

POLITECNICO DI MILANO
SCUOLA DI INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE E TERRITORIALE
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL
TERRITORIO



**IL PIANETA MARTE:
TELERILEVAMENTO E GEOMORFOLOGIA**

Relatore: Prof. Giovanmaria **LECHI**
Correlatore: Prof. Rodolfo **SONCINI SESSA**

Tesi di Laurea di:
Gabriele RUGGIERO
Matricola n. 720274

ANNO ACCADEMICO 2010-2011

*A mio padre e mio nonno.
Esempi silenziosi di tenacia, fiducia e responsabilità.
Con gratitudine
Gabriele*

Indice

1	Premessa	1
1.1	Confessioni di un ibrido ingegnere che guarda lontano, forse troppo	1
2	Introduzione e scopo del lavoro	3
2.1	Struttura della tesi	3
2.2	Introduzione e scopo del lavoro	4
2.3	Strumenti utilizzati	4
3	L'esplorazione	6
3.1	L'esplorazione	6
3.1.1	L'esplorazione Terrestre	6
3.1.2	L'esplorazione dello Spazio	11
3.1.3	L'esplorazione di Marte	12
3.2	Marte	16
3.2.1	Caratteristiche del Pianeta Rosso	16
3.2.2	I crateri di Holden e Eberswalde	22
3.2.3	Il cratere di Holden	24
3.2.4	La zona di Eberswalde	25
3.2.5	Mars Reconnaissance Orbiter	28
4	Dati a disposizione e loro analisi	31
4.1	Analisi generale dei dati	31
4.2	Dati da ConTeXt Camera (CTX)	32
4.3	Processing CTX	33

4.4	Dal 2D al 3D	50
4.5	Dati da CRISM	67
5	Ipotesi di modellazione	84
5.1	Scopo del lavoro e introduzione ai modelli classici	84
5.2	Analisi dettagliata dei modelli	85
5.3	Processi di trasporto	91
5.3.1	Frane	92
5.3.2	Erosione da flussi superficiali	92
5.3.3	Incisione del letto alluvionale	93
5.3.4	Incisione del <i>bedrock</i> per processi fluviali	93
5.3.5	Incisione del <i>bedrock</i> per debris flow	94
5.3.6	Erosione glaciale	94
5.4	Approccio topografico ad alta risoluzione	95
5.4.1	LEMs on Mars	95
5.5	Commenti e osservazioni	99
5.5.1	Modello SIBERIA	103
6	Risultati e conclusioni	106
6.1	Pregi, difetti e affidabilità dei dati CTX	106
6.2	Pregi, difetti e affidabilità dei dati CRISM	113
6.3	Modelli di evoluzione geomorfologica	114
7	Sintesi delle attività	116
7.1	Sintesi delle attività	116
8	Sviluppi futuri	120
8.1	Sviluppi futuri	120

Elenco delle figure

3.1	Ingrandimento della tavola Peutingeriana nella zona di Roma; Hofbibliothek di Vienna	8
3.2	<i>Nova et Aucta Orbis Terrae Descriptio ad Usum Navigatium Emendate</i> ; fonte www.wikipedia.org	9
3.3	Affreschi Musei Vaticani	10
3.4	Carta della superficie di Marte di G. Schiaparelli, anno 1888	13
3.5	Prima immagine di Marte, 15 Luglio 1965, da sonda Mariner 4	14
3.6	Robot Sojourner fotografato dal lander	14
3.7	Sistema Solare e pianeta Marte	16
3.8	Marte in falsi colori da immagine MOLA	17
3.9	Tabella delle epoche marziane da Tanaka (1986) e Tanaka et al. (1988)	19
3.10	Topografia di Marte, visualizzazione Google Mars	20
3.11	Geologia di Marte 3.11	22
3.12	Geologia della zona di studio	22
3.13	Cratere Holden ed Eberswalde (Google Mars), MOLA in scala di colori	23
3.14	Delta di Holden	25
3.15	Figura A, canali fluviali e tipiche barre; figura B, canali sinuosi.	27
3.16	Geologia della zona di Eberswalde, da [1]	28
3.17	Geologia e cronostratigrafia del delta di Eberswalde, da [1]	28
3.18	Orbiter MRO	29
4.1	Context Camera, da [2]	32

4.2	Planetary Image Atlas	35
4.3	Immagine di Eberswalde, in arancione i footprint e in evidenza i nomi delle immagini	36
4.4	Schermata video con le due tipologie di file	37
4.5	Mola e footprint CTX da progetto ArcGis	37
4.6	Mola e footprint CTX da progetto ArcGis nella zona Holden-Eberswalde	38
4.7	Schema di base per il filtraggio	39
4.8	Elenco immagini Eberswalde e Holden	40
4.9	Esempio di camera shading: sinistra ripresa reale, destra ideale	42
4.10	Schema componenti tubo VIDICON	42
4.11	Reti, dati mancanti, sale e pepe	46
4.12	Esempio di errore dello strumento	46
4.13	Errore di trasmissione	47
4.14	Errore di compressione	47
4.15	Esempio di taglio di un'immagine	48
4.16	A sinistra la tipologia standard; a destra la tipologia usata	49
4.17	Elenco coppie usate per Eberswalde e delta di Holden	51
4.18	Serie di immagini da Stereo Pipeline e Goog Pixel map	52
4.19	Bacino di Eberswalde	54
4.20	Delta nel cratere di Holden	54
4.21	MOLA e HRSC di Eberswalde	55
4.22	MOLA e HRSC del delta a Sud di Holden	55
4.23	Holden in primo piano, Eberswalde in secondo piano	56
4.24	CTX Eberswalde	56
4.25	CTX delta di Holden	57
4.26	CTX delta di Eberswalde da coppia 6	58
4.27	Ingrandimento con curve di livello	58
4.28	Curve di livello a 10 m delta di Holden	59
4.29	CTX delta di Eberswalde da coppia 6 con sezioni altimetriche	59
4.30	Sezioni altimetriche delle sezioni AB e CD Eberswalde	60

4.31	CTX Holden con sezioni altimetriche	60
4.32	Sezioni altimetriche delle sezioni AB e CD Holden	61
4.33	Modello 3D del delta di Eberswalde da CTX	62
4.34	Modello 3D del delta di Holden da CTX, visione semi frontale	62
4.35	Modello 3D del delta di Holden da CTX, visione dall'alto	63
4.36	Figura <i>a</i> : particolare da CTX, linee di stratificazione	64
4.37	Strati	64
4.38	Figura <i>a</i> : particolare da HRSC, linee di stratificazione	64
4.39	Figura <i>b</i> : confluenza 3 canali ed inizio del delta	65
4.40	Figura <i>b</i> : confluenza 3 canali ed inizio del delta	65
4.41	Area delta Eberswalde	66
4.42	Fronte delta Eberswalde; ingrandimento da HRSC	66
4.43	Fronte delta Eberswalde; ingrandimento da CTX.	67
4.44	Camera CRISM, fonte http://crism.jhuapl.edu/instrument/innoDesign.php	68
4.45	Immagine dello spettro elettromagnetico.	68
4.46	Caratteristiche tecniche dello strumento	69
4.47	Diagramma dell'ottica	70
4.48	Rappresentazione del dato da Spettrometro, da [3]	70
4.49	Footprint delle immagini CRISM scelte per Eberswalde, in blu	71
4.50	Footprint delle immagini CRISM scelte per Holden, in blu	71
4.51	Elenco immagini CRISM scelte per Eberswalde e Holden	73
4.52	Schermata iniziale di ENVI con il tool CAT, pagina iniziale della guida	73
4.53	Firma della CO ₂ nei pressi del Monte Olympus	75
4.54	Delta di Holden pre e post correzione	76
4.55	Zone di acquisizione delle firme spettrali	77
4.56	Schermata di lavoro per firme spettrali Holden 6246	78
4.57	Grafico firme spettrali Holden 6246	78
4.58	Grafico firme spettrali Eberswalde 60DD	79
4.59	Holden 6246	80
4.60	Eberswalde 60DD	80

4.61	Firme spettrali standard da libreria CRISM di Envi	82
5.1	Schema di riferimento dellequazione di conservazione della massa	89
5.2	Schema di funzionamento modello D8 da [4]	101
5.3	Schema base del modello Dinfinity da www.mathworks.com . . .	102
5.4	Schema angoli 1) D8, angoli rigidi; 2) Dinfinity, angoli continui .	102
5.5	a) Condizione iniziale; b) e c) risultati da simulazione D8 e Dinfinity	103
6.1	Piccolo cratere sul delta di Holden con ombra interna	106
6.2	CTX coppia 6	107
6.3	CTX coppia 4	107
6.4	Risoluzioni Eberswalde	109
6.5	Bacino di accumulo di Eberswalde	110
6.6	Zone di matching	110
6.7	Zona di matching stereocoppia 15 e 14	111
6.8	Zona delta Holden: coppie C e SX1, in sfondo nero immagine HRSC	111
7.1	Grafico a torta delle attività svolte	118
7.2	Grafico a torta delle attività pesate	118
7.3	Diagramma di GANTT delle attività svolte	119

Elenco delle tabelle

3.1	Confronto fra le caratteristiche geo-fisiche Terra-Marte	18
3.2	Gas dell'atmosfera marziana da [5]	19
3.3	Composizione chimica del suolo marziano, da [6]	23
5.1	Modelli e loro caratteristiche	96

Capitolo 1

Premessa

1.1 Confessioni di un ibrido ingegnere che guarda lontano, forse troppo

Iniziare la descrizione del lavoro svolto entrando subito nel vivo degli argomenti trattati, risulterebbe decisamente ‘ingegneristico’ e forse anche più interessante come approccio, ma non permetterebbe di capire quali sono state le ragioni che mi hanno spinto a lavorare su di un tema così atipico e originale, all’interno dell’Ingegneria Ambientale. Lo scopo di una tesi specialistica, in generale, dovrebbe essere quello di fornire allo studente gli strumenti necessari ad immergersi nel mondo del lavoro, completando quell’iter formativo che fornisce buone basi nozionistiche e metodologiche. Di conseguenza la scelta del tema di tesi può avvenire per: interesse e passione, particolare propensione e bravura, intenzione di lavorare successivamente in un’azienda e, non nascondiamolo, anche voglia di finire in fretta. Nel mio caso, invece, la scelta è avvenuta essenzialmente per desiderio di imparare appieno il metodo ingegneristico. Già, perché la mia laurea triennale in geologia mi aveva permesso di acquisire una discreta conoscenza del metodo scientifico, mentre lo studio successivo degli esami della laurea specialistica al Politecnico, pur incrementando notevolmente il mio bagaglio nozionistico e tecnico-culturale, non mi aveva ancora lasciato la ‘struttura’ del metodo ingegneristico, decisamente utile per affrontare poi un ampio spettro di problemi pratici. Per questo motivo ho

cercato in vario modo un tema e un professore che potesse formarmi colmando questo gap. Il mio interesse nel campo del Remote Sensing mi ha portato dal Professor G. Lechi, il quale, valorizzando il mio passato geologico, mi ha proposto semplicemente di osservare Marte con tecnologie satellitari, garantendo sì l'assimilazione del metodo ingegneristico ma non garantendo con certezza il buon esito dei possibili risultati quantitativi del lavoro, a causa delle forti incertezze in ambito planetario. Quest'idea un po' bizzarra, almeno in campo ambientale (che di solito ha come oggetto di studio l'uomo e le sue interazioni con l'ambiente terrestre), mi ha dapprima incuriosito e successivamente affascinato, sorprendendomi per l'utilità che avrebbero avuto i miei studi geologici anche in questo campo. Da qui si sono susseguiti una serie di eventi, viaggi, cambiamenti di obiettivi che hanno poi portato a completare questo iter universitario. Le ricerche effettuate, le problematiche affrontate, gli ostacoli superati più che il risultato in sé, credo mi abbiano permesso di assimilare questo metodo, completando così la mia formazione.

Capitolo 2

Introduzione e scopo del lavoro

2.1 Struttura della tesi

Questo lavoro di tesi si suddivide in tre sezioni. La prima sezione inizialmente vuole inserire il lavoro svolto nel contesto esplorativo globale, evidenziando alcuni esempi di storia dell'esplorazione terrestre prima e spaziale poi. Successivamente si mostrano quelli che sono stati i passi dell'esplorazione marziana. Chiudono la sezione le informazioni geologiche del Pianeta Rosso e la specifica geo-morfologia relativa ai due crateri di Eberswalde e Holden studiati. Il paragrafo relativo al satellite *Mars Reconnaissance Orbiter* vuole mostrare lo strumento che ha acquisito i dati utilizzati in questo lavoro, descritti nello specifico nella seconda sezione. L'ultima sezione delinea la traccia per una possibile estensione dei modelli di evoluzione geomorfologica, già utilizzati in alcuni ambienti terrestri, alla superficie di Marte, in maniera tale da fornire un utile supporto quantitativo alla realizzazione di teorie di genesi delle forme deltizie presenti nelle zone analizzate.

2.2 Introduzione e scopo del lavoro

I dati-immagine acquisiti dal satellite *Mars Reconnaissance Orbiter* (MRO) permettono di rappresentare la superficie del pianeta Marte nelle sue caratteristiche più evidenti, sempre più dettagliate in funzione della risoluzione delle immagini e degli strumenti di indagine. In questo lavoro si è scelto di analizzare in particolare due zone del pianeta, Eberswalde e Holden, che presentano nei loro crateri due sistemi deltizi, uno derivante da un possibile ambiente lacustre, l'altro un ambiente alluvionale. Dai dati raw della ConTeXt Camera (CTX), attraverso il software ISIS si sono ricavate immagini 2D della superficie, a risoluzione compresa tra i 5-6 m/pixel. Dal processing di coppie di immagini contigue si sono ricavati i corrispettivi DEM che, importati in ArcScene di ArcGis, hanno permesso di ottenere modelli 3D dei delta. Dai dati spettrometrici dello strumento CRISM invece, si sono ottenute, attraverso l'analisi con il software CATCRISM di ENVI, le firme spettrali dei minerali di zone prive di polveri dei delta. L'ultimo passo del lavoro è stato tracciare le linee guida per lo sviluppo di un modello di evoluzione geomorfologica marziana, ispirandosi agli attuali Landscape Models terrestri, potenzialmente capace di descrivere e quantificare i processi erosivi e di trasporto che modificano le aree di indagine. Di grande importanza per raggiungere questo obiettivo sono le informazioni geologiche derivanti da passate missioni spaziali, da recenti studi e da analisi ad alta risoluzione. In questo modo si vuole porre le basi per lo studio quantitativo delle caratteristiche energetiche del possibile fluido di trasporto dei sedimenti.

2.3 Strumenti utilizzati

I dati utilizzati in questo lavoro sono stati acquisiti da tre satelliti risultati decisivi per l'esplorazione planetaria: il *Mars Reconnaissance Orbiter* (MRO), il *Mars Express*, il *Mars Global Surveyor* (MGS). Il primo ha permesso di utilizzare immagini della superficie marziana derivanti dalla ConTeXt Camera e dallo spettrometro *Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars* (CRISM). Il

secondo ha permesso di confrontare i DEM ricavati dall'analisi CTX con il DEM acquisito dalla stereocamera HRSC [7], *High Resolution Stereo Camera*. Il terzo ha fornito quello che è considerato universalmente dalla comunità scientifica come riferimento altimetrico del Pianeta Rosso, ovvero la mappa MOLA, da *Mars Orbiter Laser Altimeter*. In particolare, i dati CTX sono un insieme di dati raccolti contemporaneamente sia dalla camera HiRISE sia dallo spettrometro CRISM, fornendo una panoramica globale del contesto (ConTeXt, CTX) geo-topografico di ogni singola zona (si spiega così l'origine del nome). Bisogna considerare che i riferimenti delle quote dei modelli MOLA, HRSC e CTX sono differenti tra loro. Infatti, gli sferoidi d'origine variano di raggio in funzione dell'utilizzo. I limiti di questo sistema sono descritti nel paragrafo 6.1.

I dati CRISM sono registrazioni delle lunghezze d'onda riflesse dalla superficie di Marte e comprese tra l'ultravioletto (380 nm) al rosso (750 nm) nel visibile, e fino alle onde medie nell'infrarosso. Questi permettono di interpretare le firme spettrali dei sedimenti che appaiono in superficie e, di conseguenza, arrivare a conclusioni relative alla densità dei minerali che li compongono, stabilendone quindi la tipologia e la possibile origine.

Capitolo 3

L'esplorazione

3.1 L'esplorazione

Da sempre l'indole dell'uomo è quella di indagare, cercare qualcosa che possa soddisfare la sua sete di conoscenza per rispondere alle domande che i fenomeni naturali a scala locale e globale gli suscitano. Le esigenze primarie della sopravvivenza da un lato, la curiosità e lo spirito d'avventura dall'altro, hanno spinto l'uomo a viaggiare, a esplorare, a rischiare. Questo lavoro di tesi si vuole inserire proprio in questo alveo, prendendo il canale della conoscenza scientifica planetaria e utilizzando come mezzo di trasporto le conoscenze e le tecnologie che l'ingegno umano ha sviluppato: 'Considerate la vostra semenza:/ fatti non foste a viver come bruti,/ ma per seguir virtute e canoscenza.' (Dante, Divina Commedia, canto XXVI, 118-120).

3.1.1 L'esplorazione Terrestre

Dalle origini ad oggi

L'esplorazione terrestre ha reso necessaria la rappresentazione di luoghi, itinerari e ambienti su supporto cartaceo. Dal momento che il tema cartografico è di grande interesse, ci è parso utile raccogliere alcune informazioni riguardanti la nascita e l'evoluzione della cartografia terrestre per capirne l'origine. La lettura de *Carto-*

grafia e Territorio nei secoli ci è stata di grande aiuto e ha permesso di acquisire una visione globale di ciò che è stata la cartografia per le varie civiltà e popoli e nel corso della storia.

Dalla premessa: 'La trasposizione geografica dello spazio, che rappresenta l'intima essenza della carta geografica, è una indubbia conseguenza del bagaglio culturale e della visione della realtà del cartografo che la disegna. Questi, infatti, trasfonde in essa la *summa* delle conoscenze a lui note, ovvero sia le notizie desunte da altri (studiosi e viaggiatori), sia le sue esperienze dirette (viaggi e misure), più o meno scientificamente comprovate. Meno cosciente [...] è però un'altra trasposizione che il cartografo effettua nel momento in cui realizza la sua carta. Nell'impostare il disegno [...] il cartografo attinge più o meno passivamente a quella che è la concezione politica del suo Paese in quel determinato momento. [...] Per tali motivi la carta geografica può essere considerata non solo l'indice più veritiero del livello intellettuale di un popolo [...] ma anche e soprattutto una guida per l'interpretazione della concezione che un popolo ha di se stesso e dei suoi rapporti con gli altri, nonché, più in particolare, una traccia da seguire per ricostruirne le esigenze primarie. La carta diventa così una chiave di lettura (o di rilettura) della storia, dalla quale estrapolare i riflessi della visione della realtà di un popolo e di una intera civiltà.' [8].

Si è scoperto che le prime popolazioni che rappresentavano il loro territorio furono gli Inuit e gli Yupik, popoli dell'Alaska, Canada, Groenlandia e Est Russia, meglio conosciuti come Esquimesi. Per fini di sopravvivenza, essi producevano tavolette e ospitavano in una tenda del villaggio un 'plastico' dei luoghi più pescosi o più proficui per la caccia o dei luoghi di ristoro, risalenti a più di 2 000 anni prima di Cristo. Parallelamente, anche i popoli mesopotamici e gli Egizi costruivano carte, ma anche con fini bellici, di conquista militare. A loro segue la civiltà greca che, assieme all'intento tecnico-pratico, affianca la filosofia unendo per la prima volta cartografia e geografia. Fautore di questa unione fu per primo Omero, seguito da altri cartografi-filosofi di cui ricordiamo il primo, Anassimandro di Mileto (600 a.C.), redattore della prima carta (*pinax*); Ippodamo, primo urbanista, e Eratostene, primo ad applicare concetti e regole matematiche al disegno

cartografico (misura del meridiano terrestre), sempre della scuola di Mileto (200 a.C.). Successivamente, ad Alessandria d'Egitto, Tolomeo (attorno al 150 d.C.), sviluppando, correggendo e migliorando le idee cosmologiche di Marino di Tiro, localizza, con una fitta rete di meridiani e paralleli, le coordinate di circa 8 000 città. Utilizzando le scoperte dei popoli conquistati, la civiltà romana inventa strumenti (meridiana e gnomone) di misura delle coordinate e dei terreni, per fini esattoriali e militari, e sviluppa quella che viene definita la prima carta delle strade dell'impero, la cosiddetta *Tavola Peutingeriana* (pervenutaci solo come copia del XII secolo), redatta, forse, attorno all'anno 0 a.C. e rappresentante circa 200 000 km di strade suddivise in 11 tavolette per una lunghezza totale di 680 cm.

Questa non è proiettata né geometricamente corretta, non rispetta le distanze

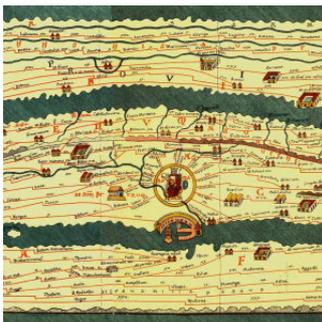


Figura 3.1 Ingrandimento della tavola Peutingeriana nella zona di Roma; Hofbibliothek di Vienna

reali, ma assolve allo scopo per cui era stata pensata: costruire una sorta di atlante stradale del *cursus publicus*. Unisce informazioni sull'importanza delle città (impersonificate) e luoghi di interesse con informazioni di carattere geografico come presenza di passi, montagne e fiumi. Fino al termine dell'epoca romana vennero solamente perfezionate le tecniche di rilievo. Con un salto di qualche secolo, passando all'Alto Medioevo (successivamente al 476 d.C.), si è fatta una scoperta molto interessante: l'aspetto religioso-spirituale, così fondamentale nel clima socio-culturale dell'epoca, arriva perfino a superare l'interesse della rappresentazione cartografica oggettiva. La cartografia, quindi, non si figura più come

strumento tecnico scientifico di rappresentazione del territorio ma come compendio grafico del sapere universale. L'aspetto pratico, però, viene rimarcato dalle carte catastali che vedono il loro fiorire sotto l'impero di Carlo Magno. Il Basso Medioevo poi, vede sia l'influenza dei pellegrini reduci da Gerusalemme, i cui racconti erano molto miticizzati, sia l'apporto delle nuove tecniche di navigazione (la bussola e l'astrolabio) dei primi esploratori che importarono anche le conoscenze scientifico-matematiche oltre che cosmologiche della Scuola Araba. Nascono così i primi mappamondi, i più importanti sono ad opera di Fra Mauro, monaco veneziano. Le grandi rivoluzioni dell'Età Moderna poi, la stampa, il Nuovo Mondo, i grandi mecenati e gli scambi culturali tra mondi lontani, portarono un fiorire della cartografia. Ricordiamo il mappamondo in proiezione isogonica cilindrica centrografica di Mercatore dell'anno 1569 (figura 3.2) e la Galleria delle Carte Geografiche dei Musei Vaticani (figure 3.3(a) e 3.3(b)).

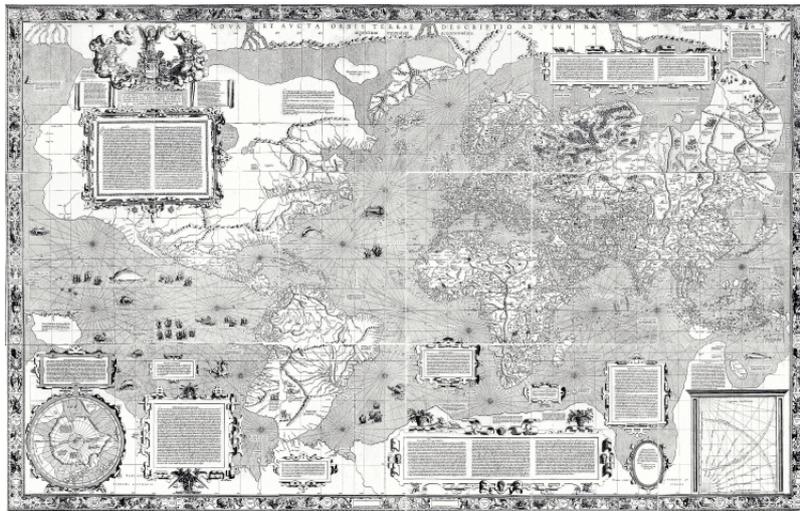


Figura 3.2 *Nova et Aucta Orbis Terrae Descriptio ad Usum Navigatium Emendate*; fonte www.wikipedia.org

L'Età Moderna vede poi anche la nascita del sestante, del teodolite e del cannocchiale: strumenti base per la triangolazione della cartografia geodetica. Nel 1700-1800, il benessere economico di alcuni e la sete di potere e conquiste, fanno nascere la figura dell'esploratore e i suoi viaggi si tramutano in vere e proprie spedizioni, come quelle tra le isole del Pacifico. Per l'Italia, sull'onda della



(a) Calabria, Carta affrescata nella Galleria dei Musei Vaticani, 1581 circa



(b) Rosa dei venti, per l'orientazione della carta, particolare

Figura 3.3 Affreschi Musei Vaticani

recente Unità Nazionale, nasce nel 1872 l'Istituto Geografico Militare (IGM, ora IGMI) che permette di redigere carte globali e di dettaglio di tutta Italia. Qui vogliamo citare alcuni padri italiani dell'aerofotogrammetria: I. Porro, foto sferica con angolo di visuale di 125 gradi (1855); P. Paganini, camera fotografica associata a teodolite, (1880); A. Ranze, fotografia di Roma da pallone aerostatico (1902). Successivamente, il perfezionamento dell'aerofotogrammetria prima e l'avvento delle immagini da aereo che permettevano anche la stereoscopia, hanno permesso di giungere a quella scienza che oggi chiamiamo Telerilevamento (Remote Sensing). Le informazioni, il grado di dettaglio e le applicazioni sono davvero sconfinata.

Dopo questo breve viaggio tra civiltà e cartografia, abbiamo capito che ciò che accomuna le rappresentazioni cartografiche antiche con quelle moderne sono le finalità. Infatti, oggi come ieri, una carta geografica presenta scopi didattici, si pensi alle carte del globo nelle scuole; di ricerca, mappe dell'evoluzione glaciale; operativi, Carte Tecniche Regionali; fiscali, mappe del Catasto; militari e turistici. Devono poi sempre rispettare i requisiti di attualità dei contenuti e di specializzazione tematica, necessari a una pianificazione e gestione accurata. In ogni caso,

si è capito che la cartografia è sempre stata uno strumento al servizio dei mercati economici, come ad esempio per le scoperte di C. Colombo e M. Polo; del potere politico e militare, dalle grandi conquiste della Roma antica alla conquista della Luna; e del potere religioso, si pensi alle Crociate e alle invasioni Islamiche.

3.1.2 L'esplorazione dello Spazio

Dopo aver guardato l'esplorazione del nostro piccolo globo, ora si vuole brevemente trattare di quella che è stata ed è la storia dell'esplorazione spaziale.

L'esplorazione spaziale può essere suddivisa in tre fasi:

1. ad occhio nudo
2. con telescopio
3. *in situ*

La prima fase, lunga quasi 4 000 anni e ricca di testimonianze archeologiche, ha generato l'astronomia come scienza e ha visto, dopo validi osservatori aztechi, arabi, di popoli della mesopotamia e greci, tre grandi astronomi susseguirsi tra il 1473 e il 1630: N. Kopernik, T. Brahe e J. Kepler. I pianeti Mercurio, Venere, Marte, Giove e Saturno assieme alla Luna trovano posto ne *De revolutionibus orbium coelestium* di Copernico.

La seconda fase ha il suo inizio con l'invenzione del primo rudimentale telescopio: il 'cannone con occhiale' di Galileo (1609). Le sue scoperte riguardanti le montagne della Luna, la Via Lattea fatta di stelle e i satelliti di Giove furono confermate da Keplero, che utilizzò un cannocchiale pervenutogli dall'Italia. L'orbita ellittica dei pianeti venne poi dimostrata da Newton nei *Principia* (1687). Successivamente si susseguirono, in una vertiginosa accelerazione della scienza, numerose scoperte fisiche e astronomiche. È alla fine di questa fase che si devono le prime osservazioni della superficie di Marte da parte di G. Schiaparelli (1877), che incontreremo a breve, e A. Hall.

La terza fase nasce il 5 ottobre 1957: i russi mettono per primi in orbita lo Sputnik.

Da quel momento ad oggi i progressi della scienza sono stati numerosi e importanti; ha spinto l'uomo sulla Luna e hanno portato satelliti e sonde attorno alla Terra e ad altri pianeti e verso i confini del Sistema Solare, oltre che ad ascoltare la radiazione cosmica con le grandi attuali scoperte della sonda Planck.

3.1.3 L'esplorazione di Marte

Nelle fasi dell'esplorazione dello spazio, tanti sono stati gli astronomi che hanno osservato Marte (figura ??). Seguono ora solo alcuni nomi, spunti e riflessioni che hanno permesso di conoscerlo meglio.

Nell'antichità

La mitologia romana e greca si distinguono per il fatto che Marte è considerato dai romani sia come dio della guerra sia come il benevolo padre di Romolo e Remo, divinizzando così la fondazione di Roma; Ares greco, per contro, è una divinità malevola, il dio degli aspetti più sanguinari e violenti della guerra, che genera terrore e paura. Curioso è il fatto che il pianeta sia stato chiamato Marte mentre i suoi satelliti non si chiamino Romolo e Remo bensì Phobos e Deimos, figli di Ares. Così come per il nome, anche per l'impatto sociale che Marte ha avuto ed ha tuttora sulle persone coesistono un aspetto positivo e uno negativo: il primo è legato all'interesse che suscita il pianeta dal punto di vista scientifico, che porterà alla prima 'passeggiata' marziana; il secondo è legato invece alla paura delle invasioni marziane, una sorta di terrore che ha portato fino alla drammatizzazione radiofonica della *Guerra dei Mondi* nel 1938 che provocò panico negli USA e paralizzò la città di New Jersey. Si ricordi anche che a Marte, sempre di derivazione romana, è anche dedicato il secondo giorno della settimana.

Nell'era moderna

Approfittando della *grande opposizione* di Marte del 1877, posizione in cui il pianeta era al suo perielio e contemporaneamente alla minima distanza dalla Terra (circa 63 Milioni di km), Giovanni Schiaparelli, dal milanese Osservatorio di Bre-

ra, inizia una serie fortunata di osservazioni che prendono corpo con la redazione di una carta della superficie marziana. I dettagli della fitta rete di canali di Schiaparelli stupiscono il mondo scientifico e l'opinione pubblica. L'errata traduzione della parola *canali* nell'inglese *canals*, canali artificiali, e non in *channels*, canali naturali, e la grande curiosità di una vita extraterrestre, portarono P. Lowell, astronomo statunitense, a credere proprio alla presenza di forme di vita molto più intelligenti e tecnologicamente avanzate dell'uomo, teoria confutata completamente solo nel 1965 con le prime immagini della sonda Mariner 4. Contemporaneamente a Schiaparelli, A. Hall scoprì i due satelliti di Marte a cui diede nome Phobos e Deimos.

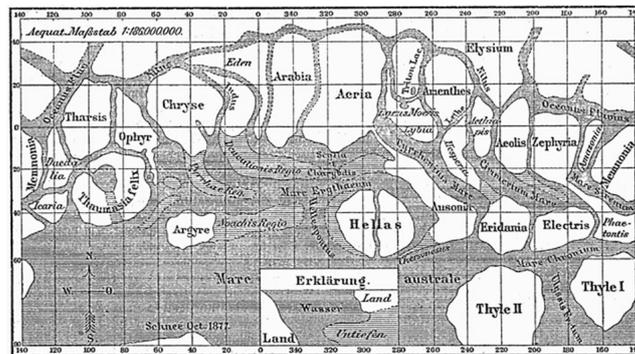


Figura 3.4 Carta della superficie di Marte di G. Schiaparelli, anno 1888

Oggi: da Mariner 4 a MRO e Phoenix

Di seguito si vuole tracciare una breve cronologia delle missioni spaziali scientificamente importanti che hanno reso possibile una così dettagliata conoscenza del pianeta fino ad oggi.

