

Studio della superficie marziana con metodi di osservazione remota, base di un modello evolutivo della geomorfologia del pianeta

Giovanni Lechi, Gabriele Ruggiero

Dipartimento BEST Politecnico di Milano, Piazza Leonardo da Vinci 32, 20133 Milano
Tel. +390223996526, lechi@polimi.it, gabriele.ruggiero@mail.polimi.it

Riassunto

I dati-immagine acquisiti dal satellite Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) permettono di rappresentare la superficie del pianeta Marte in tante caratteristiche importanti. 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. Così si pongono le basi per lo studio quantitativo delle caratteristiche energetiche del possibile fluido di trasporto dei sedimenti.

Abstract

The data-imaging registered by Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) allow the surface representation of Mars in every essential feature. In this work we analyze two areas of the planet, Eberswalde and Holden, who presents delta network in their craters. From raw ConTeXt Camera (CTX) data, using ISIS, we create 2D images of surface with 5-6 m/pixel resolution. From processing of adjacent coupled images we obtain the corresponding DEM that, loaded in ArcScene of ArcGis, give the possibility to get 3D models. Using the software CAT CRISM from ENVI, we analyse CRISM data and we obtain the spectral signatures of some areas without dust. The last step was to underline the guide lines to develop a landscape evolution model on Mars, starting from the terrestrial one, that could potentially describe and quantify erosional and transport processes, responsible of modification of interested areas. To reach this goal we used geological information taken from old space mission around Mars, recent studies and high resolution analyses. In this way we lay the foundations of quantitative study of energy features of possible fluid.

Introduzione e scopo del lavoro

Lo scopo di questo lavoro è tracciare le linee guida per lo sviluppo di un modello in grado di simulare e descrivere l'evoluzione geomorfologica del suolo marziano nelle zone di Eberswalde e Holden per poi calcolare, in un più ampio lavoro di ricerca, la distribuzione dell'energia di trasporto dei sedimenti che compongono i delta fluviali osservabili in quelle zone. Il lavoro si è sviluppato in

quattro fasi principali: 1) studio, fisico, chimico e atmosferico del pianeta Marte; 2) indagine geologica e morfologica dei due crateri e dei corrispondenti delta; 3) analisi generale dei dati raccolti dal satellite della NASA Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) relativi alla superficie (CTX e CRISM); 4) ricerca nell'ambito dei modelli di evoluzione geomorfologica (chiamati Landscape Models, LEMs).

Studio fisico, chimico e atmosferico

Marte (figura 1), 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. Nella figura 2 si possono notare le caratteristiche fisiche di Marte confrontate con quelle terrestri. Il pianeta è circondato da un'atmosfera molto tenue la cui pressione media è di circa 7 millibar, si presenta con un tipico colore arancione rossastro

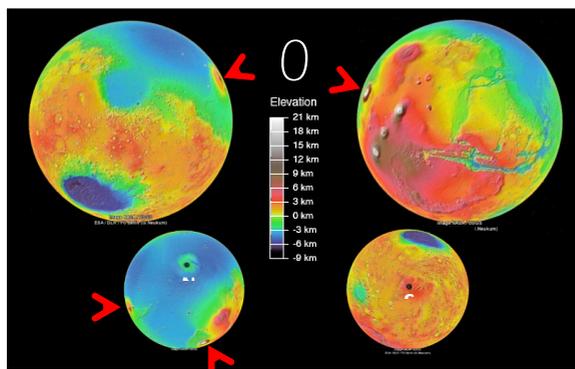


Figura 1 – Globo di Marte.

	MARTE	TERRA
Diametro equatoriale	6.804,9 km	12.756,3 km
Volume	$1,6 \times 10^{20} \text{ m}^3$	$1 \times 10^{21} \text{ m}^3$
Massa	$6,4 \times 10^{23} \text{ kg}$	$5,9 \times 10^{24} \text{ kg}$
Densità media	$3,9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$	$5,5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
Accelerazione gravitazionale	3,69 m/s ²	9,78 m/s ²
Periodo di rotazione (giorno sidereo)	1,025957 giorni	0,997 258 giorni
Temperatura superficiale	133 K (min) 293 K (max)	185 K (min) 331 K (max)
Pressione atmosferica media	8.000 Pa	101.300 Pa
Albedo media	15%	36%

Figura 2 – Confronto caratteristiche fisiche Marte-Terra.

dovuto alla copertura di ossido ferrico. La composizione atmosferica è dominata dall'anidride carbonica che rappresenta più del 95% della dotazione totale dei volatili atmosferici (figura 3). 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 CO₂ 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. La tabella in figura 4 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 geochemico dei meteoriti SNC (Shergottiti, Nakhliiti e Chassigniti).

