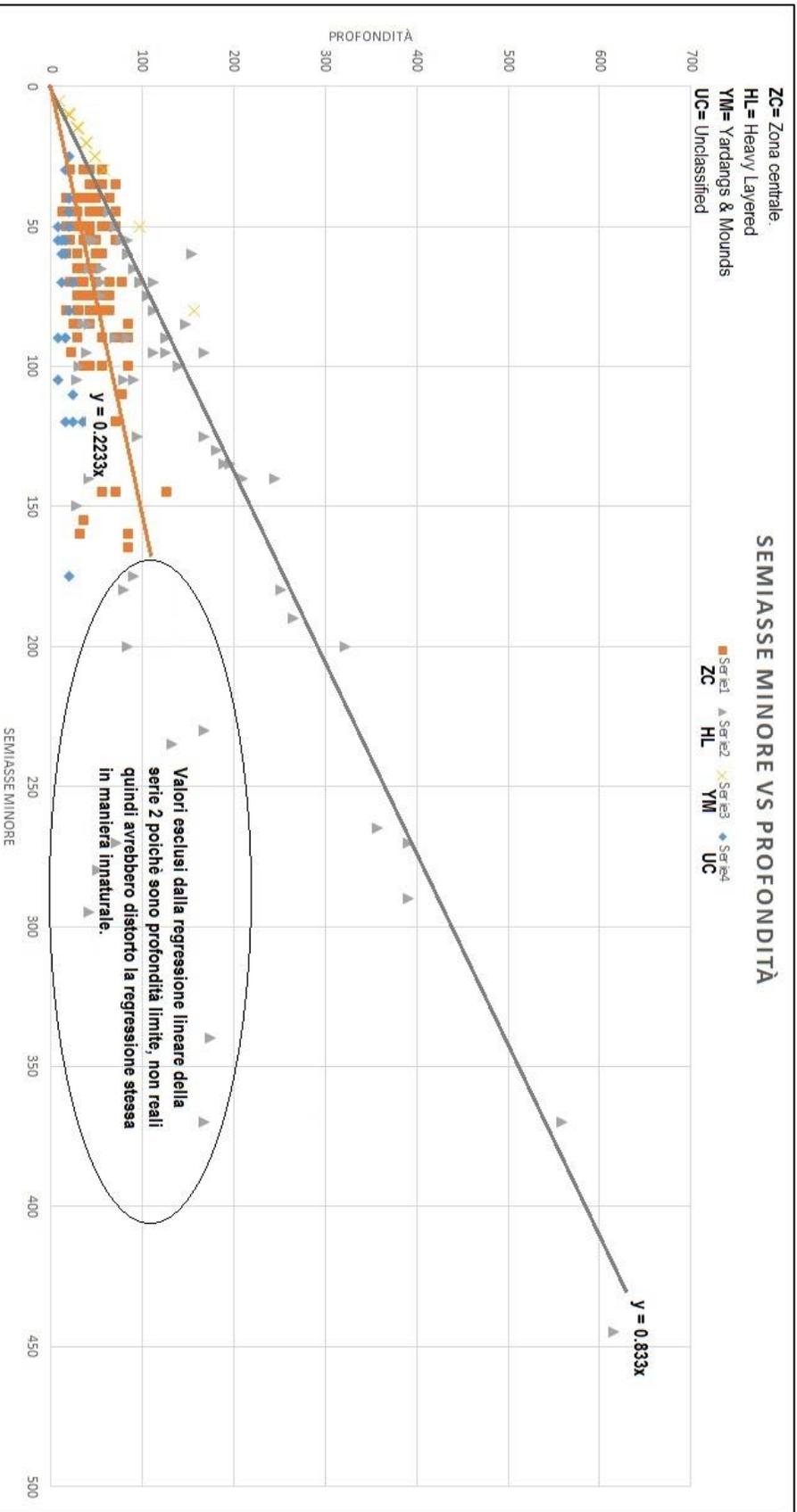


Figura 16- La famiglia di doline della zona centrale è stipata nel primo quadrante, insieme a molte delle "unclassified", ad esse correlabili. Molte doline heavy-layered sembrano essere consistentemente diverse per semiasse minore e profondità.

2.3 c) -Metodi statistici per lo studio dei dati ottenuti.

Nel grafico pare abbastanza ovvia l'appartenenza a famiglie³¹ distinte di doline cosa che sembra messa più in evidenza se si compone lo stesso grafico con i valori medi.

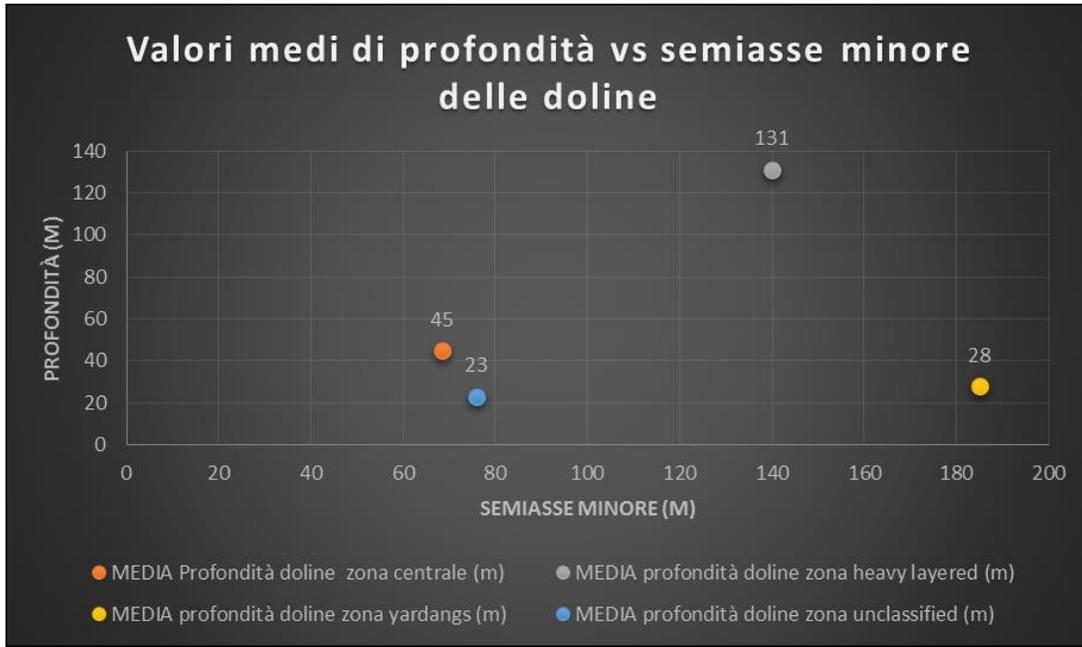


Figura 17-Valori medi di profondità e semiassi. I valori della zona *yardangs* sono troppo pochi per poter essere statisticamente significativi, ma sono stati inseriti in ogni caso. I valori delle doline unclassified sembrano essere correlabili a quelli della zona centrale, come ripetuto nella didascalia del grafico

Ma da un punto di vista statistico è lecito affermare che i vari gruppi sono entità distinte?

Per potere rispondere al quesito è necessario eseguire qualche test statistico. Il metodo più semplice e immediato sarebbe quello di calcolare la media e lo scarto quadratico medio dei dati di semiasse minore e profondità della dolina associata per ogni categoria, quindi processarli tramite normalizzazione e test di tipo gaussiano per capire che probabilità ci sia che i membri di un gruppo siano effettivamente diversi da quelli di un altro.

Questo intento di procedere nel modo più semplice possibile si scontra però immediatamente contro un'evidenza di stampo matematico-statistico. Verificando rapidamente che media, mediana e moda non coincidono, si comprende che nessuno dei gruppi ha distribuzione normale e quindi i test più semplici sono automaticamente esclusi.

³¹Con i termini famiglie distinte non si intende la totale mancanza di affinità fra i processi che hanno portato alla formazione di queste forme, quanto a delle mere differenze morfometriche che potrebbero, o meno, essere conseguenza di processi leggermente diversi o non coevi, cosa che è comunque difficile da valutare in questa sede.

Per sfruttare i molti dati raccolti da un punto di vista statistico si possono sfruttare altri metodi. Tra i più efficaci c'è quello dell'analisi della varianza o ANOVA (*ANalysis Of VAriance*).

Nella teoria della probabilità la varianza di una variabile è una funzione indicata come $\text{Var}(x)$ ³² che fornisce una misura della variabilità dei valori assunti dalla nostra variabile casuale e più precisamente di quanto essi si distacchino dal valore atteso. La varianza è pari a:

$$\text{Var}(x) = S^2$$

Equazione 2- S è pari allo scarto quadratico medio.

Nella statistica vera e propria la varianza è invece un indice di variabilità e serve per descrivere in maniera sintetica e sistematica una distribuzione statistica, in particolare di quanto i suoi valori siano lontani da un valore centrale (media).

L'ANOVA viene applicato a dei gruppi di dati tramite la scomposizione della varianza totale in varianza interna ai gruppi stessi (varianza *within*) e varianza fra i vari gruppi (varianza *between*). Se la variabilità interna ai dati è molto elevata allora è probabile che la variabilità fra gli insiemi di dati, quando presente, sia frutto non di un'effettiva diversità quanto della stessa variabilità interna. Per spiegare il fenomeno in maniera più sintetica si può dire che quando la varianza *within* è troppo elevata rispetto a quella tra i gruppi, un'eventuale differenza fra essi non è abbastanza significativa da essere considerata una disconformità non dovuta al caso.

Bisogna ora passare alla descrizione vera e propria del metodo: Siano:

- $SQQ_b = \sum_{i=1}^k n_i * (m_i - m)^2$ la varianza *within*;
- $SQQ_w = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_j} (x_{ij} - m_j)^2$ la varianza *between*;
- $SQQ_{tot} = SQQ_b + SQQ_w$ la varianza totale.

Con **k** uguale al numero dei gruppi in cui compiere l'analisi, **m_i** e **m** sono rispettivamente la media del j-esimo gruppo e la media generale di tutti i gruppi. **n_j** e **n** rispettivamente il numero di campioni del j- esimo e il numero totale di campione di tutti i gruppi. **X_{ij}** è poi l'elemento i del gruppo j.

Bisogna poi dividere tutte le precedenti somme di quadrati per i gradi di libertà concessi dalle due varianze, che nel caso di quella *within* è pari a (k-1), mentre in quello della *between* è uguale a (n-k). Infine c'è da calcolare il rapporto tra le somme dei quadrati divisi per i gradi di libertà nel modo seguente:

$$F = \frac{\frac{SQQ_b}{k-1}}{\frac{SQQ_w}{n-k}} = \frac{SQQ_b(n-k)}{SQQ_w(k-1)}$$

³² $\text{Var}(x)$ nel caso in cui la nostra variabile sia una x, ma è solo una maniera come un'altra di nominare un parametro che ci interessa.

Il valore che viene così calcolato va confrontato con i valori della F di Fisher³³. Se F risulta significativo³⁴ allora SQQ_b e SQQ_w sono relativamente simili e in caso di differenze fra i due gruppi esse si possono presumere come vere, viceversa queste differenze sono solo frutto del fatto che SQQ_b è troppo grande rispetto alla varianza *between*.

Giunti a questo punto ci si può chiedere: quali gruppi rendono significativa la F di Fisher e quali invece tendono a non farlo?

Per rispondere alla domanda si usa il test di Bonferroni che permette di integrare il test precedentemente condotto. Esso calcola tutte le diversità fra le varie medie dei gruppi comparandoli uno ad uno.

Per fare ciò bisogna paragonare il valore t di Bonferroni (valore tabulato) con quello di un'equazione:

$$t_{\text{bonferroni}} = \frac{m_i - m_j}{\sqrt{S_e^2 \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_j} \right)}}$$

Con $S_e^2 =$ varianza *within*.