Durante il periodo della Guerra Fredda, dopo cinque tentativi falliti di sorvolo del Pianeta Rosso da parte sovietica e uno da parte statunitense, nel 1965 la sonda Mariner 4 della NASA riuscì nell'impresa inviando a Terra le prime 22 immagini della superficie di Marte.

Nel 1969 altre due missioni USA, Mariner 6 e 7 sorvolarono il pianeta sulla stessa zona della prima sonda riprendendo la superficie a risoluzione maggiore.

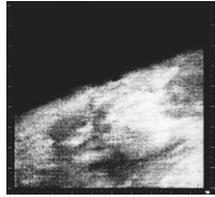


Figura 3.5 Prima immagine di Marte, 15 Luglio 1965, da sonda Mariner 4

La missione Mariner 9 fornì immagini a risoluzione 1 km/pixel e localmente a 100 m/pixel suscitando negli scienziati una prima impressione di paesaggio lunare. Il 1975-76 videro la buona riuscita delle missioni Viking 1 e 2, destinate a stravolgere il mondo dell'esplorazione extraterrestre. Esse erano composte ciascuna di un *orbiter*, il cui scopo era quello di fotografare la superficie per far 'ammartare' il suo *lander*, robot comandato da Terra con a bordo strumentazioni scientifiche di alta precisione. Le 50 000 immagini riprese dai due Orbiter e mosaicate negli anni successivi, permisero di costruire una carta globale del pianeta con particolare attenzione a zone di interesse geomorfologico. Le valli fluviali furono riprese con risoluzioni molto elevate e la loro analogia con le forme terrestri portò piano piano a ipotizzare la presenza di acqua piuttosto che altri fluidi. Dopo la missione Phobos 2 dell'88, che restituì immagini oltre che del pianeta, anche del suo satellite, le missioni americana Mars Observer del 1992 e russa Mars 96 fallirono lasciando spazio alle grandi missioni Mars Pathfinder e Mars Global Surveyor del 1996. La prima lasciò poi il lander con a bordo Sojourner (figura 3.6), robot mobile che inviò a terra 15 000 immagini panoramiche della superficie nella zona di atterraggio e testò le strumentazioni, in particolare spettrometro e sistemi di immagine, i motori e i sistemi di locomozione (ruote e rilevatori laser) per Spirit e Opportunity.



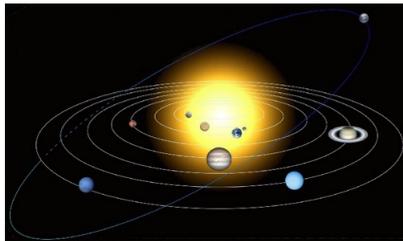
Figura 3.6 Robot Sojourner fotografato dal lander

Mars Global Surveyor invece ha permesso, attraverso le immagini ad alta risoluzione riprese dalla Mars Orbiter Camera (si parla di 1,5-6 m/pixel) unite alle misurazioni del suo altimetro laser MOLA (Mars Orbiter Laser Altimeter), di produrre una carta globale del pianeta con il dato altimetrico, così da rendere possibile una visione 3D, a risoluzione minore del dato 2D. Altri strumenti hanno permesso di studiare la temperatura di superficie, la composizione del suolo, l'inerzia termica, le anomalie magnetiche. Si sono poi susseguite missioni quali Nozomi (1998), giapponese, Mars Climate Orbiter e Mars Polar Lander (1999). Di particolare importanza è la missione Mars Odyssey (2001) della NASA che, con lo spettrometro ai raggi gamma, ha permesso di individuare sulla superficie del pianeta una ventina di elementi chimici, compreso l'idrogeno, e di osservare il pianeta anche nell'IR termico con la camera THEMIS.

La successiva missione marziana, pianificata e completamente finanziata dall'ESA (European Space Agency), è stata Mars Express (2004) che a bordo, tra gli altri strumenti, montava la stereocamera HRSC ad alta risoluzione. Successivamente alle missioni dei rover Spirit e Opportunity (MERs, 2004), inizia la collaborazione NASA e ESA che vede la riuscita della missione Mars Reconnaissance Orbiter (MRO, lanciata nel 2005). Quest'ultima dal 2006 fino ad oggi raccoglie dati della superficie marziana relativi alla geomorfologia, alla mineralogia dei sedimenti, alle caratteristiche dell'atmosfera e dei primi centimetri di suolo in ricerca di acqua. Una breve descrizione è presente nel paragrafo 3.2.5. Alcuni dati di questa missione sono stati la base del lavoro di tesi. Da ultima, la missione americana Phoenix si è posata nel 2008 su di una zona del Polo Nord marziano con lo scopo di rilevare ghiaccio nel sottosuolo e confermare la presenza di permafrost alle alte latitudini. Le fonti di queste informazioni sono state il sito della NASA www.nasa.gov e la tesi di dottorato di Sylvain Bouley [9].

3.2 Marte

3.2.1 Caratteristiche del Pianeta Rosso



(a) Sistema Solare

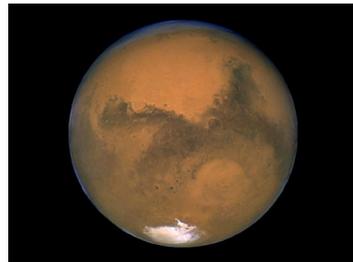
(b) Marte dall'Hubble Space Telescope, www.nasa.gov

Figura 3.7 Sistema Solare e pianeta Marte

Marte, il più esterno dei pianeti di tipo terrestre, ha un diametro di 6 805 km, intermedio tra quello della Terra e quello di Mercurio; si muove lungo un'orbita molto ellittica che provoca variazioni dell'insolazione media dell'ordine del 45%. Il periodo di rotazione attorno al proprio asse è di 24h 37min 23s, un anno marziano è lungo 780 giorni. Il pianeta è circondato da un'atmosfera molto tenue la cui pressione è di circa 7 millibar, si presenta con un tipico colore arancione rossastro dovuto alla copertura di ossido ferrico. La composizione atmosferica è dominata dall'anidride carbonica che rappresenta più del 90% della dotazione totale dei volatili atmosferici. La circolazione atmosferica globale di Marte, in mancanza di oceani che controllino i processi di redistribuzione superficiale del calore solare, è dominata dalle variazioni stagionali di temperatura. Questa, oscilla infatti, in funzione delle stagioni e della latitudine, tra un massimo di circa 293 K e un minimo di 133 K, il range è variabile a seconda delle fonti. Tali escursioni termiche favoriscono la sublimazione dei ghiacci polari in estate, mentre in inverno provocano la condensazione del 25-30% dell'atmosfera e la conseguente deposizione in superficie, sottoforma di ghiacci. La migrazione della CO_2 e di altri elementi da un emisfero all'altro determina, quindi, la circolazione generale dell'atmosfera. Occasionalmente i venti marziani possono scatenare tempeste di sabbia a livello

planetario e generare nuvole di polveri e gas molto estese, ma generalmente sono variabili e provocano sistemi di dune di varia grandezza e lunghezza d'onda.

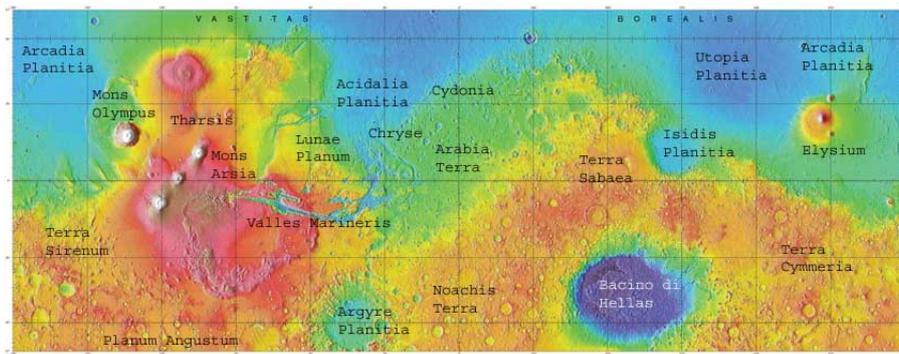


Figura 3.8 Marte in falsi colori da immagine MOLA

La tabella 3.1 vuole mostrare alcune informazioni fisiche di Marte confrontate con quelle terrestri.

L'atmosfera marziana è molto sottile probabilmente a causa del continuo bombardamento dei venti solari che asportano atomi dalla sua parte più esterna non trattenuti dal magnetismo globale del pianeta. Essa è formata per il 95% circa da CO₂ e il restante 5% da altri gas (figura 3.2). Recentemente lo spettrometro della missione Mars Express ha anche individuato tracce di metano variabili sul pianeta da 0 a 30 ppbv [10]. Si crede che sia stato originato da recenti attività vulcaniche ma, per verificare quest'ipotesi, la NASA lancerà nel 2016, a bordo dell'orbiter ExoMars, *The Mars Atmospheric Trace Molecule Occultation Spectrometer* [11].

Infine, per concludere la panoramica sulle caratteristiche di Marte, si vuole affrontare il tema della cronostratigrafia. L'età del Pianeta Rosso, non essendo ancora possibile applicare i concetti di datazione basati su livelli marker, correlazioni stratigrafiche (datazione relativa) e decadimento radioattivo (datazione assoluta), si basano sul criterio per il quale maggiore è la craterizzazione di una superficie, più antico sarà il terreno (concetto già utilizzato per osservazioni lunari) [12]. La storia geologica della superficie di Marte quindi è stata determinata in funzione

	TERRA	MARTE
Diametro Equatoriale	12 756,3 km	6 804,9 km
Diametro Polare	12 713,5 km	6 754,8 km
Superficie	$5,1 \times 10^{14} \text{ m}^2$	$1,45 \times 10^{14} \text{ m}^2$
Volume	$1,1 \times 10^{21} \text{ m}^3$	$1,6 \times 10^{20} \text{ m}^3$
Massa	$5,9 \times 10^{24} \text{ kg}$	$6,4 \times 10^{23} \text{ kg}$
Densità media	$5,5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$	$3,9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
Accelerazione gravitazionale	9,78 m/s ²	3,69 m/s ²
Velocità di fuga	11 186 m/s	5 027 m/s
Periodo di rotazione (giorno sidereo)	0,997 giorni	1,026 giorni
Velocità di rotazione	465,1 m/s	241,2 m/s
Inclinazione dell'asse sull'eclittica	23,44°	25,19°
Temperatura superficiale min	185 K	133 K
Temperatura superficiale max	331 K	293 K
Pressione atmosferica	101 300 Pa	8 000 Pa
Albedo	0,37	0,15

Tabella 3.1 Confronto fra le caratteristiche geo-fisiche Terra-Marte

della densità dei crateri, della loro dimensione e del loro numero. I tre grandi periodi in cui è stata suddivisa la stratigrafia marziana sono quindi:

- Noachiano, periodo di bombardamento primitivo d'età superiore a 3,7 Ga;
- Esperiano, periodo intermedio tra 3,7 e circa 3 Ga;
- Amazoniano, da 3 Ga ad oggi.

La tabella 3.9 illustra le suddivisioni dei periodi in epoche e il metodo utilizzato: nelle celle compare il numero N di crateri di diametro superiore a D per milione di km². I dati si riferiscono a Tanaka [12] e Tanaka et al. [13] basati rispettivamente sulla distinzione in anni di Hartmann-Tanaka (HT) e Neukum-Wise (NW) che rappresentano i due differenti modelli interpretativi della scala del tempo.

Composizione Atmosferica di Marte

Anidride carbonica	95,32%	CO ₂
Azoto	2,7%	N ₂
Argon	1,6%	Ar
Ossigeno	0,13%	O ₂
Monossido di carbonio	0,07%	CO
Acqua	0,03%	H ₂ O
Monossido di azoto	0,01%	NO _x
Neon	tracce	Ne
Kripton	tracce	Kr
Xenon	tracce	Xe
Ozono	tracce	O ₃
Metano	tracce	CH ₄

Tabella 3.2 Gas dell'atmosfera marziana da [5]

Period		Crater-Density Range: N(D) = no. > D/10 ⁶ Km ²			Absolute-Age Range (Gyr)	
		N(2)	N(5)	N(16)	HT	NW
Amazonian	Late	<40			0,25-0	0,70-0
	Middle	40-150	<25		0,70-0,25	2,50-0,70
	Early	150-400	25-67		1,80-0,70	3,55-2,50
Hesperian	Late	400-750	67-125		3,10-1,80	3,70-3,55
	Early	750-1200	125-200	<25	3,50-3,10	3,80-3,70
Noachian	Late		200-400	25-100	3,85-3,50	4,30-3,80
	Middle		>400	100-200	3,92-3,85	4,50-4,30
	Early			>200	4,60-3,92	4,60-4,50

Figura 3.9 Tabella delle epoche marziane da Tanaka (1986) e Tanaka et al. (1988)

Appunto cosmologico

Non bisogna troppo stupirsi della presenza di alcuni elementi e gas su Marte. Si deve ricordare che dal plasma di protoni, neutroni ed elettroni nel primo universo, quando, per raffreddamento, l'energia cinetica era inferiore all'energia di legame,

si formarono atomi di idrogeno (in natura compare come H_2), gli impatti tra loro diedero vita al Deuterio e successivamente al Trizio. Le successive fusioni tra questi elementi, portano alla formazione della cosiddetta particella α : l'Elio (per fusione di due atomi di idrogeno). Inizia così la nucleosintesi. Idrogeno, elio (circa 20%) e poco Litio sono il carburante delle stelle di prima generazione, il cui prodotto di combustione sono Carbonio, Ossigeno, Calcio e gli elementi fino al Ferro. L'energia dell'implosione-esplosione di Supernovae, nucleosintesi esplosiva, genera poi i restanti elementi della tavola periodica. Anche le molecole come il monossido di carbonio (CO) e l'acqua (H_2O) richiedono grandi quantitativi di energia per formarsi, sprigionabili alla morte delle stelle. Inoltre fino ad oggi nell'universo si sono scoperte più di 120 specie molecolari composte al più da 20 atomi. L'universo è quindi una grande fucina di elementi e molecole, semplici e complesse [14]. Ma, affinché si sviluppi ciò che chiamiamo vita, sono necessarie 'condizioni giuste' oltre che i 'giusti ingredienti', ritrovabili anche su Marte, e nelle 'giuste dosi' [15].

Geologia generale

Dai dati trasmessi dalle prime sonde (paragrafo 3.1.3) e confermati da quelle successive, Marte si manifesta come un pianeta geologicamente molto differenziato, caratterizzato da una dicotomia emisferica e da prominenti calotte polari [9]. Nell'emisfero nord si trovano bassopiani privi di morfologie evidenti a scala regionale, mentre in quello sud si trovano altopiani densamente craterizzati. Come

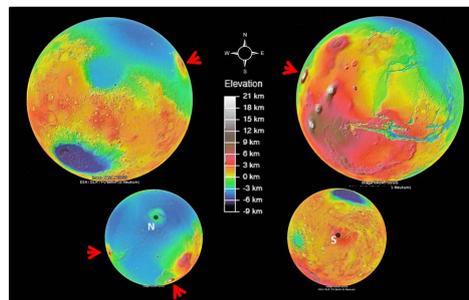


Figura 3.10 Topografia di Marte, visualizzazione Google Mars

si può notare dall'immagine in figura 3.10 sviluppata dai dati dell'altimetro laser del MGS (paragrafo 3.1.3), compaiono sulla superficie molti crateri d'impatto di notevoli dimensioni (in azzurro e blu), antichi altipiani (in arancione-rosso) fortemente craterizzati nell'emisfero sud e pianure più recenti (in verde), vulcani alti fino a 27 km (in bianco), valli e incisioni tettoniche lunghe anche 1000 km. Il pianeta presenta due calotte di ghiaccio ai poli. Inoltre si nota una pressochè globale copertura di polveri e sabbia di colore rosso, fortemente ossidate, derivanti da erosione eolica di rocce madri di uno spessore tale da permettere l'osservazione della geomorfologia del pianeta. La composizione chimica della superficie del pianeta è stata studiata nel tempo indirettamente attraverso Remote Sensing, direttamente da analisi di meteoriti marziani ritrovati sulla terra (ad esempio quello in Antartide), recentemente, dai rover Spirit e Opportunity e da spettrometri come OMEGA e CRISM, che tratteremo in seguito. Le misure hanno rilevato una crosta composta prevalentemente da rocce ignee, basalto di feldspati e pirosseni; in prossimità dei vulcani è stata osservata un'alternanza di unità resistenti, colate laviche ed erodibili, probabilmente ceneri vulcaniche. La carta di figura 3.11 è stata redatta dall'USGS nel 2005 basandosi sulle immagini dei satelliti Mars Global Surveyor, Mars Odyssey e Viking. La legenda, riportata solo per le due zone studiate nella tesi, è di tipo qualitativo e si limita a descrivere le caratteristiche macroscopiche e i possibili rapporti cronologici tra strati vicini. La figura 3.12 invece è un ingrandimento della zona in cui si è focalizzato il lavoro di tesi e cerchiata in rosso nell'immagine precedente. Si è riportata questa immagine per mostrare anche come è strutturata la legenda che, per ovvi motivi grafici, non è stata riportata nella sua interezza.

La tabella 3.3 mostra le percentuali di composizione chimica della superficie di Marte derivanti dalle analisi sia dello spettrometro a raggi X della missione Viking, sia dallo studio geochimico dei meteoriti SNC (Shergottiti, Nakhiliti e Chassigniti).

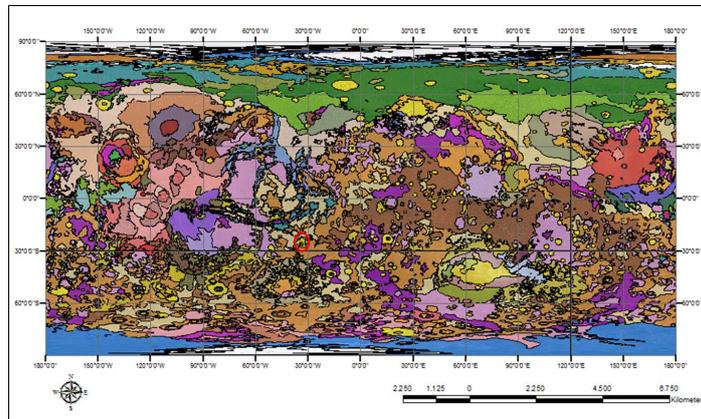


Figura 3.11 Geologia di Marte 3.11

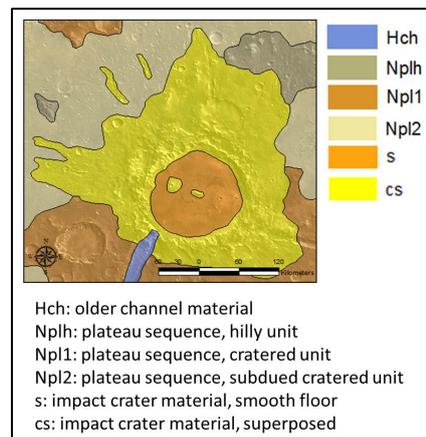


Figura 3.12 Geologia della zona di studio

3.2.2 I crateri di Holden e Eberswalde

I due crateri scelti per il lavoro di tesi si trovano nella zona centrale del pianeta poco a sud dell'equatore, compresi tra i $32^{\circ}irc$ e i $33^{\circ}irc$ W di longitudine e i $23^{\circ}irc$ e i $28^{\circ}irc$ S di latitudine. Il motivo sussiste nella possibile contemporaneità di eventi e/o nelle medesime condizioni ambientali, essendo Eberswalde ubicato solo qualche kilometro più a nord di Holden (figura 3.13).

Composizione Chimica del Suolo

Costituente	Concentrazione
SiO ₂	43,4%
Fe ₂ O ₃	18,2%
Al ₂ O ₃	7,2%
SO ₃	7,2%
MgO	6%
CaO	5,8%
Na ₂ O	1,34%
Cl	0,8%
P ₂ O ₅	0,68%
TiO ₂	0,6%
MnO	0,45%
Cr ₂ O	0,29%
K ₂ O	0,1%
CO ₃	0,2%
H ₂ O	0-1%

Tabella 3.3 Composizione chimica del suolo marziano, da [6]

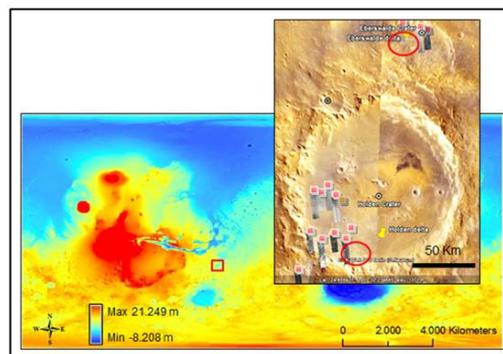


Figura 3.13 Cratere Holden ed Eberswalde (Google Mars), MOLA in scala di colori

3.2.3 Il cratere di Holden

Il cratere di Holden è situato tra i 26°S e i 32°E, in prossimità della parte terminale del sistema di canali denominato Uzboi-Ladon-Margaritifer (ULM). Ha un diametro di circa 154 km e, proprio per le sue dimensioni, si fa appartenere al periodo Noachiano, compreso tra i 3,5 e 4,6 miliardi di anni fa. Il delta a SE, oggetto del nostro studio, si stima essere del tardo Noachiano, quindi circa 3,5 Ga. La stratigrafia di Holden viene solitamente suddivisa in tre gruppi principali [16]: basamento pre-esistente o materiale prodotto in seguito a impatti, Unità Inferiore e Unità Superiore. Il materiale del basamento contiene megabrecce con clasti che probabilmente derivano dai depositi sedimentari originari del notevolmente più esteso bacino di Holden. L'unità successiva viene divisa in altrettanti tre sottogruppi. Il membro inferiore ha un albedo intermedio e presenta sottili strati orizzontali di circa 1 m di spessore, quello intermedio ha un colore leggermente più chiaro e si trova anch'esso in strati orizzontali, infine il membro superiore ha un colore chiaro e presenta strati decisamente più sottili degli altri due. L'Unità Inferiore è quindi coperta al tetto da un sottile e scuro letto di materiali fratturati dalle forme poligonali. Superiormente a questo livello si trova l'Unità Superiore, di colore scuro e con stratificazioni più grossolane, che mostra a scala decametrica forme di fondo fluviali e stratificazioni incrociate. In alcune zone inoltre, questa unità risulta coperta da un sottile strato superficiale di colore scuro. Quest'ultima osservazione, unita alle descrizioni precedenti e conseguentemente ad analogie terrestri, porterebbero ad affermare che le due unità Superiore e Inferiore siano un prodotto derivante da due possibili fasi avvenute sia nell'Esperiano (fase umida), sia nell'Amazoniano (glaciale) e che hanno modificato la superficie del cratere di Holden [17]. Il delta fluviale studiato nella tesi è posto nella parte inferiore del cratere a SW, ha un'estensione di circa 600 km² e, per la sua forma a ventaglio e la sua posizione proprio allo sbocco di una valle molto incisa, si crede sia di tipo alluvionale [18]. La figura 3.14 mostra il delta di Holden analizzato nelle sue versioni relative a tre tipologie di immagini acquisite da strumenti differenti: MOLA in ultimo piano, HRSC in secondo piano e CTX a colori in primo piano.

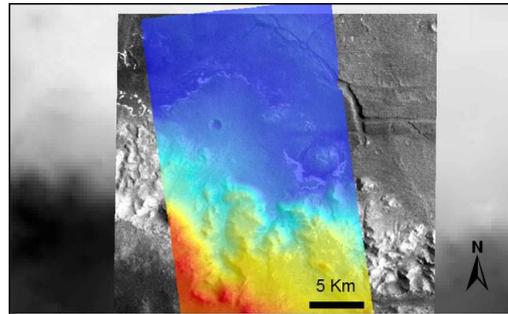


Figura 3.14 Delta di Holden

3.2.4 La zona di Eberswalde

Il sistema deltizio di Eberswalde è ubicato leggermente a NE del cratere di Holden. Esso è inserito in un sistema di canali in un'area di estensione di circa 8 200 km² e comprendente il bacino di drenaggio, il delta e la zona di deposito dei sedimenti all'interno di una vasta area depressa e piatta (figura 3.16). La zona deltizia presenta accumuli di sedimento a ventaglio, canali meandriciformi e pendenze delle zone terminali maggiori rispetto ai corpi centrali dei delta, suggerendo un'origine controllata da fluttuazioni eustatiche delle acque all'interno del lago che si riflettono in trasgressioni e regressioni dei lobi deltizi. In analogia all'ambiente terrestre, queste forme vengono associate alla presenza di un lago e all'oscillazione della sua superficie. L'interpretazione dell'ambiente e dei processi formativi di Eberswalde è legata alla comprensione dell'origine dei depositi. Come si è già detto, essi sono stati suddivisi in sette differenti Unità che riflettono l'alternanza di periodi a maggiore o minore energia, quindi di eventi di progradazione e regressione. L'osservazione della superficie ha permesso il riconoscimento di:

- substrato, emerge lungo tutta l'area di studio e si presenta come un materiale massivo, di colore chiaro e tessitura fine;
- strati chiari di medio spessore, sono presenti nel delta e si presentano come poligoni angolosi, piatti, composti da blocchi di diametro compreso tra 1 e 4 m.

- strati scuri di spessore sottile, meno resistenti all'erosione con layer poco visibili;
- strati chiari di spessore maggiore, non presentano una stratificazione interna percepibile alla risoluzione dell'immagine;
- depositi di ricoprimento (mantling), scuri e lisci che giacciono in maniera discordante col substrato, presentano una stratificazione molto leggera o assente e, data la loro alta erodibilità al vento, si crede abbiano dimensioni di sabbie o silt;
- depositi massivi di origine erosiva, sono visibili sulle ripide scarpate del cratere e consistono perlopiù in materiali allungati che mostrano differenti tessiture;
- depositi di polveri e dune, consistono in forme fossili o recenti ubicate lungo tutta l'area di studio.

Le stratificazioni chiare e scure formano un'unica unità di spessore massimo di 100 m, distribuita sottoforma di una serie di cinque diversi lobi nel delta che, con le loro distinte relazioni stratigrafiche, testimoniano un processo di sedimentazione avvenuto presumibilmente per oscillazioni del lago di Eberswalde. Associato a questo ambiente formativo, in letteratura si trovano descritti gli effetti di possibili canali fluviali e loro interazioni con il lago [1]. I modelli di evoluzione geomorfologica studiati nel capitolo 5.1 che si potrebbero sviluppare su Marte, avrebbero l'intenzione di descrivere le interazioni versante-canale-delta utili alla comprensione della situazione attuale. Infatti l'origine delle forme, ad esempio, in figura 3.15 B, è ancora controversa. Esse potrebbero essere generate da cambiamenti del letto fluviale o da interazione di spinte tra i flussi dei canali Nord e Sud (visibili in figura 4.33), o da entrambi. Inoltre, studi recenti riguardanti il delta di Eberswalde, in particolare derivanti da elaborazioni effettuate a partire dai meandri visibili su di esso, corrispondenti ad un evento impulsivo, hanno portato a stimare un range di portata compreso tra i 460 e i 140 m³/s [19].

$$Q_2 = 1,2W_b^{1,22} Q_{1,5} = 0,0068\lambda_m^{1,54} \quad (3.1)$$

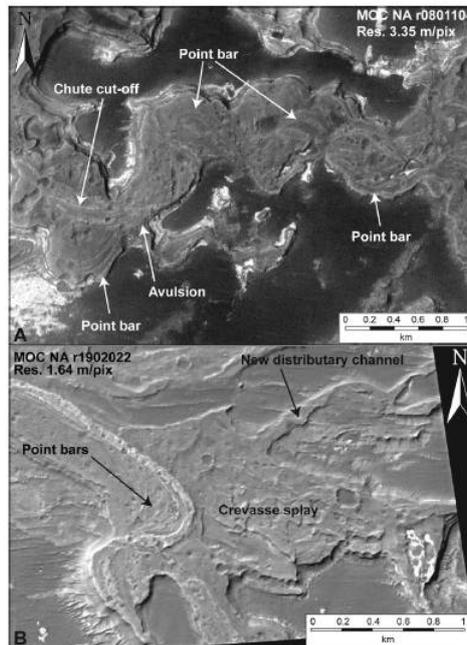


Figura 3.15 Figura A, canali fluviali e tipiche barre; figura B, canali sinuosi.

Le equazioni sono state ricavate dopo 1,5 e 2 anni di impostazioni e confronti tra la geometria dei canali e la portata. W_b larghezza della forma; λ_m lunghezza d'onda del meandro. Con il valore massimo, relativo al meandro a nord, si calcola una produzione di runoff pari a circa 3 mm/giorno da una superficie di circa 12 500 km² o di 8 mm/giorno da 5 000 km². Questi valori sono molto alti e corrisponderebbero a circa 1 cm/giorno di precipitazioni o fusione. Questi studi hanno alla base l'ipotesi, non ancora dimostrata con certezza, che il motore di tutto sia l'acqua, quindi, se invece fosse un altro fluido, i risultati cambierebbero sensibilmente. Nonostante ciò, questi valori possono fornire un'idea delle grandezze in gioco relative a quell'evento. Infine, questi valori non sono supportati da alcun modello evolutivo di versante, che, come vedremo, possono fornire un utile supporto quantitativo alle teorie formative.

Un passo ulteriore è stato fatto con l'analisi delle morfofacies [1] che ha portato alla sequenza cronostratigrafica dei lobi del delta (figura 3.17). Inoltre, essendo Eberswalde un possibile futuro landing site, sono state effettuate anche osserva-

zioni mineralogiche con lo spettrometro CRISM (figura 4.5). La letteratura [20] identifica quattro minerali principali evidenti in alcune zone non così ben identificate. Si trovano quindi: Olivina, Pirosseni con elevata percentuale di Calcio (HCP), Fillosilicati di Fe/Mg, Minerali idrati. La nostra analisi dei dati CRISM invece non ha mostrato la presenza di minerali idrati (si veda 6.2).

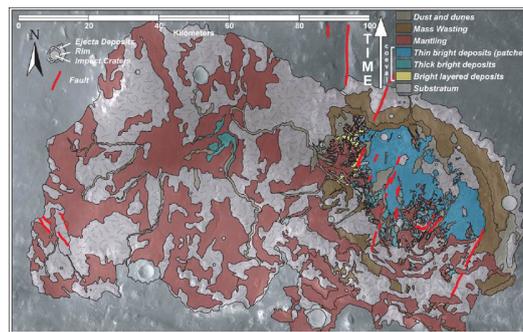


Figura 3.16 Geologia della zona di Eberswalde, da [1]

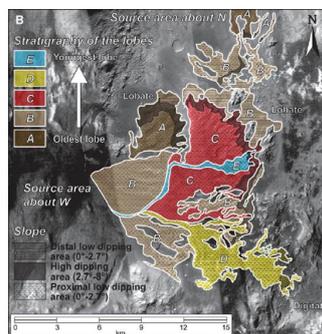


Figura 3.17 Geologia e cronostatigrafia del delta di Eberswalde, da [1]

3.2.5 Mars Reconnaissance Orbiter

Il *Mars Reconnaissance Orbiter* (MRO) della NASA (3.18), è stato lanciato nel 2005 con lo scopo di cercare evidenze della persistenza per lungo tempo di acqua allo stato liquido sulla superficie di Marte e, contemporaneamente, di individuare zone per possibili atterraggi futuri. Ma l'obiettivo primario della comunità scientifica rimane quello di cercare tracce di vita extraterrestre. Inoltre, gli strumenti

a bordo dello spacecraft si concentreranno su immagini ravvicinate della superficie marziana per analizzare minerali, ricercare acqua sotterranea, rintracciare e quantificare le percentuali di polvere e acqua distribuite in atmosfera e monitorare costantemente il tempo meteorologico globale. Il fine di questo lavoro di tesi è di fornire un contributo a riguardo della conoscenza dei processi evolutivi del pianeta; a tal fine non è stata specificata la tipologia di fluido utilizzato nei modelli. La missione primaria dell'orbiter sarebbe dovuta terminare nel Novembre 2008, ma, grazie ai successivi finanziamenti NASA e ESA, la missione è ancora in perfetta attività.

