

Università degli studi di Roma "La Sapienza"  
Facoltà di Scienze MM.FF.NN  
Corso di laurea in Scienze Geologiche

TESINA DI LAUREA

# **Su particolari forme della superficie di Marte**

che evidenziano la presenza di acqua liquida sul pianeta

Relatore: **prof. Alessandro Biasini**

Candidato:  
**Adriano Nardi**  
matr: 11081973

**ANNO ACCADEMICO 1999-2000**



# Sommario

<b>0.0 - RIASSUNTO</b>	<b>4</b>
<b>1.0 - INTRODUZIONE</b>	<b>5</b>
1.1 - BREVE STORIA GEOLOGICA DEL PIANETA	5
<b>2.0 - APPROCCIO FISICO</b>	<b>6</b>
2.1 - IL VERO PROBLEMA DELL'ACQUA LIQUIDA	6
2.2 - UN MODELLO MATEMATICO PER GUIDARE LA RICERCA	9
2.3 - LA SIMULAZIONE "RABDOMARTE"	15
<b>3.0 - APPROCCIO FOTOGEOLOGICO</b>	<b>16</b>
3.1 - RIFERIMENTI ALTIMETRICI	17
3.2 - ELEMENTI DI RIFERIMENTO NELL'INTERPRETAZIONE FOTOGEOLOGICA	17
<b>4.0 - ANALISI GEOMORFOLOGICA</b>	<b>23</b>
4.1 - TRACCE ANTICHE	23
4.2 - TRACCE RECENTI	28
4.3 - TRACCE ATTUALI	31
<b>6.0 - ANALISI GEOFISICA</b>	<b>57</b>
<b>5.0 - CONCLUSIONI E ASPETTATIVE</b>	<b>61</b>
<b>7.0 - BIBLIOGRAFIA</b>	<b>66</b>
MISSIONE MARS GLOBAL SURVEYOR	66
ATMOSFERA	66
LITOSFERA	67
ACQUA SU MARTE	67

## 0.0 - RIASSUNTO

Lo spunto iniziale deriva dall'intuizione che il problema dell'esistenza di acqua liquida nell'ambiente marziano non dipende dalla temperatura ma dalla pressione. Si è dunque costruito un modello matematico basato su gradienti di temperatura e di pressione e quindi un programma in grado di simulare le condizioni ambientali in qualsiasi punto della superficie del pianeta, dati latitudine, longitudine e quota.

Il confronto tra queste condizioni e il diagramma di stato dell'acqua (sempre calcolato dal programma e anch'esso adattato all'ambiente marziano) fornisce un verdetto sulla sussistenza delle condizioni favorevoli alla presenza di acqua allo stato liquido. Invertendo il processo di calcolo, il programma fornisce anche indicazioni geografiche sulla fascia climatica ideale.

In base alle indicazioni di questo modello e attraverso alcune chiavi di interpretazione geomorfologica definite appositamente per questo ambiente, è stata effettuata con successo una ricerca mirata tra le immagini ad alta risoluzione fornite dalla missione Mars Global Surveyor.

Si è potuto così individuare nelle zone "positive" alcune caratteristiche che sono comuni a tutte le foto di "ruscellamenti" di recente scoperta, nonché i ruscellamenti stessi. Si è potuto inoltre fornire un'interpretazione geologica di tutte le varianti di questo fenomeno basandosi unicamente sul modello fornito dal programma.

Poiché i dati di input del modello erano riferiti alle condizioni ambientali attuali, si deduce che tali fenomeni siano potenzialmente ancora in atto.

Sulla base di evidenze morfologiche antiche e recenti, si è inoltre ricostruita un'evoluzione del ciclo dell'acqua nel corso della storia geologica del pianeta. Si ritiene che tale ciclo si sia ormai arrestato, sebbene possa essere ancora possibile trovare acqua liquida in determinate condizioni.

# 1.0 - INTRODUZIONE

L'obiettivo di questa ricerca è quello di individuare tracce di acqua liquida sulla superficie del pianeta rosso attraverso lo studio geomorfologico delle foto fornite dalla fotocamera digitale MOC nell'ambito della missione spaziale "Mars Global Surveyor".

Il titolo della tesina è volutamente vago poiché inizialmente non si aveva la certezza di poter trovare delle chiare tracce di ruscellamento antico o recente. Ma se le famose immagini delle missioni Mariner 9 e Viking avevano suggerito soltanto l'ipotesi (pur concreta) della presenza di numerosi corsi d'acqua e di vaste superfici alluvionate, le immagini MOC, con una risoluzione massima di 1,4 m per pixel (10 volte superiore alle precedenti) hanno fornito per la prima volta la possibilità reale di un approccio fotogeologico di livello "terrestre".

Questo salto di qualità segna probabilmente l'inizio di una geologia comparativa di carattere interplanetario in cui il prefisso "geo" non sarà più limitato al concetto individuale di "Terra" ma esteso a quello di "terra", intesa genericamente come pianeta solido.

Il titolo non ufficiale di questa ricerca potrebbe essere: "Evidenze dell'esistenza di acqua liquida sulla superficie di Marte e ipotesi sulla presenza attuale".

## 1.1 - BREVE STORIA GEOLOGICA DEL PIANETA

Una sintesi della storia geologica di Marte si rende indispensabile dal momento che nel corso di questa ricerca verranno formulate diverse ipotesi sull'evoluzione paleoclimatica dell'ambiente marziano.

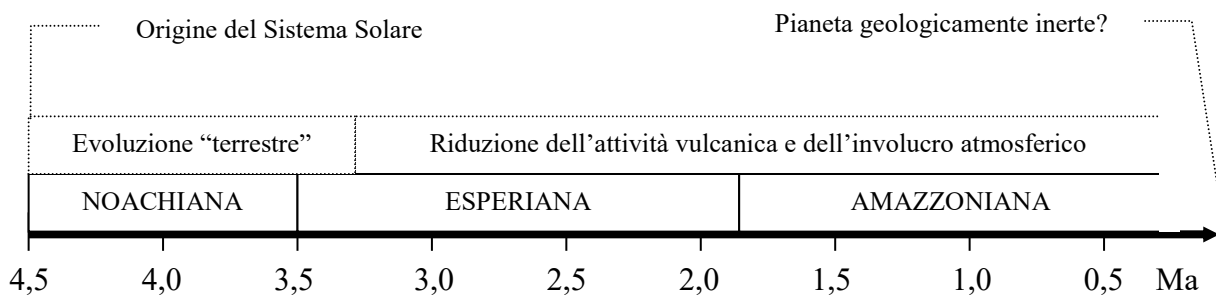
Il pianeta nasce 4,5 miliardi di anni fa insieme a tutti gli altri corpi del Sistema Solare. La fase iniziale della sua evoluzione è del tutto analoga a quella terrestre.

L'età Noachiana (da 4,5 a 3,5 miliardi di anni fa) vede l'accrescimento di un pianeta di tipo "terrestre", ovvero solido, con un'intensa attività vulcanica, un'atmosfera riducente e, nella fase più tarda, un ambiente climaticamente "temperato", potenzialmente adatto a supportare acqua liquida in superficie.