Un altro buon metodo di analisi dei dati è l'analisi del discriminante introdotta dal matematico britannico Fisher nel 1936. Essa è definita come un'analisi statistica multivariata che permette di attribuire alcuni campioni di una popolazione ad un determinato gruppo avente certi parametri. Nel caso di questa tesi è utile proiettare i dati estrapolati da questa analisi su un grafico che è la proiezione del piano in cui i dati sono massimamente sparpagliati fra loro e in base a questa dispersione trarre conclusioni di vario genere.

Per rendere tutti questi calcoli agevoli si è pensato di svolgerli con l'ausilio del software SPSS con seguente esportazione dei risultati su tabelle Excel, qui di seguito riportate solamente in parte per questioni di spazio e formattazione.

I risultati completi sono disponibili nell'appendice.

Si è voluto confrontare solo i valori di Semiasse minore e profondità delle doline, divisi ovviamente per aree di campionamento.

Per una facile lettura delle tabelle che verranno inserite bisogna sapere che:

- il gruppo 1 è quello delle doline nella zona centrale;
- il gruppo 2 è quello delle doline nella zona *heavy-layered*;
- il gruppo 3 è quello delle doline nella zona *Mounds*;
- il gruppo 4 è quello della zona a *yardangs*;
- Il gruppo 5 è un gruppo di controllo con tutti i campi lasciati bianchi per

³³ La distribuzione di Fisher (anche detta di Fisher-Snedecor) è una distribuzione di probabilità che regola il rapporto ricalcolato fra due variabili casuali che seguono due determinati distribuzioni X^2 (chi quadro).

³⁴ La significatività di un dato è ritenuta valida per supportare l'ipotesi non nulla solo nel caso in cui sia minore di 0.05, in caso contrario l'ipotesi nulla è sempre assunta come vera.

osservare come il programma processava le caselle prive di dati.
 -il gruppo 6 è la zona *unclassified*.

Questa prima tabella non fa altro che presentare somma e media dei quadrati calcolati secondo le formule riportate precedentemente e determinare se le diversità fra le medie dei gruppi sono complessivamente significative. In questo caso sia per i valori di semiasse minore che per quelli di profondità hanno una significatività superiore all' 1 per mille.

		Somma dei quadrati	df	Media dei quadrati	F	Sig.
Semiasse minore	Fra gruppi	431312.382	4	107828.095	11.594	.000
	Entro gruppi	2111125.394	227	9300.112		
	Totale	2542437.776	231			
Profondità	Fra gruppi	449113.422	4	112278.355	26.997	.000
	Entro gruppi	944058.901	227	4158.850		
	Totale	1393172.323	231			

Tabella 2- Calcolo della F di Fisher dei gruppi di dati e relativa significatività delle differenze trovate.

Questo risponde in maniera un po' sterile alla domanda fatta qualche pagina indietro: si è dimostrato che complessivamente i gruppi hanno una diversità oggettiva, ma quali fra questi gruppi sono effettivamente dissimili fra loro?

Nella tabella 3 è possibile notare che per quel che concerne i valori di semiasse minore, il primo gruppo (zona centrale) è diverso sicuramente dal secondo (*heavy layered*) e dal quarto (*yardangs*). Il secondo gruppo è sicuramente diverso dal primo. Il quarto gruppo è diverso dal primo e dal sesto (*unclassified*). Il sesto è diverso dal quarto.

Infine il terzo gruppo non è diverso da nessuno, ma bisogna ricordare che esso ha tre soli dati e quindi, a meno di valori estremamente maggiori o estremamente minori, non può cambiare di molto la media dei quadrati totali e quindi nel test di Bonferroni risulta come uguale a tutti gli altri gruppi.

Nella tabella 4 che riguarda questa volta la profondità delle doline è possibile dire che il primo e il secondo gruppo sono diversi, il terzo non è diverso da nessuno (sempre per i motivi sopracitati). Il secondo è sicuramente diverso dal primo, dal quarto e dal sesto. Il quarto è diverso dal secondo così come il sesto.

Variabile dipendente	(I) Zona	(J) Zona	Differenza fra medie (I-J)	Errore std.	Sig.	Intervallo di confidenza 95%	
						Limite inferiore	Limite superiore
Semiasse minore	1	2	-72,437*	14	0.00	-113	-31
		3	-22	56	1.00	-181	138
		4	-132,646*	24	0.00	-202	-63
		6	-8	22	1.00	-71	54
	2	1	72,437*	14	0.00	31	113
		3	51	57	1.00	-110	212
		4	-60	25	0.19	-132	12
		6	64	23	0.06	-1	130
	3	1	22	56	1.00	-138	181
		2	-51	57	1.00	-212	110
		4	-111	60	0.66	-282	59
		6	13	59	1.00	-155	181
	4	1	132,646*	24	0.00	63	202
		2	60	25	0.19	-12	132
		3	111	60	0.66	-59	282
		6	124,372*	30	0.00	38	210
6	1	8	22	1.00	-54	71	
	2	-64	23	0.06	-130	1	
	3	-13	59	1.00	-181	155	
	4	-124,372*	30	0.00	-210	-38	

Tabella 3- Calcolo del test di Bonferroni per i valori di semiasse minore

Questi dati statistici permettono di poter affermare con certezza che le doline della zona *heavy layered* sono sia per semiasse minore che per profondità sostanzialmente diverse da quelle della zona centrale. Quelle della zona *unclassified* sono correlabili a quelle della zona centrale in quanto non presentano diversità con essa, mentre le doline nella zona delle *yardangs* hanno profondità comparabile a quelle dell'area centrale, ma semiasse sostanzialmente diverso³⁵.

Passando infine alla analisi del discriminante si ha che solo il 53.4% dei campioni risulta essere appartenente alla categoria giusta. Questo dato ad una prima lettura può essere insensato poiché si è deciso arbitrariamente di dividere in zone l'analisi delle doline e dunque non si può disquisire della bontà dell'attribuzione ad un gruppo piuttosto che l'altro essendo condizionati nella scelta dal perimetro di un'area fisica geografica.

³⁵ Avendo la zona a *yardangs* un numero di dati non molto alto (18) anche un singolo risultato anomalo può modificare radicalmente la media, quindi la sostanziale diversità dei semiassi può spiegarsi in questo modo. Allo stesso tempo non è possibile affermare tutto ciò con certezza, quindi da un punto di vista prettamente scientifico, sebbene la correlazione delle forme carsiche delle *yardangs* per profondità sia comparabile a quelle della zona centrale, c'è diversità.

Tuttavia rappresentando il risultato di questo test nel diagramma del piano con la proiezione dei punti massimamente dispersi (Fig.18), si possono elaborare alcuni commenti.

Variabile dipendente	(I) Zona	(J) Zona	Differenza fra medie (I-J)	Errore std.	Sig.	Intervallo di confidenza 95%	
						Limite inferiore	Limite superiore
Profondità Dolina	1	2	-86	10	0.00	-113	-58
		3	-29	38	1.00	-136	78
		4	25	16	1.00	-21	71
		6	28	15	0.54	-13	70
	2	1	86	10	0.00	58	113
		3	57	38	1.00	-51	164
		4	111	17	0.00	63	159
		6	114	15	0.00	71	158
	3	1	29	38	1.00	-78	136
		2	-57	38	1.00	-164	51
		4	54	40	1.00	-60	168
		6	58	40	1.00	-55	170
4	1	-25	16	1.00	-71	21	
	2	-111	17	0.00	-159	-63	
	3	-54	40	1.00	-168	60	
	6	3	20	1.00	-54	61	
6	1	-28	15	0.54	-70	13	
	2	-114	15	0.00	-158	-71	
	3	-58	40	1.00	-170	55	
	4	-3	20	1.00	-61	54	

Tabella 4- Test di Bonferroni per i valori di Profondità.

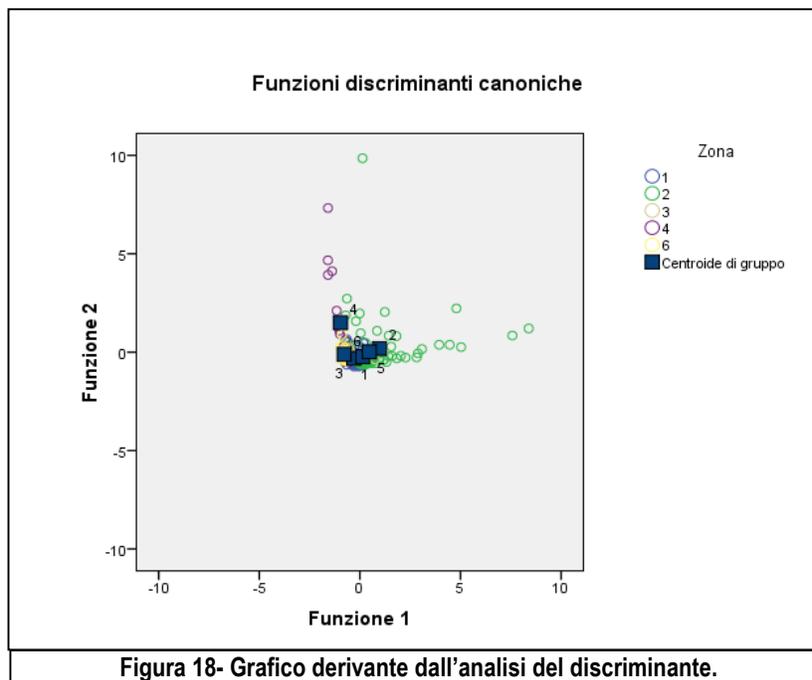


Figura 18- Grafico derivante dall'analisi del discriminante.

Il fatto che i dati siano poco dispersi, e quindi non troppo dissimili fra loro può indicare che il processo che ha dato luogo ai fenomeni non è così diverso come sembrava in un primo momento con la semplice analisi della varianza. Esistono delle famiglie di doline diverse, ma il grafico indica che esse non sono troppo dissimili fra loro.

Questo potrebbe voler indicare che il processo che ha portato alla formazione delle strutture analizzate sia simile e che le differenze dipendano dalla posizione rispetto alla risalita del diapiro centrale.

2.3 d)– Confronto delle altezze assolute fra le doline di zone diverse e studio della fascia intermedia.

Un dato che è stato acquisito in un secondo momento durante lo svolgimento di questa tesi, è l'altezza assoluta delle doline delle varie zone. Poter confrontare il livello di base al quale si raccordano le forme carsiche tra più zone sarebbe molto importante e potrebbe fornire indicazioni di vitale importanza.

Per tabulare questi dati è stato necessario ricorrere all'estensione di ArcMAP già usata per realizzare le figure 14,15,16. Sono stati fatti, laddove possibile, dei profili in piccola scala per ognuna delle doline. Questo ha generato molti risultati improbabili o paradossali che sono stati prontamente scartati, solo le doline con profilo accettabile al di là di ogni ragionevole dubbio hanno il loro valore di altezza assoluta registrato. Questo problema causa una latente insufficienza di dati a causa della quale non avrebbe molto senso fare calcoli statistici come quelli usati in precedenza. Vale la pena tuttavia calcolare delle medie per ogni zona e cercare di capire un po' come varia questa altezza assoluta.

Bisogna partire dicendo che l'altezza assoluta in questa tesi viene intesa come il punto quotato più basso che giace sul profilo di una dolina. La maggioranza dei dati di questo tipo è concentrata nella zona centrale con 50 campioni e in quella *heavy layered* con 35 campioni. Le altre aree hanno veramente pochi dati e, essendo la significatività di questo approfondimento già compromessa dai possibili errori intrinseci³⁶, si è voluto evitare di aggiungere la comparazione fra più zone aventi magari 2-3 valori ciascuna e come tali per nulla rappresentativi.

La media della zona centrale equivale a -1960 metri con un errore di 40 metri. Il *range* al quale si collocano questi campioni è tra -2000 e -1920 metri sul livello dell'ellissoide marziano di riferimento.