Gas	Abbondanza [%]
Anidride carbonica	95,32%
Azoto	2,7%
Argon	1,6%
Ossigeno	0,13%
Monossido di carbonio	0,07%
Acqua	0,03%
Monossido di azoto	0,01%
Neon	Tracce
Kripton	Tracce
Xenon	Tracce
Ozono	Tracce
Metano	Tracce

Figura 3 – Composizione dell'atmosfera marziana.

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	<2%
H ₂ O	0-1%

Figura 4 – Composizione del suolo marziano.

Indagine geologica e morfologica dei due crateri e dei corrispondenti delta

I due crateri Holden ed Eberswalde sono ubicati tra i 32° e i 33° W di longitudine e i 23° e i 28° S di latitudine (figura 5). Il motivo della scelta dei crateri in zone così vicine sussiste nella possibile contemporaneità di eventi e/o nelle medesime condizioni ambientali a cui sono stati sottoposti.

Il cratere di Holden

Il cratere di Holden 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 si stima essere del tardo Noachiano, quindi circa 3,5 Ga. La stratigrafia di Holden viene solitamente suddivisa in tre gruppi principali: 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.

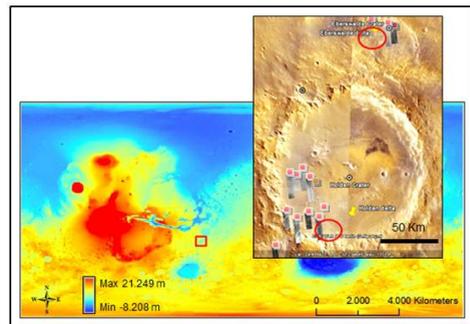


Figura 5 – Proiezione cilindrica di Marte e dettaglio area di studio.

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.

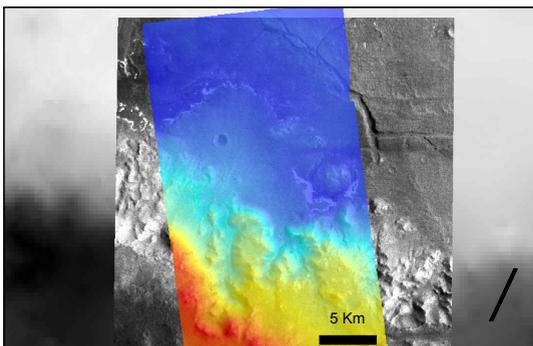


Figura 6 – Delta SW di Holden.

L'Unità Inferiore è quindi coperta al tetto da un sottile e scuro letto di materiali fratturati dalle forme poligonali. Superiormente a questo strato 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'Amazzoniano (glaciale), e che hanno modificato la superficie del cratere di Holden. Il delta fluviale 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 (Pondrelli e Baliva, 2005). La figura 6 mostra il delta di Holden analizzato nelle sue versioni relative a tre tipologie di immagini acquisite da strumenti differenti, MOLA in ultimo piano, in secondo piano HRSC e CTX a colori in primo piano.

Il cratere di Eberswalde

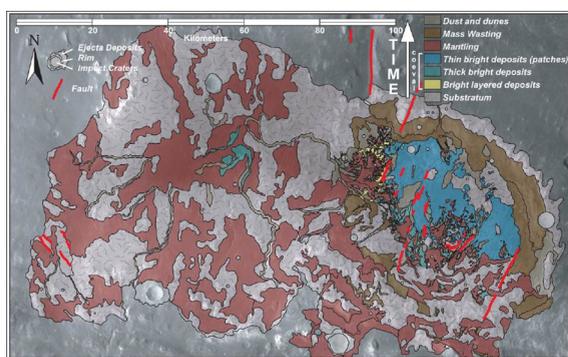


Figura 7 – Zona di Eberswalde.

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 7). La zona deltizia presenta accumuli di sedimento a ventaglio, canali meandriformi e pendenze delle zone terminali maggiori rispetto ai corpi centrali dei delta, suggerendo un'origine legata a meccanismi di tipo trasgressione-regressione in ambiente lacustre. 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. Essi sono stati suddivisi in sette differenti Unità che riflettono l'alternanza di periodi ad elevata o scarsa energia, quindi l'alternanza di eventi impulsivi o di media-lunga durata.