Da 3,5 a circa 2 miliardi di anni fa, in età Esperiana, le condizioni iniziano a deviare dalla linea di evoluzione terrestre. Si riduce l'attività vulcanica e manca un'intensa attività tettonica. La massa del pianeta è minore di quella terrestre, per cui la velocità di fuga è più bassa, incompatibile con la temperatura atmosferica. Inizia così una progressiva dispersione dei gas nello spazio che porta ad un notevole assottigliamento dello spessore atmosferico. In questo periodo ha origine la maggior parte dei grandi canali osservati già dalla

missione Mariner 9, probabilmente causati dal deflusso di acqua. La temperatura media però sta diminuendo e la fuga di atmosfera fa precipitare la situazione.

L'era Amazzoniana arriva al giorno d'oggi con la totale mancanza di attività vulcanica, totale assenza di idrografia attiva, formazione di calotte polari di spessore variabile (la CO<sub>2</sub> è stagionale), un clima rigido e arido e una sottile atmosfera di CO<sub>2</sub>.



## 2.0 - APPROCCIO FISICO

Prima di mettersi alla ricerca di tracce di acqua sulla superficie di Marte è opportuno chiedersi se e come possono verificarsi sul pianeta le condizioni necessarie alla presenza di acqua liquida. Infatti l'ambiente marziano, pur nella sua varietà climatica e fisiografica, presenta condizioni chimico-fisiche del tutto differenti da quelle terrestri.

### 2.1 - IL VERO PROBLEMA DELL'ACQUA LIQUIDA

L'esistenza di acqua nelle calotte polari, almeno negli strati superficiali di alcuni terreni e più in generale nell'atmosfera è ormai accertata e accettata. Su Marte c'è acqua e (come si vedrà in seguito) in passato certamente era presente anche allo stato liquido. La prima domanda da porsi è dunque se oggi esistono ancora le condizioni fisiche necessarie allo stato liquido.

La prima impressione che si può avere è che le rigide temperature del pianeta non consentano lo scioglimento dei ghiacci polari e del permafrost. Questo è un errato preconcetto. All'equatore, in estate, a mezzogiorno, si può raggiungere il tetto massimo<sup>1</sup> di 37°C. Ma anche se questa condizione si manifestasse su tutto il pianeta, non si avrebbe comunque la possibilità di vedere l'acqua. La pressione atmosferica in superficie (dati Viking e Pathfinder, fig.1) oscilla tra 6 e 7 millibar. A 7 millibar l'acqua bolle a circa 1°C.

<sup>1</sup> Dati Viking, 1976

Bisogna infatti uscire dagli schemi consolidati e accorgersi che anche il diagramma di stato dell'acqua per l'ambiente marziano non è uguale a quello che conoscevamo sulla Terra. Lo stesso punto triplo, spesso trattato al pari di una costante universale, in realtà dipende da fattori termodinamici e dunque risente dell'accelerazione di gravità che su Marte risulta circa il 38% di quella terrestre. Il giusto valore del punto triplo corrisponde<sup>2</sup> infatti a 6,1 mB a 0,01°C.

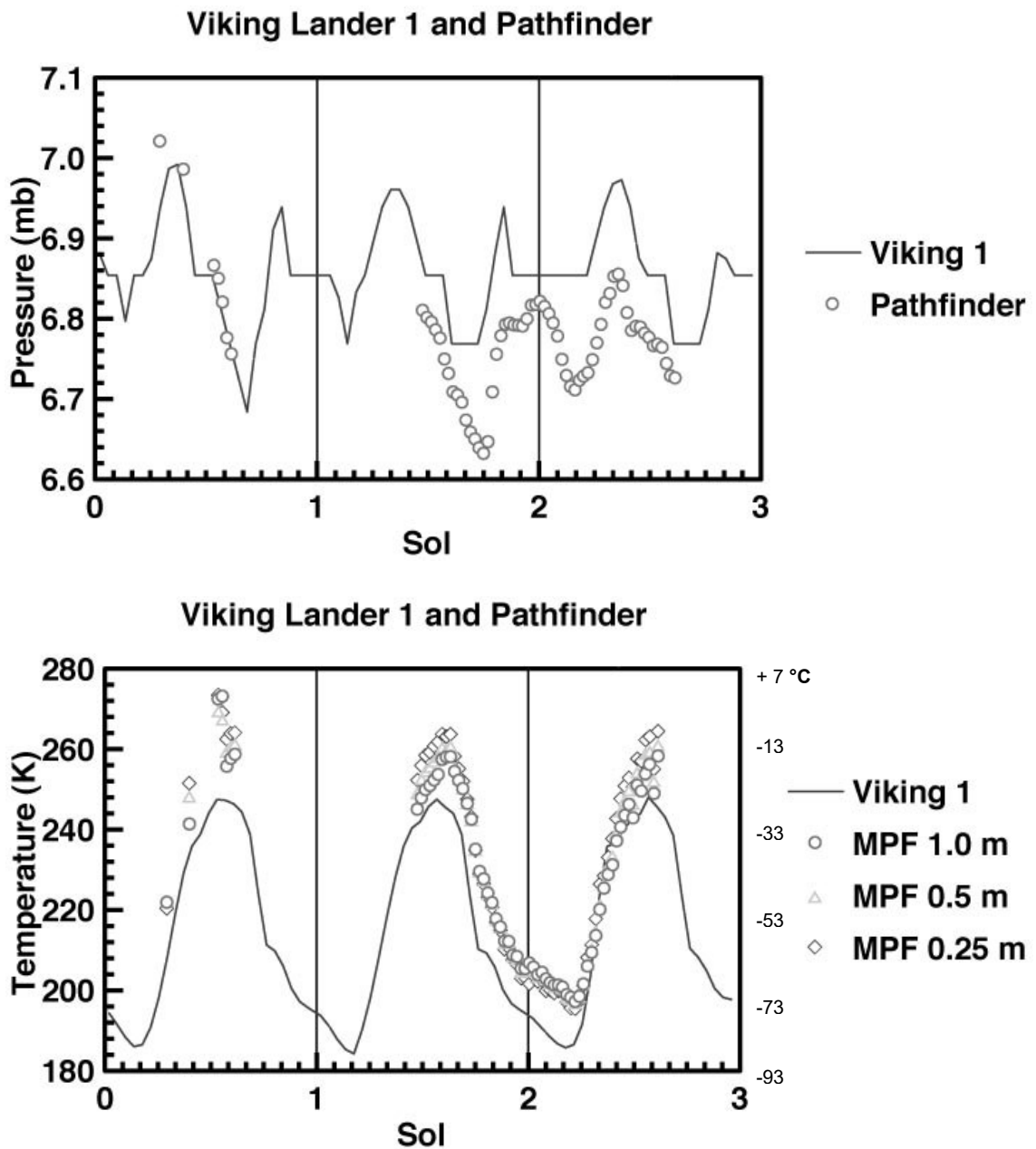


Fig. 1 - Confronto tra temperature e pressioni misurate dai lander Viking e Pathfinder nell'arco di tre giornate (Sol) marziane. Fonte NASA con l'aggiunta della scala Celsius.