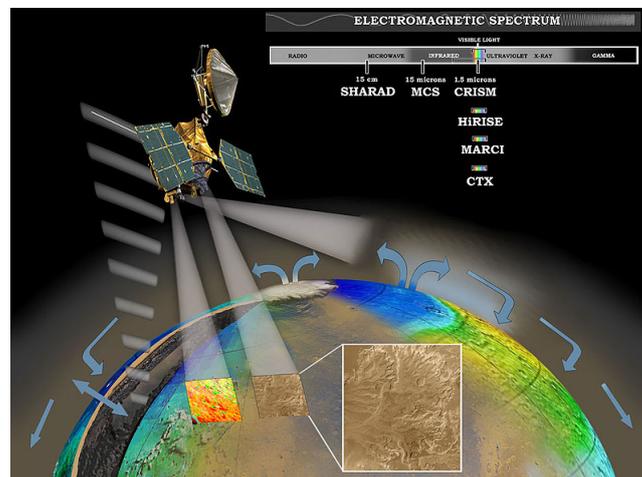


Figura 3.18 Orbiter MRO

Strumentazione scientifica di bordo

Nei primi due anni di missione, l'MRO ha svolto indagini scientifiche suddivise in tre tematiche:

- Mappatura globale del pianeta
- Rilevamento a scala regionale
- Individuazione e studio ad alta risoluzione di punti specifici della superficie

a partire dalle seguenti strumentazioni:

- HiRISE (High Resolution Imaging Science Experiment) Camera ad alta risoluzione, può rivelare piccoli oggetti, strutture geologiche in canyon, crateri, e depositi stratificati.
- CTX (Context Camera) Camera che permette la visione globale di vaste aree che aiutano a contestualizzare le analisi ad alta risoluzione di punti strategici di Marte sui quali vengono poi effettuate analisi HiRISE e CRISM.
- MARCI (Mars Color Imager) Camera meteorologica che monitora la presenza di nuvole e tempeste di sabbia.
- CRISM (Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars) Spettrometro che ricopre il campo del visibile e dell'IR-vicino. Utilizzato per identificare minerali, specialmente quelli formati in condizione idrate.
- MCS (Mars Climate Sounder) Strumento che analizza le variazioni verticali di temperatura, polvere, e concentrazione di vapore d'acqua nell'atmosfera marziana.
- SHARAD (Shallow Radar) Radar di progettazione, costruzione e gestione ASI (Agenzia Spaziale Italiana). Ha come scopo quello di indagare se il ghiaccio d'acqua è presente a profondità superiori di un metro.

Il lavoro di tesi ha utilizzato informazioni provenienti da strumentazione CTX e CRISM. Nel capitolo successivo (si veda 4.1) sono riportati, per entrambi gli strumenti, le caratteristiche, i dati di partenza, la metodologia di processing e le elaborazioni effettuate fornendo, infine, un'analisi critica effettuata confrontando i dati di letteratura.

Capitolo 4

Dati a disposizione e loro analisi

4.1 Analisi generale dei dati

In questo capitolo si descriverà l'analisi dei dati svolta tramite le immagini acquisite dal satellite MRO (figura 3.18), nato dalla collaborazione tra NASA e ASI. L'attività di analisi è stata svolta in due sedi distinte. Il dato immagine e la relativa elaborazione (Processing) per ottenere una restituzione 3D del suolo marziano, è stata effettuata all'IRSPS (International Research School of Planetary Sciences) di Pescara nel gruppo di ricerca supervisionato dal Professor Gian Gabriele Ori e dalla Prof.ssa Monica Pondrelli. Successivamente il lavoro è stato condotto all'Università degli Studi di Parma dove la Prof.ssa Maria Sgavetti e la Dott.ssa Loredana Pompilio hanno permesso di lavorare sui dati spettrografici da CRISM, loro specifico ambito di ricerca. I dati di partenza sono stati elaborati tramite il Software *ISIS* (Integrated System for Imagers and Spectrometers), implementato dall'USGS appositamente per analizzare le informazioni che sono state e vengono tuttora acquisite da satellite. Le peculiarità di Isis sono tre: in primo luogo processa le immagini *EDR* (Experimental Data Records) acquisite direttamente dal satellite di una particolare missione convertendole in un'immagine Isis, in secondo luogo calibra i Digital Number acquisiti in formato raw convertendoli in radianza, infine, attraverso un modello camera/sensore, è possibile convertire le immagini dalla geometria della camera satellitare a una determinata proiezione

utilizzabile da un qualsiasi software di visualizzazione cartografica. Inoltre il tutorial sviluppato dagli scienziati dell'USGS è consultabile sul web ed è di grande supporto alla correzione degli errori [21].

4.2 Dati da ConTeXt Camera (CTX)

I dati CTX sono un insieme di dati raccolti contemporaneamente sia dalla camera HiRISE, sia dallo spettrometro CRISM, fornendo una panoramica globale (ConTeXt, CTX) del contesto geo-topografico di ogni singola zona (si spiega così l'origine del nome dello strumento in figura 4.1).



Figura 4.1 Context Camera, da [2]

I dettagli della superficie di Marte sono studiati con diversi strumenti come, ad esempio, l'HRSC (High Resolution Stereo Camera), installato a bordo del satellite Mars Express [7] dell'ESA e in orbita dal 2004, che può fornire un DEM a risoluzione inferiore, circa 25 m/pixel, indagando una superficie decisamente più vasta rispetto alle CTX che, al contrario, indagano una superficie minore ma con un'alta risoluzione.

Il satellite MRO riprende la superficie del Pianeta da un'altitudine relativa di circa 300 km, così che le immagini CTX permettono di raggiungere una risoluzione massima al suolo di 5-6 m/pixel in strisciate di circa 30 km x 160 km, ma le strisciate non hanno quasi mai la stessa estensione. Le immagini vengono ottenute in scala di grigi da una focale di 350 mm con 6 gradi di FOV (*Field Of View*) su un dispositivo di accoppiamento di carica lineare (*CCD line array*) di larghezza pari a 5 064 pixel. Lo strumento dispone di una memoria di capacità 256 MB. La regione dello spettro elettromagnetico che viene investigata è quella del campo del visibile compresa tra i 500 e gli 800 nanometri in lunghezza d'onda. Lo strumento

ha un unico array di CCD e il processing dei dati avviene nella maniera descritta nel paragrafo successivo.

4.3 Processing CTX

Il processing dei dati avviene per passi progressivi seguendo uno schema a tre livelli:

Livello 0: ACQUISIZIONE ED ELABORAZIONE DEI DATI:

- Acquisizione e conversione dei file al formato immagine di Isis.
- Recupero di informazioni corrispondenti all'immagine Isis per calcolare proprietà geometriche quali il range di latitudine/longitudine e angoli dell'immagine.

Questo livello viene portato a termine in tre passaggi:

1. Acquisizione di dati immagine in formato raw di CTX. Questi sono scaricabili gratuitamente dal sito del *Planetary Data System* (PDS, [22]) ma sono archiviate in un formato raw, standard, chiamato *Experiment Data Record* (EDR).
2. Elaborazione di immagini formattate secondo Experiment Data Record (EDR) che vengono trasformate in formato immagine di Isis.
3. Inizializzazione di ogni singola immagine Isis con i dati kernel di SPICE (Spacecraft and Planetary ephemerides, Instrument C-matrix and Event). Questa fase è importante per eseguire calcoli relativi alle proprietà dell'osservazione della CTX, come il range di latitudine/longitudine e gli angoli di illuminazione.

Importante osservazione sulla *Naming Convention*

Capire e decifrare il nome del file è fondamentale sia durante la ricerca di una particolare immagine raw di una zona nell'atlante delle immagini osservabile sul

web, sia nella fase di gestione dei propri file. La naming convention usata da PDS per EDR è la seguente:

PPP_XXXXXX_YYYY_XX_AAHHBBBW.IMG

- PPP è la fase della missione
- XXXXXX è il numero dell'orbita seguita dal satellite
- YYYY è una rappresentazione del centro di latitudine dell'immagine in decimi di grado.
- 0 gradi corrisponde alla linea equatoriale; 90° al Polo Sud; 180° all'equatore in maniera ascendente; 270° al Polo Nord.
- X è la modalità di comando: I = ITL, N = NIFL
- AA è la latitudine centrale piana dell'immagine
- B è la longitudine centrale piana con valori positivi contati a partire da Ovest

Atlante delle Immagini Planetarie

L'Atlante delle Immagini Planetarie (figura 4.2) è consultabile sul Planetary Data System (PDS), governato e gestito dal Jet Propulsion Laboratory (JPL) e dal programma di ricerca planetaria dell'USGS. Da questo sito è possibile osservare in preview e scaricare immagini provenienti da varie missioni di diversi pianeti attraverso chiavi di ricerca inserite dall'utente.

Ricerca

L'atlante fornisce un tool per la ricerca, che permette di interrogare il database delle immagini. Infatti attraverso questo tool è possibile conoscere informazioni riguardanti ogni immagine e ignorare i dati che non corrispondono alla richiesta dell'utente. Una metodologia atta a ridurre il numero di immagini da osservare e analizzare prima di scaricarle è stata quella di definire un'area di interesse attraverso un range di latitudine e longitudine. Inoltre sono stati introdotti nel tool di



Figura 4.2 Planetary Image Atlas

ricerca anche il range di risoluzione minima o massima. Una volta effettuata la ricerca, si può cliccare *Get Count* per sapere quante immagini corrispondono alla ricerca svolta, oppure *Get Result* per accedere all'immagine cercata.

I passaggi sopra descritti sono stati eseguiti come verifica della ricerca delle immagini svolta precedentemente con Google Mars, poi con il software ArcGis della ESRI e infine con l'analisi svolta con Excel. Google Mars, disponibile dal software Google Earth [23], è stato utilizzato come strumento di ricerca. Infatti, permette di visualizzare i contorni e i nomi delle immagini delle zone di interesse (*footprint*) fornendo, se disponibili, l'anteprima di visualizzazione.

La figura 4.3 mostra un esempio di visualizzazione in Google Mars. Sulla sinistra sono visibili le tipologie di immagini di cui sono disponibili i footprint.

Tuttavia Google Mars non è aggiornato di default settimanalmente, frequenza con cui invece i dati vengono inseriti nel database. Di conseguenza, per ottenere una panoramica globale di tutte le immagini e quindi effettuare una scelta mirata, è stato necessario utilizzare un metodo che permettesse di visualizzare tutte le

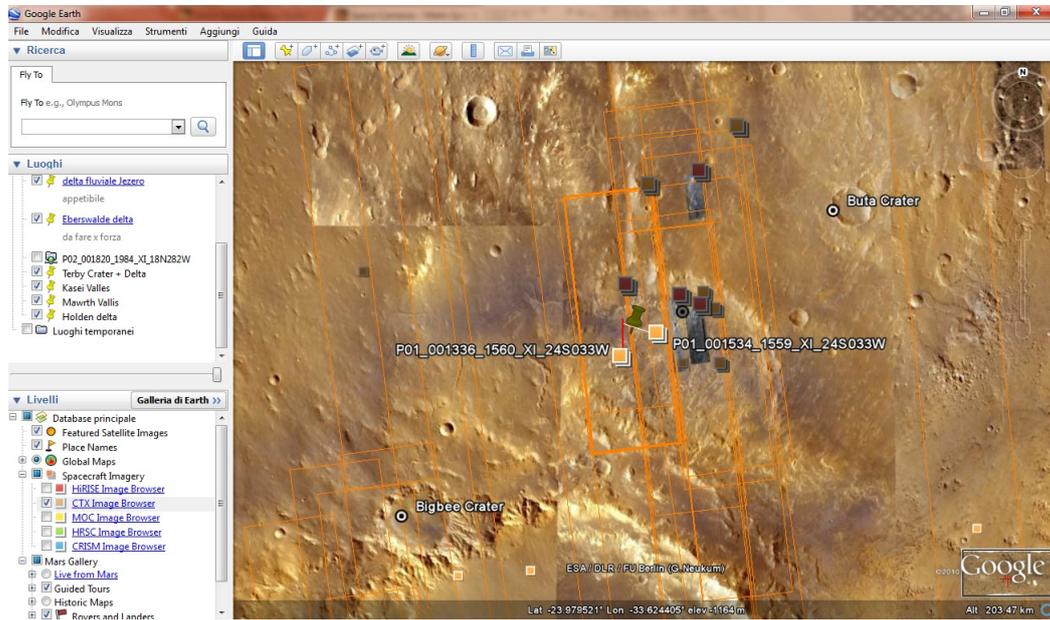


Figura 4.3 Immagine di Eberswalde, in arancione i footprint e in evidenza i nomi delle immagini

immagini disponibili. A tal fine sono stati utilizzati due metodi possibili per un controllo incrociato.

Dal sito <http://ode.rsl.wustl.edu/mars/indextools.aspx> (sezione *Mars Footprint Coverage Explorer*) è stato scaricato un file .zip KML il quale, importato in Google Mars, fornisce tutte le immagini.

Un'altra modalità, più completa, è scaricare, sempre dallo stesso sito (figura 4.4), il file .zip per ESRI che raccoglie uno shapefile apribile in un progetto di ArcGis e sovrapponibile all'immagine MOLA (figura 4.5).

Tuttavia si è osservato che il numero di immagini disponibili è molto elevato per la zona di studio (figura 4.6). Pertanto è stato scelto il metodo basato su ArcGis. Attraverso i tools di Arctoolbox è stato 'tagliato' il dato MOLA delle due aree investigate. Successivamente sono state esportate in Excell le informazioni delle tabelle degli attributi dei footprint scelti. L'obiettivo di tale metodologia di ricerca delle immagini è di trovare un criterio col quale scegliere le immagini senza doverle scaricare (processo che richiede molto tempo). Il criterio è basato

CAPITOLO 4. DATI A DISPOSIZIONE E LORO ANALISI

ode.rsl.wustl.edu/mars/indextools.aspx

Mars Orbital Data Explorer [Click To Try The New Beta Site!](#) **PDS Geosciences Node**
Washington University in St. Louis

Home Data Product Search Tools Data Set Browser Download Help & Resources

MARS FOOTPRINT COVERAGE EXPLORER PAGE

Product coverage maps include all footprints for a given instrument host, instrument, and product type (identical to ODE's Product Search page). Opening the file in Google Earth will display the footprint with a center point for each footprint. Selecting the center point will open a pop-up display with links to PDS including a link directly to ODE's Product Result Page for that product.

Product Type Coverage KML File Generated by ODE to Google Mars

-->>New users are encouraged to read about footprints here! <<--

Coverage maps are provides in several forms:

- [Google Earth KMZ Format](#)
- [Global Projection ESRI ShapeFile](#)
- [Cylindrical Projection Center Longitude 0 ESRI ShapeFile](#)
- [Cylindrical Projection Center Longitude 180 ESRI ShapeFile](#)

-->> How do I use Google Earth with ODE? <<--

[KML Moon and Mercury Basemaps](#) - Add a Moon or Mercury basemap to your Google Earth before loading Moon or Mercury coverage maps!

Figura 4.4 Schermata video con le due tipologie di file

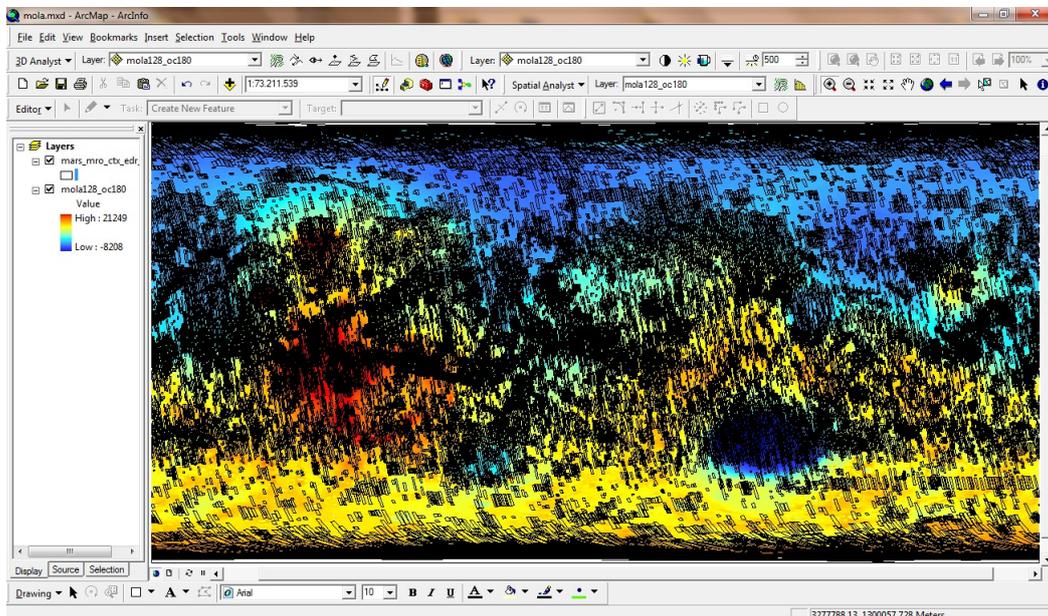


Figura 4.5 Mola e footprint CTX da progetto ArcGis

CAPITOLO 4. DATI A DISPOSIZIONE E LORO ANALISI

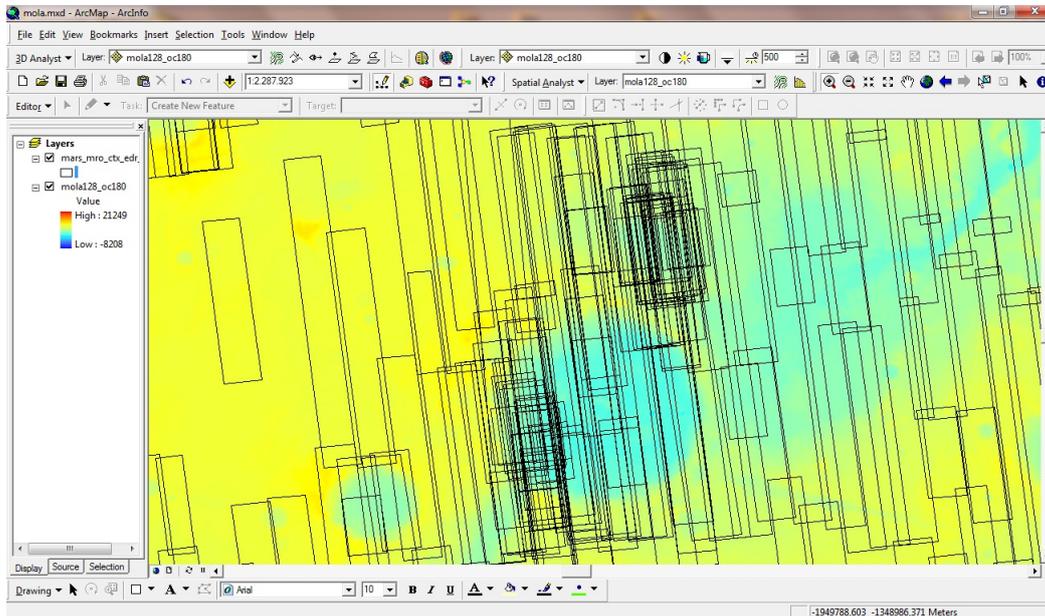


Figura 4.6 Mola e footprint CTX da progetto ArcGis nella zona Holden-Eberswalde

sul fatto che le immagini sono tutte rettangolari, seppur di aree differenti. Pertanto sono stati scelti diversi filtri al file excel usando come riferimenti matematici le coordinate Long/Lat delle intersezioni delle diagonali e dei punti medi dei lati dell'immagine, seguendo il seguente criterio: le immagini devono avere la h maggiore e contemporaneamente si devono sovrapporre per almeno il 90% (schema in figura 4.7).

con $h = \text{DELTALAT} = \text{MAXLAT} - \text{MinLat}$

MAXLAT e MinLat si riferiscono alle latitudini dei punti A1 e B1

se $\text{DELTALAT} = 5, 4$ o 3 , allora

se è vero che $EF = (\text{MAXLAT1} - \text{MAXLAT2}) / \text{GL} / 2$ (con $\text{GL} = \text{MAXLAT1} - \text{Minlat1}$)

allora se $EF = 0.1 * \text{GL}$

Successivamente è stato effettuato un controllo dell'elenco delle immagini risultante che ha permesso di individuare altre immagini utili con DELTALAT 1 e 2. In questo modo il numero delle immagini è stato ridotto a 31, rispetto alle 70 iniziali effettivamente scaricabili per Eberswalde; per Holden invece è stato ne-

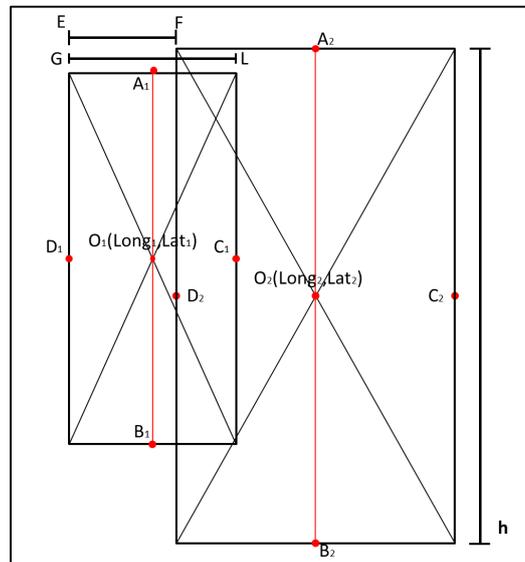


Figura 4.7 Schema di base per il filtraggio

cessario scaricare solamente 10 immagini, data la minore estensione del delta. Una volta scelte le immagini, si è copiato l'indirizzo URL presente per ogni immagine in una delle colonne del file excel, in un file di testo così che, entrando nel terminale Unix disponibile nel laboratorio dell'IRSPS, con un semplice comando *wget-i* 'nome del file di testo.txt' si sono potute scaricare in automatico tutte le immagini dal sito PDS della NASA [22]. Un esempio del nome del file di testo che si ottiene è il seguente:

```
http://pds-imaging.jpl.nasa.gov/data/mro/mars_reconnaissance_orbiter/ctx/
mrox_0758/data/B06_011898_1558_XN_24S035W.IMG
```

Mentre l'elenco degli URL delle immagini scaricate e successivamente processate è il seguente (si riporta solo il nome dell'immagine):

Questo procedimento porta solamente a scaricare le immagini in un formato utile per essere poi corrette con i passaggi successivi, ma non è ancora utilizzabile da software tipo ArcGis.

Il programma usato per convertire i file CTX EDR in file cube di Isis è *mroctx2isis*. La linea di comando seguente è quella che è stata eseguita per raggiungere il file

B06_011898_1558_XN_24S035W.IMG	
G02_019111_1548_XI_25S034W.IMG	
G01_018689_1548_XI_25S034W.IMG	
P13_006123_1547_XN_25S034W.IMG	
G02_018834_1546_XI_25S034W.IMG	
P06_003433_1548_XI_25S034W.IMG	
B18_016777_1580_XN_22S034W.IMG	
B22_018333_1548_XI_25S033W.IMG	
B02_010408_1548_XI_25S033W.IMG	
P17_007626_1591_XN_20S033W.IMG	
P16_007125_1530_XN_27S033W.IMG	
P17_007481_1544_XI_25S033W.IMG	
P19_008272_1545_XI_25S033W.IMG	
P13_005978_1543_XI_25S032W.IMG	
G01_018768_1546_XI_25S032W.IMG	
B01_010197_1545_XI_25S032W.IMG	
B05_011687_1567_XI_23S032W.IMG	
P20_008852_1550_XN_25S031W.IMG	
P16_007270_1546_XI_25S033W.IMG	
G02_018900_1561_XI_23S035W.IMG	
P15_006835_1536_XN_26S035W.IMG	
P15_006980_1536_XN_26S034W.IMG	
P04_002721_1538_XI_26S034W.IMG	
B22_018122_1555_XI_24S034W.IMG	
B02_010263_1557_XI_24S034W.IMG	
B20_017555_1539_XI_26S034W.IMG	
G01_018412_1560_XN_24S033W.IMG	
B21_017911_1559_XI_24S033W.IMG	
B22_018056_1559_XN_24S033W.IMG	
B21_017700_1557_XI_24S033W.IMG	
B21_017845_1557_XI_24S033W.IMG	
G01_018478_1557_XI_24S032W.IMG	
B17_016210_1558_XN_24S033W.IMG	
P21_009274_1558_XN_24S033W.IMG	
B03_010830_1560_XI_24S033W.IMG	
B22_018267_1558_XN_24S033W.IMG	
G01_018623_1555_XN_24S033W.IMG	
	P13_006123_1547_XN_25S034W.IMG
	P04_002721_1538_XI_26S034W.IMG
	P18_008127_1548_XI_25S034W.IMG
	P22_009485_1528_XI_27S034W.IMG
	P22_009551_1529_XI_27S034W.IMG
	B01_009841_1528_XI_27S034W.IMG
	B20_017555_1539_XI_26S034W.IMG
	G02_019111_1548_XI_25S034W.IMG
	G02_018834_1546_XI_25S034W.IMG
	G01_018689_1548_XI_25S034W.IMG

(a) Immagini Eberswalde

(b) Immagini Holden

Figura 4.8 Elenco immagini Eberswalde e Holden

cube:

mroctx2isis from=B06_011898_1558_XN_24S035W.IMG

to=B06_011898_1558_XN_24S035W.cub

Con questo formato è possibile svolgere poi tutti i passaggi in ISIS per giungere ai DEM su ArcGis. Un'importante peculiarità di Isis, da non sottovalutare, è quella di caratterizzare geometricamente e fotometricamente i pixel in formato raw. Possono essere acquisite informazioni quali latitudine, longitudine, angolo di fase, angolo di incidenza, angolo di emissione, ora solare locale, azimut solare, e molte altre, attraverso i kernel SPICE (Spacecraft and Planetary ephemerides, Instrument C-matrix and Event kernel). Questi kernel memorizzano la posizione e l'orientazione del satellite, dello strumento specifico e dell'obiettivo analizzato. Essi necessitano di essere aggiornati spesso, all'IRSPS si aggiornavano circa ogni tre settimane, per avere le informazioni precise sugli spostamenti e le correzioni imposte all'assetto del satellite.

Livello 1: CALIBRAZIONE RADIOMETRICA E RIMOZIONE DEL RUMORE

Il procedimento per generare un'immagine di livello 1 calibrata radiometricamente e pulita da rumore implica:

- Calibrazione radiometrica dei dati così da confrontarla con un'immagine ideale acquisita con lo stesso sistema di camera fotografica con le medesime proprietà radiometriche. I valori dell'immagine risultante rappresentano la riflettanza della superficie (I/F).
- Rimozione del rumore sistematico dall'immagine. Per le CTX, questo rumore appare visualizzato come strisce verticali (rughe) che si riscontrano sotto alcune condizioni di osservazione, oppure come discrepanze di tonalità fra i datasets raccolti da canali adiacenti nel CCD.

Perchè eseguire la calibrazione radiometrica

Sia le camere a tubo Vidicon come quelle montate sulle missioni Viking e Voyager, sia le camere a CCD (montate su MRO) producono immagini digitali con forti problematiche definite come ombreggiature della camera (*camera shading*). Questi errori di acquisizione sono dovuti alla disuniforme sensitività lungo il campo di vista (FOV) dello strumento immagine. Per chiarire: si pensi di acquisire un'immagine digitale di un oggetto piano con luminosità uniforme in ogni punto e di un'unica colorazione grigia. Se la sensitività della camera sul FOV fosse ideale, l'immagine digitale acquisita avrebbe lo stesso valore di DN per ogni pixel. Tuttavia, a causa della disuniformità della sensitività della camera, i DN risulteranno variare. Una tipica camera ha circa il 20 % di variazione di valori lungo il campo di vista. Le correzioni di ombreggiatura sono applicate in modo tale da avere un'immagine radiometricamente uniforme.

Il *Tubo vidicon* (ora obsoleto) è un sensore il cui funzionamento si basa sulla variazione della resistenza elettrica in funzione della radiazione luminosa. É costituito da una serie di elettrodi contenuti in un tubo di vetro nel quale è praticato un vuoto. L'elettrodo dove avviene la conversione tra l'informazione luminosa ed

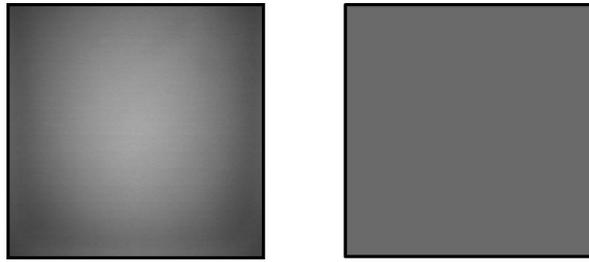


Figura 4.9 Esempio di camera shading: sinistra ripresa reale, destra ideale

elettrica si chiama catodo e su di esso deve essere focalizzata otticamente l'immagine. Sul catodo è depositato uno strato sottile fotoconduttivo (ossido e solfuro di piombo, sensibili alle radiazioni nel visibile e nel vicino infrarosso) la cui resistenza è funzione del numero di fotoni che lo colpiscono. La lettura della superficie illuminata è fatta tramite un pennello di elettroni che, deflesso, effettua una esplorazione raster (per linee orizzontali) dell'immagine, per cui l'apporto di carica sul catodo e, quindi, la corrente del pennello elettronico, dipende dall'illuminazione (figura 4.10 da [24]).

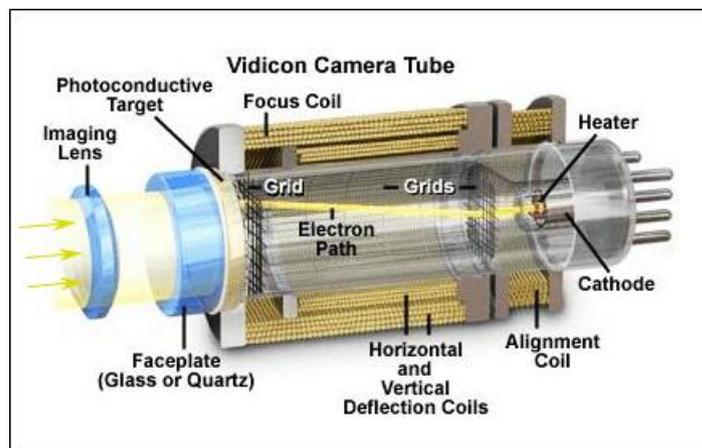


Figura 4.10 Schema componenti tubo VIDICON

Calibrazione radiometrica di dati CTX

Il detector CTX è composto da un totale di 5 064 pixels divisi tra canale A e canale B e posti in maniera alternata: ABABAB. Le immagini da CTX possono includere o non includere tutti i pixel acquisiti nell'immagine. Esistono alcune modalità di calcolo (*Spatial Summing*) utilizzate direttamente sullo spacecraft per trovare la media di più pixel-detector da tradurre in valore associato ad un unico pixel di output. I pixel dark current, descritti precedentemente, vengono considerati per ogni linea e immagazzinati in una tabella di Isis cube CTX Prefix Dark Pixel. Durante il processo di calibrazione, il valore dark viene sottratto dai pixel dell'immagine. La linea di comando relativa a questo passo del processing è la seguente:

```
ctxcal from=P01_001472_1747_XI.05S146W.cub  
to=P01_001472_1747_XI.05S146W.cal.cub
```

Effetti della calibrazione radiometrica

I DN di un'immagine calibrata radiometricamente sono espressi in unità radiometriche direttamente proporzionali alla luminosità di una scena. I miglioramenti dovuti alla calibrazione radiometrica di Isis portano a valori che rappresentano:

- Radianza: l'energia elettromagnetica totale emessa o riflessa da un'area di un pianeta [$w/(cm^2 Sr)$],
- Riflettanza: tasso di energia riflessa rispetto all'energia in ingresso (a.e. irradianza/fluxo solare, I/F). Essa sarebbe 1 per un riflettore ideale al 100% dove il sole e l'orientazione della camera sono perpendicolari alla superficie riflettente.