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, scuri e lisci che giacciono in maniera discordante con 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 erosionali, 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 (Pondrelli et al.).

Analisi generale dei dati di relativi alla superficie

I dati utilizzati in questo lavoro sono stati acquisiti dal satellite Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) della NASA, lanciato nel 2005 e tuttora in attività. La sua strumentazione di bordo permette di ricavare immagini e dati relativi alla morfologia della superficie (HiRISE e CTX), alla

mineralogia del suolo (CRISM), al clima (MCS), alla meteorologia (MARCI), alla possibile presenza d'acqua (SHARAD). I dati utilizzati si presentano sottoforma di immagini prodotte da *ConTeXt Camera* (CTX), che permette di osservare vaste aree della superficie del pianeta, e dello strumento *Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars* (CRISM), spettrometro che ricopre il campo del visibile e dell'IR-vicino, utilizzato per identificare i minerali di rocce o sedimenti affioranti. L'obiettivo dell'analisi è quello di generare dei modelli 3D della superficie del delta con le relative informazioni altimetriche e unirsi informazioni mineralogiche con un range di densità e tipologia di sedimento.

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 del contesto (ConTeXt) geo-topografico di ogni singola zona. Le immagini CTX permettono di raggiungere una risoluzione massima al suolo di 5-6 m/pixel in strisciate rettangolari di dimensioni massime 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 su un dispositivo CCD 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 secondo uno schema a tre livelli sviluppato con il software ISIS (*Integrated System for Imagers and Spectrometers*), implementato dall'USGS per l'analisi di immagini da missioni planetarie. I livelli sono: acquisizione ed elaborazione dei dati; calibrazione radiometrica e rimozione del rumore; proiezione. Le immagini delle zone di interesse sono state acquisite dal sito <http://pds.nasa.gov>. Il loro URL è stato identificato inizialmente attraverso Google Mars, utile strumento di supporto al lavoro svolto, successivamente sono state controllate con lo *shapefile* dei *footprint* delle immagini importato in ArcGis e vagliate secondo il criterio per il quale l'area di sovrapposizione tra due immagini contigue doveva essere di almeno il 90% e ricoprire maggiormente l'estensione dei crateri. In questo modo il numero delle immagini scaricate è stato ridotto a 31, rispetto alle 70 iniziali effettivamente scaricabili per Eberswalde; per Holden invece è stato necessario scaricare solamente 10 immagini, data la minore estensione del delta (N.d.A.). Effettuato il *download* delle immagini, si è poi svolta l'elaborazione con ISIS che ha portato ogni immagine dal suo originario formato *raw* con cui viene acquisita, al formato *cube*, necessario alle analisi successive. Infatti ISIS permette di calibrare ogni immagine correggendo le ombreggiature, in modo da raggiungere un'immagine con dato radiometrico il più uniforme possibile, e di ripulirle dal rumore. Infine, dopo aver osservato le immagini in *preview*, dopo averne scartate alcune e dopo aver tagliato, per alleggerirle, quelle scelte, si è proceduto con ulteriori comandi di ISIS che hanno reso possibile una corretta proiezione delle singole immagini 2D (figura 8) e la successiva realizzazione di immagini con dato altimetrico, derivante dall'unione di coppie contigue che permettono la visione stereoscopica. In questo modo si sono ottenute le immagini ORTHO-L-equi.tif che, unite ai rispettivi DEM, hanno permesso di raggiungere il risultato sperato (figura 9) attraverso il software ArcGis.

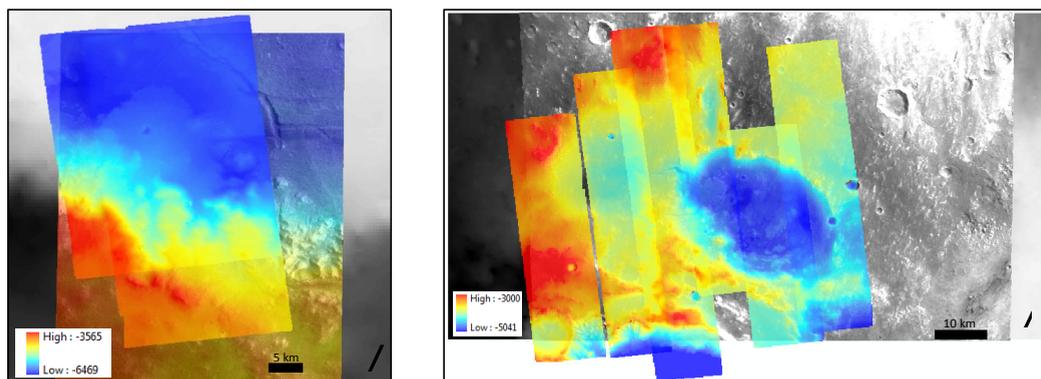


Figura 8 – CTX di Holden (immagine di sinistra) e di Eberswalde (immagine di destra).