<sup>2</sup> Valori tratti da "Liquid water and life on Mars" - G.V. Levin e R.L. Levinb.

Considerando ciò, la realtà è che su Marte può fare fin troppo caldo, tanto che il ghiaccio sublima senza passare per lo stato liquido. L'acqua è infatti presente anche nell'atmosfera allo stato di vapore e non raramente può brinare in superficie, come testimoniavano già le immagini delle missioni Viking (fig.2).



*Fig. 2 - Formazione di brina sulla superficie di Marte (foto NASA, missione Viking, 1996)*

A questo punto occorre prendere in esame un'ipotesi apparentemente discordante ma di enorme interesse, proposta da R. Hoover (Marshall Space Flight Center). La pressione media del pianeta risulta corrispondere esattamente a 6,1 mB, il valore del punto triplo. Hoover ritiene che non si tratti di un caso ma di un preciso equilibrio raggiunto dall'ambiente marziano. Basterebbe un'eruzione vulcanica (ricordiamo il monte Olympus e gli altri colossali edifici hawaiani sull'altopiano di Tharsis) o un'inclinazione dell'asse di rotazione<sup>3</sup> (cfr. pag.13) perché la pressione di CO<sub>2</sub> nell'atmosfera raggiunga valori superiori al punto triplo. In queste condizioni, non appena la temperatura supera gli 0,01°C (ricordiamo che il massimo registrato risulta 37°C) si entrerebbe nell'intervallo di liquidità. L'abbondante produzione di acqua liquida causerebbe allora il riassorbimento della CO<sub>2</sub> fino a che la pressione non si ristabilizza sui 6,1 mB arrestando il processo.

---

<sup>3</sup> Le calotte polari sono composte da uno strato superficiale di CO<sub>2</sub> e uno strato inferiore di H<sub>2</sub>O. In estate l'anidride carbonica sublima quasi totalmente ma non si arriva mai alla temperatura necessaria alla sublimazione dell'acqua.



Se ciò fosse vero, allora l'ambiente marziano si mantiene intorno ad un equilibrio basato proprio sull'assenza di acqua liquida, e squilibri occasionali o periodici possono aver causato le evidenti tracce di alluvioni antiche.

Tuttavia, per questo stesso motivo, nell'ambito di questa tesi si ritiene auspicabile la presenza ancor attuale di acqua liquida. Basterebbero infatti condizioni di poco differenti dalla media planetaria per trovare tuttora qualche traccia di ruscellamento.

Il problema si sposta dunque in una direzione molto diversa da quella ipotizzabile a priori. La domanda da porsi diventa ora: "Esiste oggi qualche sito ove si possa ancora riscontrare una pressione sufficiente a supportare un intervallo di liquidità?" Certamente a poca profondità nel terreno, per un certo intervallo, agiscono in concordanza gradiente termico e gradiente di pressione, ma probabilmente anche in ambiente epigeo, alle quote più basse e a determinate latitudini, potrebbero sussistere le giuste condizioni.

## **2.2 - UN MODELLO MATEMATICO PER GUIDARE LA RICERCA**

Per poter individuare in qualsiasi punto della superficie i relativi valori di temperatura e pressione si è impostato un modello matematico basato su gradienti orizzontali e verticali, estendendo poi l'architettura dall'atmosfera al sottosuolo.

In base a questo modello è stato realizzato (in ambiente Excel) il software "Rabdomarte" in grado eseguire automaticamente tutti i calcoli necessari.

Il meccanismo di base per l'atmosfera si limita alla troposfera e presume dei gradienti lineari in senso verticale e longitudinale, dipendenti dunque da quota e latitudine. Non esistendo masse oceaniche o ghiacciai montani, si suppone che lungo lo stesso parallelo i parametri T e P varino esclusivamente in funzione della quota. Il calcolo parte dai valori stimati a quota 0 e latitudine 0. Da qui si raggiungono la quota e la latitudine richieste scalando precisi gradienti atmosferici con le seguenti modalità:

- **P** diminuisce con la quota e aumenta con la latitudine;
- **T** diminuisce con la quota e diminuisce con la latitudine.

A questo punto l'indagine può proseguire nel sottosuolo del punto in esame scalando ulteriori gradienti con le seguenti modalità:

- **P** aumenta con la profondità;
- **T** aumenta con la profondità.

Ecco un esempio (fig.3) di come vengono raggiunte le condizioni previste alla latitudine +10 e quota -100, proseguendo poi per la profondità di 10 metri. Lungo le frecce nere vengono calcolati i relativi gradienti di **P** e **T**.

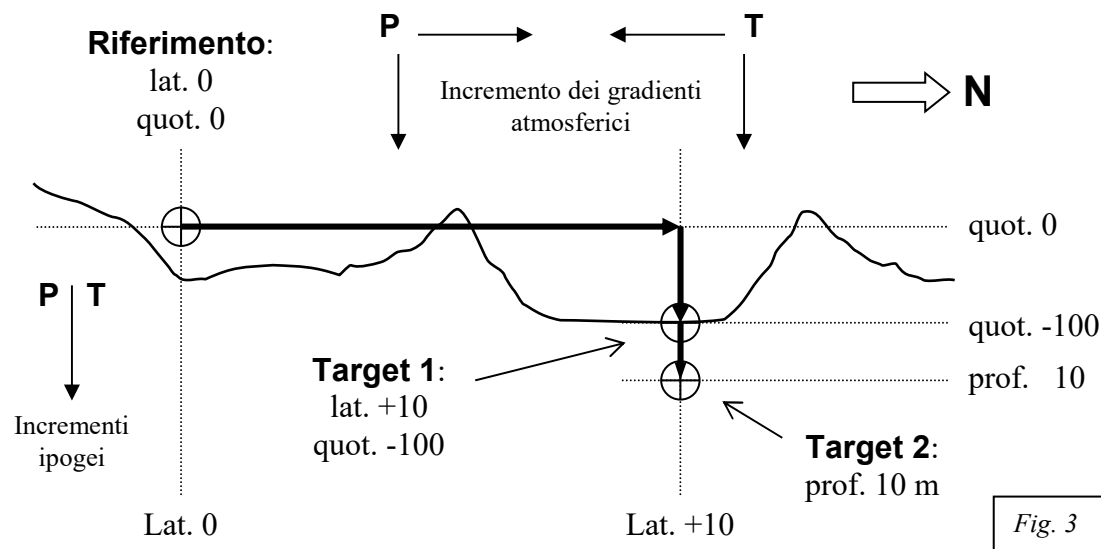


Fig. 3

Un'apposita schermata di *Rabdomarte* (fig.4) richiede l'inserimento di alcuni dati di INPUT in base ai quali verrà calibrato il modello. In particolare è necessario stabilire con la minore approssimazione i vari gradienti. Sono già indicati dei valori di default (colore grigio) ritenuti attualmente i più attendibili ma i risultati potranno essere sempre più raffinati man mano che dati più precisi saranno resi disponibili dalle future missioni spaziali.