Di solito la calibrazione radiometrica di Isis offre come output automatico la riflettanza, mentre la radianza può essere comunque calcolata.

Rumore e Artefatti

Con i termini Rumore e Artefatti (difetti derivanti dall'elaborazione) si vogliono identificare quegli errori sull'immagine visibili come macchie, punti isolati, dati mancanti, segni, motivi ripetuti regolarmente o casualmente, difetti e anomalie nell'immagine creati durante l'acquisizione, la trasmissione e/o il processing dei dati. La distinzione tra rumore e artefatto non è molto ben chiara e spesso questi termini vengono usati come sinonimi. Dal punto di vista tecnico, il processo di calibrazione radiometrica è in grado di rimuovere questi errori di visualizzazione. Ora si vuole fare un approfondimento su questo tema analizzando le varie tipologie di errori-immagine.

Rumore

Il rumore si presenta nell'immagine come imperfezione o difetto ed è causato da:

1. Dispersione o caduta del dato telemetrico o errori nella trasmissione
2. Malfunzionamento o rottura del detector
3. Lettura del rumore madre del sistema di CCD
4. Segnale elettronico spurio

Esso poi viene suddiviso in tre categorie:

1. **Localizzazione fissata del rumore:** il rumore esiste sempre nello stesso punto dell'array dell'immagine e la cui posizione è facilmente prevedibile. È possibile correggere esteticamente questo tipo di errore sostituendo i pixel sbagliati con un valore calcolato dalla media pesata in funzione dei pixel corretti attorno al pixel errato. La causa è identificabile in un malfunzionamento della macchina o nella rottura di qualche detector.
2. **Rumore casuale:** è dato da errori di trasmissione che causano flussi di bit che modificano l'immagine ad intervalli casuali. Questa categoria di errori provoca piccole variazioni o variazioni molto marcate nell'immagine, può

essere errato qualche pixel isolato, e l'immagine che ne risulta è definita a 'sale e pepe', infatti appaiono pixel neri e bianchi disposti in maniera casuale sull'immagine. Solitamente la correzione avviene con tecniche di filtraggio che riconoscono i pixel mancanti o anomali e li sostituiscono con un valore che deriva da una media pesata dei pixel vicini non affetti da errore.

3. **Rumore lineare:** è causato dal segnale elettronico acquisito a bordo dello strumento che risulta essere spurio. Esso interferisce con l'immagine aggiungendole accidentalmente un segnale non coerente con l'immagine stessa.

Artefatti

Gli artefatti sono delle imperfezioni e/o difetti dell'immagine causati da errori nel processing dei dati che possono essere intenzionali (dovuti a imperfezioni del sistema), o non intenzionali (dovuti a cali o picchi di energia nel sistema durante il processing). Ne fanno parte:

- reti incise sulle lenti della camera
- reti esposte sul film fotografico durante i preparativi del volo della missione
- piccoli granelli di polvere posizionati nel percorso ottico o nell'array del piano focale
- effetto dei raggi cosmici o altre particelle cariche che impattano sui sensori (i CCD sono molto delicati)
- strisce, anelli o reticoli visibili creati durante il filtraggio
- quantificazione e checkerboarding introdotti durante algoritmi di compressione e conversione dell'immagine da formato *cube* di Isis ad uno standard, oppure a una riduzione dei bit dell'immagine che causa una riduzione della tonalità di colore.

Di seguito si riportano una serie di immagini che rappresentano gli errori e/o gli artefatti incontrati durante questo lavoro di tesi.

Reti, dati mancanti, visualizzazione a sale e pepe

I larghi puntini neri regolarmente disposti sull'immagine (figura 4.11) sono causati da una retina disposta sulle lenti della camera. Il reticolo di linee nere verticali al piede dell'immagine è causato invece da una perdita di dati durante la loro trasmissione a terra. I puntini bianchi e neri, a sale e pepe, sono rumore casuale.

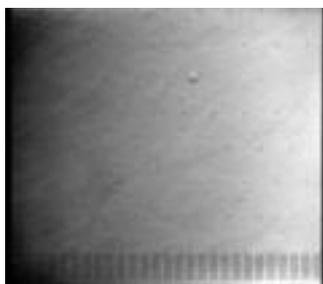


Figura 4.11 Reti, dati mancanti, sale e pepe

Errore dello strumento

La linea nera verticale che attraversa il lato destro dell'immagine 4.12 è stata causata da un errore insolito dello scanner della camera che ha acquisito l'immagine.



Figura 4.12 Esempio di errore dello strumento

Errore di trasmissione

Nell'immagine 4.13 si possono notare una serie di pixel grigi e neri (in alto a destra) disposti a scacchiera che non permettono di riconoscere nessuna forma sulla superficie, inoltre si vede un grosso quadrato nero al centro. Questi errori sono dovuti a una trasformazione dei dati a causa di un guasto tecnico durante la loro trasmissione, il quadrato nero invece è stato causato da una perdita dei dati.



Figura 4.13 Errore di trasmissione

Compressione dell'immagine

L'esportazione dell'immagine in un formato di scarsa qualità usando un algoritmo che porti a una compressione molto alta, introduce un motivo a mosaico lungo tutta l'immagine.



Figura 4.14 Errore di compressione

Selezione immagini

A questo punto è possibile svolgere una selezione ulteriore delle immagini scaricate osservandole in una sorta di anteprima con il comando 'qview' del terminale. Se l'immagine risulta essere buona, senza troppi buchi, allora essa viene selezionata, altrimenti scartata. Diventerebbe inutile fare delle analisi o cercare di migliorare l'immagine con ulteriori elaborazioni perchè di fondo ci sono errori incorreggibili del satellite. Una volta selezionata l'immagine, si può decidere di tagliarla in funzione dell'area di studio. In questo modo risulteranno più veloci le analisi successive, si consideri che un'immagine intera può pesare anche 1,5 GB. Tale operazione è possibile su immagini .cub. La schermata si presenterà come quella sottostante.

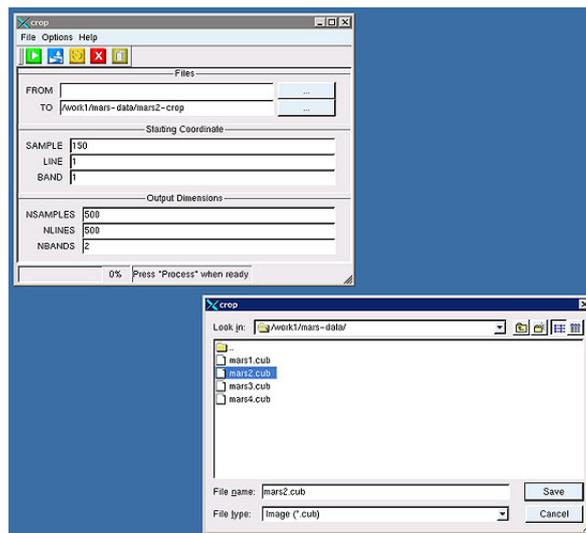


Figura 4.15 Esempio di taglio di un'immagine

Ora si può procedere con il livello successivo. Livello 2: PROIEZIONE
Questo livello avviene eseguendo in Isis i seguenti comandi:

Map Template

Per proiettare un'immagine in una specifica proiezione cartografica, è necessario impostare una serie di parametri basati sul tipo di proiezione che si vuole utilizzare. Per fare ciò si è compilato, in un file di testo, il maptemplate con i parametri di proiezione voluti. Di seguito si mostrano due maptemplate distinti per Marte, il primo è una tipologia standard con proiezione sinusoidale, il secondo è quello utilizzato per il processing dei dati CTX sia per Eberswalde sia per Holden (figura 4.16):

<pre> Group = Mapping TargetName = Mars EquatorialRadius = 3396190.0 <meters> PolarRadius = 3376200.0 <meters> LatitudeType = Planetocentric LongitudeDirection = PositiveEast LongitudeDomain = 360 ProjectionName = Sinusoidal CenterLongitude = 227.95679808356 MinimumLatitude = 10.766902750622 MaximumLatitude = 34.44419678224 MinimumLongitude = 219.7240455337 MaximumLongitude = 236.18955063342 PixelResolution = 426.87763879023 <meters/pixel> End_Group </pre>	<pre> Group = Mapping TargetName = Mars EquatorialRadius = 3396190.0 <meters> PolarRadius = 3376200.0 <meters> LatitudeType = Planetocentric LongitudeDirection = PositiveEast LongitudeDomain = 180 ProjectionName = SimpleCylindrical CenterLongitude = 0.0 PixelResolution = 6 <meters/pixel> End_Group </pre>
--	---

Figura 4.16 A sinistra la tipologia standard; a destra la tipologia usata

Quindi le immagini sono state proiettate attraverso il comando di Isis chiamato *cam2map*.

Il *cam2map*

Questo comando di Isis converte l'immagine-camera, acquisita dallo strumento, in un'immagine proiettata secondo un sistema di riferimento. Automaticamente il *cam2map* calcola alcuni parametri di mapping, cosicché è possibile scrivere solamente la tipologia di ProjectionName scelta per attivare un'ulteriore serie di passaggi che portano alla corretta proiezione dell'immagine.

Informazioni utili:

- il formato *cube* deve derivare da una missione supportata da Isis perché il *cam2map* dipende dalla camera e dalle informazioni dello strumento presenti nel sistema Isis,
- lo stesso *maptemplate* è riutilizzabile per proiettare più immagini con gli stessi parametri di proiezione semplicemente modificando nel file di testo le voci relative alla Latitudine e Longitudine,
- per il processing di più immagini che devono poi essere mosaicate, è necessario assicurarsi che la *PixelResolution* sia la stessa per ogni immagine.

4.4 Dal 2D al 3D

Per creare un'immagine visualizzabile tridimensionalmente e che abbia per ogni pixel anche il dato altimetrico, è necessario che un punto venga 'visto' da due punti di osservazione differenti e abbastanza vicini. Nel caso di immagini satellitari, un punto sulla superficie può comparire in più immagini riprese anche in periodi diversi. Pertanto è stato necessario identificare coppie di immagini 2D acquisite in un breve arco temporale al fine di produrre un'unica immagine 3D. Il concetto è lo stesso della visione tridimensionale dei nostri occhi.

In continuità con il lavoro descritto nel paragrafo precedente, le immagini bidimensionali ottenute da Isis si trovano in due formati di visualizzazione: *.png* e *.pgw*. Per produrre i DEM, sono state individuate coppie di immagini sovrapponibili (elenco in figura 4.17) osservando prima ogni immagine *.png* o *.pgw*; in seguito sono state raccolte ognuna in una cartella per creare, dopo opportuni passaggi, la tridimensionalità della stereoscopia, coprendo il più possibile la superficie di tutte le due aree di interesse. La colonna 'note' indica se il processing è andato a buon fine.

Sia per Eberswalde sia per Holden è stata scaricata anche un'immagine HRSC, sempre dal sito [22], per avere un confronto con le CTX. È stata sufficiente una sola immagine per ogni zona poichè la risoluzione di HRSC è minore rispetto a quella delle CTX, 25 m/pixel versus 5 m/pixel, cosicchè con uno stesso numero

CAPITOLO 4. DATI A DISPOSIZIONE E LORO ANALISI

COPPIA	IMMAGINE 1	IMMAGINE 2	NOTE
1	P13_006123	G02_019111	No
2	B21_017845	B22_018056	Sì
3	B21_017845	B21_017700	Sì
4	B02_010408	B22_018333	Sì
5	G02_018834	P06_003433	No
6	G01_018412	B21_017911	Sì
7	B21_017700	P13_005978	Sì
8	B01_0110197	G01_018768	Sì
9	P19_008242	B21_017700	Sì
10	P17_007481	P19_008272	Sì
11	G01_018478	G01_018768	Sì
12	G02_019111	G01_018689	Sì
13	P13_006123	G01_018689	Sì
14	B22_018222	B02_010263	Sì
15	G02_019111	G01_018689	Sì

(a) Eberswalde

COPPIA	IMMAGINE 1	IMMAGINE 2	NOTE
C	G01_018689	G02_019111	Sì
dx 1	B20_017555	G02_019111	Sì
dx 2	B20_017555	P18_008127	Sì
dx 3	G02_019111	P18_008127	Sì
sx 1	B01_009841	P22_009485	Sì
sx 2	B01_009841	P22_009551	Sì
sx 3	P22_009485	P22_009551	Sì

(b) Holden

Figura 4.17 Elenco coppie usate per Eberswalde e delta di Holden

di pixel si può ricoprire una zona maggiore.

Successivamente, per ogni coppia CTX identificata, si è lanciato lo *script* relativo alla *Stereo Pipeline*, software creato appositamente dal team dell'USGS, che permette di individuare, per la sola area di sovrapposizione delle due immagini-coppia, i punti comuni che, correlati, permettono di creare un prodotto cartografico comprendente DEM, immagini orto-rettificate e modelli 3D ([25]). Le parti delle immagini che non si sovrappongono vengono automaticamente eliminate. Nel lavoro di tesi sono stati utilizzati i DEM e le relative immagini ortorettificate per costruire un modello tridimensionale della superficie. Facendo una similitudine in ambito fisiologico, il software della Stereo Pipeline è assimilabile a tutti quei processi di trasferimento di informazioni che ci permettono di percepire la profondità partendo dalla percezione 2D di un oggetto coi nostri occhi fino alla sua visione 3D nel nostro cervello. Il processing impiega un notevole numero di ore di calcolo, variabile in funzione della grandezza dell'immagine e produce una serie di file in vari formati, ciascuno necessario allo svolgimento di un passaggio successivo del processing stesso fino a raggiungere un'immagine in formato TIFF chiamata 'Good Pixel map'. Questa può essere aperta con qualsiasi programma di visualizzazione immagini. La figura 4.18 illustra la serie di immagini prodot-



Figura 4.18 Serie di immagini da Stereo Pipeline e Good Pixel map

te dall'elaborazione eseguita attraverso la Stereo Pipeline relativa a un'immagine campione E0201461_M0100115, presente nel manuale [25], nella quale è visibile la Good Pixel map a destra. L'immagine in grigio risulta scarsamente puntinata di rosso, ciò significa che il prodotto finale è di buona qualità e utilizzabile per

svolgere gli ultimi passaggi per poi importare l'immagine in ArcGis.

Infine, lo script 'FINEPROC' ha permesso di convertire in formato GIS-ready il DEM e l'ortoimmagine e sono stati denominati coppia2-DEM_equi e ortho-L_equi. Essi permettono sia la visualizzazione 2D sia quella 3D in ArcGis.

Riassumendo

I passaggi essenziali dell'elaborazione del dato per produrre immagini elaborabili in ambiente GIS sono riassunti nell'elenco sottostante e riferiti alla coppia 2 di Eberswalde:

- Download the CTX images B22_018056_1559_XN_24S033W.IMG and B21_017845_1557_XI_24S033W .IMG
- mroctx2isis from=B22_018056_1559_XN_24S033W.IMG to=B22_018056_1559.cub
mroctx2isis from=B21_017845_1557_XI_24S033W.IMG to=B21_017845_1557.cub
- spiceinit from=B22_018056_1559.cub
spiceinit from=B21_017845_1557.cub
- ctxcal from=B22_018056_1559.cub to=B22_018056_1559.cal.cub
ctxcal from=B21_017845_1557.cub to=B21_017845_1557.cal.cub
- cam2map4stereo.py B22_018056_1559.cal.cub B21_017845_1557.cal.cub
- -map=maptemplate.map -resolution=6.0
- mkdir result/output
- stereo B22_018056_1559.map.cub B21_017845_1557.map.cub result/output
- fineproc B22_018056_1559.map.cub B21_017845_1557.map.cub

Nelle figure di questo paragrafo si vogliono mostrare i dati visualizzati col software ArcGis di ESRI delle due zone.

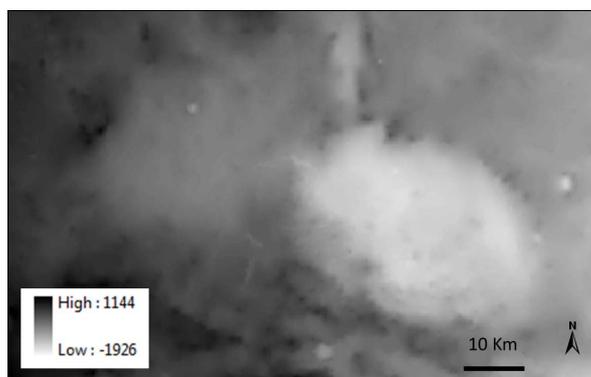


Figura 4.19 Bacino di Eberswalde

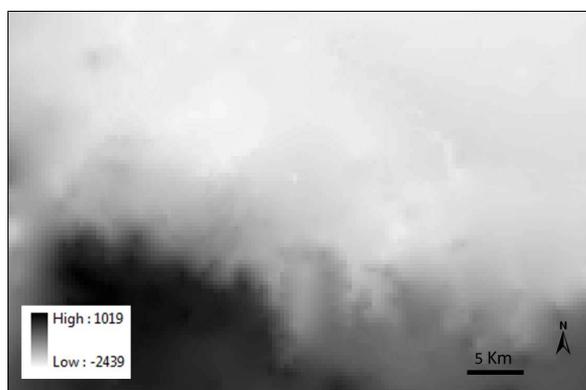


Figura 4.20 Delta nel cratere di Holden

MOLA

Come si vede nelle immagini di figura 4.19 e 4.20, il MOLA non permette di distinguere particolarmente bene i dettagli a causa della bassa risoluzione del dato ma nonostante questo è stato posizionato in ogni immagine del progetto GIS come base alle CTX. La risoluzione del MOLA sia per Eberswalde sia per Holden è di 463 m/pixel.

MOLA e HRSC

Come si può notare, la sovrapposizione dell'immagine HRSC (DEM e immagine contemporaneamente) a quella del MOLA permette una migliore rappresentazio-

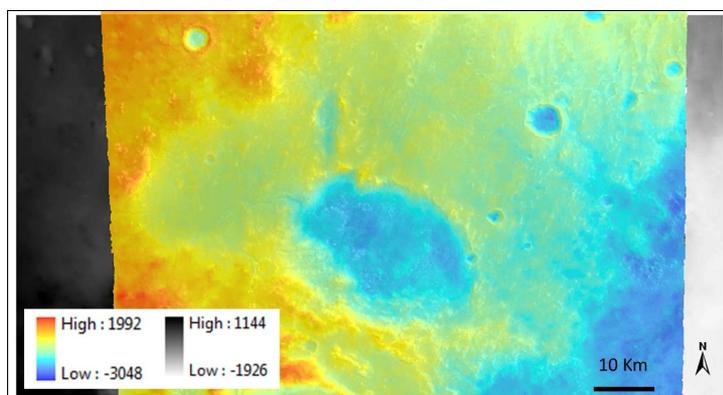


Figura 4.21 MOLA e HRSC di Eberswalde

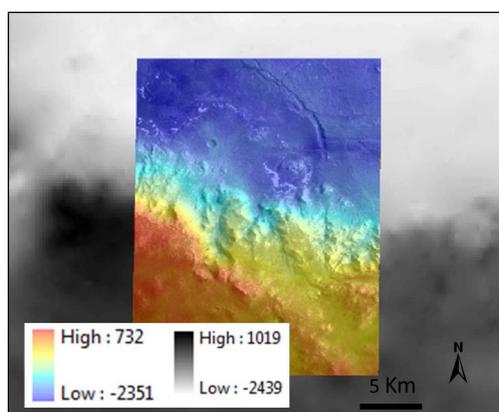


Figura 4.22 MOLA e HRSC del delta a Sud di Holden

ne dei dettagli se si visualizza l'HRSC con una trasparenza di circa il 20% (figure 4.21 e 4.22). Le variazioni di toni di colore indicano una variazione di altezza e, come si può osservare dalla legenda, MOLA e HRSC (rispettivamente in scala di grigi e in scala di colori) non hanno gli stessi valori di altitudine. Inoltre le immagini di HRSC in B/N (*nd4*) hanno una risoluzione di 25 m/pixel mentre quella dell'immagine con il dato altimetrico, il DEM (*da4*), è di 125 m/pixel proprio per la necessità di immagazzinare anche l'informazione su z . Nella figura 4.23 si mostrano le immagini *nd4* in scala di grigi.

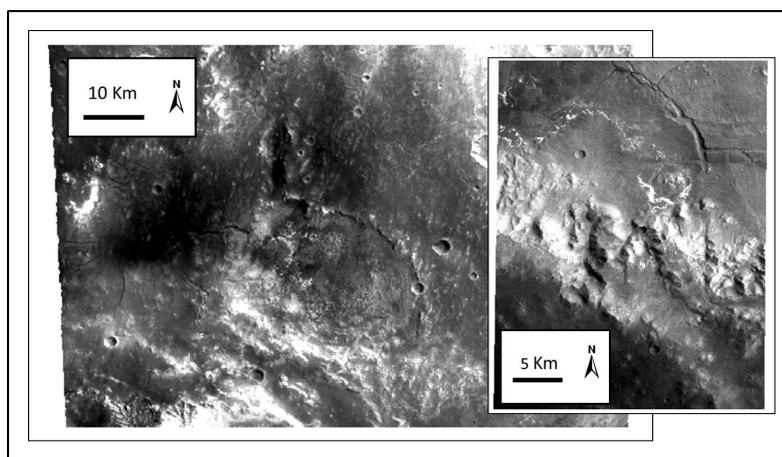


Figura 4.23 Holden in primo piano, Eberswalde in secondo piano

CTX

Come già precedentemente accennato, la risoluzione delle immagini CTX è molto elevata (fino a 5 m/pixel), di conseguenza i dettagli come linee di stratificazione, contorni di forme fluviali, meandri e limiti di bacino sono molto più netti (figure 4.24 e 4.25). Le immagini e i DEM presentano bordi con dato nullo (*background*) che sono stati opportunamente eliminati. Le coppie migliori per effettuare osser-

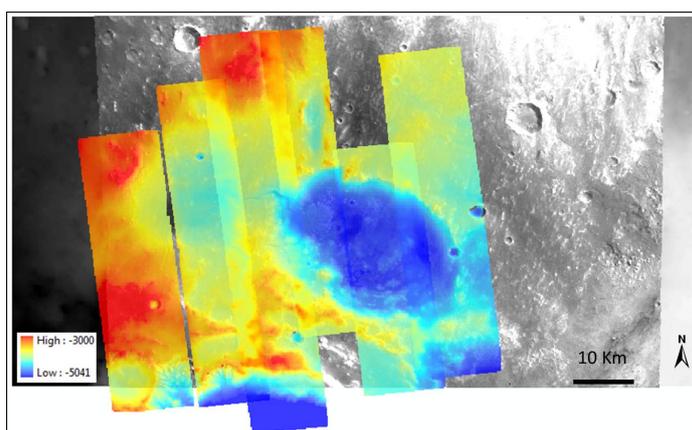


Figura 4.24 CTX Eberswalde

vazioni sul territorio sono le seguenti: 3, 4, 6, 11, 14, 15 (figura 4.24). Il motivo di questa scelta è dovuto alla chiarezza di visualizzazione, all'assenza di errori tipo

a bande (presenti nella coppia 13) e alla necessità di non appesantire il progetto GIS con immagini ridondanti (ad esempio la coppia 2 è risultata già compresa nell'area della coppia 3). Le coppie scelte per il delta di Holden tra le 7 analizzate

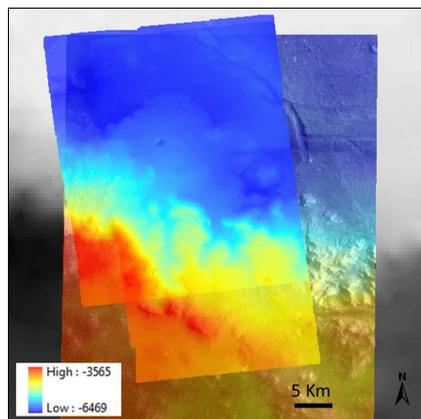


Figura 4.25 CTX delta di Holden

sono la *sx l* e la *c* (figura 4.17).

Come si può notare dalle legende di queste due ultime immagini, la scala di colori per entrambe le zone indica che l'elevazione è molto differente da quella del MOLA o anche da quella di HRSC, la motivazione verrà spiegata nel paragrafo dei limiti del metodo utilizzato (paragrafo 6.1).

La peculiarità di questa tipologia di immagini, come è stato detto, è la buona risoluzione al suolo che permette ingrandimenti notevoli. Inoltre, usando alcuni tool di ArcGis, è possibile visualizzare curve di livello, mappe delle pendenze, profili altimetrici di transetti, ecc... Di seguito sono riportate alcune immagini di queste caratteristiche come esempio delle potenzialità degli strumenti di elaborazione. In particolare l'immagine 4.27 rappresenta la parte EST del delta di Eberswalde sulla quale è stato effettuato un calcolo delle curve di livello a equidistanza 10 m dal tool *contour* del software ArcGis. Questo strumento permette di avere un'idea più precisa dell'andamento della superficie sull'intera area di interesse, come testimonia anche l'immagine 4.28 di Holden attraverso le isoipse che degradano costantemente verso il fronte del delta.

Le immagini dei profili (figure 4.30 e 4.32) ci permettono di visualizzare pro-

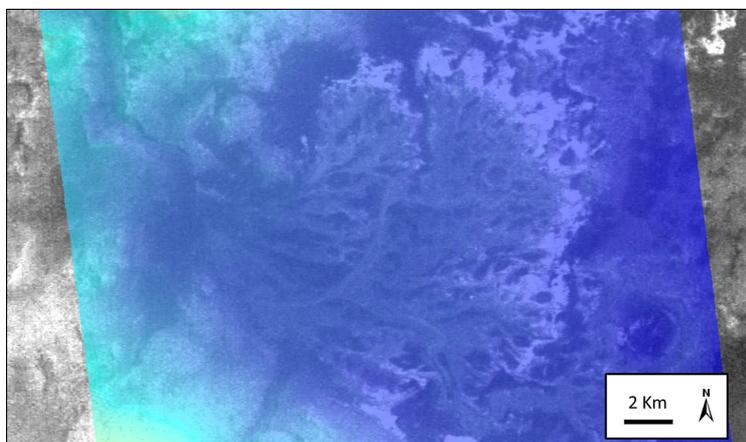


Figura 4.26 CTX delta di Eberswalde da coppia 6

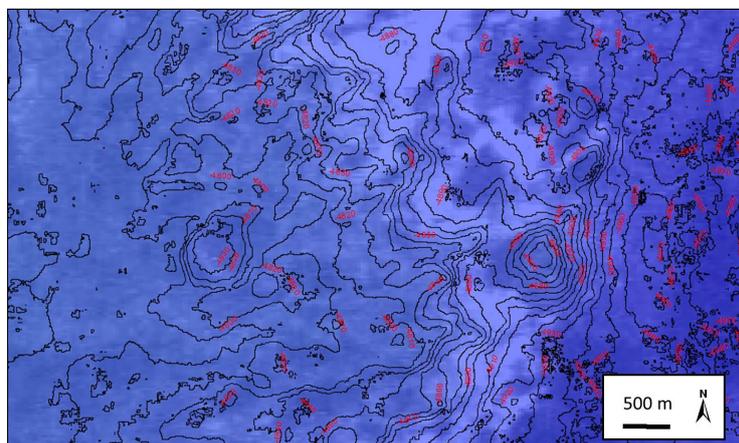


Figura 4.27 Ingrandimento con curve di livello

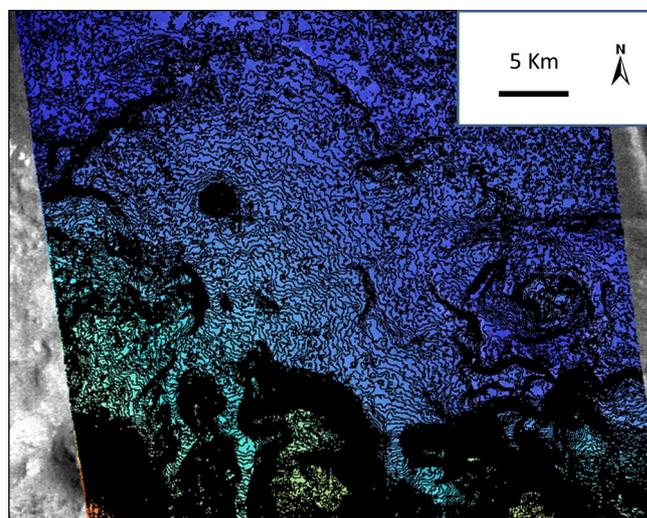


Figura 4.28 Curve di livello a 10 m delta di Holden

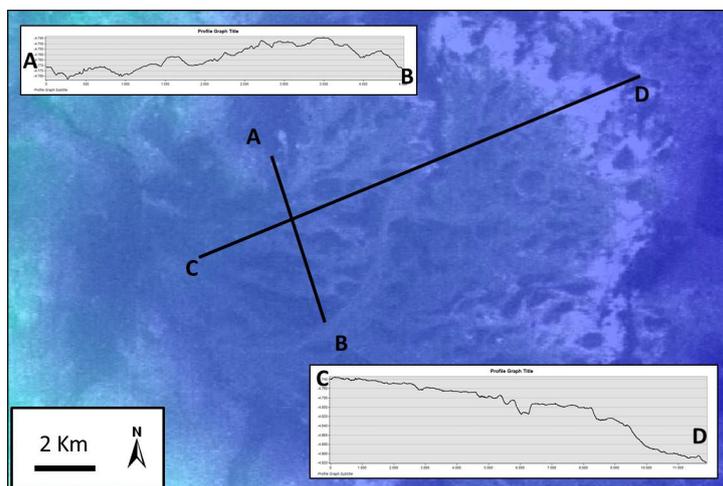


Figura 4.29 CTX delta di Eberswalde da coppia 6 con sezioni altimetriche

CAPITOLO 4. DATI A DISPOSIZIONE E LORO ANALISI

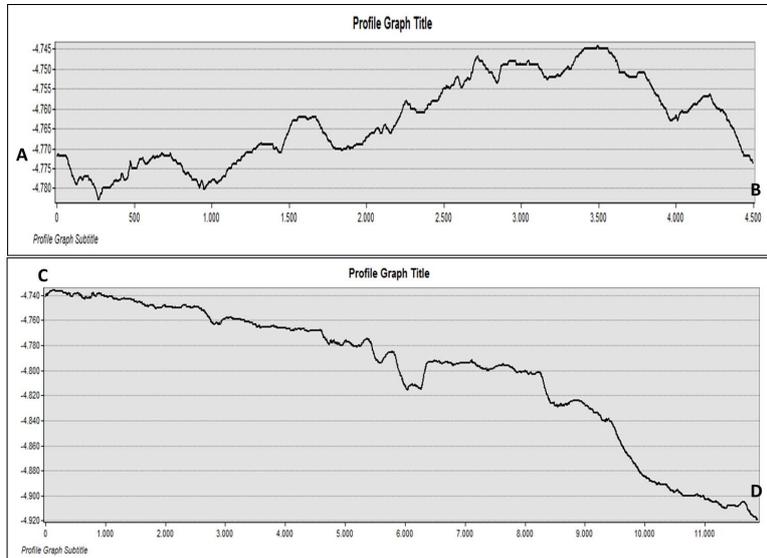


Figura 4.30 Sezioni altimetriche delle sezioni AB e CD Eberswalde

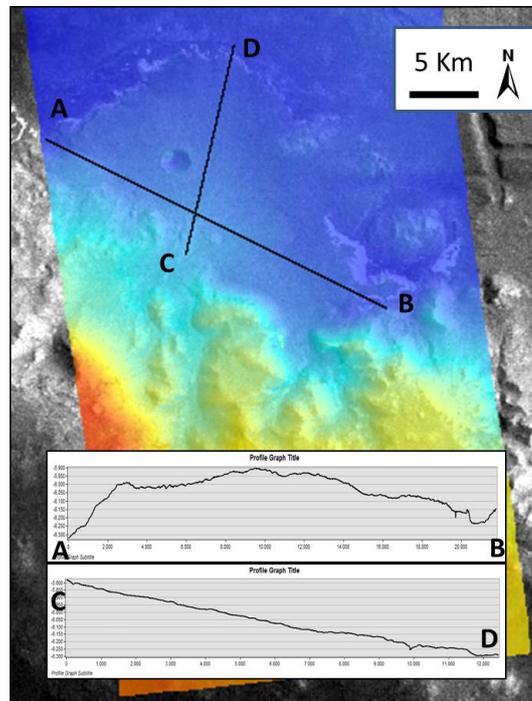


Figura 4.31 CTX Holden con sezioni altimetriche

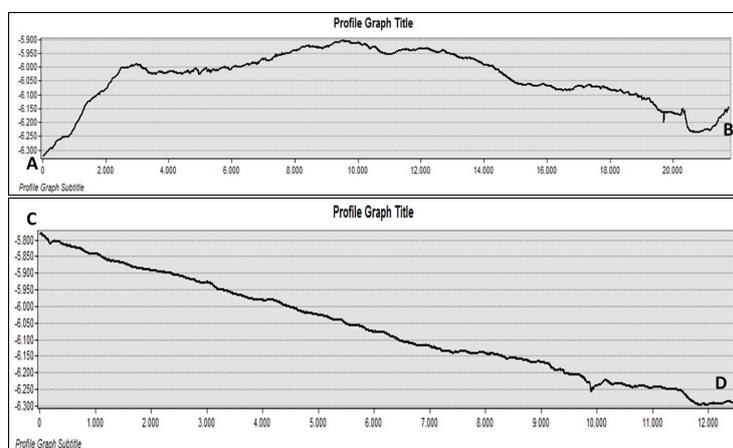


Figura 4.32 Sezioni altimetriche delle sezioni AB e CD Holden

prio l'andamento dell'altitudine di un transetto. Questo, associato a informazioni di distanza, pendenza e orientazione, può darci anche gli strumenti utili per creare una carta geologica come è stato fatto per Eberswalde. All'inizio del lavoro si volevano sfruttare le caratteristiche del territorio e i tool appena descritte di ArcGis per confutare o avallare le teorie di formazione geologica vigenti nelle due aree. Ma, una volta confrontati con la letteratura e con le dinamiche di evoluzione descritte ed essendoci anche coinvolti personalmente in un'analisi del territorio con transetti differenti con lo scopo di capire il perchè di alcune forme, siamo rimasti convinti anche noi dalle teorie evolutive [1].