La media della zona *heavy layered* equivale invece a -1900 metri con un errore di 60 e di conseguenza il *range* al quale si collocano le doline dell'area è tra -1960 e -1840 (Fig. 19).

³⁶ I possibili errori intrinseci riguardano l'accuratezza del DEM nei singoli punti che potrebbe non rispecchiare completamente la realtà e l'accuratezza del programma nel realizzare profili su piccola scala che, come già spiegato nel capitolo 2.3 a) non è buona.

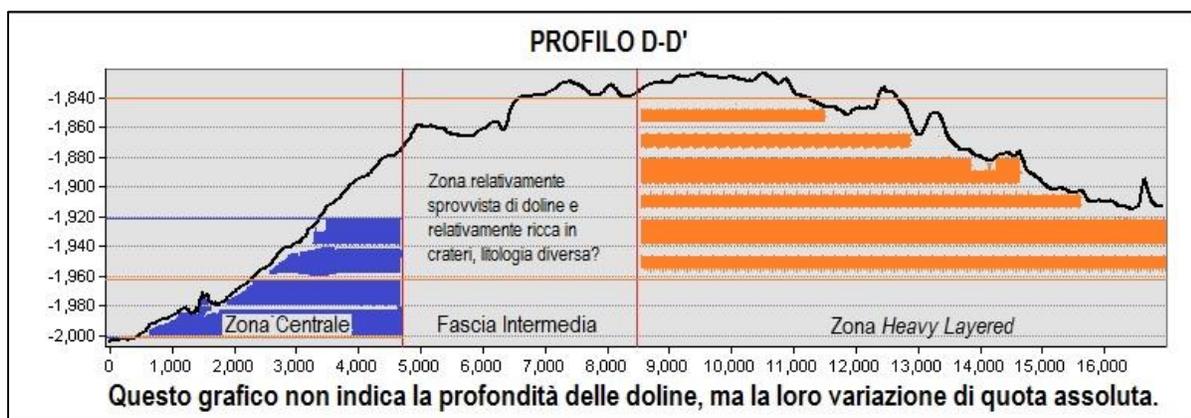
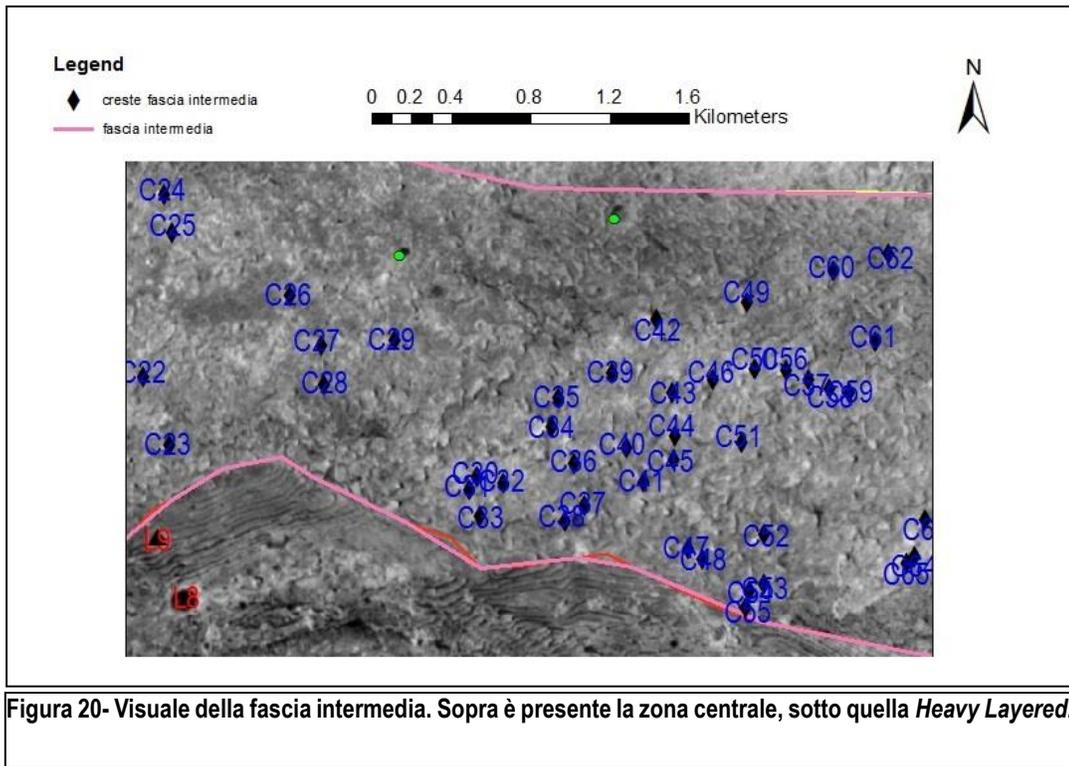


Figura 19- Ulteriore profilo longitudinale che mette in evidenza l'altezza assoluta delle forme carsiche studiate. La sua traccia non è stata inserita nella figura 13 perché era quasi totalmente sovrapposta alla traccia del profilo A-A'.

La prima cosa che salta all'occhio è che nonostante le doline della zona *heavy layered* siano tendenzialmente più profonde (come dimostrato nel precedente *cluster* di dati) giacciono ad un'altezza assoluta maggiore. Questo avviene perché esse sono collocate nella zona più elevata del cratere, in un'area di appena un centinaio di metri più alta rispetto alla zona centrale. Questo avviene perché il *bulge* è asimmetrico nel cratere e alza preferenzialmente la parte più a sud. Si hanno infatti le quote più alte in corrispondenza dell'inizio dell'area soprannominata *Heavy Layered*. Il fatto che le doline della zona centrale siano meno profonde e più piccole potrebbe indicare che siano più giovani, oppure che il processo che ha portato alla loro formazione sia più lento e meno efficace.

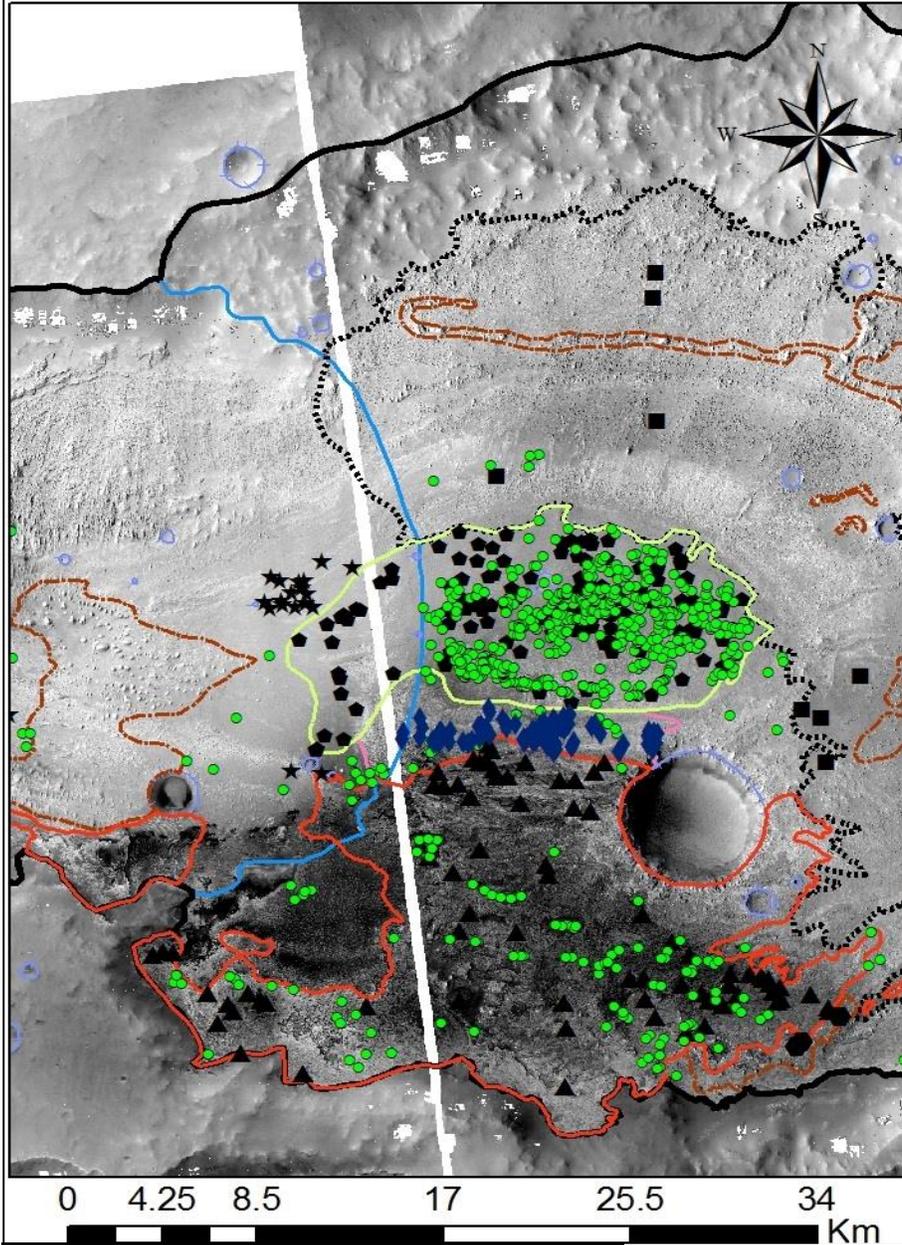
Nella figura 20 è stata introdotta una zona supplementare fino ad ora poco menzionata: la fascia intermedia (Fig. 20). Questa è una zona che si colloca tra quella centrale e quella *heavy layered* e presenta caratteristiche miste a queste due. La maggior parte delle doline presenti entro essa sono del tipo non risolubile quindi non si hanno misure a riguardo, ma osservando la geomorfologia superficiale si possono notare delle bande concentriche che testimoniano la presenza anche in questo luogo del diapiro e una serie di scabrosità e rugosità che vanno a formare un sistema di piccole creste e depressioni varie. Misurando l'altezza di queste creste e facendone la media si possono ottenere due risultati differenti di deviazione standard che indicano due cose differenti: se la deviazione standard è relativamente piccola si può affermare che tutte le forme hanno un'altitudine simile e che quindi rappresentavano il piano di base nel quale è avvenuta carsificazione massiva, viceversa le collinette hanno un'origine di tipo diverso e non possono contribuire in alcun modo allo svolgimento di questa tesi.

La media dell'altezza è di 30 metri, mentre la deviazione standard è di 9 metri. Sebbene ci si mantenga nello stesso ordine di grandezza, un parametro di dispersione di 9 metri su uno di locazione di 30, non implica per forza una correlazione.



Prima di passare ad un nuovo argomento è auspicabile poter riassumere tutte le informazioni discusse fino ad adesso in una mappa riassuntiva completa del cratere 12000088 (Fig. 21).

Mappa completa con luoghi prelievo campioni



Legenda

- | | |
|------------------------------------|-------------------------|
| ◆ creste fascia intermedia | — Zone heavy layered |
| ● doline non risolvibili-non certe | — Limite doppio cratere |
| ★ doline fuorizona | — Zone a Monti |
| ■ Doline zona yardangs | ⋯ Zone a Yardangs |
| ⬠ Doline zone monti | ⊕ Crateri secondari |
| ▲ Doline nella zona heavy layered | — cratere interno |
| ● doline dentro zona interna | — fascia intermedia |
| — Zona doline piccole e diffuse | |

Figura 21- Mappa che racchiude tutte le misurazioni compiute all'interno del cratere. Ogni contrassegno (tranne quelli verdi) equivale ad una misurazione di semiasse maggiore, semiasse minore e lunghezza dell'ombra, poi convertita in profondità.

2.4– Confronto del modello di diapirismo salino marziano con analogo terrestre.