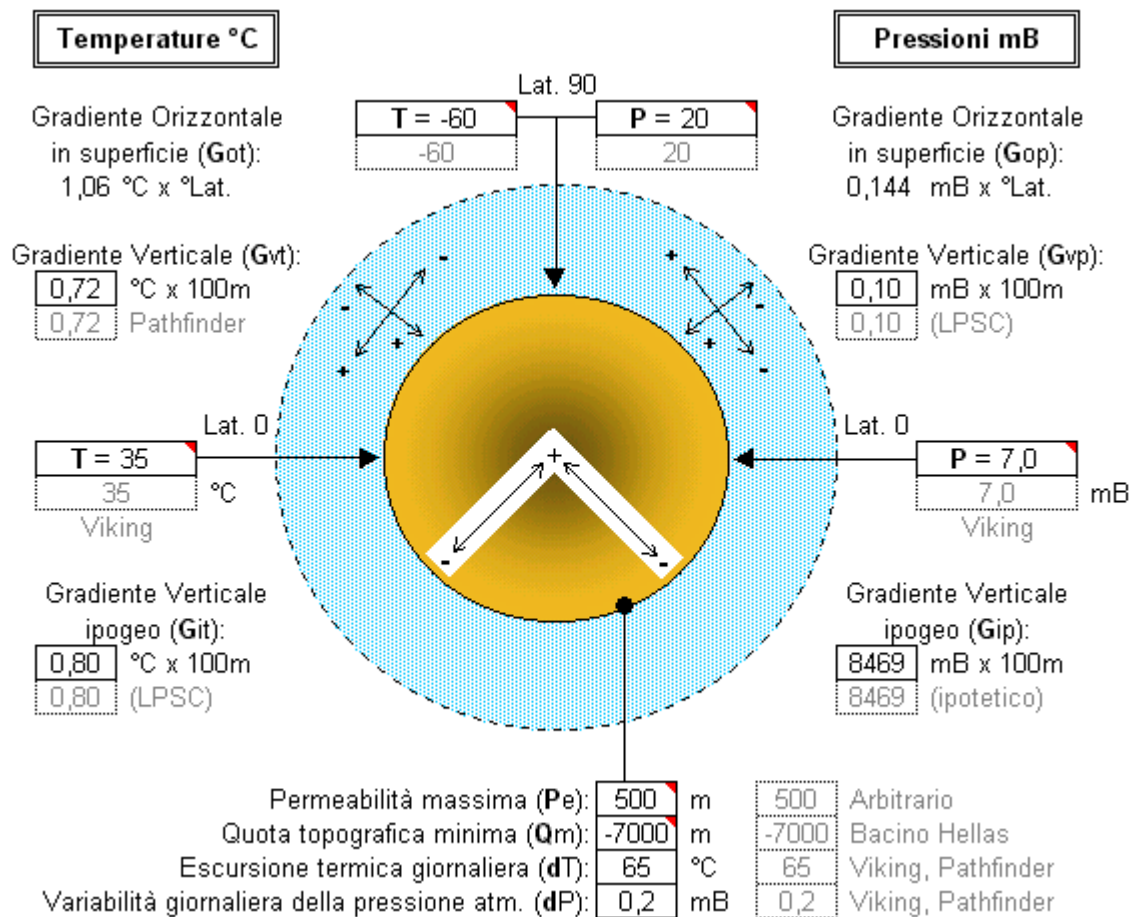


Fig. 4 - Schermata "Gradients" del software RABDOMARTE

I valori di P e T corrispondenti alle latitudini limite devono essere coerenti (entrambi med. max o min). In base a questi verranno calcolati automaticamente i rispettivi gradienti orizzontali. Tutti gli altri valori dovranno essere preimpostati. A fianco ai valori suggeriti sono indicate le fonti.

A questo punto il programma valuterà la posizione della condizione stimata nel diagramma di stato dell'acqua. Per fare ciò si è dovuto ricavare delle formule lineari in grado di riprodurre le curve solido-liquido e liquido-vapore con sufficiente approssimazione, almeno nell'ambito di un ragionevole range.

Il punto di partenza è stato il diagramma tratto da "Liquid water and life on Mars" (G.V. Levina e R.L. Levinb, cfr. bibliografia) sul quale sono state tracciate due rette (fig. 5). Calcolato il coefficiente angolare di tali rette si è ricavata la formula approssimativa del relativo cambiamento di stato. Come appare evidente la linea solido/liquido risulta perfettamente approssimata mentre la curva liquido/vapore rappresenta un'accettabile approssimazione per difetto in un range ben più alto di quello previsto per la superficie del pianeta.

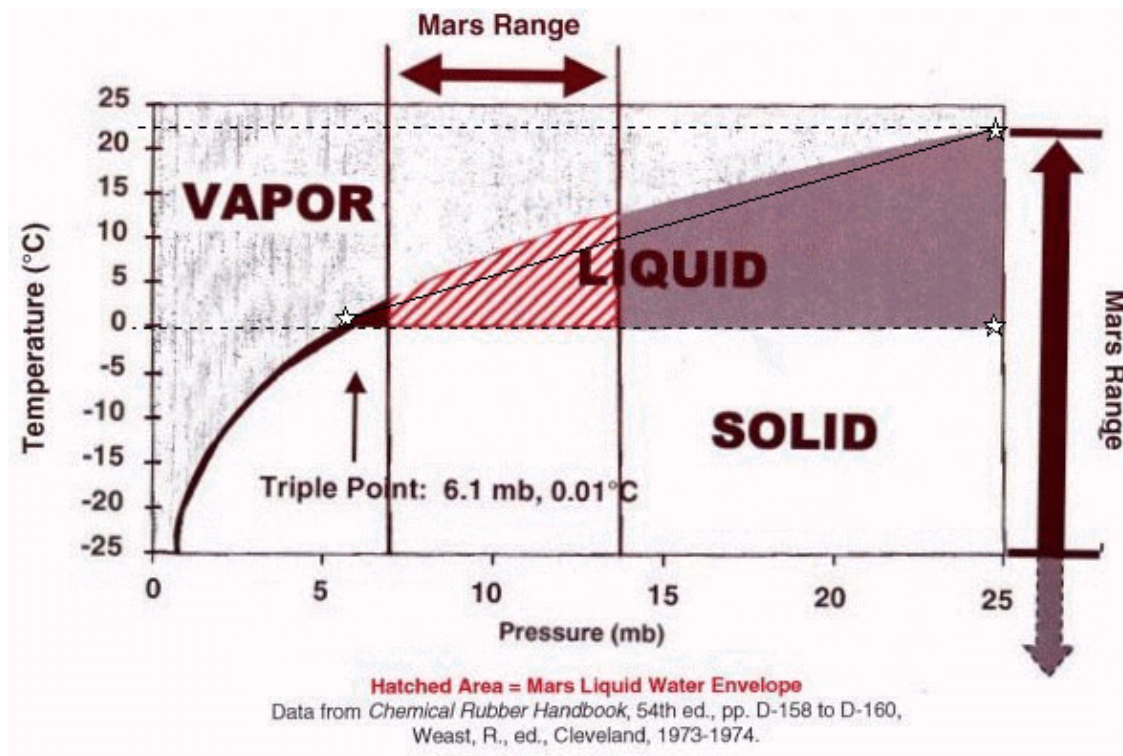


Fig. 5 - Schermata "Diagramma di Stato" di RABDOMARTE

Ora il programma sarà in grado di identificare un intervallo di liquidità che risulta delimitato dalle seguenti equazioni:

$$\text{Solido/Liquido: } P = -315 T + 9,25$$

$$\text{Liquido/Vapore: } P = 0,86 T + 6,09$$

Campo di validità:  
 P: 6,1-25 mB ; T: 0.01-22°C

Il risultato viene illustrato in una schermata interattiva (fig. 6) che funge anche da calcolatore delle coordinate P e T per i limiti dell'intervallo liquido.