Prodotto 3D

L'estensione ArcScene di ArcGis ci ha permesso di raggiungere una visualizzazione tridimensionale molto buona caricando l'immagine ORTHO-L-equi.tif unita al DEM corrispondente. I due modelli (figure 4.33 e 4.34) sottostanti si sono ottenuti ponendo come esagerazione verticale un valore pari a cinque unità, con Black come background color e con rendering di qualità massima.

Per mostrare le caratteristiche dell'analisi svolta sono state scelte alcune immagini dal 3D dal modello di Holden perchè presenta delle forme più semplici e chiare

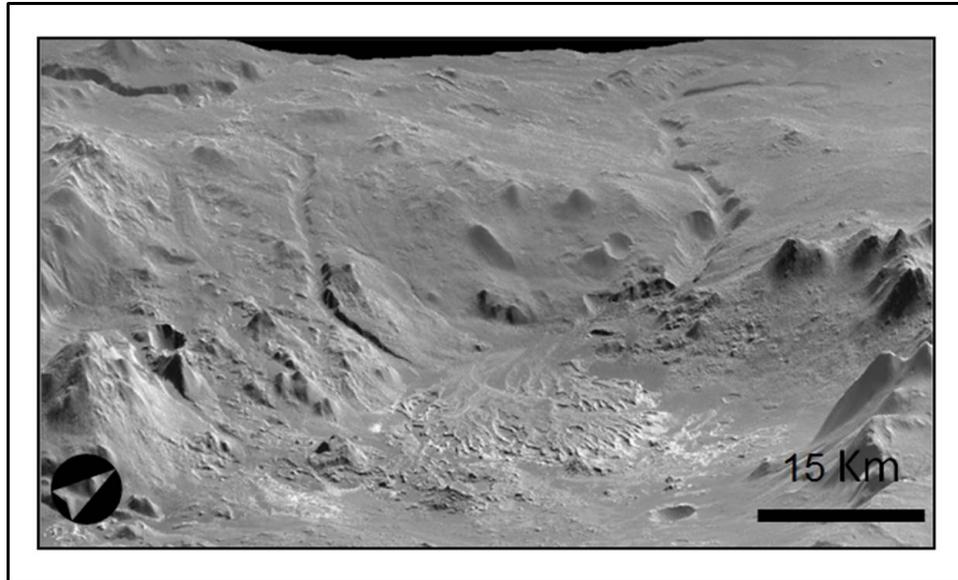


Figura 4.33 Modello 3D del delta di Eberswalde da CTX

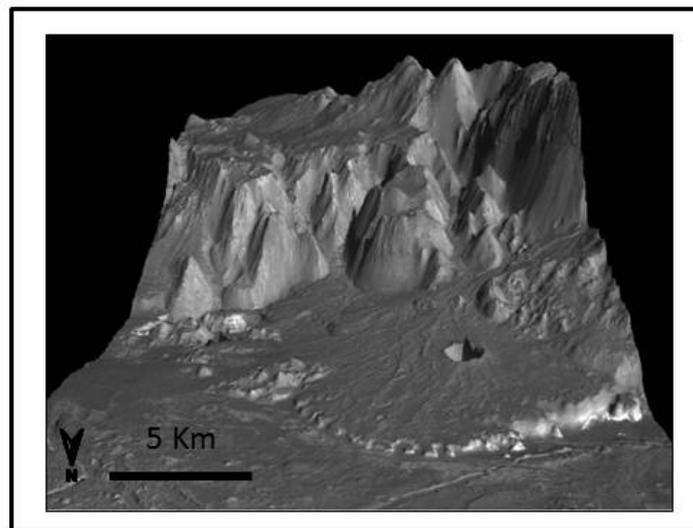


Figura 4.34 Modello 3D del delta di Holden da CTX, visione semi frontale

rispetto a quello di Eberswalde caratterizzato da lobi sovrapposti; di quest'ultimo vedremo solo alcune figure di confronto alla fine del paragrafo. La figura 4.35 mostra il delta di Holden dall'alto, prospettiva dalla quale sono visibili i fronti deltizi non solo del corpo più esteso a Ovest, ma anche di altri due piccoli delta a Est, di estensione circa 20 km² ciascuno. Inoltre, per mostrare la differenza di dettaglio tra CTX e HRSC, sono state scelte due zone particolari: l'immagine in figura 4.36 mostra chiaramente delle linee da pianoparallele leggermente ondulate, di spessore e intensità di grigio variabili. Sembra che lo spessore possa raggiungere almeno i 15 m dato che la risoluzione dell'immagine è di 5 m/pixel e ci sono fasce di almeno 3 pixel che seguono l'andamento globale della forma. Probabilmente, quindi, non si tratta di linee di sedimentazione, ma di strati di una certa potenza. L'area identificata con la lettera *a* da HRSC in figura 4.38, invece, non permette di cogliere tali linee poiché la risoluzione di 25 m/pixel. Inoltre è proprio la morfologia della superficie che appare differente, come ben mostrato dal confronto tra le figure *b* 4.39 e 4.40: infatti quest'ultima non coglie i contorni e i bassi topografici di tutte le valli e, non da ultimo, addolcisce la 'rugosità' della superficie e dei versanti, quasi levigandoli, caratteristica che invece per un potenziale sviluppo di un modello di evoluzione geomorfologica e/o fluidodinamica è necessario considerare. Le figure 4.41 e 4.42 invece, vogliono evidenziare il

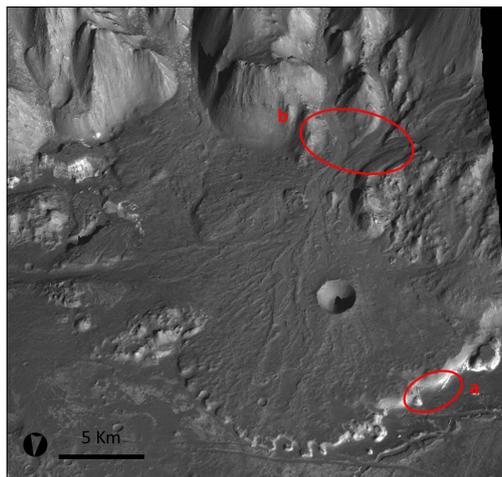


Figura 4.35 Modello 3D del delta di Holden da CTX, visione dall'alto

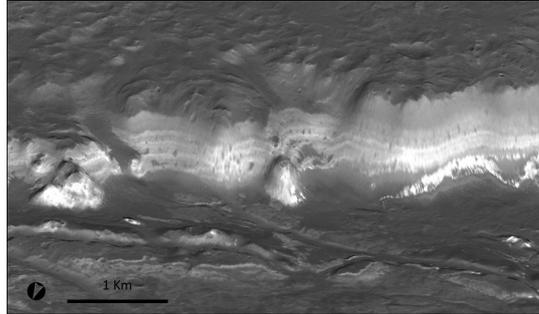


Figura 4.36 Figura *a*: particolare da CTX, linee di stratificazione

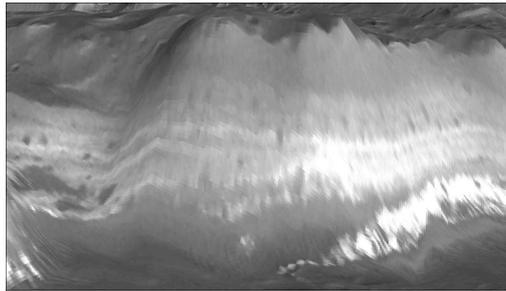


Figura 4.37 Strati

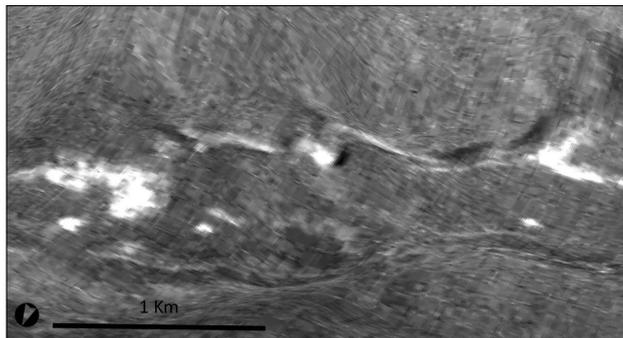


Figura 4.38 Figura *a*: particolare da HRSC, linee di stratificazione

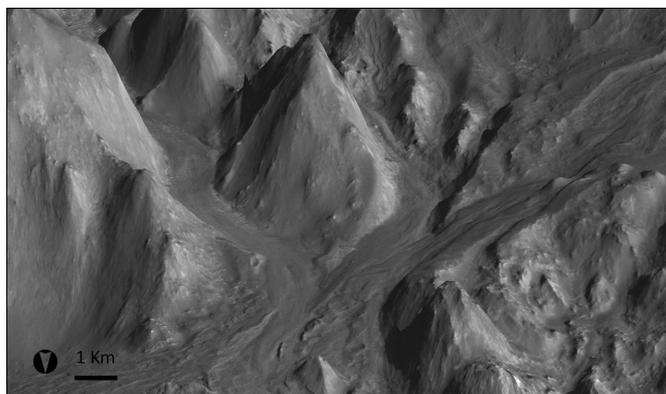


Figura 4.39 Figura *b*: confluenza 3 canali ed inizio del delta

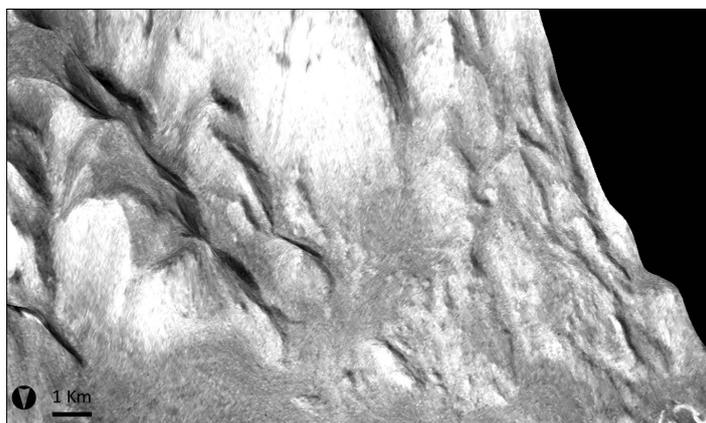


Figura 4.40 Figura *b*: confluenza 3 canali ed inizio del delta

differente dettaglio delle incisioni fluviali dei due canali principali a Nord e a Sud del delta di Eberswalde. In particolare, l'osservazione da HRSC (figure 4.41 e 4.42) mostra il canale Sud molto meno inciso se confrontato con l'immagine 3D raggiunta da CTX (figura 4.43).

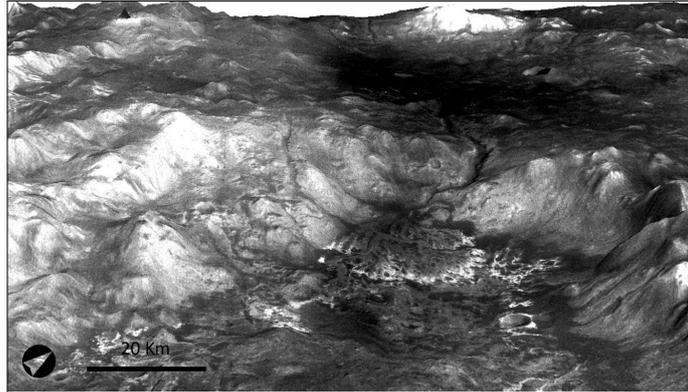


Figura 4.41 Area delta Eberswalde

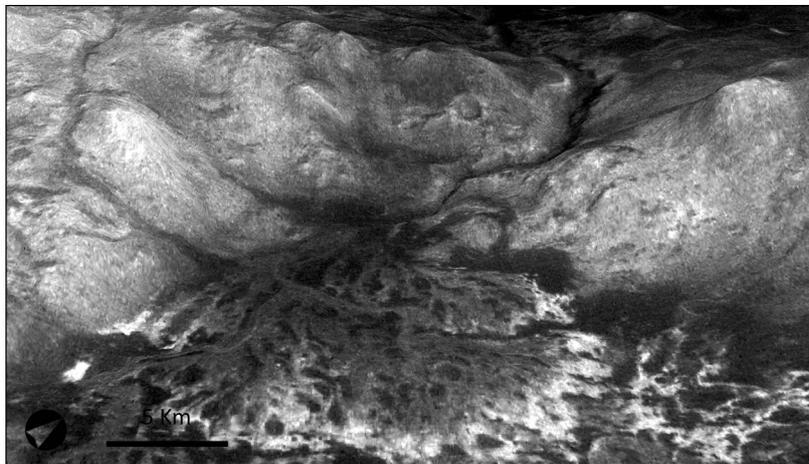


Figura 4.42 Fronte delta Eberswalde; ingrandimento da HRSC

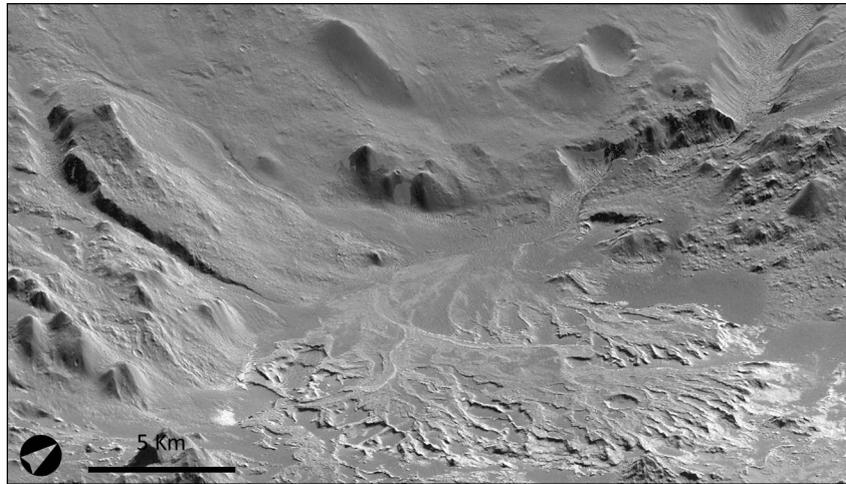


Figura 4.43 Fronte delta Eberswalde; ingrandimento da CTX.

Nota Bene

La scala spaziale di ogni immagine tridimensionale è riferita a punti specifici dell'immagine stessa, ad esempio quelle del delta di Eberswalde sono riferite al fronte e non alla zona dell'immagine dove è stata posizionata la scala.

4.5 Dati da CRISM

Un passo importante che si è voluto compiere nella tesi è stato quello di indagare la tipologia di sedimento componente i nostri due delta. L'obiettivo ultimo era quello di identificare il peso specifico e quindi la densità del sedimento stesso, dato fondamentale per la realizzazione di uno studio di valutazione energetica del possibile mezzo di trasporto. Si è voluto elaborare questi dati autonomamente imparando una seconda tecnica di analisi, in modo tale da essere autosufficienti e non troppo influenzati già in partenza da dati di letteratura. Il confronto è stato fatto alla fine dell'analisi e ci ha riservato sorprese di non poca importanza.

CAPITOLO 4. DATI A DISPOSIZIONE E LORO ANALISI

Per conoscere la mineralogia del sedimento, sono state analizzate immagini spettrali nell'InfraRosso e InfraRosso Vicino ricavate dallo spettrometro CRISM (Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars), uno degli strumenti dell'MRO, processate con un apposito tool di ENVI: CAT nella versione 6.6.

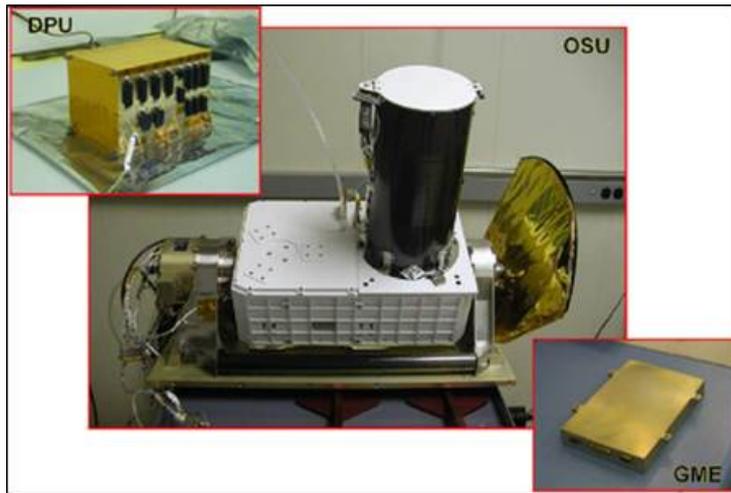


Figura 4.44 Camera CRISM, fonte <http://crism.jhuapl.edu/instrument/innoDesign.php>

CRISM ha la capacità di registrare un ampio intervallo di lunghezze d'onda comprese tra 362 e 3920 nanometri a 6,55 nanometri per canale per un totale di 551 canali permettendo di identificare un buon numero di minerali sulla superficie di Marte. Il range di lunghezza d'onda analizzata varia quindi dall'ultravioletto (380 nm) al rosso (750 nm) nel visibile, e fino alle onde medie nell'infrarosso.

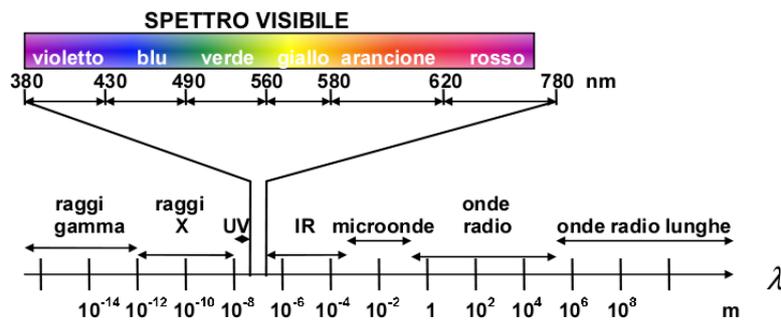


Figura 4.45 Immagine dello spettro elettromagnetico.

Lo strumento è costituito da tre corpi (figura 4.44):

1. sensore ottico (OSU, Optical Sensor Unit),
2. giunto elettronico (GME, Gimbal Motor Electronics),
3. unità di processamento dati (DPU, Data Processing Unit).

Il sensore ottico include le ottiche, il giunto elettronico, i piani focali, refrigeratori, radiatori e componenti elettroniche del piano focale. Il GME comanda e aziona il giunto e analizza i dati codificando la loro posizione angolare in un ciclo di feedback. L'unità di processamento dati accetta e processa i comandi dallo spacecraft, accetta e processa i dati provenienti dall'OSU e li comunica allo spacecraft stesso.

Caratteristiche tecniche

La tabella in figura 4.46 illustra quali sono le caratteristiche tecniche di principale interesse dello strumento CRISM. L'immagine 4.47 indica il percorso seguito

Massa	32,92 kg	Range Spettrale	VNIR: 362-1053 nm IR: 1002-3920 nm
Apertura	100 mm	Campionamento Spettrale	6,55 nm/canale
Distanza focale	441 mm	Campionamento Spaziale	15,7-19,7 m/pixel; 38 m/pixel se tutte le lunghezze d'onda in un punto
FOV	2,12 gradi (37 millirad)	Larghezza di spazzata	9,4-11,9 km da 300 km di altezza
FOV istantaneo	0,0035 gradi (61,5 microrad)	Puntamento	+/- 60 gradi lungo il percorso del satellite
Potenza (standard)	44,4-47,3 W	Potenza (standby)	16,1 W

Figura 4.46 Caratteristiche tecniche dello strumento

dalla radiazione entrante nello strumento, nello schema entra da sinistra.

Oggetto d'indagine

Lo strumento nel suo complesso vuole trovare l'*impronta*, ovvero l'identità della tipologia di superficie attraverso la sua firma spettrale. Questa è unica per ogni

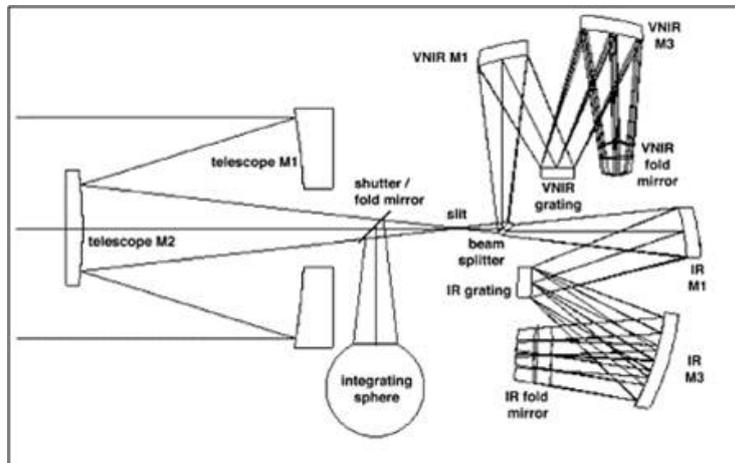


Figura 4.47 Diagramma dell'ottica

materiale ed è il prodotto della complessa combinazione di riflessioni e assorbimenti della radiazione elettromagnetica a diverse lunghezze d'onda. La fonte energetica nel nostro caso è il Sole, si parla quindi di riflessione raccolta dalla spettrometro dell'MRO. Inoltre bisogna ricordare che le immagini acquisite dallo spettrometro possono essere rappresentate con un parallelepipedo a tre dimensioni dove ogni pixel ha le coordinate immagine (x, y) e ha uno 'spessore' dato dal numero di bande; inoltre ogni pixel di ogni banda ha un suo proprio DN spettrale (figura 4.48).

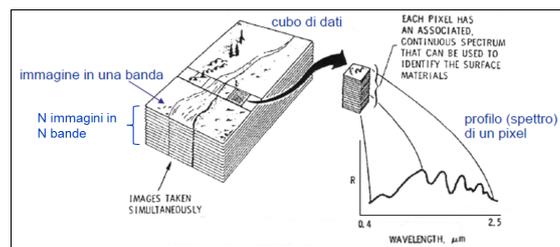


Figura 4.48 Rappresentazione del dato da Spettrometro, da [3]

Procedura di analisi dei dati

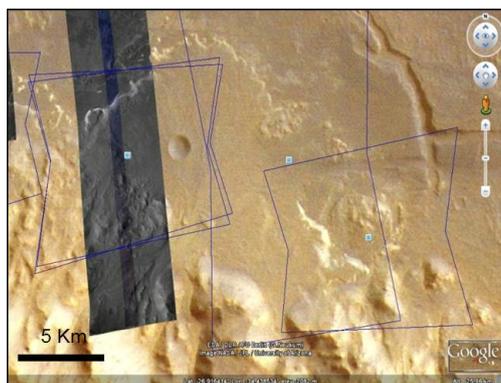
Come per le immagini CTX, il primo passo dell'analisi è stata l'individuazione delle immagini CRISM sulla superficie del pianeta in una doppia modalità: dap-

prima, utilizzando GoogleMars, è stato scaricato dal sito dedicato [22] il pacchetto immagini KML e sono stati individuati i footprint delle immagini CRISM; successivamente, queste immagini sono state confrontate con quelle ricavate importando lo shapefile dei footprint sul progetto GIS, sul quale erano stati caricati sia il MO-LA sia il layer dei nomi delle zone; infine, si sono scaricate le immagini scelte dal sito dell'atlante delle immagini [22]. Le immagini scaricate sono quelle riportate



Fonte: Google Mars

Figura 4.49 Footprint delle immagini CRISM scelte per Eberswalde, in blu



Fonte: Google Mars

Figura 4.50 Footprint delle immagini CRISM scelte per Holden, in blu

nelle tabelle sottostanti (figure 4.51(a) e 4.51(b)). Quelle il cui prefisso è FRT (Full Resolution Targeted observation) sono già espresse in radianza.

I formati necessari da scaricare per ogni immagine di interesse (tabelle nelle figure 4.51(a) e 4.51(b)) sono i .LBL, .TAB e .IMG. I file .LBL e .TAB riportano, rispettivamente, le definizioni sommarie e le relative tabelle che contengono i dati acquisizione dell'immagine, necessari per il successivo preprocessing. Il file .IMG può comparire come DDR (Derived Data Record, contiene parametri geometrici e fisici della scena), TRR2 e TRR3 i quali indicano due versioni del file Targeted Reduced Data Record (o TRDR), in unità di radianza e con parametri radiometrici e spettrali per la trasformazione a riflettanza apparente; il più recente e di cui gli scienziati hanno implementato un nuovo metodo di pre-processing, è il TRR3. Le immagini acquisite dallo strumento sono poi state elaborate con l'apposito tool, CAT ENVI, seguendo la guida dedicata *CRISM Data Users' Workshop CAT Tutorial* redatta dal CRISM Team. I pixel delle immagini vengono convertiti dal loro formato raw in formato CATENVI, e trasformate in riflettanza apparente. Per questa trasformazione si utilizzano i dati contenuti nelle tabelle abbinate, dividendo la radianza al sensore per l'irradianza solare e applicando una funzione che tende a minimizzare gli effetti dell'atmosfera, con riferimento a profili atmosferici determinati in corrispondenza dell'Olympus Mons. Queste immagini vengono indicate come I/F. A queste correzioni radiometriche e spettrali seguono correzioni geometriche e di georeferenziazione.

CAPITOLO 4. DATI A DISPOSIZIONE E LORO ANALISI

IMMAGINI EBERSWALDE		
FRT00009C06_07_	IF164_	L_TRR2 S_TRR2
	DE164_	L_DDR1 S_DDR1
FRT00007B8F_07_	IF164_	L_TRR3 S_TRR3
		L_TRR2 S_TRR2
	DE164_	L_DDR1 S_DDR1
HRS00003207_07_	IF173_	L_TRR3
		S_TRR3
		L_TRR2
		S_TRR2
	DE173_	L_DDR1 S_DDR1
FRT000060DD_07_	IF164_	L_TRR2 S_TRR2
	DE164_	L_DDR1 S_DDR1
FRT0000B548_07_	IF164_	L_TRR2 S_TRR2
	DE164_	L_DDR1 S_DDR1
FRT0000A30C_07_	IF164_	L_TRR2 S_TRR2
	DE164_	L_DDR1 S_DDR1
FRT0000BA45_07_	IF164_	L_TRR2 S_TRR2
	DE164_	L_DDR1 S_DDR1
FTR0000B2D4_07_	IF164_	L_TRR2 S_TRR2
	DE164_	L_DDR1 S_DDR1

IMMAGINI HOLDEN		
FRT00006246_07_	IF164_	L_TRR3
		S_TRR3
	DE164_	L_DDR1
		S_DDR1
FRT0000C4A3_07_	IF164_	L_TRR2
		S_TRR2
	DE164_	L_DDR1
		S_DDR1
FRT000064B3_07_	IF164_	L_TRR2
		S_TRR2
		L_TRR3
		S_TRR3
	DE164_	L_DDR1
		S_DDR1
FRT00004F2F_07_	IF164_	L_TRR3
		S_TRR3
	DE164_	L_DDR1
		S_DDR1

(a) Immagini CRISM per Eberswalde

(b) Immagini CRISM per Holden

Figura 4.51 Elenco immagini CRISM scelte per Eberswalde e Holden

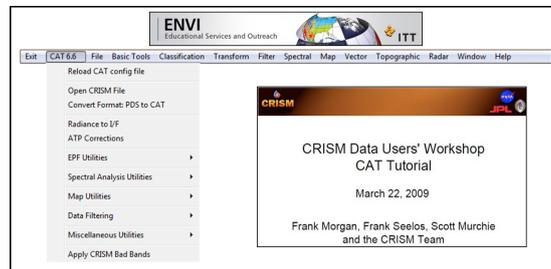


Figura 4.52 Schermata iniziale di ENVI con il tool CAT, pagina iniziale della guida

L'intera procedura di correzione e calibrazione segue i passaggi sottostanti:

- apertura del file CRISM di tipo .IMG;
- conversione del file da PDS a CAT, permette a ENVI di utilizzare il file sostituendo i valori 65535 con una lunghezza d'onda di 4 μm ;
- si imposta il salvataggio del progetto in una cartella del calcolatore:
- ATP corrections, si esegue dapprima la correzione fotometrica per il *cosi* angolo di incidenza dei raggi solari (informazione acquisita dal file DDR), successivamente viene effettuata la correzione atmosferica, solo per l'IR, per correggere lo spettro dall'influenza della CO₂ (che compone circa il 95 % dell'atmosfera marziana);
- Spectral Analysis Utilities, indicano nell'immagine dove si può trovare un particolare tipo di minerale pre-selezionato e, nel caso si scelgano di utilizzare anche informazioni iperspettrali, vengono selezionate altre bande per evidenziare ulteriormente alcune caratteristiche dei minerali stessi;
- Latloninator, georeferenzia l'immagine individuandone latitudine e longitudine;
- CIRRUS, elimina i picchi isolati di rumore sulla firma spettrale e corregge gli errori sistematici nelle colonne di dati.