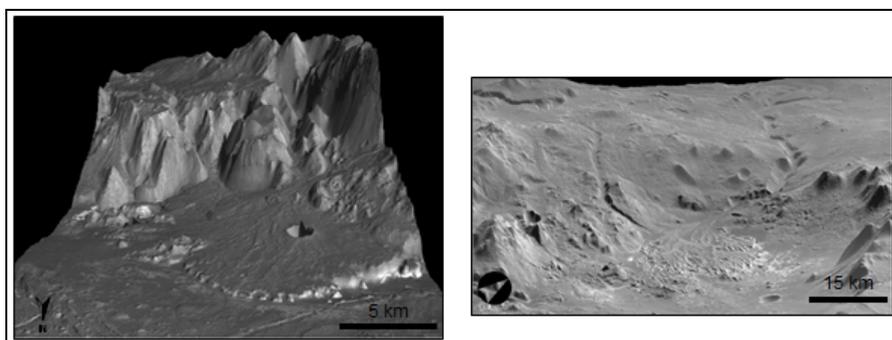


Figura 9 – Modelli 3D di Holden (immagine di sinistra) e di Eberswalde (immagine di destra) da ArcScene.

Come è facilmente immaginabile, sono in ArcGis sono poi eseguibili operazioni quali calcolo delle curve di livello, della mappa delle pendenze, del reticolo idrografico, dei profili (ecc...) utili strumenti per comprendere maggiormente la morfologia delle zone.

Dati da CRISM

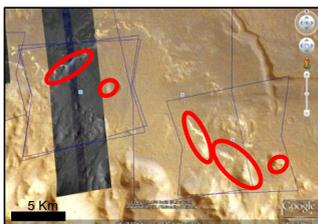
La mineralogia del sedimento, identificabile attraverso le firme spettrali dei minerali, è stata ricavata dall'analisi di immagini spettrali nell'InfraRosso e InfraRosso Vicino acquisite dallo spettrometro CRISM. Lo strumento con a bordo lo spettrometro presenta le seguenti caratteristiche tecniche (figura 10).

Le immagini riprese dallo spettrometro possono essere rappresentate in un parallelepipedo a tre dimensioni dove ogni pixel ha le proprie coordinate immagine (x,y)

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 λ 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 istantanea	44,4 – 47,3 W	Potenza in standby	16,1 W

Figura 10 – Caratteristiche strumentazione CRISM.

e un suo “spessore” dato dal numero di bande; inoltre ogni pixel di ogni banda ha un suo proprio DN spettrale. Il primo passo dell'analisi è stata l'individuazione delle immagini CRISM sulla superficie del pianeta in una doppia modalità. Dapprima si sono cercati con GoogleMars, una volta scaricato dal sito dedicato (<http://pds.nasa.gov>) il pacchetto immagini KML, i footprint delle immagini CRISM e, confrontate con quelle ricavate importando lo *shapefile* dei *footprint* sul progetto GIS con caricati sia il MOLA sia il layer dei nomi delle zone, si sono scaricate le immagini scelte. Il cui prefisso è FRT sono già espresse in radianza. I formati necessari da scaricare per ogni immagine di interesse sono i .LBL, .TAB e .IMG, quest'ultimo compare sottoforma di DDR, TRR2 e TRR3. Le immagini acquisite già in I/F, ovvero in radianza al detector diviso il flusso solare in quel punto, sono poi state elaborate, corrette e proiettate con l'apposito tool, CAT ENVI, seguendo la guida dedicata *CRISM Data Users' Workshop CAT Tutorial* redatta dal CRISM Team. Per lo svolgimento dell'analisi, si sono selezionate le bande spettrali solo fino alla 340 racchiudendo quindi nell'intervallo bande spettrali del visibile e dell'infrarosso vicino. Inoltre, per la correzione atmosferica, abbiamo scelto l'opzione *Scaled Volcano pre-selected New Mc Guire* poichè così la correzione viene effettuata in funzione della CO₂ presente tra la sommità del Monte Olympus (27 km) e la sua base, prendendo in considerazione l'importante picco di assorbimento vicino a 2007 nm. Sono state poi analizzate 18 immagini per Eberswalde e 9 per Holden (ogni footprint può avere più tipologie di immagini), ma solo di quelle che presentavano affioramenti puliti da polveri in superficie sono state scelte per l'analisi di dettaglio delle firme spettrali. Nelle immagini di figura 11 sono evidenziate le zone cerchiare in rosso, pulite da polveri, che hanno visto calcolati gli spettri di circa venti pixel ciascuna. Su di essi è stata poi calcolata la media, cercando prima di tutto un pixel che presentasse una firma spettrale abbastanza piatta come riferimento, poi ricavando pixel per pixel le firme spettrali.