Le condizioni ambientali precedentemente stimate possono ora essere confrontate con il diagramma di stato per emettere un verdetto "SI/NO" sulla possibilità di trovare acqua liquida nel luogo geografico in esame e, in caso positivo, verrà espresso un giudizio sulla "qualità" del sito in base alla posizione di P e T nell'intervallo liquido. Il punteggio è proporzionale alla "stabilità" delle condizioni in quanto è tanto più alto quanto più il punto risulta distante dai limiti e dal vertice del campo liquido.

### APPROSSIMAZIONE DELLE CURVE CON RETTE

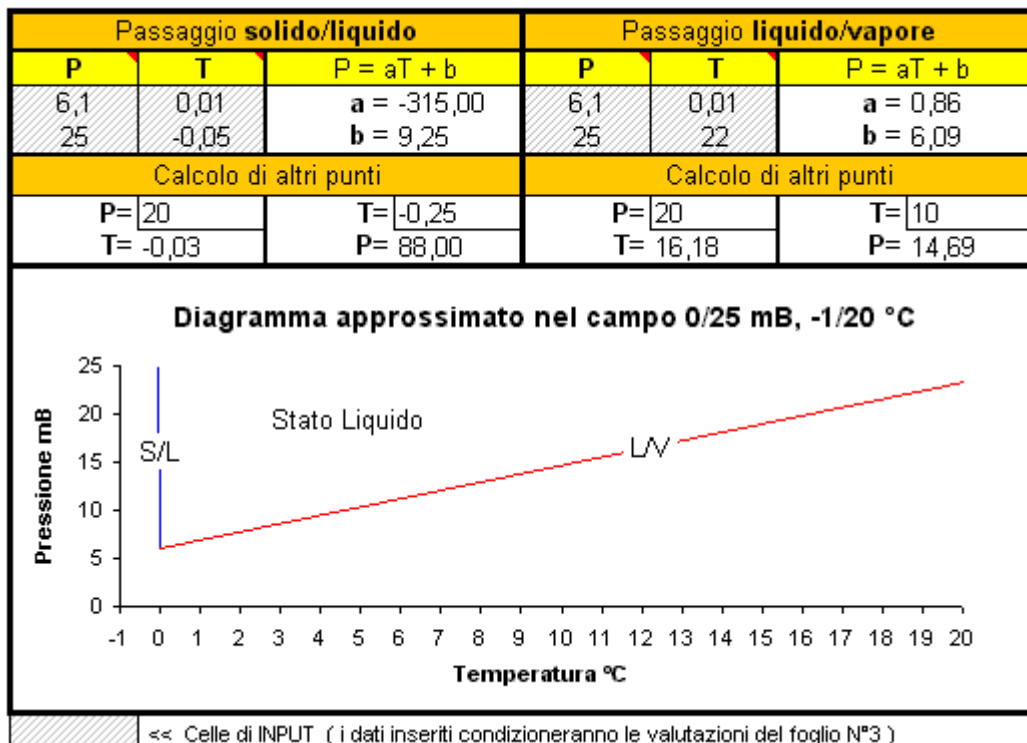


Fig. 6 - schermata "Diagramma di stato" di RABDOMARTE

Se l'acqua non viene trovata in superficie, automaticamente verrà applicato il modello "ipogeo" alla ricerca di una profondità alla quale il gradiente geotermico e il gradiente di pressione convergeranno all'interno dell'intervallo liquido.

Un ulteriore calcolo stabilisce la differenza di quota tra i limiti atmosferici al fine di stimare la potenziale capienza di un eventuale bacino di raccolta delle acque sorgive (questo dettaglio verrà più ampiamente discusso in seguito).

Le condizioni ideali, in quanto più resistenti alle escursioni di P e T, corrisponderanno naturalmente alla quota intermedia tra i limiti atmosferici. Con un processo di calcolo inverso è dunque possibile stabilire un'equazione dell'andamento generale delle condizioni ideali in funzione di quota e latitudine. In base agli input di default, si è ottenuta la seguente formula:

Funzione "Condizioni ideali" :

$$Q = 175 L + 5240$$

dove:

Q = quota (m) ; L = latitudine (°)

e un grafico che illustra la fascia climatica ideale:

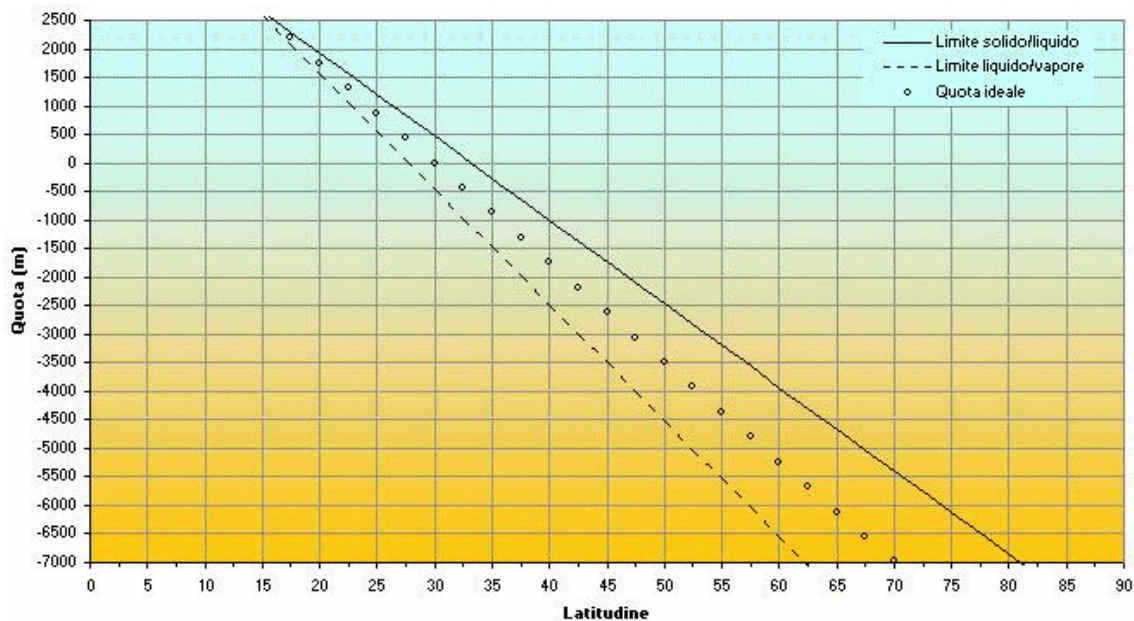


Fig. 7 - Schermata "Grafico delle condizioni favorevoli" del programma RABDOMARTE

Come è evidenziato dal grafico (fig.7) le zone favorevoli sono delimitate in senso verticale dall'equilibrio fisico solido/liquido in alto e dall'equilibrio liquido/vapore in basso. Ciò significa che nella medesima latitudine, a quote relativamente alte l'acqua può essere presente soltanto allo stato di ghiaccio e può al massimo sublimare (situazione standard). Per un ristretto intervallo di altitudini l'acqua potrà anche liquefare (in particolari condizioni) ma non può mai scendere al di sotto di una quota limite senza evaporare.