Durante lo svolgimento di questi passaggi e per sviluppare una buona analisi, abbiamo selezionato le bande spettrali solo fino alla 360, comprendendo quindi nel nostro intervallo bande spettrali del visibile e dell'infrarosso vicino (tra 0,41 μm e 3,55 μm). Inoltre, per la correzione atmosferica, abbiamo scelto l'opzione *Scaled Volcano pre-selected New Mc Guire* che, come accennato, tiene conto della

concentrazione di CO₂ presente tra la sommità del Monte Olympus (27 km) e la sua base, comprendendo in particolare l'importante picco di assorbimento vicino a 2007 nm (figura 4.53).

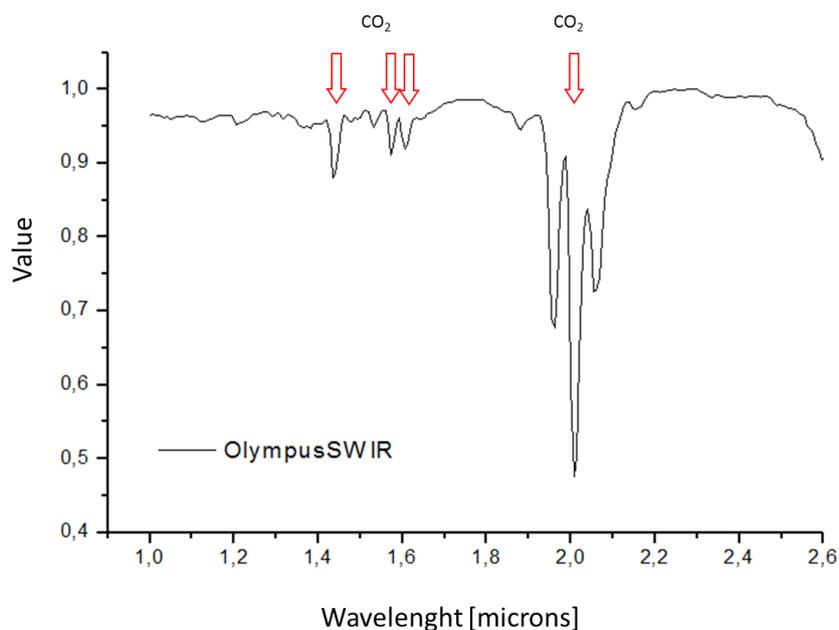


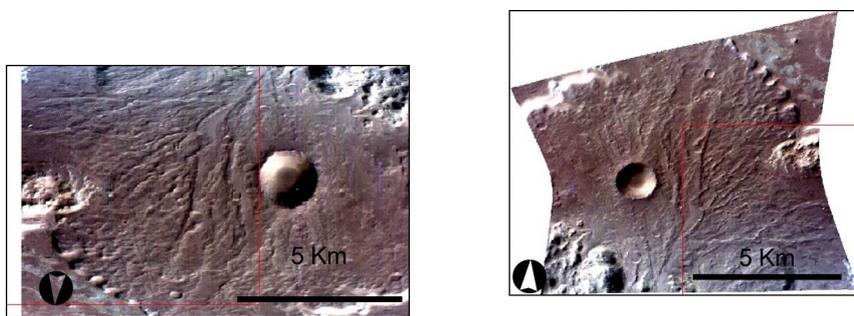
Figura 4.53 Firma della CO₂ nei pressi del Monte Olympus

Lo spettro della figura 4.53 rappresenta proprio la firma spettrale dell'atmosfera per tutti i 27 km d'altezza dell'Olympus Mons. In essa sono ben distinguibili le lunghezze d'onda alle quali si ha la presenza dell'anidride carbonica a circa 1,4 μm ; 1,96 μm e 2,1 μm . Uno degli obiettivi della ATP Correction è quello di ridurre al minimo, se non addirittura eliminare, l'influenza in quelle bande proprio della CO₂ che incide notevolmente sull'andamento della firma spettrale globale dei minerali al suolo. Infine si vuole sottolineare l'importanza del file .DDR diverso per ciascuna immagine che, nel caso non venga trovato automaticamente dal software all'interno del comando Project Single Cube Data della Map Utilities, è necessario cercarlo e caricarlo manualmente poichè esso raccoglie informazioni essenziali sulla proiezione e georeferenziazione dell'immagine considerata.

Prodotto-immagine

Di seguito si illustrano i prodotti-immagine a cui si è giunti in seguito a tutte le elaborazioni. Si sono scelte solo alcune immagini tra tutte quelle elaborate per non appesantire la spiegazione.

La prima immagine di figura 4.54(a) è la FRT0000C4A3_07_IF164_L_TRR2.img del delta di Holden pre-correzione, la seconda (figura 4.54(b)) è la stessa immagine post correzione con la corretta georeferenziazione.



(a) Pre correzione

(b) Post correzione

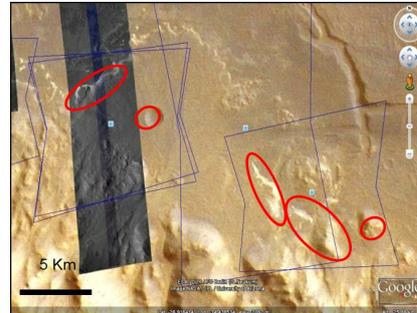
Figura 4.54 Delta di Holden pre e post correzione

Come è intuibile, lo stesso lavoro è stato svolto per tutte le altre immagini che completano il delta di Holden e per tutte quelle immagini della zona di Eberswalde. Purtroppo, per quest'ultimo non si disponeva ancora delle immagini spettrali del bacino di accumulo, quindi non è stato possibile effettuare un controllo sulla provenienza dei depositi, se derivano direttamente da monte oppure no. Questa informazione sarebbe stata molto utile per lo sviluppo dei modelli di evoluzione geomorfologica di cui si tratterà in seguito. Le ellissi indicate in rosso nelle figure 4.55(a) e 4.55(b), rappresentano aree di entrambi i delta per le quali si sono calcolati gli spettri di radianza usando immagini CRISM di alta qualità (*footprint* blu). Il criterio utilizzato per sceglierle è stato quello per il quale, usando le informazioni ricavate dall'analisi geometrico-morfologica descritta precedentemente, si notavano più facilmente aree prive di polvere o di materiale eolico o comunque affioramenti apparentemente puliti. Inoltre, ogni ellisse è localizzata in corrispondenza di un ben definito elemento morfologico, caratterizzato da un valore di al-

bedo specifico e quindi indicativo di una composizione mineralogica distinta. Per



Fonte: Google Mars



Fonte: Google Mars

(a) Zone di Eberswalde per le firme spettrali

(b) Zone del delta di Holden per le firme spettrali

Figura 4.55 Zone di acquisizione delle firme spettrali

ogni ellisse sono stati calcolati gli spettri di circa venti pixel ciascuna. Su di essi è stata poi calcolata la media. I comandi necessari allo svolgimento del *processing* sono stati:

- dalla finestra di *Scroll* (figura 4.56, in basso a sinistra) dell'immagine individuare la zona da indagare visualizzata nella finestra *Image window* (figura 4.56, in alto a sinistra);
- dalla finestra di *Zoom* (figura 4.56, in basso a destra) ingrandire fino ad individuare i pixel di cui si vuole osservare la firma spettrale;
- *Z Profile* (spectrum), spuntare *Plot Key* e *Collect Spectra*;
- cliccare su ogni pixel;
- file, save file as, ASCII.

La figura 4.56 mostra in alto a destra una serie di firme spettrali, una per ogni pixel, relative a una data posizione dello zoom, indicata in rosso della finestra *Image window*, dell'immagine Holden FRT00006246_07_IF164_L_TRR3.img. I grafici riportati nelle figure 4.57 e 4.58 sono stati ricavati importando in Excel i

CAPITOLO 4. DATI A DISPOSIZIONE E LORO ANALISI

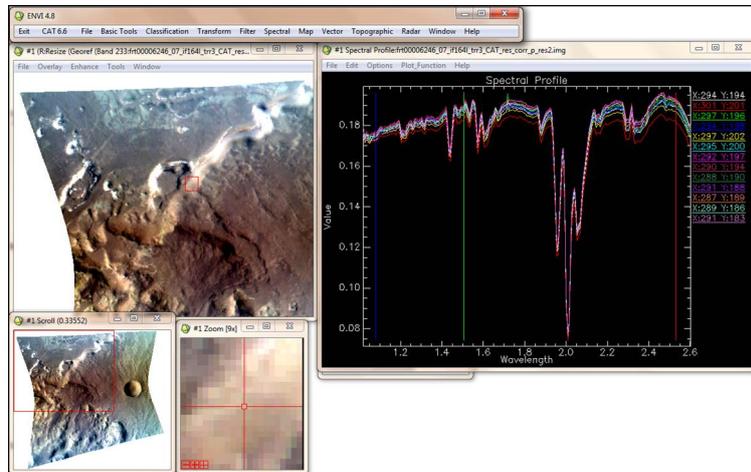


Figura 4.56 Schermata di lavoro per firme spettrali Holden 6246

file ASCII di tutti i valori derivanti dalle misure spettrometriche delle immagini e rappresentano le medie nell'intero intervallo VIS IR vicino. Il matching tra i due range spettrali è stato possibile perchè vi è una sovrapposizione di circa 51 nm; di conseguenza si è potuto calcolare il gap necessario per traslare e far coincidere i due intervalli spettrali. I grafici mostrati sono relativi a Holden 6246 (figura 4.57) ed Eberswalde (figura 4.58) e mostrano l'effetto del rumore. Dagli spettri sono

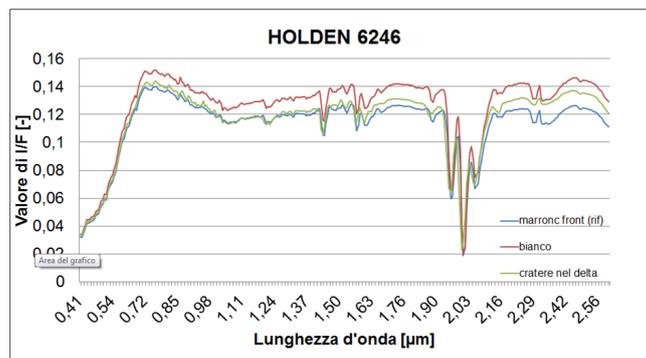


Figura 4.57 Grafico firme spettrali Holden 6246

stati rimossi gli intervalli in cui si hanno gli assorbimenti della CO_2 , non completamente eliminati dalla procedura standard di correzione degli effetti atmosferici implementata in CATENVI, e due strutture tra 2,2 μm e 2,4 μm presenti con iden-

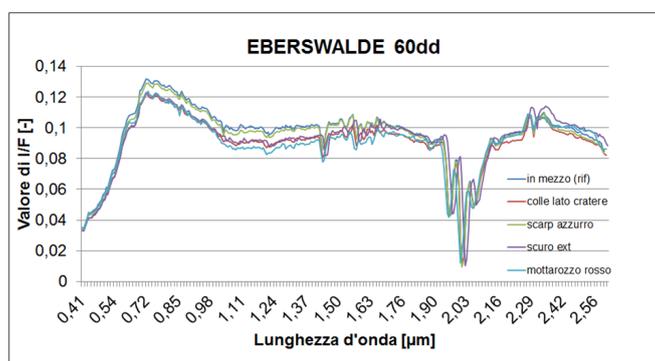


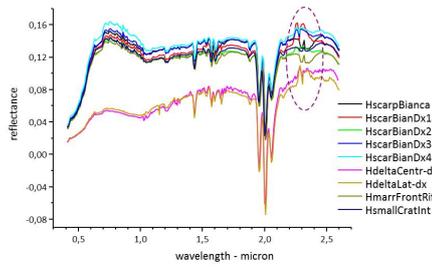
Figura 4.58 Grafico firme spettrali Eberswalde 60DD

tica forma, ma invertita, negli spettri di Holden e Eberswalde (figura 4.56). Le figure 4.59(a) e 4.60(a) riportano alcuni spettri relativi ai due delta, e mostrano l'ampia banda di assorbimento centrata a circa $1 \mu\text{m}$, non affetta dai principali assorbimenti della CO_2 . Dalla analisi di questa banda è possibile dedurre informazioni sulla composizione del volume complessivo di ciascuno dei due delta. L'ampia letteratura sulla spettroscopia dei minerali documenta che responsabili di strutture di assorbimento di questo tipo sono processi elettronici del ferro nel campo cristallino (CF) di molti minerali, tra cui transizioni CF del ferro bivalente in molti silicati ferromagnesiaci e del ferro trivalente in alcuni minerali idrati [26]. La Figura 4.61 mostra alcuni esempi di minerali che contengono questi assorbimenti, e mostra anche che nei minerali idrati la banda CF del Fe^{3+} è associata a diverse bande di assorbimento vibrazionali nella regione tra $1,4 \mu\text{m}$ e $2,6 \mu\text{m}$, dove si viene a determinare una marcata pendenza negativa.

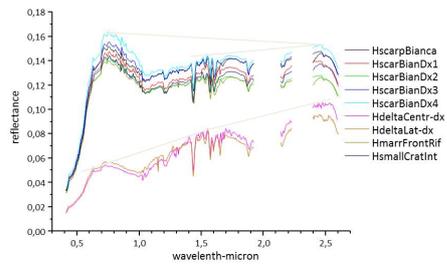
L'analisi delle bande di assorbimento a circa $1 \mu\text{m}$ negli spettri di Eberswalde e Holden (figure 4.59(a) e 4.60(a)) non evidenzia sostanziali differenze riconducibili a composizioni diverse per i due delta, e indica un prevalente contenuto di minerali ferro magnesiaci. Localmente, la presenza di plagioclasti potrebbe essere suggerita dall'appiattimento, in alcuni spettri, della regione spettrale attorno a $1,2 \mu\text{m}$ e $1,3 \mu\text{m}$.

Questo risultato, che deriva da osservazioni limitate alla banda nella regione di $1 \mu\text{m}$, è in apparente contrasto con i dati riportati in letteratura, basati su osservazioni nella ampia regione tra $1 \mu\text{m}$ e $2,6 \mu\text{m}$ senza che siano prese in considerazione

CAPITOLO 4. DATI A DISPOSIZIONE E LORO ANALISI

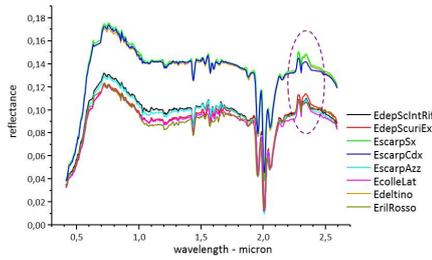


(a) Holden 6246 con effetto CO₂ e rumore

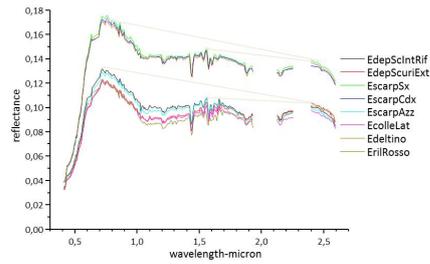


(b) Holden 6246 con effetto CO₂ e rumore rimossi

Figura 4.59 Holden 6246



(a) Eberswalde 60DD con effetto CO₂ e rumore



(b) Eberswalde 60DD con effetto CO₂ e rumore rimossi

Figura 4.60 Eberswalde 60DD

le bande elettroniche. In base a questi dati, minerali idrati (argillosi e fillosilicati in genere) sono stati individuati sia nel delta di Holden che di Eberswalde sulla base di intense bande vibrazionali dovute al gruppo catione-OH in spettri CRISM I/F [27]. Successive analisi del delta di Eberswalde, sempre partendo da dati CRISM, hanno però evidenziato che le strutture riconducibili a fillosilicati sono molto deboli, suggerendo una bassa concentrazione di queste fasi minerali [20].

La pratica corrente nell'analisi degli spettri di Marte consiste nel produrre *spectral ratio* dividendo lo spettro da analizzare per uno spettro di una regione *dusty* il più possibile privo di strutture di assorbimento, allo scopo di ridurre il rumore sistematico. Questa pratica, applicata agli spettri CRISM estratti per questa tesi, ha dato risultati del tutto insoddisfacenti, e si è quindi deciso di limitarsi ad interpretare gli spettri originali. Poiché però, come accennato sopra, negli spettri era comunque evidente la presenza di rumore sistematico nella regione tra $2,2 \mu\text{m}$ e $2,4 \mu\text{m}$ sia per Holden sia per Eberswalde, è stato necessario eliminare i corrispondenti valori di riflettanza, sebbene la mancanza di dati in questo intervallo spettrale precluda il riconoscimento di eventuali bande vibrazionali diagnostiche dei fillosilicati. D'altra parte, come già osservato prima, gli assorbimenti vibrazionali provocano una generale riduzione di riflettanza verso l'IR, espressa come pendenza negativa dello spettro, che può fornire una chiave per ipotizzare un contributo spettrale da parte di questi minerali. Negli spettri analizzati, le pendenze della regione spettrale compresa tra $1,5 \mu\text{m}$ e $2,5 \mu\text{m}$ sono positive per Holden e lievemente negative per Eberswalde (figure 4.59(b) e 4.60(b)). Questo potrebbe essere indicativo di un decisamente scarso contenuto di fillosilicati nelle aree di Holden esaminate e di una possibile debole alterazione dello strato superficiale dei sedimenti in Eberswalde. Un'ulteriore considerazione riguarda le pendenze complessive nell'intero intervallo VIS-SWIR, che sono nettamente diverse per i due sistemi deposizionali. Le pendenze sistematicamente positive del delta Holden potrebbero indicare una significativa copertura di regolite a granulometria fine, che potrebbe essere più spessa o comunque più uniforme nella porzione centrale e laterale Est del corpo sedimentario. Le pendenze negative che caratterizzano Eberswalde potrebbero essere imputabili ad una minore presenza di regolite a gra-

nulometria fine, e quindi una maggiore presenza di rocce affioranti. É comunque possibile che tutti questi risultati siano affetti da incertezze dovute alla non perfetta correzione degli effetti atmosferici, che comprendono, oltre agli assorbimenti dei gas atmosferici, anche la presenza di una concentrazione incognita, e variabile nel tempo, di aerosol nell'atmosfera. Metodi recenti di calibrazione dei dati CRISM utilizzano, oltre al metodo basato sul profilo dell'Olympus Mons, il modello di trasferimento radiativo *DISORT*, considerando, oltre ai parametri forniti da CATENVI, profili di temperatura dalle osservazioni del sensore *Mars Global Surveyor Thermal Emission Spectrometer* (TES) e valori di pressione superficiale derivati dai dati Viking (Wisemann, 2009, PhD thesis). Future analisi della composizione della superficie di Marte dovrebbero essere fatte con dati CRISM corretti con questo codice, per evitare l'operazione *spectral ratio*, che in alcuni casi può anche generare false strutture di assorbimento.

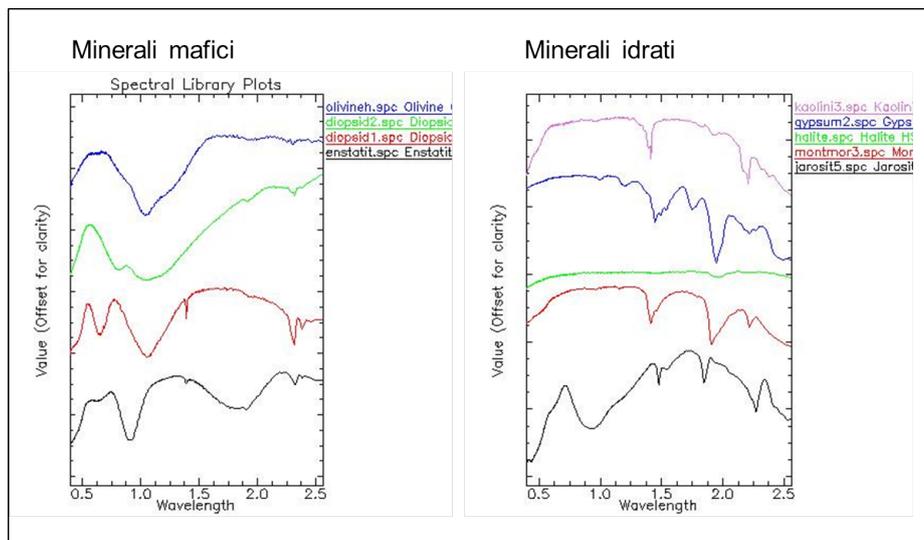


Figura 4.61 Firme spettrali standard da libreria CRISM di Envi

Sulla base dei risultati e della discussione precedente, si è comunque scelto di assumere una composizione prevalentemente silicea ferro-magnesiaca. Questo comporta un range di valori di densità per i depositi studiati compreso tra i 3-4 g/cm³ per i ferromagnesiaci quali Olivina e Pirosseni e i 2,5-2,6 g/cm³ dei

plagioclasti. Di conseguenza si ritiene di poter considerare trascurabili gli effetti di densità inferiori in cui ricadono minerali argillosi (attorno a $2,6 \text{ g/cm}^3$) e solfati (tra $2,3$ e 3 g/cm^3).

Capitolo 5

Ipotesi di modellazione

5.1 Scopo del lavoro e introduzione ai modelli classici

Lo scopo di questo lavoro è tracciare le linee guida per lo sviluppo di un modello che sia in grado di simulare e descrivere l'evoluzione geomorfologica del suolo marziano nelle zone di Eberswalde e Holden, analizzando pregi e difetti dei recenti *Landscape Models* applicati finora in alcuni ambienti terrestri. La fase di simulazione successiva, unita alle osservazioni geologiche planetarie di letteratura, potrebbe poi spiegare gli effetti a valle dell'erosione, processo alla base dell'evoluzione geomorfologica.

Inizialmente si era pensato di sviluppare questo capitolo cercando di identificare un modello fluidodinamico con il suo rispettivo metodo d'indagine. Questo, con appropriate condizioni iniziali e al contorno, unite alle caratteristiche fisiche, chimiche e atmosferiche relative al territorio marziano, avrebbe potuto fornire, dopo le dovute simulazioni, un range di viscosità e densità del fluido capace di trasportare sedimento sia al fondo sia in sospensione e di creare quelle forme deltizie visibili nei due crateri e così simili a quelle terrestri. Successivamente si sarebbe ricavato un range di valori di energia della corrente fluida pensando a una possibile

estensione della formula classica:

$$E = h + \frac{\alpha V^2}{2g} \quad (5.1)$$

da [28].

Purtroppo questo obiettivo è risultato essere utopico da raggiungere essenzialmente per tre motivi:

- scarsa conoscenza delle passate dinamiche fluviali marziane;
- difficoltà di adeguare il modello possibile alle condizioni marziane;
- tempo e potenza della macchina insufficienti ad eseguire le simulazioni.

Quest'ultimo punto in particolare è dovuto alla già ingente quantità di tempo impiegato nel lavoro di tesi (paragrafo [?]).

Questa parte di lavoro si è svolta in compartecipazione col Professor R. Soncini e il Dott. Ing. S. Bizzi del Dipartimento di Elettronica e Informazione (DEI).

5.2 Analisi dettagliata dei modelli

Origine e funzione

In generale, l'intento di questi modelli di evoluzione geomorfologica (Landscape Models) è quello di descrivere con formalismi matematici, a partire dalla situazione attuale, sia l'evoluzione futura sia quella passata di una certa zona di cui si dispone di varie informazioni (in particolare del modello digitale del terreno).

Si ha quindi la possibilità di considerare vari modelli cercando quello che può descrivere più adeguatamente le due zone marziane studiate, utilizzando le informazioni in nostro possesso ricavate dallo studio geologico (paragrafo 3.2) e dall'analisi dei dati (capitolo 4.1).

Certamente, come tutti i modelli esistenti, essi non pretendono di descrivere *in*

toto la realtà, con i suoi complessi processi di formazione e le sue molteplici interazioni tra un processo e l'altro, oltre che tra modello e modello (si pensi ad un modello climatico in relazione ad un modello afflussi-deflussi). Né tantomeno vogliono prevedere l'evoluzione della realtà leggendo il futuro a lungo termine. Permettono però di sviluppare un'ipotesi verosimile su ciò che potrebbe accadere a breve termine. Si vuole sottolineare l'uso del condizionale come tempo verbale della frase precedente perché in ogni caso, a seconda dell'incertezza del modello e delle semplificazioni che necessariamente si devono apportare, i modelli rimangono sempre dei modelli, non sono la realtà, ma solo immagini, proiezioni più o meno attendibili di ciò che potrebbe succedere nell'arco di tempo significativo. Lo scopo pratico della comunità scientifica, oltre a quello di incrementare le proprie conoscenze, è duplice: da un lato si vuole implementare la capacità di analisi e di calcolo dei fenomeni che modificano il paesaggio, dall'altro si vuole evitare che evoluzioni inaspettate provochino danni all'uomo e all'ambiente.

Ma su Marte? È lecito, ed eventualmente, come è possibile applicare questi modelli sviluppati e validati in ambito terrestre su di un altro pianeta?

Apparentemente semplice, nell'ipotesi fondamentale che l'evoluzione geomorfologica di Marte si paragonabile a quella della Terra. Si vogliono così adattare le condizioni al contorno e, ipotizzando una serie di condizioni e situazioni iniziali, si procede con un numero significativo di simulazioni confrontando poi il risultato di queste con le due situazioni attuali dei delta marziani. Certamente risulterebbe necessario dare delle limitazioni spaziali e dei vincoli temporali sull'evoluzione di unità geo-morfologiche. L'implementazione di un modello di questo genere e le seguenti simulazioni, i controlli e le validazioni necessitano di un notevole dispendio di tempo, di energie e di calcolatori non disponibili allo stato attuale del nostro lavoro. Per questo motivo in questa sede si è ritenuto sufficiente tracciare solo l'indirizzo di ricerca, lasciando poi ad un lavoro futuro la realizzazione del progetto.

Entriamo nel dettaglio

Sui Modelli Geomorfologici, essendosi sviluppati maggiormente solo in queste ultime due decadi, si discute ancora molto su quali tipologie di fenomeni essi debbano modellizzare, quali leggi utilizzare, quali rapporti di causa-effetto considerare. Ciò che comunque è accettato incondizionatamente dalla comunità scientifica internazionale è il processo alla base di tutto: il trasporto di sedimento. E. Dietrich et al. [29] propongono che la legge di trasporto sia un assunto matematico derivante da un principio fisico o meccanismo che esprime il flusso di massa, o l'erosione, causato da uno o più processi, in maniera tale che:

- si possa parametrizzare da misure di campo;
- si possa testare con modelli fisici;
- si possa applicare a scale spaziali e temporali variabili.

È di uso comune parametrizzare la legge basandosi su misure di campo di zone prestabilite o comunque da fotogrammetria di precisione.

Queste leggi di trasporto geomorfologiche sono un compromesso tra le teorie fisicamente basate, le quali necessitano di un gran numero di informazioni sui materiali e le loro interazioni difficili da reperire già sulla Terra, e gli approcci basati sulle regole o principi generici, che non possono essere testate ma solo utilizzate in modelli per vedere se il risultato che si ottiene è simile a ciò che ci si aspetta o si osserva sul campo. Con il termine geomorfologico si riesce a sottolineare la dipendenza di queste leggi dallo spazio e dal tempo necessaria per risolvere le equazioni di conservazione della massa.

Il punto di partenza per i modelli di evoluzione geomorfologica, inteso come condizione iniziale dei modelli stessi, risulta essere la topografia di dettaglio ad alta risoluzione, disponibile anche su Marte. Le condizioni iniziali quindi sono quelle topografiche ricavate da fotogrammetria aerea o da satellite. È per questo motivo che si crede possibile applicare questo approccio modellistico anche alla superficie marziana e in particolare alle nostre due zone, perché come condizioni iniziali risultano necessarie solo le informazioni topografiche di alta precisione. Con le

immagini a disposizione caratterizzate da un'alta risoluzione (5 m/pixel per le CTX, 0,25 m/pixel per HiRISE), come si è visto nel capitolo 4.4, si possono anche creare DTM di notevole precisione.

Di seguito a questa premessa, si vuole sposare la classificazione che gli autori Dietrich et al. [29] propongono, distinguendo quattro classi di approcci per spiegare la morfologia. Essi si ispirano alla parola Realismo perché, in qualche modo, ogni classe ha l'intento comune di spiegare alcuni aspetti del paesaggio reale.

Le tipologie di Realismo sono:

1. Dettagliato: mira a descrivere nello specifico tutti i processi, le interazioni e i materiali ad una scala temporale e spaziale ben definita ma, con la potenza di calcolo attuale, è possibile individuare solo caratteristiche di morfologie a breve termine [30];
2. Apparente: vuole descrivere le relazioni di trasporto a grande scala spaziale aggiungendo informazioni, leggi e ipotesi ad un modello base. Però la mancanza di rappresentazione di meccanismi a piccola scala unita all'assenza di dati morfologici quantitativi, rischiano di portare ad un risultato che rappresenta solo apparentemente la realtà [31];
3. Statistico: ha intenzione di rappresentare e spiegare il complesso schema morfologico dal punto di vista statistico, usando quelli che sono gli strumenti matematici più adeguati [32];
4. Essenziale: considerando che un paesaggio evolve nelle quattro dimensioni e che spazialmente variano anche i materiali e le condizioni al contorno, è impensabile aspettarsi di prevedere l'esatta topografia di un'area ad un certo istante di tempo. Per questo motivo il Realismo Essenziale, con le adeguate leggi matematiche, vuole spiegare le differenze tra evoluzioni differenti del paesaggio considerando gli ordini di grandezza in gioco [33].

Criterio generale per conservazione della massa e leggi di trasporto

I processi che modificano un versante o un'area sia orizzontalmente sia verticalmente sono molti. Si ricordano ad esempio i processi tettonici, fluviali, climatici e chimico-fisici. Tutti i processi hanno una caratteristica comune: ridurre la resistenza del *bedrock* sia meccanicamente sia chimicamente. Questo porta alla produzione di materiale erodibile, in alcuni casi particolari può portare invece all'aumento della resistenza come per la formazione di Calcrete, ma nessun modello analizzato considera questo fenomeno. Assumendo per semplicità una *bulk density* costante, si può scrivere l'equazione di conservazione della massa, per un suolo o per un *bedrock* ricoperto da sedimento, come

$$\frac{\partial z}{\partial t} = U - P + \frac{\partial h}{\partial t} \tag{5.2}$$

dove z è l'altezza della superficie del terreno, h lo spessore del suolo o del sedimento, P è il termine che indica la produzione di sedimento (per questo motivo è sempre positivo), U il tasso di innalzamento del suolo.