Un ottimo modo per poter capire se un certo fenomeno è avvenuto o è tuttora in atto su pianeti extraterrestri, è cercare un esempio del fenomeno stesso sulla superficie terrestre. Quest'ultimo deve avere quante più somiglianze possibili con quello che si cerca di studiare per ridurre il più possibile le variabili aleatorie che possono entrare nel sistema. Per quanto concerne questa tesi un buon esempio di carsismo su evaporiti, estensivo e con grande numero di doline affioranti e ben visibili è quello collocato a Baisun-Tau nella zona più orientale dell'Uzbekistan (per la precisione all'interno della regione *Surkhandar'inskii*). L'intero complesso è costituito da due catene montuose principali la *Ketmen Chapyt* e la *Hodja Gur Gur Ata*.

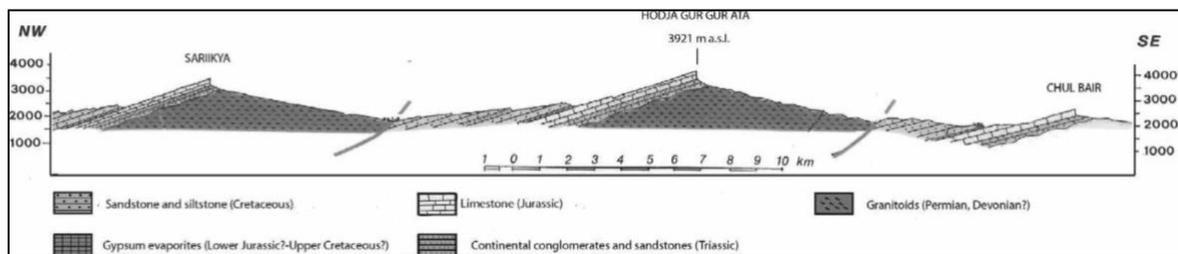


Figura 22- Situazione stratigrafica tettonica della zona. La catena centrale è Hodja Gur Gur Ata. Tratto da Tsurikhin et al. 2013

Attualmente l'assetto tettonico della zona si mostra a fortissima prevalenza di monoclinali separate da sovrascorrimenti (Fig. 22), ma si pensa che in passato il sistema fosse organizzato in più anticlinali con faglie sub parallele agli assi delle pieghe.

Al tetto di queste monoclinali sarebbero presenti delle areniti e argilliti cretache che sono però state erose successivamente e si ritrovano solo nelle parti più altimetricamente basse delle monoclinali. Subito sotto ci sono dei banchi gessosi di difficile attribuzione temporale: si va infatti dal Giurassico superiore al Cretaceo inferiore. Sotto queste evaporiti sono presenti strati carbonatici giurassici e andando ancora più in giù si incontrano prima dei conglomerati terrigeni del Triassico e poi delle rocce granitoidi del Permiano.

Il carsismo ha ovviamente preso posto negli strati evaporitici e si spinge al massimo nella zona a calcari. La zona è conosciuta anche per un carsismo ipogeo con alcune delle grotte più profonde del sud-Asia. Sono disponibili alcune teorie che spiegano il probabile meccanismo di carsificazione della zona (Tsurikhin et al., 2013).

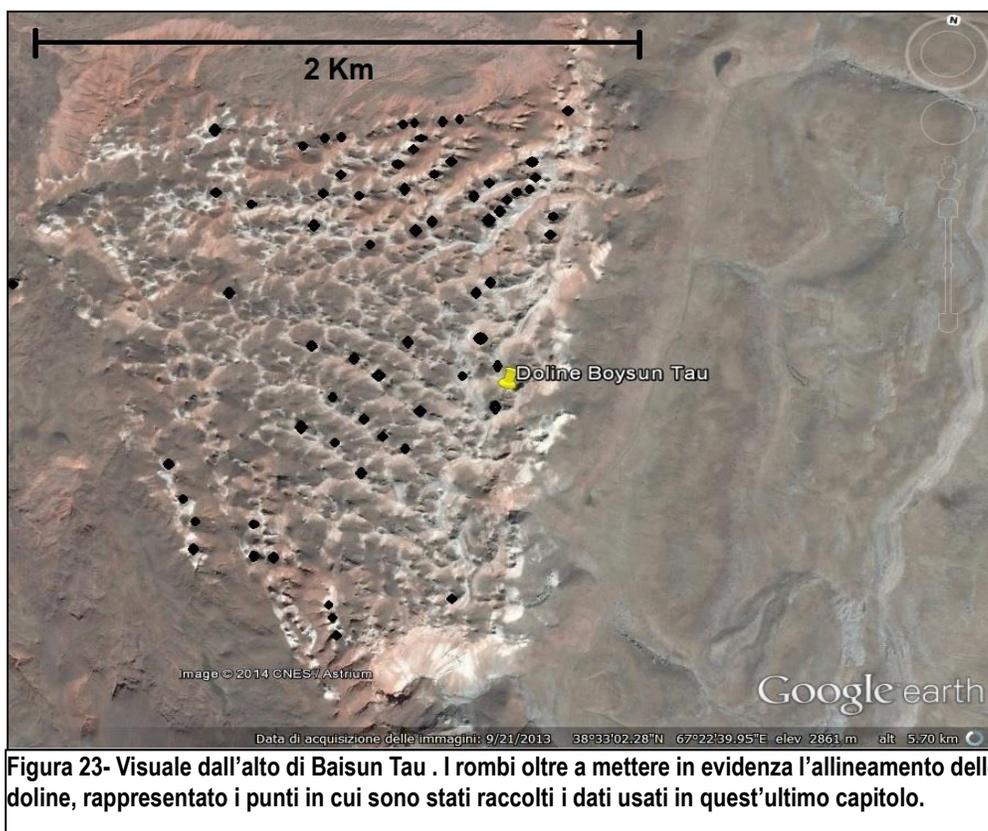
La parte che mostra un'intensa presenza di doline è posta quasi al tetto di una delle monoclinali che compongono la zona. Essendo in un luogo difficile

da raggiungere³⁷ ed avendo una tribolata storia socio-politica comune ai paesi del gruppo ex-URRS non si dispone di DEM adatti ad un'analisi sistematica ed approfondita come quella condotta su Marte. I dati raccolti sono quindi unicamente frutto dell'uso di Google Earth (Fig. 23), con tutti i limiti che derivano da questo.

Non è stato possibile ottenere l'angolo di azimuth solare e quindi, pur avendo misurato le ombre non è possibile ricavare la profondità delle doline.

Anche questi dati verranno inclusi per completezza nell'appendice sebbene la loro utilità per lo svolgimento di questa tesi si sia rivelata molto bassa .

E' possibile fare un confronto tra le zone ad un livello geomorfologico: l'area è molto più piccola di quella del cratere 12000088, infatti nel suo lato di massima estensione raggiunge i 2 Km, con un'estensione media di 700 m-1 km. Nonostante questo la zona presenta un grandissimo numero di doline, si potrebbe affermare tranquillamente che l'intera zona è composta da un sistema di forme carsiche negative che drenano l'acqua delle precipitazioni convogliandola nelle molte grotte sottostanti.



³⁷ Sono infatti necessari parecchi giorni di viaggio a piedi e trasportando l'attrezzatura a dorso di mulo per vedere Baisun-Tau

Le principali differenze rispetto alla zona oggetto di questa tesi sono:

- I contorni delle doline che tendono ad essere meno netti e definiti;
- Il profilo delle stesse che sembra essere meno acclive;
- La disposizione geometrica delle forme carsiche che invece di essere dispersa in maniera caotica e per lo più casuale è allineata (le doline si susseguono una dietro l'altra, probabilmente perché sotto ad esse ci sono fratture drenanti);
- La densità di doline nell'area è di circa 300 dol / 1,3 Km² che equivale a un fattore di 230 dol per Km².

Questa differenza è dovuta principalmente alla quantità di acqua disponibile sul suolo terrestre che è di gran lunga superiore a quella del suolo marziano.

Il rilievo topografico in Uzbekistan segue la monoclinale e l'acqua meteorica che cade in zona, ruscella lungo essa fino ad essere captata da uno dei tanti inghiottitoi, mentre su Marte l'eventuale acqua liquida ristagna all'interfaccia fra zona freatica e superficie topografica. Questo fatto insieme ad una forza di gravità minore sul pianeta rosso contribuiscono a rivelare le differenze come derivanti da cause non interne al fenomeno, ma esterne allo stesso.

Esistono anche elementi di similitudine fra le due zone; infatti i semiassi minori della zona centrale del cratere 12000088 e quelli di Baisun-Tau sono tutto sommato simili e variano dai 20-30 metri fino a 50-70 (più rari). Essendo le doline di Baisun-Tau poste su una serie stratigrafica ben definita l'aspetto generale ricorda più la zona *heavy layered* (Fig. 24) eccezion fatta per la profondità delle forme che è minore (ma questo è dovuto alla profondità della tavola d'acqua, che in una zona arida come il suolo marziano è più bassa) rendendo sempre più plausibile l'ipotesi che si vuole verificare in questa tesi.

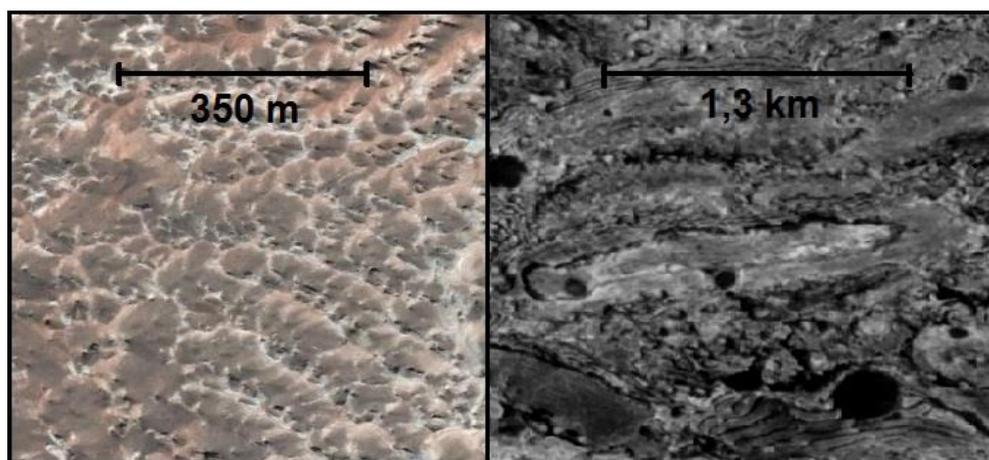


Figura 24- A sinistra si può notare il sistema carsico di Baisun Tau con i suoi fitti pattern di doline che tagliano i banchi di evaporiti, a destra invece la zona *heavy layered* marziana. Al di là delle diverse scale si possono cogliere le notevoli somiglianze. Persino le forme oblunghe spesso colme di sedimenti potrebbero essere causate da sistemi di doline fra loro collegati come a Baisun Tau.

3. Conclusioni

Riepilogando le informazioni ottenute durante lo svolgimento di questa tesi si può dire che:

1) Il mondo accademico ha accumulato parecchie prove della presenza di acqua liquida sul suolo marziano, almeno nel lasso di tempo che va dal Noachiano all'Hesperiano.

2) Uno dei possibili metabolismi di eventuali batteri extraterrestri potrebbe basarsi sul consumo di solfati, per questo trovare zone nelle quali c'è acqua liquida con concentrazioni di solfati molto alte potrebbe aiutare a fare qualche scoperta interessante conseguentemente all'invio di un *rover* in grado di collezionare dati e campioni.

3) Tra Noachiano ed Hesperiano si ha una transizione geochimica che comporta un passaggio da un *weathering* basato sui fillosilicati, simile a quello terrestre, ad uno basato sui solfati. E' in questo periodo che si formano i grandi strati di evaporiti e la figura 7 evidenzia che ad oggi ci sono fasce di fillosilicati Noachiani che compenetrano i solfati.