Le condizioni dell'intervallo liquido però sono tutt'altro che stabili: si possono verificare soltanto con carattere stagionale e soltanto in determinati periodi della giornata. Risentono infatti in modo significativo della variazione diurna di pressione e temperatura, ma soprattutto, dell'illuminazione solare che può localmente, e in modo transitorio, portare la temperatura a livelli più alti di quelli teorici e del tutto incompatibili con l'intervallo liquido.

Una temporanea modifica alla schermata di input del programma, tesa a sostituire i valori medi di T e P con una scala di gradazioni diurne, ha mostrato come in funzione della latitudine si possono avere uno o due cicli diurni di liquefazione.

Alle latitudini medio-alte (compatibilmente con il problema dell'insolazione) si possono manifestare due cicli di liquefazione, simmetrici rispetto all'ora in cui si tocca la massima temperatura della giornata, durante la quale potranno avvenire soltanto evaporazione o sublimazione.

Questi cicli sono inizialmente molto brevi (pochi minuti) ma, all'aumentare della latitudine, tendono ad allungarsi e contemporaneamente ad avvicinarsi fino a che, alle latitudini estremamente alte, si fondono in un unico ciclo massimo (40-60 minuti) centrato nell'ora corrispondente alla massima temperatura diurna.

Questa caratteristica è stata quindi implementata nella release successiva attraverso una più raffinata valutazione dell'indice di qualità "Q" del sito. Questo indice assoluto e adimensionale, oltre ad essere funzione della stabilità dell'intervallo liquido al variare delle condizioni diurne e stagionali, può ora esprimere anche il tempo massimo di permanenza delle condizioni liquide nell'arco della giornata. Diviso per 1,44 esprime approssimativamente l'intervallo totale in minuti.

L'equazione delle condizioni ideali corrisponde anch'essa ad una retta. Tutti i calcoli del modello comportano infatti la soluzione simultanea di numerose incognite, correlate attraverso diversi sistemi di equazioni, tutte lineari.

Purtroppo i dati altimetrici attualmente disponibili non hanno consentito una migliore calibrazione del modello sulla base dei fenomeni effettivamente osservati sul pianeta. Come si è già detto, attualmente il programma è calibrato su inputs derivanti dai dati forniti dalle precedenti missioni Viking e Pathfinder. Sarà tuttavia possibile ottenere risultati più precisi modificando gli inputs di default.

## 2.3 - LA SIMULAZIONE "RABDOMARTE"

La simulazione *Rabdomarte*, basata su questo modello, è in grado di fornire informazioni specifiche e generali. Fornisce cioè indicazioni geografiche sulla banda climatica ideale e informazioni specifiche sulle condizioni epigee e ipogee di siti localizzati sulla superficie attraverso gli input di latitudine e quota.



Schermata di apertura del programma RABDOMARTE

Il modello è calibrabile in ogni sua variabile e dunque i risultati possono essere progressivamente raffinati.

Il processo di analisi si articola in 4 sezioni:

- 1) Approssimazione del **diagramma di stato** dell'acqua in ambiente marziano mediante linee rette. L'operazione si esegue estraendo tre punti dal diagramma reale: il punto triplo, un punto dalla curva Solido/Liquido e un punto dalla curva Liquido/Vapore. Inseriti i tre punti, il programma calcola automaticamente un diagramma approssimato per difetto in base al quale verranno espresse le successive valutazioni.
- 2) Immissione dei dati necessari al calcolo dei vari **gradienti** di pressione e temperatura in funzione di quota e latitudine. I dati forniti condizioneranno tutte le valutazioni successive. Valori medi o standard sono indicati in trasparenza.
- 3) La stima dell'**andamento generale** delle condizioni climatiche in funzione di quota e latitudine identifica un criterio di distribuzione delle zone ad alta probabilità. L'estrapolazione di una funzione matematica consente il calcolo diretto delle fasce climatiche.
- 4) Inserimento dei dati geografici dei siti prescelti. Latitudine e quota sono elementi indispensabili alla **valutazione**. Il programma valuta per ciascun sito le condizioni ambientali alla superficie e i limiti di esistenza dello stato liquido in funzione della quota. In caso di assenza di acqua liquida in superficie verrà ricercato il dislivello minimo rispetto al suolo necessario al raggiungimento delle condizioni limite. Qualora le condizioni venissero rilevate nel sottosuolo verrà calcolata la quota assoluta dell'eventuale sorgente, la profondità limite di un eventuale bacino di raccolta e la sua potenziale capienza.

### 3.0 - APPROCCIO FOTOGEOLOGICO

Inizia qui la fase di rilevamento fotogeologico sulle immagini disponibili fino al dicembre 2000. La ricerca di morfologie correlabili alla presenza di acqua è stata effettuata in preferenza nelle aree segnalate come "positive" dalla simulazione *Rabdomarte*. Per riscontro tuttavia non sono state trascurate altre aree della superficie planetaria, anche se non verranno qui presentate, mancando del tutto di morfologie riconducibili ad attività idrologica.

Prima di iniziare un'analisi è stato però necessario stabilire alcuni importanti riferimenti.



### **3.1 - RIFERIMENTI ALTIMETRICI**

Per quanto riguarda le quote si è fatto riferimento alla mappatura globale fornita dall'altimetro MOLA a bordo della stessa sonda MGS.

Occorre specificare fin d'ora che, non esistendo ufficialmente<sup>4</sup> un livello del mare, nel caso di Marte si usa come riferimento la "Quota media planetaria", ovvero il livello medio della curva ipsografica del pianeta. Rispetto a questo livello, il punto più alto della topografia risulta essere la cima del vulcano Olympus con un'altitudine di 27 km. La zona più depressa risulta invece il fondo del grande bacino di Hellas (cratere da impatto) con una quota corrispondente a -4 km. Il dislivello totale corrisponde quindi a circa 31 km contro i circa 20 che risulterebbero sulla Terra tra il monte Everest e la Fossa delle Marianne.