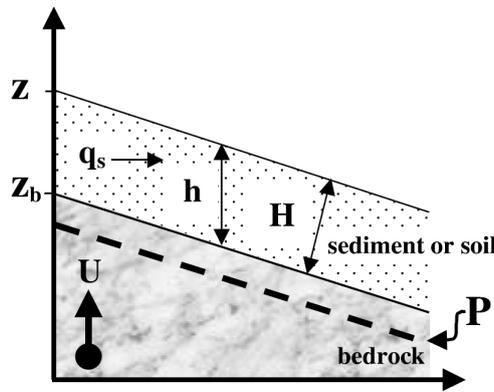


Figura 5.1 Schema di riferimento dell'equazione di conservazione della massa

In caso di pendii si può scrivere che la divergenza del vettore \tilde{q}_s trasporto di sedimento è legata all'accumulo e al trasporto di sedimento secondo la legge

$$\frac{\partial h}{\partial t} = P - \nabla \cdot \tilde{q}_s \tag{5.3}$$

Il termine \tilde{q}_s è influenzato da forze fisiche non indipendenti dallo spessore del suolo. Sostituendo, si ottiene la formula classica dell'equazione di conservazione

della massa come viene applicata nella gran parte dei modelli geomorfologici

$$\frac{\partial z}{\partial t} = U - \nabla \cdot \tilde{q}_s \quad (5.4)$$

Nel caso il *bedrock* emergesse lungo un versante, il termine di divergenza diventa uguale al solo tasso di produzione di sedimento, non considerando nemmeno la possibile copertura di suolo. Quando questo limite viene inserito in modelli di calcolo numerico, si introduce una nuova grandezza che rappresenta la distanza di percorso del sedimento per il passo di unità temporale in caso di *bedrock* esposto. I modelli con alla base queste leggi vengono utilizzati sia in caso di versanti sia in caso di canali, ma buona parte di essi non considerano di grande importanza il prodotto di sedimento da erosione e degradamento del *bedrock*. Inoltre, nel caso di fiumi, la parte di sedimento in sospensione nella corrente e in movimento al fondo non viene considerata. Chiariti questi limiti, si può affermare che l'accumulo di sedimento al letto dei fiumi si può scrivere come

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -\nabla \cdot \tilde{q}_s \quad (5.5)$$

Mentre per l'incisione o il deterioramento della superficie del *bedrock* si può scrivere

$$P = f(A, S, Q_s, D, \sigma, \dots) \quad (5.6)$$

Con P tasso di erosione che produce regolite, A area di drenaggio, S pendenza, Q_s portata solida, D dimensione dei granuli, σ sforzo all'interfaccia fondo-*bedrock*. Infine si può scrivere, in accordo con l'equazione 5.5, l'espressione più generale che descrive la variazione di quota della superficie in funzione del tempo come

$$\frac{\partial z}{\partial t} = U - f(A, S, Q_s, D, \sigma, \dots) - \nabla \cdot \tilde{q}_s \quad (5.7)$$

Il tasso di efflusso di sedimento da un versante si trova ad essere limitato da tre condizioni:

1. *Transport-limited*: nel caso in cui il versante fosse totalmente ricoperto da suolo e i canali fossero ricoperti sempre da sedimento, l'equazione 5.3 potrebbe essere applicata senza alcuna costrizione. Così il tasso di rimozione

del sedimento sarebbe limitato solo dalla capacità di trasporto e non dalla disponibilità di fluido;

2. *Weathering-limited*: se l'erosione sui versanti causasse l'emersione del *bedrock*, il tasso di erosione diventerebbe limitato dal tasso di produzione P;
3. *Detachment-limited*: se l'erosione da parte di flussi quali acqua, ghiaccio o un insieme di acqua e sedimento, assottigliasse o rimuovesse sufficientemente la copertura di sedimento in modo tale da far degradare il *bedrock*, la permanenza delle particelle nella stessa posizione diverrebbe limitata solo dal tasso di erosione da parte del flusso.

Questa breve classificazione delle condizioni limite ci verrà poi utile nella descrizione dei modelli.

Osservazione

L'approccio finora descritto, oltre alle condizioni limite, presenta una lacuna nella considerazione dei processi. Infatti non coglie né il processo chimico di dissoluzione, né il suo opposto, ovvero la formazione di croste dure sulla superficie del deposito che ne possono incrementare la resistenza (a.e. calcrete, ferricrete). Nei casi analizzati dagli autori questi processi non hanno una grande valenza, ma non si può escludere che invece l'abbiano in ambiente marziano.

5.3 Processi di trasporto

In questo paragrafo si vuole mostrare come i fenomeni classici di trasporto vengono trattati nei modelli di evoluzione geomorfologica. Si analizzano frane, slavamento superficiale dei versanti, incisione del letto alluvionale, incisione del *bedrock* per processo fluviale e per debris flow, erosione glaciale.

5.3.1 Frane

Frane e smottamenti spesso dominano l'erosione e allo stesso tempo sono fortemente influenzati dalla topografia. Purtroppo non esiste ancora una legge di trasporto poiché l'instabilità del sistema è governata da processi stocastici come le precipitazioni ed eventi non ancora prevedibili come i terremoti. Ad ogni modo ci sembra utile citare lo studio effettuato da Hergarten e Neugebauer [34] che per primi cercarono di mostrare come le proprietà statistiche della topografia potessero influenzare lo sviluppo di frane. Essi sostengono che il trasporto di frane a lungo termine dipende essenzialmente dall'angolo di inclinazione del pendio e dallo spessore del corpo di frana, proponendo così la seguente equazione di flusso franoso

$$q_s = \alpha(H |\nabla z| - B) \quad (5.8)$$

dove α è una costante, H è lo spessore del corpo frana, B è la soglia di movimento. Successivamente formularono una relazione basata sulla probabilità che un evento fosse regolato da alterazione superficiale, stabilizzazione per disseccamento, dissipazione di energia nello scivolamento.

5.3.2 Erosione da flussi superficiali

Se la vegetazione è scarsa e il deposito al suolo è impermeabile, l'eccesso di pioggia che supera la capacità di infiltrazione del terreno provoca flussi superficiali che slavano i versanti. Questo può avvenire con due modalità: fogli d'acqua che scorrono sull'intero versante erodendolo, zone concentrate di ruscellamento superficiale in piccoli canali. Anche per questo processo non esiste ancora una legge di trasporto geomorfologica poiché l'erosione è influenzata sia dagli eventi di pioggia, processo stocastico, caratterizzati da durate e intensità variabili che influenzano molto la capacità di trasporto, sia dalle proprietà del materiale molto variabili spazialmente, come l'infiltrazione, il corazzamento, la copertura vegetale. Questo processo quindi è stato classificato come detachment-limited. Generalmente però i modelli numerici trattano i flussi superficiali e il trasporto in canali

fluviali con una singola legge di trasporto

$$q_s = k(\tau - \tau_c)^n \quad (5.9)$$

q_s tasso di trasporto del sedimento, in termini volumetrici, per unità di larghezza; k e n parametri; τ sforzo di taglio al contorno, τ_c sforzo di taglio critico per l'inizio del movimento delle particelle.

5.3.3 Incisione del letto alluvionale

L'accumulo transitorio di sedimenti in forme a ventaglio, barre e piane alluvionali è fortemente influenzato dagli input stocastici di sedimento i quali tendono ben presto ad attenuarsi. Nella nostro lavoro si è deciso di abbracciare l'equazione più generale e semplificata dei modelli di evoluzione del paesaggio

$$q_s = kA^m S^n \quad (5.10)$$

dove q_s è il trasporto di sedimento per unità di larghezza attiva del letto; A area di drenaggio; S pendenza dell'area; k , m , n parametri. Nel caso di incisione costante sono stati calcolati i parametri da esperimenti in laboratorio; l'equazione si semplifica ma non è detto che nella realtà quei termini assumano i valori calcolati. Infatti il *bedrock* potrebbe giocare un ruolo fondamentale il cui effetto non verrebbe contemplato dalla formula.

5.3.4 Incisione del *bedrock* per processi fluviali

Rispetto all'argomento precedente, per il caso di canali che incidono il *bedrock* esistono molte osservazioni di campo che hanno portato a sviluppare poi varie formule applicative. La più semplice afferma che l'incisione P è proporzionale all'area e alla pendenza

$$P = K_b A^m S^n \quad (5.11)$$

Con K_b parametro che indica l'influenza della tipologia di roccia sul processo in esame. Sklar e Dietrich [35] hanno raggiunto invece una formula più complessa che unisce osservazioni da modelli di trasporto empiricamente basati, tipologia di

moto delle particelle per saltazione e impatto sull'erosione di flussi a bassa velocità e si riferisce a una scala spaziale dell'ordine dei metri e a una scala temporale dell'ordine delle ore

$$P = \frac{(1 - (u^*/w_f)^2)^{1.5}}{\varepsilon_v} \left(k_1 \frac{q_s}{(\tau^*/\tau_c^* - 1)^{0.5}} - k_2 \frac{q_s^2}{D_s^{1.5} (\tau^*/\tau_c^* - 1)^2} \right) \quad (5.12)$$

con u^* velocità di taglio; w_f velocità di sedimentazione delle particelle, che dipende da D diametro; ν coefficiente di resistenza della roccia; τ^* è lo shear stress adimensionale al contorno mentre τ_c^* è il suo valore soglia; k_1 e k_2 sono coefficienti determinati dalla densità del sedimento. Per applicare questa equazione a una scala decisamente più ampia nella quale è possibile cogliere le evoluzioni del paesaggio, è necessario includere anche la frazione del carico totale di sedimento in classi di granulometria, capire quale è il diametro dominante e la portata che meglio rappresenta l'interazione particelle-magnitudo della portata e sua frequenza di accadimento.

5.3.5 Incisione del *bedrock* per debris flow

Non esiste a tutt'oggi una legge di trasporto geomorfologica che descriva questo processo, ma è noto che maggiore è l'area e la pendenza del versante, maggiore sarà il volume di materiale che tenderà a muoversi. Il percorso, la velocità e la quantità di materiale in movimento saranno regolate dalla topografia preesistente, dalla quantità di fluido che permea il deposito e dalla resistenza del fondo. Molti versanti acclivi in zone non glacializzate sono delimitati da valli da debris flow e non da valli fluviali.

5.3.6 Erosione glaciale

I modelli quantitativi di calcolo dell'erosion glaciale si basano sull'ipotesi di Hallet per cui il tasso di erosione E dipende dalla velocità del ghiaccio alla base del corpo glaciale U_b .

$$E = cU_b \quad (5.13)$$

Il calcolo del valore di velocità necessita di un gran numero di assunzioni relative alla reologia del ghiaccio, alla sua forma e alla sua resistenza che non tratteremo in questo lavoro. Ulteriori studi per la parametrizzazione dell'equazione sono in corso di svolgimento.

5.4 Approccio topografico ad alta risoluzione

I modelli numerici per l'evoluzione geomorfologica solitamente assumono condizioni al contorno e leggi di trasporto e, partendo da una topografia iniziale 'arbitraria', risolvono le equazioni di conservazione della massa con passi temporali prefissati e in una certa finestra temporale. Successivamente il risultato viene confrontato con la topografia reale. L'approccio utile al caso marziano risulta proprio questo. Infatti le diverse morfologie risultanti da varie simulazioni possono essere confrontate con la topografia digitalizzata disponibile delle aree e dei delta. Inoltre questo metodo permette anche di selezionare e far interagire tra loro più processi di versante e, più in generale, processi ambientali capaci di modificare il paesaggio, concedendo la possibilità di identificare quali meccanismi controllano maggiormente la geomorfologia e quali invece possono essere trascurati, a favore della semplicità del modello. Un altro aspetto di non poca importanza è la possibilità di sviluppare scenari a una scala di tempo molto ampia, anche di migliaia di anni. Un approccio simile è stato applicato e testato da Heimsath su di un bacino dell'Oregon Coast Range simulando una finestra temporale di 50000 anni con un tasso di erosione di 100 m/Manni. È descritto in [36] riportato in bibliografia.

5.4.1 LEMs on Mars

Come si è potuto intuire, le immagini ad alta risoluzione topografica hanno dato un grande contributo allo sviluppo dei modelli geomorfologici e allo studio quantitativo dell'idrologia e dell'erosione, rivoluzionando così la Geomorfologia che ora integra notevolmente l'intento dei modelli descrittivi e qualitativi classici. G. Willgoose, scienziato di fama internazionale nell'ambito della modellistica del paesaggio, chiama questi modelli basati sui *DEM* (*Digital Elevation Model*),

LEMs ovvero *Landscape Evolution Model*. Questi modelli sono spazialmente distribuiti e sono influenzati, come già è stato detto, da processi di versante, processi legati a canali fluviali e a quelli legati alla tettonica. La modellazione matematica e la simulazione numerica permettono di farsi un'idea di quello che potrà essere uno scenario futuro o, come è il nostro intento, potrebbero permettere di risalire a quello che era lo scenario passato. Una caratteristica fondamentale è che, come per i DEM, anche i LEM si basano su di un modello digitale del terreno che associa ad un punto di coordinate x,y anche un valore di elevazione z . In questa sezione si vogliono analizzare alcuni modelli e capire quali delle loro caratteristiche sarebbero utili a un modello di evoluzione geomorfologica applicato a Marte, che vorremmo chiamare *LEMoM: Landscape Evolution Models on Mars*. Per questo motivo, nel corso del paragrafo, saranno frequenti dei brevi confronti marziani con le informazioni ricavabili dalle nostre immagini, dalla letteratura sul Pianeta Rosso e sulle caratteristiche fisiche e geomorfologiche delle zone di Eberswalde e Holden.

La tabella 5.1 [37] permette di visualizzare alcuni modelli e le loro principali peculiarità ma bisogna premettere che i modelli non sono in grado ancora di simulare contemporaneamente più processi.

Model	Transport Processes ^b	Grading ^c	Soils ^d	Tectonics ^e	DEM ^f
SIBERIA	T _G DC	1	GP	S	G,MF
ARMOUR	T _G D	∞	w		G,SF
DELIM	TDC			S	G,SF
GOLEM	TC		EP	S	G,SF
CHILD	T _G DCL ⁱ	∞	GP	L	T,SF
CASCADE	TD			C	T,SF
ZSCAPE	TDCL		GP	L	G,SF
CAESAR	TDC		E		G,MF

Tabella 5.1 Modelli e loro caratteristiche

La colonna *b* indica i meccanismi e le tipologie di trasporto: T transport-limited; T_G transport-limited basato su classificazione granulometrica; D detachment-limited;

C soil creep; L frana. Tutti questi processi possono accadere sulla superficie marziana. Recenti immagini dell'MRO di zone già riprese alcuni anni fa mostrano un gran numero di canali su versanti acclivi non visibili in immagini precedenti.

La colonna *c* indica se il modello ragiona con un unico diametro caratteristico dei grani (1) o se il numero di diametri è arbitrario e limitato dalla memoria del calcolatore (∞). Sulla granulometria chiaramente non si possono avere dei dati precisi dai nostri crateri marziani poiché, ovviamente, non si può andare sul terreno, per ora. Inoltre la massima risoluzione delle immagini è 0,25 m/pixel. Di conseguenza, come già descritto nel capitolo riguardante la geologia (si veda il paragrafo 3.2.1) e affrontato da Pondrelli et al. [1], l'unico modo per definire indicativamente una granulometria del sedimento è quello di partire dalle forme geologiche evidenti nelle immagini, dai colori dei depositi, ragionando sui possibili processi che possono aver depositato quel tipo di sedimenti e da possibili analoghi terrestri. Questo metodo non permette di ricavare la curva granulometrica ma è utile a capire quantomeno il limite superiore del diametro dei granuli.

La colonna *d* indica la tipologia di suoli o regolite (strato di materiale sciolto a granulometria eterogenea che copre uno strato roccioso). S profondità di partenza; E=S+bilancio di erosione/deposito; G=E+classificazione granulometrica; W=G+range di granulometria da alterazione leggera a corazzamento; P= funzione di produzione di suolo da roccia. Nel caso di Eberswalde si potrebbe avere un'idea dei primi due possibili valori se si riuscissero ad acquisire delle immagini CRISM di tutto il bacino di accumulo in modo da confrontarle nel dettaglio con le firme spettrali dei lobi del delta. Purtroppo questo non è ancora possibile.

Colonna *e*: modello tettonico. S, modello tettonico con solo una componente verticale in cui variano gli input di spazio e di tempo; L=S + deformazioni; C= L + dinamiche crostali. Allo stato attuale delle conoscenze, il nostro modello tettonico potrebbe essere semplicemente di tipo S poiché ad oggi non si notano deformazioni o dinamiche crostali che fanno supporre l'esistenza di una tettonica attiva. Probabilmente in passato è stata anche molto incisiva, ma anche le linee di faglia ipotizzabili nelle nostre zone possono essere state causate da impatti relativamente recenti (qualche migliaio di anni fa) di asteroidi.

La colonna f indica il modo di rappresentare la quota. G a griglia a maglia quadrata; T a griglia a maglia triangolare tipo TIN (Triangulate Irregular Network). Inoltre viene anche descritto il metodo di analisi di drenaggio: SF flusso ad una singola direzione o MF a direzione multipla. Dai dati in nostro possesso possiamo far riferimento a un modello con elevazione rappresentata da G e flusso SF considerando la forma dei canali così netti almeno per Eberswalde. Per il delta di Holden infatti si crede siano più utili modelli tipo MF.

Tutti questi modelli si rifanno a uno schema base di erosione fluviale e presentano caratteristiche simili di dati di input e condizioni al contorno; ciò che distingue poi un modello dall'altro sono le equazioni utilizzate per rappresentare i processi. Ora si caratterizzano gli elementi base dei modelli, successivamente analizzeremo, come esempio, il modello SIBERIA [38] ([39]). Il modello esplicito di capacità di trasporto e il bilancio di massa per flussi che interessano i versanti e i fiumi sono i due concetti fondamentali di tutti i modelli citati in tabella 5.1 e indicano che, se una certa quantità di sedimento trasportato ed entrante in un nodo della maglia, in cui è stato suddiviso il versante, è maggiore del sedimento uscente, significa che in quel nodo c'è stata sedimentazione. Viceversa, se nel nodo il valore del tasso di trasporto uscente è maggiore di quello entrante, avviene erosione. L'erosione può poi essere limitata da una soglia di velocità e dalla capacità di ingresso di materiale dalla superficie di una granulometria tale da permettere il corazzamento (detachment-limited, D), o al contrario se si arriva ad al *bedrock*, il trasporto è limitato dalla resistenza dello stesso (T in tabella 1). L'equazione di bilancio di massa inserita nei modelli, simile a quella precedentemente descritta, è la seguente

$$\frac{\partial z}{\partial t} = U + \underline{\nabla} \cdot Q_s \quad \text{con} \quad \begin{cases} \nabla \cdot Q_s > 0 & \text{deposizione} \\ \nabla \cdot Q_s < 0 & \text{erosione} \end{cases} \quad (5.14)$$

U è l'innalzamento del terreno per cause tettoniche, e nel caso marziano sarebbe uguale a 0; Q_s il flusso di sedimento/unità di larghezza. In caso di detachment-limited la formula si riduce a

$$\frac{\partial z}{\partial t} = U - D \quad (5.15)$$

Con D tasso di distacco.

Infine il tasso di trasporto potenziale può variare in funzione della granulometria del materiale eroso e depositato cosicché la capacità di trasporto diventa una funzione non solo di condizioni idrauliche basate sul numero di Reynolds, ma anche della tipologia di sedimento trasportato dalla corrente (T_G in tabella 5.1)

$$\frac{\partial z}{\partial t} = U + \sum_i \underline{\nabla} \cdot Q_{si} \quad \text{con} \quad \begin{cases} \underline{\nabla} \cdot Q_{si} > 0 & \text{deposizione} \\ \underline{\nabla} \cdot Q_{si} < 0 & \text{erosione} \end{cases} \quad (5.16)$$

Solitamente non viene considerato il creep nei processi di movimento di sedimento.

Il modello di profondità di suolo o regolite è calcolato con un'altra equazione di bilancio di massa

$$\frac{\partial R}{\partial t} = W - \underline{\nabla} \cdot Q_s \quad (5.17)$$

R profondità della regolite; W tasso di produzione di regolite o di conversione da *bedrock* a regolite.

5.5 Commenti e osservazioni

Uno dei risultati principali di queste rappresentazioni matematiche è che permettono di capire il legame tra i processi naturali e la geomorfologia. Infatti, ad esempio, le equazioni possono essere rese adimensionali esplorando le relazioni di scala e i tempi di adattamento della geomorfologia. Dal punto di vista della tettonica, ma nel caso marziano riguarderebbe di più gli sforzi tra i limiti di unità diverse di sedimenti, risulta anche possibile modellare il movimento laterale, la compressione e la tensione deformativa lungo linee di faglia proprio per la facile deformabilità della griglia alla base della topografia. Questo risulterebbe ancor più semplice se la griglia considerata fosse di tipo triangolare (TIN). Infatti una griglia che modella l'elevazione necessita di interpolazioni dei movimenti laterali e dell'elevazione stessa dei nodi ad ogni passo di calcolo. I nodi dei TIN soddisfano proprio questi requisiti.

Un ulteriore punto da prendere in considerazione è la peculiarità del metodo Monte Carlo, utilizzabile nel possibile modello. Il metodo, infatti, fornisce dei range di probabilità di accadimento di possibili output, quindi di scenari evolutivi, in funzione della distribuzione di probabilità degli input. Questa caratteristica, considerando l'impossibilità di effettuare precisi rilievi e osservazioni di campo, ci fa propendere per l'utilizzo di un LEM per Marte con alla base proprio il metodo Monte Carlo, sostituendo così un'analisi statistica ad un'analisi deterministica. In generale, la validazione di ogni modello deve avvenire con osservazioni di campo dei processi implicati nell'evoluzione geomorfologica e deve essere integrata da test di laboratorio per determinare il margine d'errore e per rendere applicabili i modelli ad altri luoghi differenti da quelli in cui sono stati sviluppati. Questo punto però non viene soddisfatto nella sua completezza dalle scienze della terra, dove la troppa specificità del sito di indagine sembra sia un limite all'esportabilità del modello. È in questo contesto che il metodo Monte Carlo si adatta ottimamente perchè permette di validare in maniera quantitativa i risultati ottenibili da un modello. Così si propende ad utilizzarlo anche in ambito marziano.

Infine si ricorda che la scala spaziale di applicazione dei modelli attualmente esistenti è variabile e compresa tra 1 e 1 000 km², scala locale e scala di bacino. Ricordiamo però che all'aumentare dell'area che si vuole modellizzare, crescerà l'incertezza del risultato a causa delle scelte che necessariamente impone la simulazione.

Da ultimo, è necessario ricordare anche che ogni modello può simulare morfologie differenti con vari modelli di flusso. Questi simulano la direzione di flusso seguita da una particella d'acqua lungo un versante, linee di drenaggio, basandosi sul DEM. Gli esempi sono relativi agli algoritmi D8 e DInfinity.

Algoritmo D8

Questo metodo traccia le linee di flusso da un pixel a uno degli altri 8 pixel circostanti basandosi sulla pendenza massima pesata rispetto alla distanza secondo la

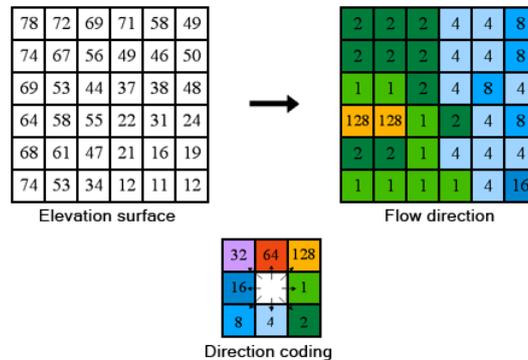


Figura 5.2 Schema di funzionamento modello D8 da [4]

formula

$$pendenza\ massima = \frac{\Delta h}{l} * 100 \quad (5.18)$$

Con l uguale a 1 se la cella è ortogonale a quella di riferimento, a 1,414 se obliqua (con lato cella di valore 1). Individua così canali, network fluviali e limiti del bacino. Alla base però ci sono due semplificazioni che non permettono di cogliere la geometria dei flussi globali del versante:

1. l'uso di 8 angoli di flusso discreti
2. ogni pixel possiede un'unica direzione di flusso

Cioè tutto il flusso che attraversa una cella si muove in un'unica cella vicina con angoli prestabiliti. Mentre queste semplificazioni sono valide in zone dove il flusso converge, non valgono per zone di versante divergenti. Questo può potenzialmente provocare grossi errori di stima dell'area contribuyente pur essendo corretti i valori di elevazione.

Algoritmo Dinfinity

Questo algoritmo, chiamato *facetFlow*, è stato sviluppato da Tarboton nel 1997 [40] con un'attenzione particolare alle zone di possibile flusso divergente. È un algoritmo di flusso multidirezionale che permette di considerare angoli di direzione continui e partizionamento del flusso in una o due celle vicine a quella d'origine

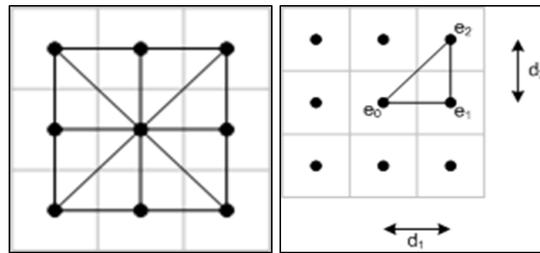


Figura 5.3 Schema base del modello Dinfinity da www.mathworks.com

risolvendo situazioni ambigue che si possono creare nella realtà.

Il metodo esamina otto faccette triangolari per ogni pixel, tutte con un vertice al centro della cella di riferimento e ogni faccetta possiede gli altri due vertici al centro di due delle celle contigue. La direzione di flusso per una particolare faccetta è quella della più ripida tra le inclinazioni. L'algoritmo *facetFlow* è descritto nel dettaglio nell'articolo [40] riportato in bibliografia.

Differenze tra gli algoritmi

Di seguito (figura 5.4) si rappresentano le differenze delle possibili direzioni di flusso legate agli angoli dei modelli D8 e Dinfinity. Si riportano, come esempio

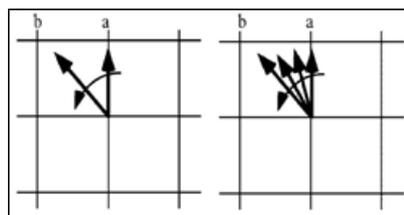


Figura 5.4 Schema angoli 1) D8, angoli rigidi; 2) Dinfinity, angoli continui

di evoluzione morfologica, tre simulazioni fatte con SIBERIA (da [37]) usando modelli di flusso differenti. Immagine *a*) condizioni iniziali; *b*) simulazione dopo 1000 anni di evoluzione con modello di flusso D8; *c*) simulazione dopo 1000 anni di evoluzione con modello di flusso Dinfinity. L'area rettangolare ha dimensioni 1 km x 1,5 km. Si noti l'incisione più curva e meno lineare delle valli nell'immagine *c*).

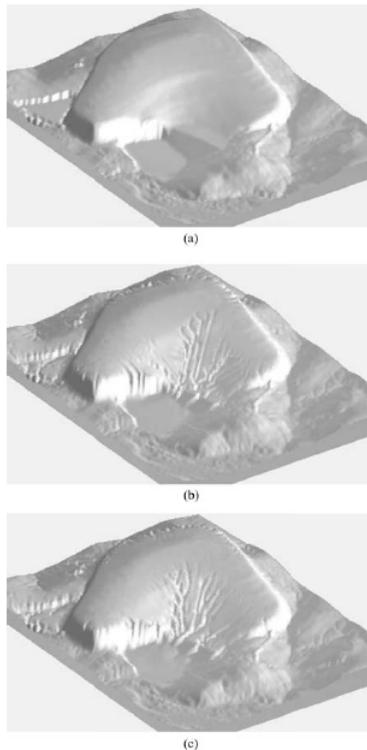


Figura 5.5 a) Condizione iniziale; b) e c) risultati da simulazione D8 e D-infinity

5.5.1 Modello SIBERIA

Questo modello ha come obiettivo quello di descrivere il cambiamento geomorfologico, ponendo particolare attenzione alla scala temporale (scala geologica rispetto alla scala di flusso singolo) e quella spaziale (scala di bacino rispetto alla scala della lunghezza del canale), considerando che i processi dominanti sono solitamente eterogenei sia nello spazio sia nel tempo. Le fonti d'informazione relative a questo modello sono il manuale d'uso trovato sul web [39] e le risposte alle domande avute direttamente dall'autore. SIBERIA vede esplicitamente l'interazione tra i versanti e la crescita di un network fluviale basata su meccanismi fisicamente osservabili sulla superficie terrestre. Un punto inizia ad essere un canale quando un flusso selezionato e dei processi di trasporto eccedono valori soglia. Se la funzione 'nascita di un canale' continua ad essere maggiore di quel valore soglia, allora il canale continuerà ad evolvere da quel punto in poi. Questa

funzione dipende dalla portata e dalla pendenza in quel punto, mentre la soglia è data dalla resistenza del bacino alla canalizzazione. Questo è il legame versante (inteso come elevazione z) e la crescita del canale (variabile Y) descritto da due equazioni differenziali alle derivate parziali di tipo non lineare (pagg. 4-5 manuale [39]). Sempre dal punto di vista spaziale, SIBERIA definisce cinque variabili di rilevante importanza: pendenza massima del versante, area contribuente, portata, distribuzione iniziale della funzione di canalizzazione, trasporto di sedimento. Per il caso marziano, le prime due sono facilmente ricavabili dai dati immagine da CTX attraverso, una volta importate correttamente, semplici tools di ArcGIS. Le portate sarebbero ipotizzabili. Gli ultimi due temi sono di difficile risoluzione stando alle attuali conoscenze marziane e necessiterebbero di un tavolo di confronto con esperti geologi planetari, ingegneri modellisti, ingegneri idraulici e di telerilevamento. SIBERIA permette di inserire incrementi di altezza per cause tettoniche di diverse tipologie. Non si elencano qui le equazioni perché, come abbiamo già detto, l'attività tettonica attuale di Marte è pressoché nulla. Ci si limita a registrare le tipologie possibili di sollevamento (c_0) nel caso si volesse aggiungere anche questo termine al modello.

1. Sollevamento continuo distribuito uniformemente su tutta la superficie dopo uno specifico periodo di tempo dall'inizio della simulazione

$$c_0(x,y,t) = C \text{ con } t \in [0,t_0] \quad (5.19)$$

2. Continuo sollevamento in obliquo dopo uno specifico periodo di tempo dall'inizio della simulazione

$$c_0(x,y,t) = C x \text{ con } t \in [0,t_0] \quad (5.20)$$

3. Sollevamento ciclico secondo una funzione di tipo sinusoidale, onda quadra o impulsiva uniformemente distribuita nello spazio e lungo l'intero periodo della simulazione.

I processi erosivi invece, si differenziano in: 1) trasporto fluviale; 2) trasporto diffusivo. Nel primo, oltre che considerare il trasporto fluviale di sedimento come

dipendente da portata e pendenza, si contempla anche la possibilità che il trasporto lungo il versante possa essere minore di quello all'interno dei canali. Nel secondo viene considerata solo la pendenza come causa del trasporto diffusivo. La modalità con cui questo può avvenire è sia per fenomeni franosi, sia per l'impatto di gocce d'acqua sulla superficie, sia per creep diffuso e intenso. Ora ci sarebbe interessato molto capire come SIBERIA avrebbe affrontato il tema della simulazione col metodo Monte Carlo, descritto precedentemente nelle sue linee essenziali, ma, con un certo stupore, si è scoperto che la guida dalla quale trarre le informazioni base non è ancora stata rilasciata.

Capitolo 6

Risultati e conclusioni

6.1 Pregi, difetti e affidabilità dei dati CTX

Questo percorso di analisi dei dati ci ha permesso di ricavare informazioni utili riguardanti sia il metodo in sè, sia i dati. Possiamo affermare che il pregio più rilevante riguarda la capacità di comprendere la morfologia con i suoi dati geometrici e altimetrici con semplici tool di ArcGis. L'informazione della quota, se viene presa come riferimento assoluto una singola immagine stereoscopica derivante da elaborazione di due immagini CTX, non presenta particolari problemi. Possono comparire solamente dei punti o delle piccole aree grigio scure, se non nere, causate dall'ombra di forme adiacenti che non hanno permesso al satellite di fotografare la superficie con precisione (figura 6.1). Queste, nella visualizzazione 3D, risulterebbero dei piccoli coni che fuoriescono dalla superficie.