4) Il cratere 12000088 presenta caratteristiche peculiari, mostrate nelle figure 13,14 e 15 che fanno pensare ad una risalita diapirica e ad un diffuso carsismo ad essa collegata.

5) L'analisi delle doline ha messo in evidenza che la zona centrale fa parte di uno dei due rigonfiamenti principali (*bulge*) del cratere. Presenta doline piccole e diffusissime. La parte *heavy layered* ha forme negative molto più estese, ma in numero minore è inoltre posto in un secondo rigonfiamento che arriva fino a -1820 metri circa, la quota massima all'interno del cratere. Le altre aree rivelano una correlazione con la zona centrale per quel che riguarda la profondità delle doline (e quindi alla tavola d'acqua presente durante la formazione del carsismo).

6) L'analisi del discriminante potrebbe indicare che il fenomeno che ha generato le varie doline è lo stesso e che le differenze fra le varie zone è dovuta alla loro posizione nel cratere.

7) Lo studio delle altezze delle creste della fascia intermedia ha fornito una debole evidenza del fatto che un tempo questa zona potesse essere il livello di base a partire dal quale si è avuta dissoluzione, purtroppo però questa ipotesi non si è potuta verificare a partire dai dati ottenuti e per confermarla servono ulteriori studi.

8) Un confronto con un ambiente geologico analogo terrestre, le doline gessose di Baisun Tau, restituisce alcune differenze tutte motivabili come influenze di stampo planetario (minore gravità, minore precipitazione) o topografico (aree inclinate in maniera diversa) e molte similitudini, avvalorando sempre più l'ipotesi di carsismo nel cratere 12000088.

Quando ci si approccia ad un argomento di questo tipo, ovvero nel quale è difficile verificare le proprie ipotesi, la tentazione è lasciar lavorare molto la fantasia piuttosto che attenersi a fatti reali.

Nello stilare queste conclusioni si cercherà di rimanere il più possibile neutri e attinenti alle evidenze fornite dai dati.

Una delle tante cose rilevate che sarebbe meritevole di approfondimento (non per forza che riguardi direttamente il carsismo) è la disposizione radiale delle *yardangs* intorno al sito d'impatto. Esse infatti sono allungate longitudinalmente tutt'attorno il cratere principale, fatta eccezione per la zona *heavy layered*, che ne risulta sprovvista in maniera completa. Partendo col dire che sono forme che si creano a partire da forti venti unidirezionali che soffiano nello stesso verso per lungo tempo, è possibile immaginare che nell'arco di poche decine di chilometri il sistema delle correnti d'aria marziane cambi così tanto? E perché sono allungate proprio in maniera radiale? Una possibile risposta potrebbe essere che sono state create, molto velocemente, nel momento dell'impatto meteoritico a causa dell'onda d'urto e delle turbolenze generatesi a partire da essa. Il fenomeno andrebbe comunque approfondito, magari avendo a disposizione un DEM con risoluzione più alta.

Così come la questione *yardangs* anche la presenza di piccoli *Mounds* (monti) all'interno di un cratere risultano difficilmente spiegabili. Ci sono intere fasce (riconosciute e delimitate nella figura 9) che presentano forme più rialzate delle *yardangs* ma soprattutto con basi più larghe (quindi per eccellenza non assimilabili alle prime, che come caratteristica di base hanno quella di stagliarsi più in altezza che estendersi in lunghezza). Questi monoliti sono semplicemente composti da rocce localmente più resistenti all'erosione eolica, ma approfondimenti sulla loro morfogenesi sarebbero da un punto di vista scientifico molto interessanti. Anche in questo caso per poter lavorare in maniera accurata servirebbero DEM con risoluzione maggiore.

Un "mistero" rimasto irrisolto è la differenziazione del carsismo tra la zona centrale e quella *heavy layered* perché, limitatamente alla zona stratificata posta a sud del cratere, si hanno doline più grandi, larghe e profonde? Bisogna partire dai dati statistici di base ricavati in questa tesi: la media di profondità delle forme negative dell'area centrale è di 45 metri contro i 98 di quella *heavy layered*. Si ha inoltre che le quote medie assolute sono rispettivamente di -1960 e -1900.

Una possibile risposta potrebbe essere l'influenza del livello di base della tavola d'acqua nella carsificazione della zona. La tavola d'acqua è il livello

al quale l'acqua meteorica tende ad arrivare per gravità. Una volta che raggiunge questo livello smette di perforare la roccia e l'unico tipo di alterazione che si avrà potrà essere la dissoluzione che proseguirà fino al momento in cui tutta l'acqua sarà satura degli elementi presenti nelle rocce entro le quali scorre.

In questo contesto si può capire facilmente che se il percorso che il liquido percorre è inferiore, anche la dissoluzione della roccia varierà con esso, mentre laddove si ha una distanza maggiore dal livello freatico, il carsismo sarà più intenso. Nella zona *heavy layered* può poi aver concorso anche l'impaccamento degli strati: una roccia stratificata offre all'acqua molteplici piani di debolezza nel quale sviluppare l'erosione ed è anche più prona a crolli che avvengono a causa del progressivo sfaldarsi degli strati all'interno di una cavità ipogea fino al punto in cui la volta non riesce più a reggere il peso della roccia soprastante.

Il problema di fondo con questa teoria è che sul pianeta Marte non ci sono precipitazioni e le doline che si formano sono dovute praticamente solo ai crolli. Questi ultimi sono a loro volta generati dall'azione corrosiva dell'acqua in corrispondenza della tavola d'acqua, la cavità carsica così formata tenderà a svilupparsi in maniera *bottom-up* fino a raggiungere la superficie. In un contesto di questo tipo è più semplice che il carsismo fosse già in qualche modo iniziato poco dopo l'impatto del meteorite magari perché quest'ultimo ha messo a nudo uno strato permeabile distruggendone contemporaneamente uno prima posto sopra ad esso impermeabile. Così facendo questa sorta di ex falda sospesa sarebbe stata in grado di far percolare quantità d'acqua tali da iniziare a sciogliere i solfati. In un secondo momento il diapiro, rigonfiandosi, potrebbe aver spostato lentamente alcune doline (le prime ad essersi formate) in posizione più rialzata. Le doline dell'area *heavy layered*, probabilmente più antiche, hanno continuato a scavare verso l'alto³⁸ allargandosi sempre più. E' possibile anche che a furia di allargarsi più doline si siano unite tra loro a formare crolli interconnessi che è facile notare se si guarda in maniera ravvicinata l'ortofoto. D'altro canto la zona centrale potrebbe aver cominciato a rigonfiarsi e quindi ad esporre i solfati solo più recentemente e per questo presentare crolli più piccoli e diffusi. Probabilmente andando avanti nel tempo anche questa parte del cratere diventerà simile a quella *heavy layered* man mano che le doline più piccole si allargheranno a causa del rigonfiamento e si conetteranno fra loro formando voragini più grosse.

Nel processo appena descritto sarebbe importante capire le determinanti differenze che una minore gravità ha sul livello della tavola d'acqua. Infatti

³⁸ In realtà è il diapiro che crescendo verso l'alto rende disponibile più roccia sopra la tavola d'acqua. Il carsismo in quanto tale infatti è efficace solo fino al limite tra zona vadosa e zona freatica, al di sotto di essa è presente la dissoluzione, ma solo se l'acqua non è già in equilibrio con la roccia e comunque il processo è molto più lento (specie se l'acqua non fluisce come in condizioni marziane).

se la gravità è pari a circa a un terzo di quella terrestre, le forze capillari rimangono inalterate dipendendo dalla viscosità dei liquidi e dai pori. Questo dovrebbe portare la tavola d'acqua di "aderire" in maniera maggiore al profilo topografico. Che cambiamenti comporterebbe una situazione del genere in una zona costellate di doline da crollo?

Un'altra questione che viene messa in evidenza dai dati raccolti è che la zona centrale ha molte più doline di quella *heavy layered* e che in mezzo ad esse la fascia intermedia ne è praticamente sprovvista. Questo deve trovare riscontro in qualche fattore che differenzi le tre zone. Se una prima interpretazione sulla disparità di numeri fra la zona centrale e *heavy layered* è stata fornita sopra, è ancora di indagare la quasi totale assenza di forme carsiche nella fascia intermedia. Non è facilmente spiegabile ma una possibile teoria potrebbe essere la presenza, sotto tutta la fascia intermedia, di una lente argillosa residua che, tramite la sua plasticità, impedisce che i crolli arrivino in superficie. Poco più a destra si può notare (Fig. 7) che la litologia prevalente è proprio quella fillosilicatica che potrebbe proseguire in profondità o, ancora, la porzione visibile potrebbe essere stata trascinata in superficie dal diapiro che rigonfiava, mentre il grosso della lente ancora giace sotto la fascia intermedia.

Un dato che emerge fortemente in contrasto nel confronto tra carsismo marziano e terrestre è la densità delle doline su chilometro quadrato: la zona centrale che è la più prolifica in termini di forme negative, presenta un numero di doline per Km² di 2,73. Baisun Tau 240. Questo è dovuto sia alla scarsità di acqua disponibile sul terreno del pianeta rosso, ma probabilmente, essendo così elevata, riguarda anche la differenza della scala alla quale sono state compiute le osservazioni. Quando venti metri sono risolti dal tono di grigio di quattro pixel, si rischiano di perdere molti dati.

L'obiettivo della tesi era capire se ci potessero o potessero essere state zone di scambio fra acqua a solfati nelle quali eventuali organismi estremofili avessero potuto prosperare. A questa domanda si può rispondere in maniera abbastanza intuitiva: il carsismo presente nel cratere è avvenuto su più fasi e questo richiede acqua liquida in quantità e tempo sufficienti per scavare i condotti esistenti. Un altro fattore che potrebbe essere determinante nel ritrovamento di vita extraterrestre nel sottosuolo marziano è il pensiero che l'autore di questa tesi ha sviluppato sulla possibile esistenza di grandi spazi vuoti sotterranei, grotte che ancor più di un pozzo sotto ad una singola dolina, potrebbero ospitare vita.

La convenienza nel lanciare un *rover* nel cratere è d'altro canto forse dubbia: l'area è fortemente accidentata, con terreni cedevoli e molto friabili a causa dell'esteso *weathering* subito dal diapiro e le possibilità di perdere

il mezzo sono molto alte. A guastare ancora di più il quadro di una possibile esplorazione della zona si vuol far presente che una volta arrivati al bordo di una dolina il prelievo di campioni ad adeguata profondità (ovvero quantomeno nella zona freatica) potrebbe risultare difficile se non impossibile a causa dell'attuale condizione iperarida del pianeta. In ogni caso sarebbe meglio concentrarsi nel provare a raccogliere esemplari di roccia prelevati dall'area centrale che mostra doline più piccole e di profondità minore, quindi più vicine alla tavola d'acqua. Qualora queste difficoltà fossero superabili l'intera zona diventerebbe immediatamente molto interessante per un possibile atterraggio (ammartaggio?) di un modulo marziano.

APPENDICE

Appendice 1: Dati prelevati dal cratere 12000088. La serie "C" indica le creste.