Fonte: Google Mars



Fonte: Google Mars

Figura 11 – Aree sottoposte ad analisi CRISM.

I grafici che seguono sono stati ricavati importando in Excel i file ASCII di tutti i valori derivanti dalle misure spettrometriche delle immagini e rappresentano le medie del VNIR affiancato all'IR. Il matching tra i due range spettrali è stato possibile perchè entrambi coprono contemporaneamente un sotto-intervallo di circa 51 nm, di conseguenza si è potuto calcolare il gap necessario ad abbassare, per differenza, il primo valore dell'IR facendolo coincidere con l'ultimo del VNIR. I grafici mostrati sono relativi a Holden 6246 ed Eberswalde 60DD.

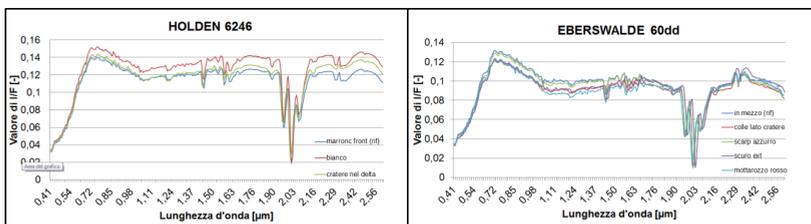


Figura 12 – Firme spettrali di Holden 6246 e Eberswalde 60DD.

Si nota un particolare andamento molto simile in ogni zona, leggermente spostato sull'asse x. I picchi sono sempre nell'intorno delle stesse lunghezze d'onda e, purtroppo, vi si nota ancora l'influenza della CO₂ attorno a 2 μm. Gli spettri precedenti sono stati poi confrontati con gli spettri standard di minerali mafici e idrati presenti nella libreria CRISM di Envi e con spettri di letteratura (Wiseman, 2009). I confronti sono stati effettuati sia portando le nostre firme medie ad avere la stessa lunghezza di quelle standard per poi sovrapporle, sia individuando la lunghezza d'onda delle bande di assorbimento.

Dall'analisi delle firme spettrali medie e dal confronto con i riferimenti standard possiamo dire che i minerali compresi nei delta sia di Eberswalde sia di Holden possono essere in prevalenza silicati ferromagnesiaci. In alcune zone inoltre potrebbe esserci prevalenza di plagioclasti. La pendenza positiva, seppur leggera, delle code delle firme spettrali per Holden dovrebbe escludere la presenza di minerali idrati e solfati. Così si è potuto dare un range di densità ai nostri depositi compresa tra i 3-4 g/cm³ per i ferromagnesiaci quali Olivina e Pirosseni e come estremo superiore i 5-6 g/cm³ dei plagioclasti. Di conseguenza si escluderebbero densità inferiori in cui ricadono minerali argillosi (attorno a 2,6 g/cm³) e solfati (tra 2,3 e 3 g/cm³).