É quindi necessario ricordarsi di eliminare il valore '*NODATA VALUE*', che ver-

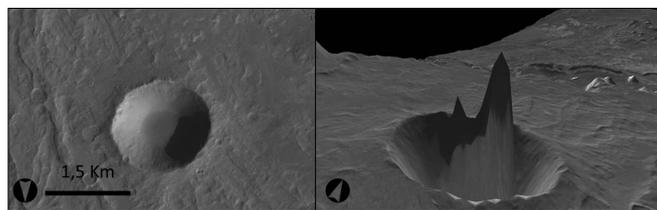


Figura 6.1 Piccolo cratere sul delta di Holden con ombra interna

rebbe visualizzato come nero, dalla tabella degli attributi prima di operare qualsiasi passaggio di elaborazione su GIS. Il valore *nodata* si trova nella finestra *Source* delle *Properties* dell'immagine.

Invece se si confrontano DEM contigui da elaborazioni CTX, già si notano delle differenze di quota importanti nelle fasce periferiche di sovrapposizione. Le immagini 6.2 e 6.3 mostrano proprio un esempio di questo difetto.

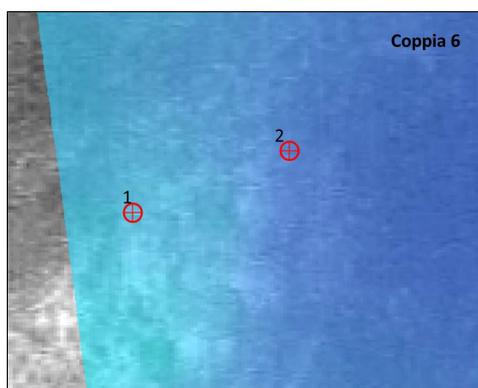


Figura 6.2 CTX coppia 6



Figura 6.3 CTX coppia 4

I pixel che si notano sullo sfondo sono quelli del MOLA che, data la trasparenza del 20% delle immagini, ci hanno permesso di individuare gli stessi punti sia sulla coppia 6 sia sulla 4. Il punto 1 della coppia 6 ha un valore di quota di -4

488 m, mentre quello della coppia 4 è -4 568 m; il punto 2, invece, vale -4 681 m nella coppia 6 e -4 783 m nella coppia 4. L'offset di quota risulta quindi pari a 80 m per il punto 1 e 102 m per il punto 2. Come appare dall'esempio, anche se limitato solamente per due punti, si è notato che le differenze di altitudine non sono costanti su tutta la superficie e non appaiono nemmeno distribuite come una funzione sottraibile dai valori delle altezze nella tabella degli attributi di ciascuna immagine. Questo OFFSET è dovuto probabilmente alle differenti quote di volo del satellite e ai passaggi di analisi con ISIS che può non aver corretto anche una sola delle due immagini che compongono una stereocoppia o non aver considerato correttamente i kernel, essenziali parametri di correzione del volo. Ricordiamo che la coppia 6 è stata presa come riferimento, mentre gli aggiustamenti di quota sono stati necessari sulle altre immagini per rendere la visione 3D il più vicino possibile a quella che noi crediamo essere la realtà marziana in quei luoghi.

Un secondo limite di questo lavoro è legato alle differenti risoluzioni che possono esserci tra immagini contigue prese dallo stesso satellite. Nella tabella in figura 6.4 che segue, abbiamo riassunto le risoluzioni relative a ogni stereocoppia della zona di Eberswalde tratte da CTX. Si passa da un massimo di 3,46 a un minimo di 5,89 m/pixel. Risulta evidente che, essendo la risoluzione massima delle immagini acquisite dal satellite MRO pari a 5 m/pixel, la risoluzione più dettagliata di alcune immagini può solo essere dovuta a passaggi di calcolo e di elaborazione compiuti con ISIS, e perciò sono da considerarsi affette da errore. Ecco il motivo per cui tra tutte le stereocoppie se ne sono scelte solamente alcune. È da considerare però che, per completare l'area indagata, è stato necessario scegliere anche l'immagine 14 che presenta una risoluzione di 4,55 m/pixel. Come si nota, mancano le immagini 1 e 5 che purtroppo, una volta terminata tutta l'analisi, sono risultate affette da un errore non correggibile che ne ha escluso l'utilizzo. La causa di questo difetto è stata identificata nel fatto che l'MRO riprende immagini di zone contigue in passaggi di volo differenti e può modificare la sua distanza dal pianeta influenzando così la risoluzione delle immagini. Se quindi le correzioni di altezza e di coordinate di volo presenti nei kernel non sono state

EBERSWALDE	
COPPIA	RISOLUZIONE m/pixel
2	4,62
3	5,72
4	5,89
6	5,78
7	5,10
8	3,74
9	4,07
10	5,29
11	5,57
12	5,78
13	3,46
14	4,55
15	5,88

Figura 6.4 Risoluzioni Eberswalde

svolte nella giusta modalità e se questi ultimi non sono stati aggiornati, risulterà alta la probabilità di avere risoluzioni non corrette.

Un terzo difetto consiste nell'offset tra i valori altimetrici di lavori antecedenti al nostro. In particolare in alcune zone di bassi topografici vi sono circa 3 000 m di differenza nel valore di altitudine tra CTX e MOLA, unica superficie quotata riconosciuta e approvata scientificamente dalla comunità dei planetologi. Tale discrepanza tra i dati potrebbe essere associata a un differente sistema di riferimento acquisito. Inoltre, lo sferoide di riferimento utilizzato dal MOLA dipende dall'interpolazione che si sceglie di utilizzare in funzione delle aree da analizzare. Infine, HRSC ha grosse difficoltà a leggere aree piatte, mentre CTX, come si è visto, legge male le ombre. Gli errori, quindi, sono molto diversi da punto a punto, indipendentemente dal dato. Può capitare che uno dei tre modelli della superficie sia migliore in una zona e peggiore in un'altra rispetto ad un altro.

Un ulteriore limite, sempre legato alle differenti quote di raster contigui, è il matching cromatico tra le immagini delle stereocoppie che rispecchia la differenza di quote e la non continuità tra i raster stessi. Esempi di questa problematica si trovano nelle immagini del possibile bacino di accumulo (figura 6.5). Il primo caso è rappresentato dalle immagini in figura A 6.6(a) e figura B 6.6(b), dove si nota

che tra un raster e l'altro la continuità di colore non è garantita, di conseguenza non vi è una continuità altimetrica.

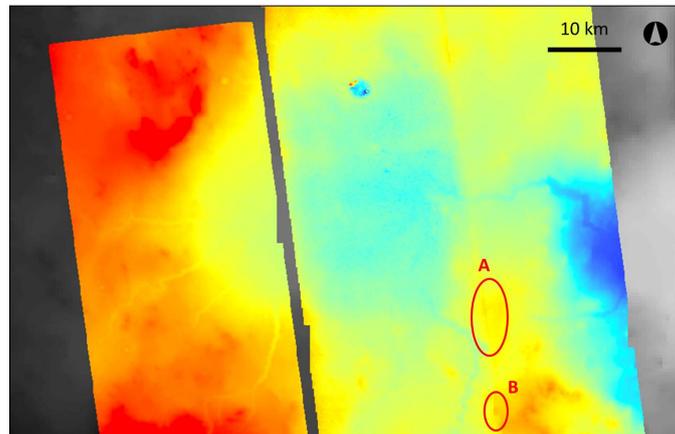


Figura 6.5 Bacino di accumulo di Eberswalde

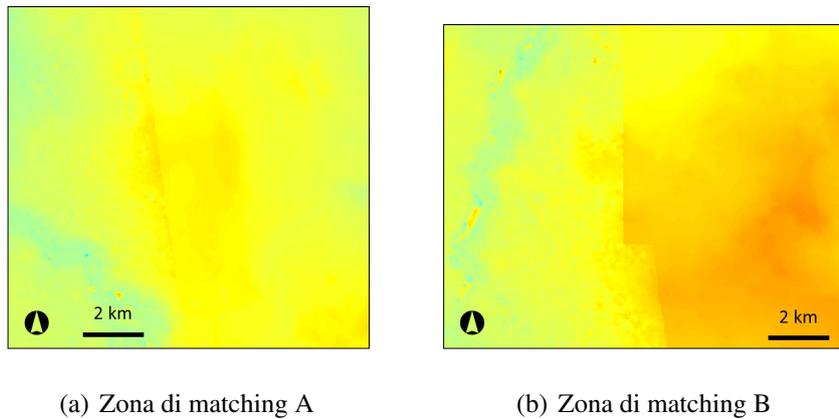


Figura 6.6 Zone di matching

Un esempio del secondo caso è quello relativo al bacino di accumulo della zona di Eberswalde (figura 6.7) dove, tra la coppia 15 (a sinistra) e la coppia 14 (a destra), si trova un gap di circa 1,5.

Per un'analisi applicativa legata ai modelli di evoluzione geomorfologica come quelli descritti nel capitolo 5, si propone di creare un raster unico in funzione dell'andamento dei valori dei pixel nella fascia di circa 1 km di larghezza tra i bordi del raster sia di destra sia di sinistra, con lo scopo di dare continuità all'immagine

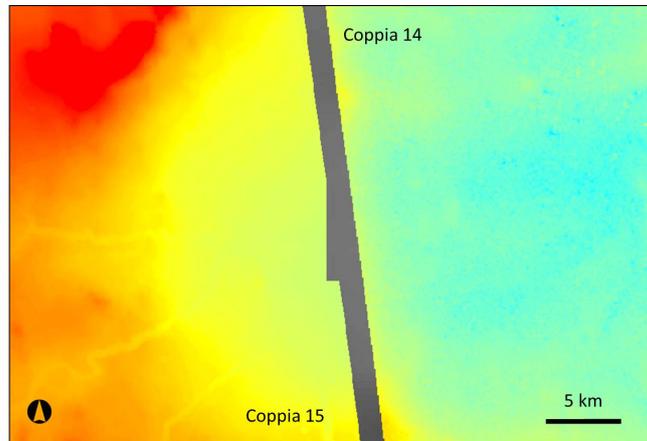


Figura 6.7 Zona di matching stereocoppia 15 e 14

e disporre di valori altimetrici su cui effettuare simulazioni. È necessario però ricordare che in questo caso il raster risultante sarebbe un raster di valori *calcolati* e non *misurati* o derivanti dal processing descritto precedentemente.

Quest'ultima problematica non si trova nella parte di lavoro svolto su Holden per il semplice motivo che le immagini scelte non necessitano di essere affiancate poichè si sovrappongono molto una sull'altra, ricoprendo entrambe l'intero delta.

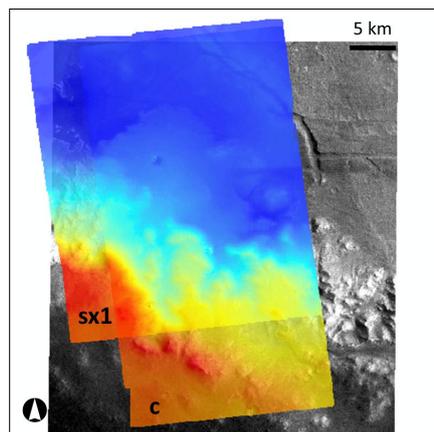


Figura 6.8 Zona delta Holden: coppie C e SX1, in sfondo nero immagine HRSC

Un ultimo difetto non è legato alle immagini in quanto visualizzazione, ma alle

immagini in quanto somma di bit e alla gestione fisica della grande mole di dati che sono stati utilizzati per questo lavoro. Infatti ogni immagine CTX, come il MOLA e il DEM HRSC, è stata acquisita a 16 bit per pixel, e se si considerasse l'immagine presa in tutta la sua estensione senza i dovuti crop, si arriverebbe a un 'peso' di circa 1,5 GB in media per ogni immagine; chiaramente più l'area è grande più il peso dell'immagine aumenta. Per questo motivo si è cercato di alleggerire il peso di ogni immagine tagliandole. Gestire quindi un progetto Gis con un buon numero di immagini che si aggirano attorno ai 500 MB è risultato più semplice.

Una problematica di notevole importanza incontrata nel lavoro è quella relativa alla risoluzione degli errori che si incontravano nel processare le immagini con i software ISIS, *stereopipeline* e Gis. Infatti per ogni errore di elaborazione il processing termina i calcoli, e la risoluzione dell'errore può non essere così immediata poichè non si dispone di algoritmi di risoluzione degli errori. È per questo motivo che il tempo di elaborazione delle immagini è dilatato. Un utile strumento di risoluzione è stato il tutorial di ISIS all'indirizzo <http://isis.astrogeology.usgs.gov/IsisWorkshop/index.php/>. Questo è un forum scientifico dove, suddivisi per tipologie di errori, si trovano risposte ad errori standard individuati dagli scienziati della NASA e dell'USGS i quali, per agevolare i colleghi che in tutto il mondo usano di questi dati, hanno inserito sia risposte standard elaborate da tecnici, sia risposte specifiche di chi usa quotidianamente dati e programmi di questo tipo per la propria ricerca scientifica. Di seguito si riporta un elenco degli errori tipici incontrati durante l'analisi sia per Eberswalde sia per Holden.

- *Gdal error*, durante la prima e la seconda fase del processing; questo errore si può ripetere molte volte;
- *Gdal10 error: 'hDS is NULL in Gdal Close' dirty block*;
- *error*, al termine del *fineproc*;
- *invalid cache andle*, durante lo svolgimento del *fineproc*;

- *file size too large*, mentre si stava svolgendo la stereopipeline.

Bisogna considerare anche che, una volta croppate le immagini, il processing procede senza troppi errori e in circa 10-15 ore arriva al termine, rispetto alle 48 ore dell'immagine non tagliata.

Un'ultima difficoltà è stata riscontrata nel produrre con ArcGis il modello 3D poichè inizialmente, una volta importata l'ortho-L-equi di una coppia e assegnatole il DEM corrispondente, la schermata risultava totalmente nera. Si sono quindi dovuti eliminare nuovamente i valori nulli e trasformare, con lo SPATIAL ANALYST, tutti i valori da *float* a *int*.

6.2 Pregi, difetti e affidabilità dei dati CRISM

I pregi del metodo descritto nella sezione 4.5 rientrano in generale nella possibilità di individuare la tipologia di minerali che compongono in generale la parte superficiale di un pianeta, e in particolare nella definizione della mineralogia dei delta marziani e da lì nell'indicazione di un range di densità del sedimento stesso. Infatti si è raggiunto un insieme di valori di densità per i depositi studiati compreso tra i 3-4 g/cm³ tipici dei ferromagnesiaci, Olivina e Pirosseni, e i 2,5-2,6 g/cm³ dei plagioclasti.

I difetti, invece, sono identificabili in una serie di errori o problematiche già espresse nella trattazione del metodo, come, ad esempio, la forte influenza della CO₂ sulle firme spettrali attorno ad almeno tre bande di assorbimento (1,4 µm; 1,96 µm e 2,1 µm), dove risulta quindi necessario rivedere il metodo di analisi nei suoi passaggi legati all'ATP Correction. Inoltre si dovrebbe considerare anche la presenza di ghiaccio sia di CO₂ a bassa quota, soprattutto in depressioni della superficie, sia di polveri, molto presenti sulla superficie marziana, che potrebbero influenzare le misure. Per affrontare questa problematica sarebbero necessari codici di correzione atmosferica resi disponibili agli utenti dei dati CRISM, ad esempio sul sito *PDS Geoscience Node* [22], dove già si trovano tutti i dati compresi quelli utilizzati per questa tesi. Inoltre bisogna ricordare che sarebbe necessaria

una copertura CRISM totale del bacino completo delle zone di studio per poter effettuare confronti sulla provenienza del materiale.

Da ultimo, si vuole fare una piccola osservazione: quando, nel corso della tesi, si è cambiato obiettivo concentrandosi sul tracciare le linee guida di un possibile modello di evoluzione geomorfologica marziana, sembrava che l'analisi CRISM svolta risultasse inutile. Invece, alla luce di quanto detto precedentemente, si è capito uno dei punti fondamentali di una qualsiasi indagine scientifica e ingegneristica: la necessità di poter ripetere esperimenti e analisi sugli stessi dati in posti diversi e da persone diverse, in modo da validare un risultato o, al contrario, da affermare che sarebbe ancora utile impiegare del tempo per risolvere alcune problematiche ancora aperte.

6.3 Modelli di evoluzione geomorfologica

Nel capitolo 5.1 si è notato come ad ogni modello e alle sue caratteristiche siano possibili dei confronti con la realtà marziana. Si sono identificate da una parte delle lacune nelle informazioni sul Pianeta Rosso che sarebbero decisamente utili per l'implementazione di un modello geomorfologico applicabile, dall'altra parte, invece, si è notato come anche molti modelli terrestri si basino su considerazioni derivanti da immagini satellitari molto dettagliate, disponibili anche su Marte, e su simulazioni Monte Carlo in sostituzione ai rilievi di campo, in analogia con la problematica trattata. Le immagini disponibili non permettono di approfondire adeguatamente argomenti basilari come quello, ad esempio, dell'analisi granulometrica. Sicuramente in futuro, una volta ultimata la copertura HiRISE, la cui risoluzione raggiunge i 25 cm/pixel, si potrà risolvere questo problema. Infine si è notato come non esista ancora un modello applicabile alle condizioni marziane, ma esistano aspetti positivi e negativi di modelli diversi, da valutare e selezionare con accuratezza per costruirne uno adeguato.

Si sono date così le linee guida di un modello di evoluzione geomorfologica tali

da poter descrivere, in uno sviluppo futuro, quella serie di processi che potrebbero essere avvenuti a monte delle sezioni di chiusura dei canali che hanno alimentato i delta nei due crateri studiati.

Capitolo 7

Sintesi delle attività

7.1 Sintesi delle attività

Il lavoro svolto per questa tesi ha permesso di affrontare un notevole ventaglio di problematiche in un ambiente apparentemente senza connessioni con le classiche problematiche di lavoro in campo terrestre. Si pensi però alle problematiche relative al matching e alla omogeneità di produzione cartografica. Infatti le carte in aree di confine tra stati, sia in occidente sia nei paesi del terzo mondo o in quelli in via di sviluppo, risultano attualmente discordanti tra stato e stato, se non completamente assenti. Inoltre si pensi alle incredibili potenzialità dell'analisi spettrale da satellite di territori di difficile esplorazione per la ricerca di risorse minerarie, acquifere e petrolifere; senza escludere il campo della protezione del territorio con l'individuazione di siti contaminati. Inoltre, l'aspetto dell'evoluzione del territorio, affrontato nel capitolo dei *Landscape Models*, ha permesso di capire le basi di una scienza ancora molto giovane e in continua evoluzione grazie al grande apporto derivato da riprese satellitari e da metodi di simulazione.

Questi ambiti di interesse ingegneristico non sono stati trattati nel loro specifico problema terrestre, ma il metodo di indagine e gli strumenti utilizzati nello studio di Marte sono facilmente esportabili.

Infine sono stati prodotti alcuni grafici che riproducono le attività e il grado di

impegno che sono stati necessari per il termine di questo elaborato finale. In particolare, le categorie delle attività svolte sono le seguenti:

- Definizione argomento di studio
- Ricerca
- Confronto con esperti disciplinari
- Raccolta dati
- Analisi dati
- Produzione
- Stesura Tesi
- Interpretazione
- Parte finale

Di queste, sono stati calcolati i giorni necessari al loro completamento visibili nella tabella in figura 7.1 e, una volta assegnato il grado di impegno variabile da 1 a 5, è stata redatta la tabella in figura 7.2, dove è osservabile il cambiamento delle percentuali in funzione del peso conferito alla tipologia di lavoro. Il diagramma di Gantt della figura 7.3 rispecchia la sequenza delle attività svolte nel tempo e, assieme alle tabelle appena descritte, vuole dare un'idea di quelle che sono le priorità da tenere in considerazione per lo svolgimento di un lavoro analogo e i tempi di realizzazione.

CAPITOLO 7. SINTESI DELLE ATTIVITÀ

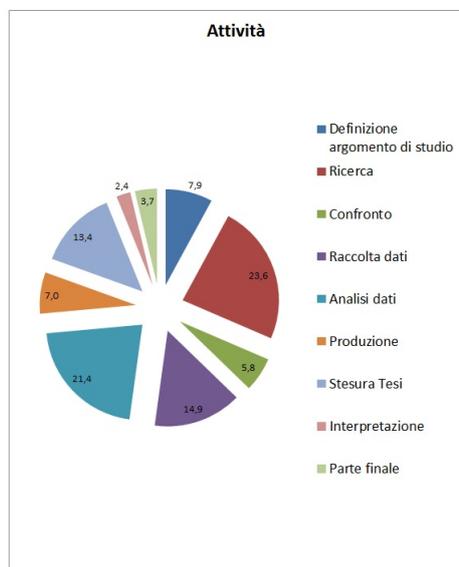


Figura 7.1 Grafico a torta delle attività svolte

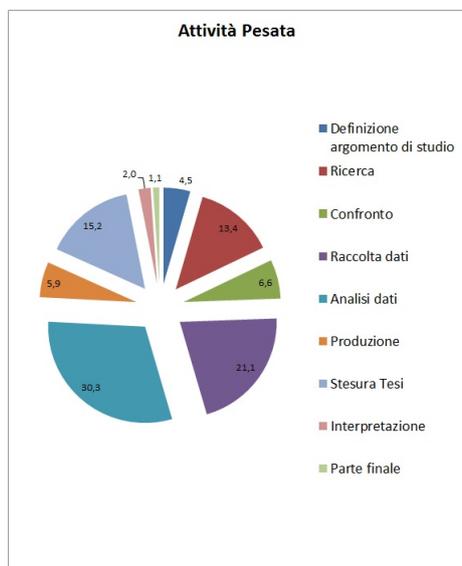


Figura 7.2 Grafico a torta delle attività pesate

CAPITOLO 7. SINTESI DELLE ATTIVITÀ

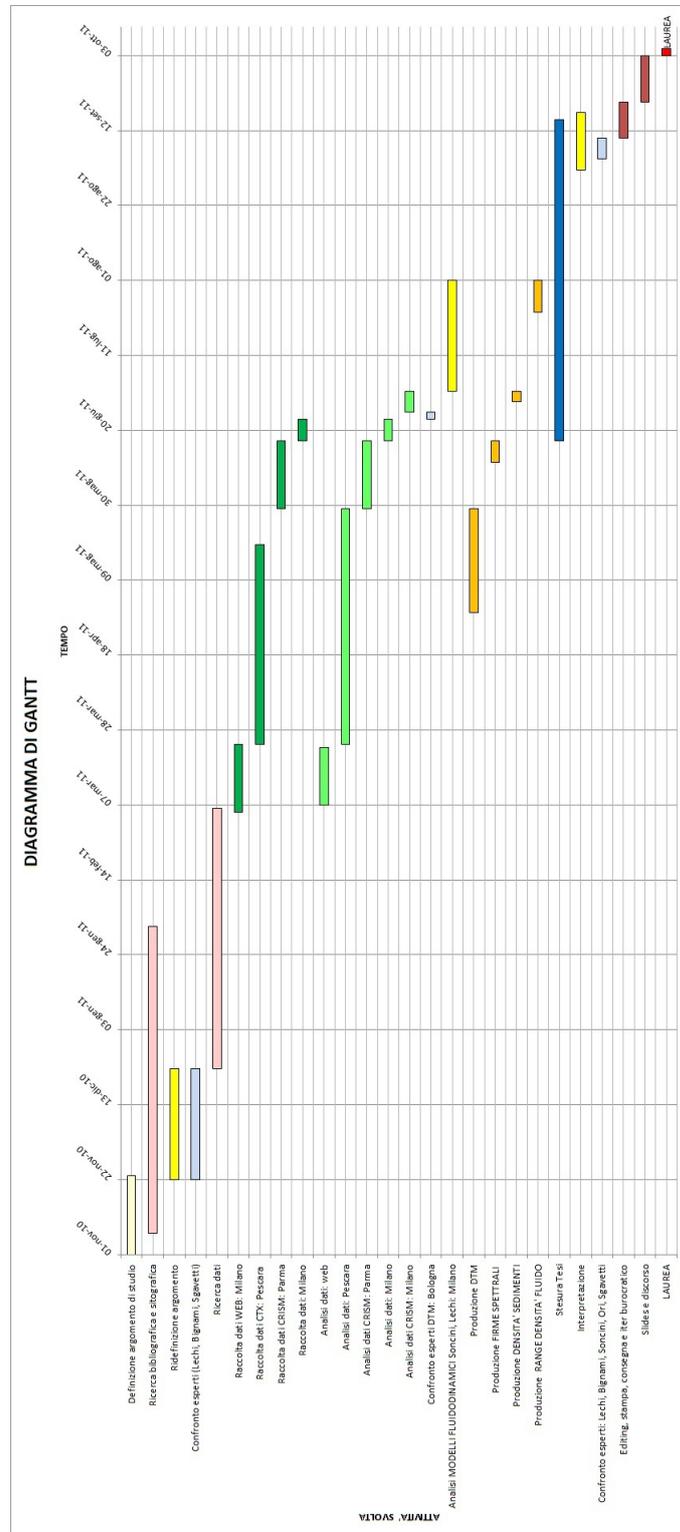


Figura 7.3 Diagramma di GANTT delle attività svolte

Capitolo 8

Sviluppi futuri

8.1 Sviluppi futuri

Le criticità emerse nel corso del lavoro ed evidenziate nel capitolo 6, suggeriscono che sarebbe necessario continuare ad analizzare entrambe le tipologie di immagini acquisite, CTX e CRISM, con uno studio più approfondito. In questo modo si potrebbero sviluppare delle tecniche di *processing* tali da permettere una migliore correzione delle immagini stereoscopiche della superficie, al fine di eliminare sia il problema dell'*offset* tra DEM contigui, riferendo quindi tutte le immagini ad un unico sferoide di riferimento, sia di *matching* nelle zone di sovrapposizione, con l'obiettivo finale di produrre un unico DEM delle aree studiate. Questo infatti risulterebbe di grande efficacia per calcoli e osservazioni al suolo, e contemporaneamente diverrebbe la base di quel modello di evoluzione geomorfologica che potrebbe identificare quali forze hanno modificato l'ambiente marziano nel passato. Lo studio di questo modello è ancora troppo embrionale per delinearne possibili miglioramenti. Infatti in primo luogo risulterebbe necessario creare il modello nella sua struttura, successivamente elaborare delle simulazioni e infine confrontarle con il dato quantitativo della situazione attuale, inteso come rapporto tra forme e volumi delle aree deltizie, effetto dei processi di erosione e trasporto descritti proprio dal modello implementato. Per validare o meno il metodo si potrebbe ripetere lo stesso studio in altre zone deltizie di Marte e confrontare i

risultati ottenuti. Da ultimo, per una corretta analisi dei dati CRISM, si è notata l'importanza del corretto pre-processing dei dati spettrali. Nel caso questo passo non venisse svolto in maniera adeguata si rischierebbe di trascurare alcuni minerali presenti in superficie e di conseguenza si cadrebbe in errore nel fornire il dato di densità e tipologia di sedimento, informazioni base sia per capirne l'origine sia per svolgere l'analisi evolutiva del territorio.

Bibliografia

- [1] M. Pondrelli et al. Evolution and depositional environments of the eberswalde fan delta, mars. *Icarus*, vol. 197, 2008.
- [2] <http://www.msss.com/space-cameras/>.
- [3] G. Vane and A. Goetz. Proceedings of the airborne imaging spectrometer data analysis workshop. *JPL Publication 85-41, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, p.1-21*, 1985.
- [4] <http://www.arcgis.com>.
- [5] T. Owen. *The composition and early history of the atmosphere of Mars*. 1992.
- [6] H. Kieffer et al. *The Planet Mars: from antiquity to the present*. 1991.
- [7] J. Alibert et al. C. Heipke, J. Oberst. Evaluating planetary digital terrain models: the hrsc dtm test. 2007.
- [8] G. Arena C. Palagiano, A. Asole. *Cartografia e Territorio nei Secoli*.
- [9] Sylvain Bouley. Morphologie et datation des vallees fluviales anciennes sur mars. *Université Paris-Sud XI*, 2009.
- [10] V. Formisano et al. Detection of methane in the atmosphere of mars. *Science*, 2004.
- [11] V.J. Hipkin et al. The mars atmospheric trace molecule occultation spectrometer: Science objectives. <http://www-mars.lmd.jussieu.fr>, 2011.

- [12] K.L. Tanaka. The stratigraphy of mars. *Journal of Geophysical Research*, 1986.
- [13] K.L. Tanaka et al. The resurfacing history of mars - a synthesis of digitized, viking-based geology. *Lunar and Planetary Science Conference, 18th*, 1988.
- [14] G.F. Bignami. *I marziani siamo noi*. 2010.
- [15] G.F. Bignami. *L'esplorazione dello spazio*.
- [16] J. Grant et al. Seventh international conference on mars. 2007.
- [17] R.E. Milliken. Clay minerals in holden crater as observed by mro crism. *Seventh International Conference on Mars*, 2007.
- [18] A. Baliva et al. M. Pondrelli. Complex evolution of paleolacustrine systems on mars: an example from the holden crater. *Journal of Geophysical Research, vol. 110*, 2005.
- [19] R. P. Irwin III. Timing, duration and hydrology of the eberswalde crater paleolake, mars. *42nd Lunar and Planetary Science Conference*, 2011.
- [20] N.K. McKeown and M.S. Rice. Detailed mineralogy of eberswalde crater. *42nd Lunar and Planetary Science Conference*, 2011.
- [21] <http://isis.astrogeology.usgs.gov/IsisWorkshop/index.php>.
- [22] <http://pds.nasa.gov/>.
- [23] <http://www.google.com/intl/it/earth/index.html>.
- [24] www.opificiodellepietre.it.
- [25] http://ti.arc.nasa.gov/m/project/ngt/asp_book_1.0.4.pdf.
- [26] R.G. Burns. *Mineralogical applications of crystal field theory*. 1993.
- [27] R.E. Milliken et al. Clay minerals in holden crater as observed by mro crism. *Seventh International Conference on Mars*, 2007.

-
- [28] Citrini e Nosedà. *Idraulica*.
- [29] W.E. Dietrich et al. Geomorphic transport laws for predicting landscape form and dynamics. 2003.
- [30] Ikeda and Parker. *River Meandering*. 1989.
- [31] R.S. Anderson. Evolution of Santa Cruz mountains, California, through tectonic growth and geomorphic decay. *J. Geophys.*, 1994.
- [32] Rodríguez-Iturbe e Rinaldo. Fractal river basins: Chance and self-organization. *Cambridge University Press, NY.*, 1997.
- [33] A.D. Howard. Badland morphology and evolution: interpretation using a simulation model. *Ear. Surf. Proc. and Landforms*, 1997.
- [34] S. Hergarten e H.J. Neugebauer. Self-organized criticality in a landslide model. *Geophys. Res. Lett.*, 1998.
- [35] L. Sklar e W.E. Dietrich. Sediment supply, grain size, and rock strength controls on rates of river incision into bedrock. *Geology*, 2001.
- [36] A.M. Heimsath. Stochastic processes of soil production and transport: Erosion rates, topographic variation and cosmogenic nuclides in the Oregon coast range. *Ear. Surf. Proc. And Landforms*, 2001.
- [37] G. Willgoose. Mathematical modeling of whole landscape evolution. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 443-459, 2005.
- [38] G. Willgoose. User manual of siberia, version 8.30. 2005.
- [39] <http://www.telluricresearch.com/siberia-homepage.html>.
- [40] D. G. Tarboton. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research.*, 1997.