	Zona Dolina	SEMIASSE MAGGIORE (m)	SEMIASSE MINORE (m)	Lunghezza Ombra (m)	Profondità Dolina (m) , Zona centrale	TOTALMENTE NERI (quindi profondità minima, non prof. Esatta)	Quota assoluta (m)
D1	Centrale	50	40	20	16		-2050
D2	Centrale	75	70	25	20		-2025
D3	Centrale	60	60	20	16		-2060
D4	Centrale	55	55	20	16		-2040
D5	Centrale	50	50	30	24		-2045
D6	Centrale	125	85	30	24		-2050
D7	Centrale	80	80	20	16		-2040
D8	Centrale	30	30	25	20		-2035
D9	Centrale	55	55	25	20		-1960
D10	Centrale	55	50	20	16		-1970
D11	Centrale	65	45	15	12		-1975
D12	Centrale	55	55	20	16		-1955
D13	Centrale	180	160	40	32		-1950
D14	Centrale	85	50	30	24		-1950
D15	Centrale	90	70	40	32		-1950
D16	Centrale	160	155	45	36		-1950
D17	Centrale	115	100	30	42		
D18	Centrale	180	165	60	84		
D19	Centrale	70	60	20	28		
D20	Centrale	100	50	20	28		-1920
D21	Centrale	60	45	35	49		
D22	Centrale	50	40	35	49		
D23	Centrale	100	80	40	56		
D24	Centrale	110	80	40	56		
D25	Centrale	50	45	50	70	SI	-1930
D26	Centrale	50	35	50	70	SI	-1935
D27	Centrale	60	60	20	28		-1935
D28	Centrale	50	30	25	35		
D29	Centrale	90	80	35	49		
D30	Centrale	75	70	25	35		
D31	Centrale	55	45	15	21		
D32	Centrale	45	45	15	21		

D33	Centrale	55	52	30	42		
D34	Centrale	80	70	35	49		
D35	Centrale	80	65	35	49		-1935
D36	Centrale	45	40	45	63	SI	
D37	Centrale	40	30	40	56	SI	-1940
D38	Centrale	75	65	30	42		
D39	Centrale	150	145	50	70		-1935
D40	Centrale	30	30	30	42	SI	
D41	Centrale	50	40	45	63	SI	
D42	Centrale	80	60	35	49		-1945
D43	Centrale	65	50	40	56		
D44	Centrale	90	80	20	28		
D45	Centrale	60	45	20	28		-1950
D46	Centrale	80	70	45	63		
D47	Centrale	70	55	50	70		
D48	Centrale	55	50	25	35		-1950
D49	Centrale	80	80	45	63		
D50	Centrale	155	145	90	126		-1960
D51	Centrale	40	35	30	42		
D52	Centrale	60	55	30	42		-1970
D53	Centrale	65	40	25	35		-1970
D54	Centrale	40	30	30	42	SI	-1950
D55	Centrale	90	90	60	84		-1970
D56	Centrale	130	100	60	84		
D57	Centrale	50	50	30	42		
D58	Centrale	50	45	30	42		
D59	Centrale	75	70	55	77		-1975
D60	Centrale	45	45	40	56		-1975
D61	Centrale	150	145	40	56		-1980
D62	Centrale	65	60	35	49		
D63	Centrale	60	50	30	42		
D64	Centrale	55	55	35	49		
D65	Centrale	45	35	40	56		-1945
D66	Centrale	105	85	60	84		-1940
D67	Centrale	65	60	20	28		-1935
D68	Centrale	65	50	50	70	SI	-1910
D69	Centrale	60	55	50	70		
D70	Centrale	105	90	50	70		
D71	Centrale	80	70	35	49		
D72	Centrale	85	75	30	42		
D73	Centrale	110	100	40	56		
D74	Centrale	75	75	35	49		
D75	Centrale	65	50	20	28		

D76	Centrale	55	50	45	63	
D77	Centrale	45	40	35	49	
D78	Centrale	80	75	41	57	
D79	Centrale	85	80	21	29	
D80	Centrale	100	95	15	21	
D81	Centrale	120	120	50	70	
D82	Centrale	90	90	50	70	
D83	Centrale	55	35	35	49	SI
D84	Centrale	50	40	30	42	
D85	Centrale	50	40	30	42	
D86	Centrale	60	45	40	56	
D87	Centrale	55	40	20	28	
D88	Centrale	60	55	30	42	
D89	Centrale	120	85	20	28	-1950
D90	Centrale	130	120	30	42	-1850
D91	Centrale	55	50	50	70	SI
D92	Centrale	85	80	30	42	-1830
D93	Centrale	120	120	30	42	
D94	Centrale	70	60	40	56	
D95	Centrale	100	100	25	35	
D96	Centrale	50	40	30	42	
D97	Centrale	65	55	25	35	
D98	Centrale	115	110	55	77	
D99	Centrale	85	85	30	42	
D100	Centrale	45	45	30	42	
D101	Centrale	180	160	60	84	
D102	Centrale	95	80	40	56	-1980
D103	Centrale	40	40	25	35	-1985
D104	Centrale	90	80	20	28	-1970
D105	Centrale	85	75	25	35	-1960
D106	Centrale	70	75	20	28	-1940
D107	Centrale	80	65	20	28	-1930
D108	Centrale	65	65	25	35	-1900
D109	Centrale	75	65	30	42	
D110	Centrale	105	90	20	28	
D111	Centrale	100	90	40	56	-1910
D112	Centrale	85	75	45	63	-1930
D113	Centrale	110	80	30	42	
D114	Centrale	90	80	20	28	
D115	Centrale	55	50	25	35	
D116	Centrale	95	90	55	77	

L1	Heavy-Layered	190	180	180	252	SI	
L2	Heavy-Layered	90	75	75	105	SI	
L3	Heavy-Layered	90	70	70	98	SI	
L4	Heavy-Layered	90	75	40	56		
L5	Heavy-Layered	95	85	30	42		
L6	Heavy-Layered	60	55	55	77	SI	
L7	Heavy-Layered	165	85	25	35		
L8	Heavy-Layered	105	105	65	91		
L9	Heavy-Layered	65	55	60	84	SI	
L10	Heavy-Layered	110	100	100	140	SI	
L11	Heavy-Layered	480	445	440	615	SI	-1865
L12	Heavy-Layered	280	265	255	357	SI	
L13	Heavy-Layered	75	60	60	84	SI	-1840
L14	Heavy-Layered	430	370	400	559	SI	
L15	Heavy-Layered	140	80	80	112	SI	-1925
L16	Heavy-Layered	90	60	60	84	SI	-1825
L17	Heavy-Layered	80	65	30	42		-1810
L18	Heavy-Layered	85	70	70	98	SI	-1815
L19	Heavy-Layered	50	50	50	70	SI	-1845
L20	Heavy-Layered	60	50	50	70	SI	-1900
L21	Heavy-Layered	65	60	60	84	SI	-1900
L22	Heavy-Layered	105	95	80	112	SI	-1905
L23	Heavy-Layered	280	270	280	392	SI	-1870
L24	Heavy-Layered	160	135	140	196	SI	-1875
L25	Heavy-Layered	150	140	30	42		-1865
L26	Heavy-Layered	70	70	70	98		-1865
L27	Heavy-Layered	100	95	90	126	SI	-1875
L28	Heavy-Layered	105	85	105	147	SI	-1840
L29	Heavy-Layered	1230	1120	125	175	SI	
L30	Heavy-Layered	125	125	120	95	SI	
L31	Heavy-Layered	290	270	90	71	SI	
L32	Heavy-Layered	70	65	70	55	SI	
L33	Heavy-Layered	115	105	100	79	SI	
L34	Heavy-Layered	75	70	70	55	SI	
L35	Heavy-Layered	470	280	65	51		
L36	Heavy-Layered	140	100	40	32		
L37	Heavy-Layered	250	180	100	79		
L38	Heavy-Layered	120	105	35	28		
L39	Heavy-Layered	60	55	60	48	SI	
L40	Heavy-Layered	65	55	55	44	SI	
L41	Heavy-Layered	100	95	50	40		
L42	Heavy-Layered	305	295	30	42		-1840
L43	Heavy-Layered	175	175	65	91		-1840

L44	Heavy-Layered	150	140	150	210	SI	-1845
L45	Heavy-Layered	370	370	120	168		-1905
L46	Heavy-Layered	180	60	110	154	SI	-1895
L47	Heavy-Layered	90	75	75	105	SI	-1880
L48	Heavy-Layered	255	230	120	168		-1890
L49	Heavy-Layered	130	130	130	182	SI	-1905
L50	Heavy-Layered	270	235	95	133		-1940
L51	Heavy-Layered	250	95	120	168	SI	
L52	Heavy-Layered	610	290	280	392	SI	
L53	Heavy-Layered	300	200	230	322	SI	-1920
L54	Heavy-Layered	175	140	175	245	SI	-1910
L55	Heavy-Layered	105	90	90	126	SI	-1905
L56	Heavy-Layered	80	70	70	98	SI	-1900
L57	Heavy-Layered	110	100	100	140	SI	
L58	Heavy-Layered	145	125	120	168	SI	
L59	Heavy-Layered	230	190	190	266	SI	
L60	Heavy-Layered	330	135	135	189	SI	
L61	Heavy-Layered	175	90	90	126	SI	
L62	Heavy-Layered	415	200	60	84		
L63	Heavy-Layered	160	150	20	28		-2030
L64	Heavy-Layered	85	70	70	98	SI	-2060
L65	Heavy-Layered	80	70	80	112	SI	-2060
L66	Heavy-Layered	60	45	45	63	SI	
L67	Heavy-Layered	65	50	50	70	SI	
L68	Heavy-Layered	55	45	45	63	SI	
L69	Heavy-Layered	90	90	60	84	SI	
L70	Heavy-Layered	80	65	65	91	SI	-1980
L71	Heavy-Layered	85	60	60	84	SI	-1980
L72	Heavy-Layered	100	90	50	70	SI	-1980
M1	Mounds	100	90	80	112		
M2	Mounds	110	90	30	42		
M3	Mounds	90	90	50	70		
Y1	Yardangs	100	85	20	28		
Y2	Yardangs	350	260	10	14		
Y3	Yardangs	65	55	15	21		
Y4	Yardangs	135	130	15	21		
Y5	Yardangs	110	80	15	21		
Y6	Yardangs	190	190	10	14		
Y7	Yardangs	50	45	20	28		
Y8	Yardangs	50	40	10	14		
Y9	Yardangs	240	215	10	14		
Y10	Yardangs	580	580	10	14		
Y11	Yardangs	165	160	20	28		

Y12	Yardangs	130	120	25	35	
Y13	Yardangs	140	90	25	35	
Y14	Yardangs	210	205	10	14	
Y15	Yardangs	1370	110	15	21	
Y16	Yardangs	260	250	10	14	
Y17	Yardangs	500	500	5	7	
Y18	Yardangs	540	505	15	21	
U1	Unclassified	130	120	45	36	
U2	Unclassified	100	90	20	16	
U3	Unclassified	60	55	20	16	-2135
U4	Unclassified	70	70	15	12	
U5	Unclassified	60	60	15	12	-2150
U6	Unclassified	125	120	30	24	-2060
U7	Unclassified	65	25	25	20	-2065
U8	Unclassified	110	110	30	24	
U9	Unclassified	80	70	30	24	-2100
U10	Unclassified	85	55	15	12	-2115
U11	Unclassified	60	60	20	16	-2125
U12	Unclassified	55	40	25	20	-2130
U13	Unclassified	60	55	10	8	-2135
U14	Unclassified	50	50	10	8	
U15	Unclassified	70	30	20	16	
U16	Unclassified	55	45	25	20	-2150
U17	Unclassified	60	50	25	20	-2080
U18	Unclassified	140	120	20	16	
U19	Unclassified	90	90	10	8	
U20	Unclassified	200	175	25	20	
U21	Unclassified	110	90	20	16	
U22	Unclassified	85	80	25	20	
U23	Unclassified	135	105	10	8	

	Lunghezza Ombra (m)	Altezza cresta (m)	Angolo di incidenza sole (gradi)	Angolo di incidenza sole (rad)	Altezza assoluta (m)
C1	40	56	54.67°	0.95	-1900
C2	35	0	54.67°	0.95	-1905
C3	30	0	54.67°	0.95	-1900
C4	35	0	54.67°	0.95	-1895
C5	25	0	54.67°	0.95	-1880
C6	25	0	54.67°	0.95	
C7	30	0	54.67°	0.95	-1890