Ricerca nell'ambito dei modelli di evoluzione geomorfologica

In generale, l'intento di questi modelli di evoluzione geomorfologica (Landscape Models) è quello di simulare, 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) considerando, a seconda del modello, tutti o solo alcuni processi di erosione e trasporto. Si sono quindi considerati vari modelli, già applicati al caso terrestre, cercando quello che potesse descrivere più adeguatamente le due zone marziane studiate utilizzando le informazioni in nostro possesso, ricavate dallo studio geologico e dall'analisi dei dati. 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 per i modelli terrestri 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 da MRO caratterizzate da un'alta risoluzione (5 m/pixel per le CTX, 0,25 m/pixel per HiRISE), si possono anche creare DTM di notevole precisione. Tutti i *Landscape Models* (LEM) fanno riferimento all'equazione di conservazione della massa, per un suolo o per un *bedrock* ricoperto da sedimento, come

$$\frac{\partial z}{\partial t} = U - P + \frac{\partial h}{\partial t} \quad [1]$$

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 (sempre positivo), U il tasso di innalzamento tettonico del suolo. Un limite dei LEM è che non colgono né il processo chimico di dissoluzione né il suo opposto, ovvero la formazione di croste dure sulla superficie del deposito che possono incrementarne la resistenza (a.e. calcrete, ferricrete...). Non si può escludere che questi processi siano importanti in ambiente marziano. I modelli numerici per l'evoluzione geomorfologica, come SIBERIA, ARMOUR, CHILD, ZSCAPE, assumono solitamente condizioni al contorno e leggi di trasporto e, partendo da una topografia iniziale "arbitraria" e utilizzando una suddivisione a griglia (quadrata o triangolare) della superficie, 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.

Una caratteristica di rilevante importanza in alcuni modelli è che utilizzano il 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 (Willgoose, 2005).

Conclusioni

Il pregio più rilevante dell'analisi da CTX 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 causate dall'ombra di forme adiacenti che non hanno permesso al satellite di fotografare la superficie con precisione (N.d.A.). Invece se si confrontano DEM contigui, da elaborazioni CTX, già si notano delle differenze di quota nelle fasce periferiche di sovrapposizione, anche superiori ai 100 m, dovute alle variazioni della quota di volo del satellite. Inoltre si è osservato anche un limite nella risoluzione delle immagini. Infatti immagini contigue registrate dallo stesso satellite presentano una risoluzione massima di 3,46 m/pixel e minima di 5,89 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.

Riguardo all'analisi dei dati CRISM, si è osservato che questo metodo permette di individuare la tipologia di minerali che compongono la parte superficiale di un pianeta fornendo un range di densità del sedimento stesso. I limiti dell'analisi sono identificabili in una serie di errori avvenuti nell'elaborazione delle immagini, che hanno portato a eliminarne alcune, e problematiche 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. Risulta quindi necessario rivedere il metodo di analisi nei suoi passaggi legati all'ATP Correction. Inoltre si dovrebbe considerare anche la presenza di nebbie sia di CO₂ a bassa quota, soprattutto in depressioni della superficie, sia di polveri, molto presenti sulla superficie Marziana, che potrebbero influenzare le misure. 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.

In conclusione, si è notato come ad ogni modello e alle sue caratteristiche siano possibili dei confronti con la realtà marziana. Si sono identificate delle lacune nelle informazioni riguardanti il Pianeta Rosso utili per l'implementazione di un modello geomorfologico applicabile, come ad esempio l'assenza di immagini CRISM nel bacino di accumulo del delta di Eberswalde. 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 alla nostra problematica. Le immagini disponibili non permettono di approfondire adeguatamente un argomento così basilare 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 abbiamo notato come non esista ora un modello applicabile alle condizioni marziane ma esistano aspetti positivi e negativi da valutare e selezionare con accuratezza per costruire un modello *ad hoc*.

Bibliografia

- Kieffer H. et al. (1991), "The Planet Mars: from antiquity to the present", *Mars*, 1-33, per figura 4
- Owen T. (1992), "The composition and early history of the atmosphere of Mars", *Mars*, 818-834, per figura 3
- Pondrelli M. et al. (2008), "Evolution and depositional environments of the Eberswalde fan delta, Mars", *Icarus*, vol. 197: 429-451
- Pondrelli M., Baliva A. et al. (2005), "Complex evolution of paleolacustrine systems on Mars: an example from the Holden crater", *Journal of Geophysical Research*, vol. 110
- Willgoose G. (2005), "Mathematical Modeling of Whole Landscape Evolution", *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 443-459
- Wiseman S. M. (2009), "Spectral and stratigraphic mapping of hydrated sulfate and phyllosilicate-bearing deposits: Implications for the aqueous history of Sinus Meridiani, Mars", Proquest Dissertations And Theses 2009. Section 0252, Part 0372 ; [Ph.D. dissertation]. United States -- Missouri: Washington University in St. Louis. Publication Number: AAT 3371615