Se si applicasse lo stesso metodo sul nostro pianeta, il livello 0 verrebbe fissato a -1322 m rispetto a quello medio del mare. E' chiaro dunque che ogni riferimento altimetrico non dovrà assolutamente essere correlato ad un eventuale livello dei paleoceanici o comunque ad un livello piezometrico di base, anche se la consuetudine ci porta istintivamente a farlo.

### **3.2 - ELEMENTI DI RIFERIMENTO NELL'INTERPRETAZIONE FOTOGEOLOGICA**

La prima fase di un'interpretazione fotogeologica è l'individuazione di elementi fisiografico-morfologici in grado di fornire la chiave di lettura per le informazioni fondamentali, quali la polarità del rilievo<sup>5</sup>, l'angolo di illuminazione, un eventuale angolo di tilt, la pendenza e la natura del terreno. Queste informazioni sulla terra sono deducibili da elementi noti e facilmente riconoscibili o da pattern standard, teorizzati in base alla preventiva conoscenza dei fenomeni che li hanno prodotti.

Su una superficie "aliena" come quella marziana si pone dunque come primo problema quello di definire qualche riferimento di base.

Dovendoci necessariamente adattare alle risorse del territorio marziano, il primo elemento preso in considerazione è stato il cratere da impatto, che si è rivelato subito più che soddisfacente per una significativa gamma di determinazioni.

La tenue atmosfera del pianeta non è in grado di fornire un valido schermo alla caduta dei corpi meteoritici e l'attività tettonica ed erosiva non è e non è stata tale da rinnovare velocemente la superficie marziana, cosicché essa è costellata da crateri da impatto di dimensioni molto eterogenee e quindi rilevabili senza grande difficoltà sotto qualsiasi scala fotografica.

---

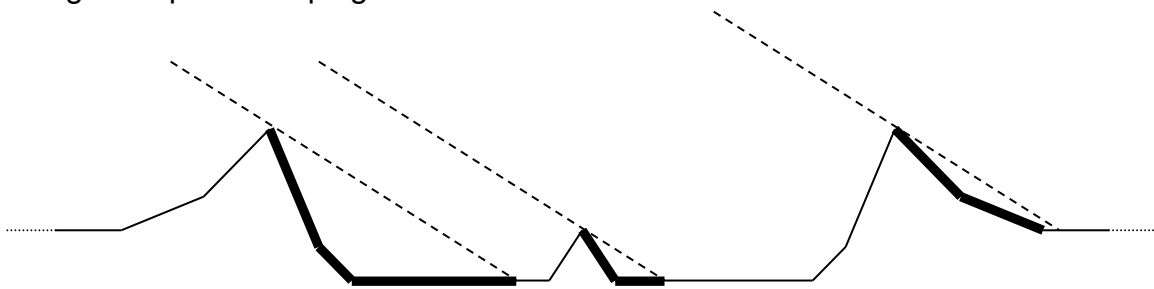
<sup>4</sup> In realtà, come vedremo, evidenze morfologiche possono determinare con la precisione di circa 100 m il livello di un oceano settentrionale.

<sup>5</sup> Per "polarità del rilievo" si vuole intendere la concavità o convessità delle strutture osservate.

Il cratere da impatto è dunque un elemento ricorrente e fortemente indicativo per i seguenti aspetti:

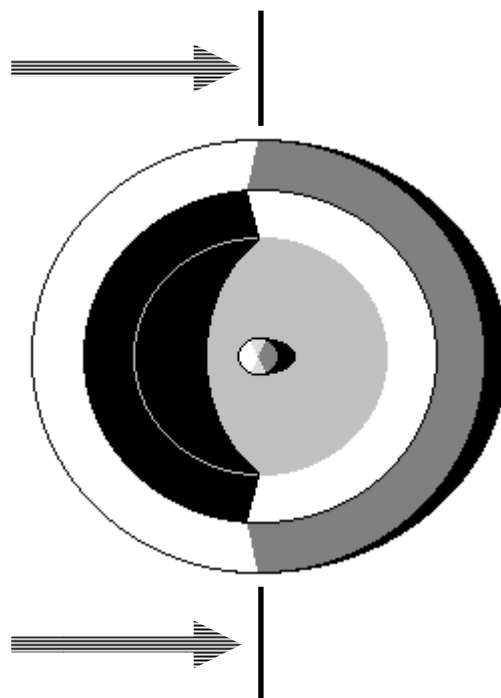
**Morfologia dei crateri meteoritici:** la forma tipica del cratere da impatto di tipo comune (alto angolo di incidenza) è un rilievo di pianta circolare, spesso con un monte conico al centro. L'aspetto basso e ampio dell'arcata può essere simile al modello terrestre dei crateri vulcanici legati ad attività idromagmatica (Maar). Come questi presenta anche una depressione profonda e pianeggiante, salvo che per il rilievo conico centrale, tipico anche dei crateri lunari. A differenza della Luna, dove la forza di gravità è molto minore, gli ejecta saranno però ricaduti a breve distanza dal centro di impatto (il cono) formando un deposito radiale esterno al cratere ma nelle immediate vicinanze. E' importante inoltre considerare che, al contrario di quanto avviene sulla Luna, tali depositi potranno in seguito essere rimaneggiati dagli agenti esogeni.

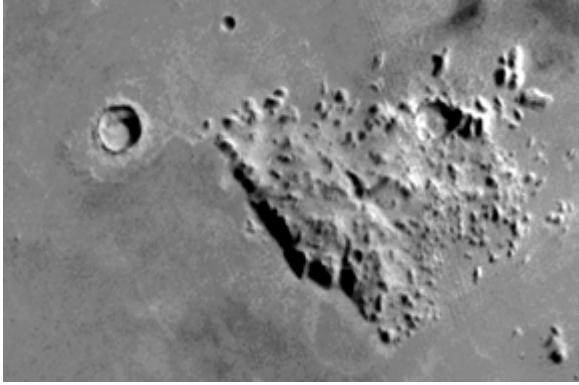
Questa morfologia, così semplice e standard, rappresenta un'ottima chiave di lettura per il riconoscimento della polarità del rilievo e dell'angolo di illuminazione in pianta. I disegni che seguono (fig.8;9) illustrano il concetto meglio di qualsiasi spiegazione.