C8	30	0	54.67°	0.95	-1890
C9	35	0	54.67°	0.95	-1890
C10	25	0	54.67°	0.95	-1895
C11	15	0	54.67°	0.95	-1900
C12	15	0	54.67°	0.95	-1895
C13	25	0	54.67°	0.95	-1880
C14	25	0	54.67°	0.95	-1895
C15	25	0	54.67°	0.95	-1900
C16	25	0	54.67°	0.95	-1895
C17	15	0	54.67°	0.95	-1870
C18	20	0	54.67°	0.95	-1875
C19	25	0	54.67°	0.95	-1875
C20	10	0	54.67°	0.95	-1865
C21	15	0	54.67°	0.95	-1865
C22	20	0	54.67°	0.95	-1865
C23	20	0	54.67°	0.95	-1860
C24	15	0	54.67°	0.95	-1865
C25	15	0	54.67°	0.95	-1870
C26	25	0	54.67°	0.95	-1850
C27	15	0	54.67°	0.95	-1850
C28	20	0	54.67°	0.95	-1850
C29	15	0	54.67°	0.95	
C30	10	0	54.67°	0.95	
C31	20	0	54.67°	0.95	-1860
C32	25	0	54.67°	0.95	-1850
C33	20	0	54.67°	0.95	-1855
C34	20	0	54.67°	0.95	-1850
C35	20	0	54.67°	0.95	-1855
C36	15	0	54.67°	0.95	-1850
C37	15	0	54.67°	0.95	-1840
C38	20	0	54.67°	0.95	-1845
C39	25	0	54.67°	0.95	-1845
C40	20	0	54.67°	0.95	-1840
C41	15	0	54.67°	0.95	-1840
C42	20	0	54.67°	0.95	-1850
C43	15	0	54.67°	0.95	-1845
C44	20	0	54.67°	0.95	-1835
C45	30	0	54.67°	0.95	-1835
C46	20	0	54.67°	0.95	
C47	20	0	54.67°	0.95	
C48	20	0	54.67°	0.95	
C49	30	0	54.67°	0.95	
C50	25	0	54.67°	0.95	

C51	15	0	54.67°	0.95	-1830
C52	20	0	54.67°	0.95	-1830
C53	20	0	54.67°	0.95	-1835
C54	30	0	54.67°	0.95	-1840
C55	20	0	54.67°	0.95	
C56	20	0	54.67°	0.95	
C57	20	0	54.67°	0.95	
C58	15	0	54.67°	0.95	-1830
C59	15	0	54.67°	0.95	-1835
C60	15	0	54.67°	0.95	-1820
C61	20	0	54.67°	0.95	-1820
C62	30	0	54.67°	0.95	-1820
C63	20	0	54.67°	0.95	-1825
C64	30	0	54.67°	0.95	-1820
C65	15	0	54.67°	0.95	-1815
C66	10	0	54.67°	0.95	-1815
C67	30	0	54.67°	0.95	-1810
C68	15	0	54.67°	0.95	-1805
C69	25	0	54.67°	0.95	-1800
C70	20	0	54.67°	0.95	-1800
C71	15	0	54.67°	0.95	-1800
C72	20	0	54.67°	0.95	-1830
C73	30	0	54.67°	0.95	-1850
C74	25	0	54.67°	0.95	-1865
C75	25	0	54.67°	0.95	-1865
C76	35	0	54.67°	0.95	-1860
C77	20	0	54.67°	0.95	-1850
C78	15	0	54.67°	0.95	-1850
C79	20	0	54.67°	0.95	-1870
C80	30	0	54.67°	0.95	-1870
C81	20	0	54.67°	0.95	-1880
C82	25	0	54.67°	0.95	-1865
C83	25	0	54.67°	0.95	
C84	25	0	54.67°	0.95	

Appendice 2: Risultati delle prove statistiche completi.

ANOVA univariata: Descrittivi (Pre test)

	N	Media	Deviazion e std.	Errore std.	confidenza 95% per la		Minimo	Massimo
					Limite inferiore	Limite superiore		
SEMIASSE 1	116	68.47	30.137	2.798	62.92	74.01	30	165
MINORE 2	72	140.90	145.980	17.204	106.60	175.21	45	1120
(m) 3	3	90.00	.000	.000	90.00	90.00	90	90
4	18	201.11	165.428	38.992	118.85	283.38	40	580
6	23	76.74	35.948	7.496	61.19	92.28	25	175
Totale	232	102.34	104.911	6.888	88.77	115.91	25	1120
Profondità 1	116	45.36	19.61	1.82	41.75	48.97	11.88	125.85
Dolina (m) 2	72	131.28	112.30	13.23	104.89	157.67	27.73	615.29
, Zona 3	3	74.58	35.19	20.32	-12.84	162.00	41.95	111.87
centrale 4	18	20.20	7.91	1.87	16.26	24.13	6.99	34.96
6	23	16.88	6.57	1.37	14.04	19.72	7.92	35.65
Totale	232	67.63	77.66	5.10	57.58	77.67	6.99	615.29

		Somma dei quadrati	df	Media dei quadrati	F	Sig.
Semiasse minore	Fra gruppi	431312.382	4	107828.095	11.594	.000
	Entro gruppi	2111125.394	227	9300.112		
	Totale	2542437.776	231			
Profondità	Fra gruppi	449113.422	4	112278.355	26.997	.000
	Entro gruppi	944058.901	227	4158.850		
	Totale	1393172.323	231			

Variabile dipendente	(I) Zona	(J) Zona	Differenza fra medie (I-J)	Errore std.	Sig.	Intervallo di confidenza 95%	
						Limite inferiore	Limite superiore
Semiasse minore	1	2	-72,437*	14	0.00	-113	-31
		3	-22	56	1.00	-181	138
		4	-132,646*	24	0.00	-202	-63
		6	-8	22	1.00	-71	54
	2	1	72,437*	14	0.00	31	113
		3	51	57	1.00	-110	212
		4	-60	25	0.19	-132	12
		6	64	23	0.06	-1	130
	3	1	22	56	1.00	-138	181
		2	-51	57	1.00	-212	110
		4	-111	60	0.66	-282	59
		6	13	59	1.00	-155	181
4	1	132,646*	24	0.00	63	202	
	2	60	25	0.19	-12	132	
	3	111	60	0.66	-59	282	
	6	124,372*	30	0.00	38	210	
6	1	8	22	1.00	-54	71	
	2	-64	23	0.06	-130	1	
	3	-13	59	1.00	-181	155	
	4	-124,372*	30	0.00	-210	-38	

Variabile dipendente	(I) Zona	(J) Zona	Differenza fra medie (I-J)	Errore std.	Sig.	Intervallo di confidenza 95%	
						Limite inferiore	Limite superiore
Profondità Dolina	1	2	-86	10	0.00	-113	-58
		3	-29	38	1.00	-136	78
		4	25	16	1.00	-21	71
		6	28	15	0.54	-13	70
	2	1	86	10	0.00	58	113
		3	57	38	1.00	-51	164
		4	111	17	0.00	63	159
		6	114	15	0.00	71	158
	3	1	29	38	1.00	-78	136
		2	-57	38	1.00	-164	51
		4	54	40	1.00	-60	168
		6	58	40	1.00	-55	170
	4	1	-25	16	1.00	-71	21
		2	-111	17	0.00	-159	-63
		3	-54	40	1.00	-168	60
		6	3	20	1.00	-54	61
6	1	-28	15	0.54	-70	13	
	2	-114	15	0.00	-158	-71	
	3	-58	40	1.00	-170	55	
	4	-3	20	1.00	-61	54	

Pre-test, test F di Fisher, test di Bonferroni per valori di semiasse minore e test di Bonferroni per valori di profondità della dolina.

Test del discriminante

Statistiche di gruppo

Zona		Validi (listwise)	
		Non pesati	Pesati
1	SEMIASSE MINORE (m)	116	116.000
	Profondità Dolina (m), Zona centrale	116	116.000
2	SEMIASSE MINORE (m)	72	72.000
	Profondità Dolina (m), Zona centrale	72	72.000
3	SEMIASSE MINORE (m)	3	3.000
	Profondità Dolina (m), Zona centrale	3	3.000
4	SEMIASSE MINORE (m)	18	18.000
	Profondità Dolina (m), Zona centrale	18	18.000
6	SEMIASSE MINORE (m)	23	23.000
	Profondità Dolina (m), Zona centrale	23	23.000
Totali	SEMIASSE MINORE (m)	232	232.000
	Profondità Dolina (m), Zona centrale	232	232.000

Tabelle che riassumono l'analisi del discriminante.

Autovalori

Funzione	Autovalore	% di varianza	% cumulata	Correlazione canonica
1	,480 ^a	72.4	72.4	,569
2	,183 ^b	27.6	100.0	,393

Lambda di Wilks

Test di funzioni	Lambda di Wilks	Chi-quadrato	df	Sig.
Da 1 a 2	,571	127.380	8	,000
2	,845	38.223	3	,000

Coefficienti standardizzati della funzione discriminante canonica

	Funzione	
	1	2
SEMIASSE MINORE (m)	-.126	1.073
Profondità Dolina (m), Zona centrale	1.041	-.290

Matrice di struttura

	Funzione	
	1	2
Profondità Dolina (m), Zona centrale	,993	,117
SEMIASSE MINORE (m)	,268	,963

Funzioni ai baricentri di gruppo

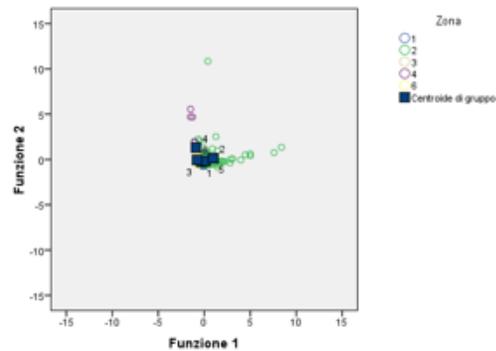
Zona	Funzione	
	1	2
1	-.315	-.277
2	,977	,143
3	,128	-.169
4	-.895	1.312
6	-.786	-.057

Funzioni discriminanti canoniche non standardizzate valutate alle medie di gruppo

Probabilità a priori per gruppi

Zona	A priori	Casi usati nell'analisi	
		Non pesati	Pesati
1	,200	116	116.000
2	,200	72	72.000
3	,200	3	3.000
4	,200	18	18.000
6	,200	23	23.000
Totali	1.000	232	232.000

Funzioni discriminanti canoniche



Risultati della classificazione^a

Originale	Zona	Gruppo di appartenenza previsto					Totali
		1	2	3	4	6	
Conteggio	1	66	1	23	2	24	116
	2	10	28	24	6	4	72
	3	1	1	1			3
	4	1			9	8	18
	6	2			1	20	23
	%	1	56.9	.9	19.8	1.7	20.7
	2	13.9	38.9	33.3	8.3	5.6	100.0
	3	33.3	33.3	33.3	.0	.0	100.0
	4	5.6	.0	.0	50.0	44.4	100.0
	6	8.7	.0	.0	4.3	87.0	100.0

Appendice 3: Risultati delle misurazioni Baisun-Tau. Uzbekistan

	Semiassa Minore (m)	Lunghezza ombra (m)
D1	30	10
D2	35	25
D3	60	33
D4	35	21
D5	40	5
D6	25	7
D7	10	2
D8	15	7
D9	30	10
D10	50	10
D11	45	16
D12	30	21
D13	45	15
D14	35	6
D15	30	10
D16	25	18
D17	60	5
D18	35	2
D19	60	7
D20	12	5
D21	31	5
D22	35	5
D23	25	7
D24	30	9
D25	45	6
D26	20	7
D27	25	5
D28	32	3
D29	35	10
D30	55	12
D31	26	5
D32	30	10
D33	25	5
D34	20	3
D35	25	20
D36	30	15
D37	30	5
D38	32	7
D39	25	7
D40	32	6

D41	25	7
D42	22	5
D43	25	7
D44	21	4
D45	29	7
D46	15	6
D47	30	5
D48	65	15
D49	40	5
D50	43	10
D51	25	20
D52	31	20
D53	15	4
D54	30	5
D55	36	6
D56	45	12
D57	30	15
D58	35	7
D59	40	15
D60	67	31
D61	54	27
D62	25	5
D63	30	5
D64	30	15
D65	35	10

Bibliografia

- Andrews-Hanna J.C., Lewis K.W., 2011. *Early Mars Hydrology: 2. Hydrological evolution in the Noachian and Hesperian epochs*. Journal of Geophysical Research: Planets, 116, pp. 234-239.
- Anguita F., Anguita J., Castilla G., De la Casa M.A., Domínguez J.M., Herrera R., 1997. *Arabia Terra, Mars: Tectonic and palaeoclimatic evolution of a remarkable sector of martian lithosphere*. Earth, Moon and Planets, 77, pp. 55-72.
- Baioni D., Zupan Hajna N., Wezel F.C., 2009. *Karst landforms in a Martian evaporitic dome*. Acta Carsologica 38, pp 9-18.
- Baioni D., Sgavetti M., Wezel F.C., 2012. *Karst landforms in Northern Sinus Meridiani, Mars*. Lunar and Planetary Institute Science Conference, pp. 43-44.
- Baker V.R., 1982. *The Channels of Mars*. Texas University Press, 198 p.
- Baldo G., Massironi M., Riccobon, R., 2014. *Study of bulged craters in Arabia Terra (Mars)*, pp. 1-28.
- Boston P.J., Spilde M.N., Northup D.E., Melim L.A., Soroka D.S., Kleina L.G. Lavoie K.H., Hose L.D., Mallory L.M., Dahm C.N., Crossey L.J., Schelble R.T., 2001. *Cave Biosignature Suites: Microbes, Minerals and Mars*. Astrobiology, 1, pp. 25-55.
- Brown D., 2012. *NASA Rover's first soil Studies help fingerprint martian minerals*. NASA's Press, pp. 1-7.
- Caleb I., Fasset T., James W. Head III, 2005. *Fluvial sedimentary deposits on Mars: Ancient deltas in a crater lake in the Nili Fossae region*. Geophysical Research Letters, 32, pp. 1-4.
- Chipera S.J., Vaniman D.T., 2007. *Experimental stability of magnesium sulfate hydrates that may be present on Mars*. Geochimica et Cosmochimica Acta, 71, pp. 241-250.
- Clifford S.M., 1993. *A model for the hydrologic and climatic behavior of water on Mars*. Journal of Geophysical Research: Planets, 98, pp 10973-11016.
- Foley R., 2008. *Martian surface chemistry: APXS results from the Pathfinder landing site*. Cambridge Planetary Science 9, pp. 33-57.
- Greeley R., Batson R.M. (Eds), 1990. *Planetary Mapping*. Cambridge University Press, 312p.
- Grotzinger J.P., Milliken R.E. (Eds), 2012. *Sedimentary geology on Mars*, SEPM special publication, 102, 270 p.
- Marnocha C. L., Chevrier V. F., Ivey D. M., 2010. *Sulfate-reducing bacteria as a model for life in the martian subsurface*. 41st Lunar and planetary science conference, 2 p.
- Martellato E., Foing B.H., Benkhoff J., 2012. *Numerical modelling of impact crater formation associated with isolated lunar skylight candidates on lava tubes*. Planetary and Space Science, 84, pp. 33-44.
- McGill G.E., 2000. *Crustal history of north central Arabia Terra, Mars*. Journal of Geophysical Research: Planets, 105, pp. 6945-6959.
- Poulet F., Bibring J.P., Mustard J.F., Gendrin A., Mangold N., Langevin Y., Arvidson R.E., Gondet B., Gomez C., 2005. *Phyllosilicates on Mars and implications for early martian climate*. Nature, 438, pp. 623-627.
- Quantin C., Allemand P., Mangold N., Dromart G., Delacourt C., 2005. *Fluvial and lacustrine activity on layered deposits in Melas Chasma, Valles Marineris, Mars*. Journal of Geophysical Research: Planets, 110, pp. 3334-3335.
- Roberts J.H., Zhong S., 2006. *Degree-1 convection in the Martian mantle and the origin of the hemispheric dichotomy*. Earth and Planetary Science Letters, 189, pp. 75-84.

- Stevenson D.J., 2001. *Mars' core and magnetism* Nature, 412, pp. 213-219.
- Tanaka K.L., Skinner J.A., Dohm J. M., Irwin III R.P., Kolb E.J., Fortezzo M., Platz T., Michael G.G., Hare T.M., 2014. *Geologic Map of Mars*. USGS press, 43 p.
- Tsurikhin E., Loginov V., Sauro F., Breitenbach S., 2013. *Exploration of high altitude caves in the Baisun-Tau mountain range, Uzbekistan*. Proceeding of the 16th International Congress of Speleology, 2, pp. 142-147.
- Yoder C.F., Konopliv A.S., Yuan D.N., Standish E.M., Folkner W.M., 2003. *Fluid core size of Mars from detection of the solar tide*. Science, 300, pp. 299-303.
- Watters T.R., McGovern P.J., Irwin III R.P., 2007. *Hemispheres apart: the crustal dichotomy on Mars*. Annual review of Earth and planetary sciences, 35, pp. 621-652.

Bibliografia Immagini.

Figura 1: *High-Resolution Self-Portrait by Curiosity Rover Arm Camera.jpg* proprietà intellettuale della NASA, ma foto di dominio pubblico.

Figura 2: Licenza Wikipedia Common, dunque immagine priva di copyright se non usata a scopo di lucro

Figura 3: Licenza Wikipedia Common, dunque immagine priva di copyright se non usata a scopo di lucro

Figura 4: Due foto proprietà della NASA e in quanto tali loro proprietà intellettuale, ma libere da copyright.

Figura 5: Illustrazioni tratte e modificate a partire da *Baldo et al., 2014*.

Figura 6: Foto scattata dal Mars Reconnaissance Orbiter, priva di Copyright se non usata a scopo di lucro.

Figura 7: Foto ottenuta tramite Mars Reconnaissance Orbiter e il suo strumento THEMIS, priva di Copyright se non usata a scopo di lucro.

Figura 8: Carta geomorfologica del cratere 12000088 tratta da *Baldo et al., 2014*.

Figura 9: Foto ottenuta tramite Mars Reconnaissance Orbiter e modificata con il programma ArcMAP 10.1 per scopi scientifici, pertanto priva di Copyright.

Figura 10: Autoprodotta.

Figura 11: Autoprodotta.

Figura 12: Foto ottenuta tramite Mars Reconnaissance Orbiter e modificata con il programma ArcMAP 10.1 per scopi scientifici, pertanto priva di Copyright.

Figura 13: Profilo disegnato a partire da una foto ottenuta tramite Mars Reconnaissance Orbiter e modificata con il programma ArcMAP 10.1 (estensione 3d Analyst) per scopi scientifici, pertanto priva di Copyright.

Figura 14: Profilo disegnato a partire da una foto ottenuta tramite Mars Reconnaissance Orbiter e modificata con il programma ArcMAP 10.1 (estensione 3d Analyst) per scopi scientifici, pertanto priva di Copyright.

Figura 15: Profilo disegnato a partire da una foto ottenuta tramite Mars Reconnaissance Orbiter e modificata con il programma ArcMAP 10.1 (estensione 3d Analyst) per scopi scientifici, pertanto priva di Copyright.

Figura 16: Autoprodotta. Uso di Microsoft Excel.

Figura 17: Autoprodotta. Uso di Microsoft Excel.

Figura 18: Grafico autoprodotta tramite Microsoft Excel e SPSS.

Figura 19: Profilo disegnato a partire da una foto ottenuta tramite Mars Reconnaissance Orbiter e modificata con il programma ArcMAP 10.1 (estensione 3d Analyst) e successivamente ulteriormente cambiata con un software grafico, usata per scopi scientifici pertanto priva di copyright.

Figura 20: Foto ottenuta tramite Mars Reconnaissance Orbiter e modificata con il programma ArcMAP 10.1 per scopi scientifici, pertanto priva di Copyright.

Figura 21: Foto ottenuta tramite Mars Reconnaissance Orbiter e modificata con il programma ArcMAP 10.1 per scopi scientifici, pertanto priva di Copyright.

Figura 22: Tratto da *Tsurikhin et al., 2013*.

Figura 23: Foto ottenuta tramite l'uso di Google Earth e di conseguenza priva di copyright se non usata a scopo di lucro.

Figura 24: Due foto, entrambe dettagli estrapolate da foto più grandi, una di proprietà della NASA e l'altra di Google, pertanto prive di Copyright se non usate a scopo di lucro.

Tabella 1: Tabella tratta da *Marnocha et al., 2010*.

Tabella 2: Autoprodotta. Elaborazione tramite Microsoft Excel e SPSS.

Tabella 3: Autoprodotta. Elaborazione tramite Microsoft Excel e SPSS.

Tabella 4: Autoprodotta. Elaborazione tramite Microsoft Excel e SPSS.

Ringraziamenti

Questa tesi nasce in poco più di un mese sotto la costante guida dei professori Jo De Waele e Francesco Sauro, dell'Università Alma Mater di Bologna. A loro va il mio più sincero ringraziamento per il supporto e il tempo dedicatomi (e le mie scuse per essermi ridotto a tempi così stringenti).

Devo altresì porgere la stessa cortesia nei confronti del dipartimento di Scienze Geologiche dell'Università di Padova che mi ha fornito il materiale (DEM, ortofoto, alcuni dati) sul quale lavorare.

Urge poi menzionare anche il professor Fausto Desalvo che a pochi giorni dalla consegna mi ha addirittura accolto in casa propria pur di risolvermi un problema di stampo statistico che affliggeva me e i miei dati.

Ringrazio i professori Pini, Picotti, Capaccioni, Cantelli, Fanti, Spalletta, Gasparotto e Ghirotti che o per la passione profusa nel loro insegnamento o per altre ragioni hanno contribuito grandemente al raggiungimento di questo mio piccolo traguardo.

Passando alla sfera personale non posso non salutare e ringraziare con tutto il cuore Monica, forse l'unica ragazza esistente capace di tollerare certi miei comportamenti e starmi accanto giorno per giorno. Non ci sono parole che valgono quanto quello che hai saputo fare per me. Questa tesi è come se fosse stata scritta per metà di tuo pugno.

Barbara è un'altra persona che in un momento importante della mia vita mi sento di ringraziare con tutto il cuore: capace di motivarmi e sempre interessata a ciò che faccio anche quando i miei impegni mi costringono a sparire per mesi. Se pensi che le nostre vite abbiano preso vie differenti, mi impegnerò per dimostrarti il contrario.

Saluto anche Alice che in un periodo un po' buio mi ha fatto tornare la voglia di studiare a suon di calci e carezze.

Ringrazio Alessandro per la compagnia a lezione, per le risate e per gli inconvenienti impossibili; tutti affrontati al passo del bradipo zoppo che caratterizza le nostre passeggiate durante le pause pranzo.

Dragana: grazie. Betacarotene.

Ringrazio Nonna Maria che con il pugno di ferro e la pazienza d'un santo mi ha fatto recuperare la passione per la matematica e le materie scientifiche ormai tantissimi anni fa.

Più in generale tutta la mia famiglia ha saputo essere d'aiuto (anche economicamente) in momenti complementari a quelli in cui mi son stati vicini i miei amici: Nicholas, Emanuele, Gabriele, Matteo, Andrea, Gaia, Silvia, Matilde, Letizia, Noemi, Elena.

Siete tantissimi e non posso salutarvi tutti, ma il mio pensiero e la mia gratitudine va anche a voi, infine un ringraziamento anche a chi oggi non c'è più. Se c'è un motivo più degli altri che mi ha spronato a fare del mio meglio è proprio la vostra assenza.