*Fig. 8a - (In alto) Sezione di un cratere da impatto meteoritico: il tratto più marcato indica le parti in ombra*

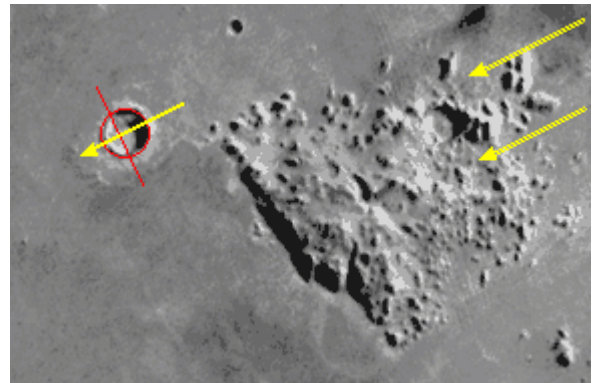
*Fig. 8b*  
*Direzione della luce incidente valutata in base alla concavità dell'ombra interna del cratere*  
*L'ombra del cono centrale (quando questo è presente) indica la direzione esatta*





*Fig.9 - Un esempio di facile valutazione della direzione di illuminazione e quindi della polarità del rilievo*

*L'ombra interna del cratere suggerisce la direzione dei raggi incidenti*

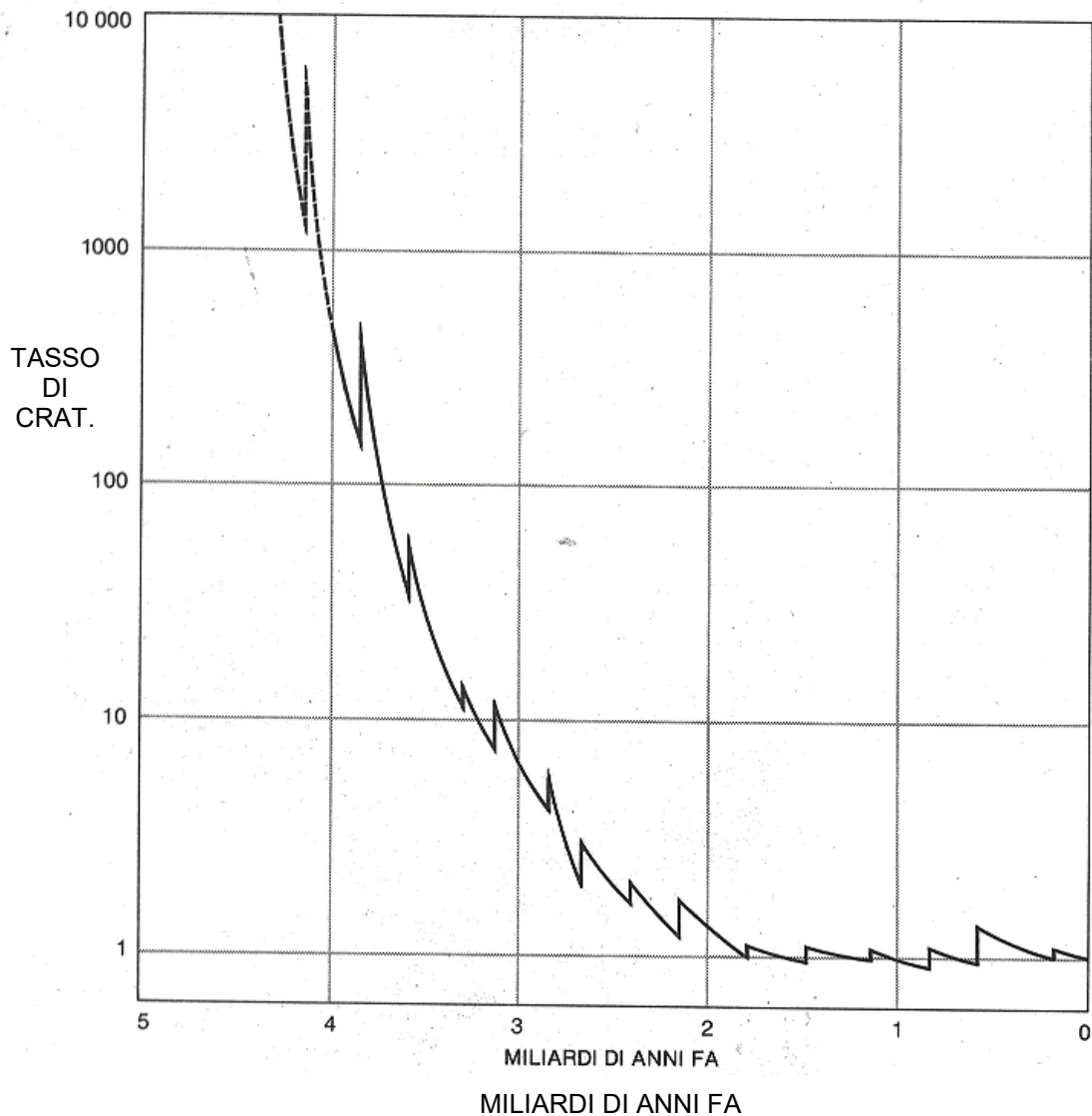


Da questo punto di vista il cratere da impatto meteoritico si rivela un indicatore ideale piuttosto che una soluzione di ripiego.

**Distribuzione della craterizzazione:** la caduta di corpi meteoritici sui pianeti del sistema solare non è stata costante nel tempo (fig.10). La massima frequenza e i corpi di massime dimensioni sono riconducibili alle prime fasi della formazione dei pianeti. Il flusso si è poi stabilizzato sui valori attuali da poco più di 1,5 miliardi di anni.

Sui corpi privi di atmosfera e di attività tettonica come Mercurio e la Luna, dove cioè nulla ha interferito nella distribuzione statistica dei crateri, è osservabile<sup>6</sup> che il numero di crateri disseminati su una data area risulta inversamente proporzionale al quadrato del loro diametro.

<sup>6</sup> "I crateri nel sistema solare" – William K. Hartmann – "Le Scienze" n.105, maggio 1977



( Fig. 10 - Grafico del tasso di craterizzazione, tratto da W. K. Hartmann 1977 )

Dunque lo spettro di dimensioni non è casuale ma segue la legge dell'inverso del quadrato. Un grafico "Diametro / Numero di crateri", riportato in scala bilogarithmica, mostra una distribuzione lineare lungo una retta di coefficiente angolare pari a -2.

Lo stesso coefficiente angolare è risultato dai grafici di tutti i corpi geologicamente "inerti" come Mercurio, la Luna e numerosi asteroidi.

E' dunque possibile determinare con esattezza se e quanto l'attività tettonica e/o erosiva del pianeta ha influito sul processo di craterizzazione e si potrebbe da ciò dedurre un indice di "attività geologica". Ma già da una rapida stima visuale della craterizzazione di una superficie possiamo trarre almeno due deduzioni:

- La disuniformità della densità di craterizzazione indica l'età relativa del terreno in esame: più crateri sui terreni antichi, meno crateri sui terreni giovani.
- La disuniformità nella distribuzione delle dimensioni indica, a parità di densità e quindi di età, che un'agente ambientale (di natura geologica) ha interferito sulla legge dell'inverso dei quadrati.

**Crateri “a circo”**: può capitare talvolta di osservare crateri di forma allungata più o meno ellittica con una distribuzione laterale degli ejecta che assume la caratteristica forma “a farfalla” (fig.11). Questo pattern, piuttosto raro, nel caso di Marte può rappresentare un importante indicatore paleogeografico.

La formazione di crateri “a circo” o “a farfalla” è tipica degli impatti radenti. I corpi asteroidali o di origine cometaria, le cui orbite sono centrate sul Sole, difficilmente possono avere angoli di impatto molto piccoli. E' stato stimato<sup>7</sup> nel caso di Marte che soltanto lo 0,7% della popolazione di crateri potrebbe rientrare in questa categoria ma in realtà il numero degli impatti radenti risulta 10 volte più grande.

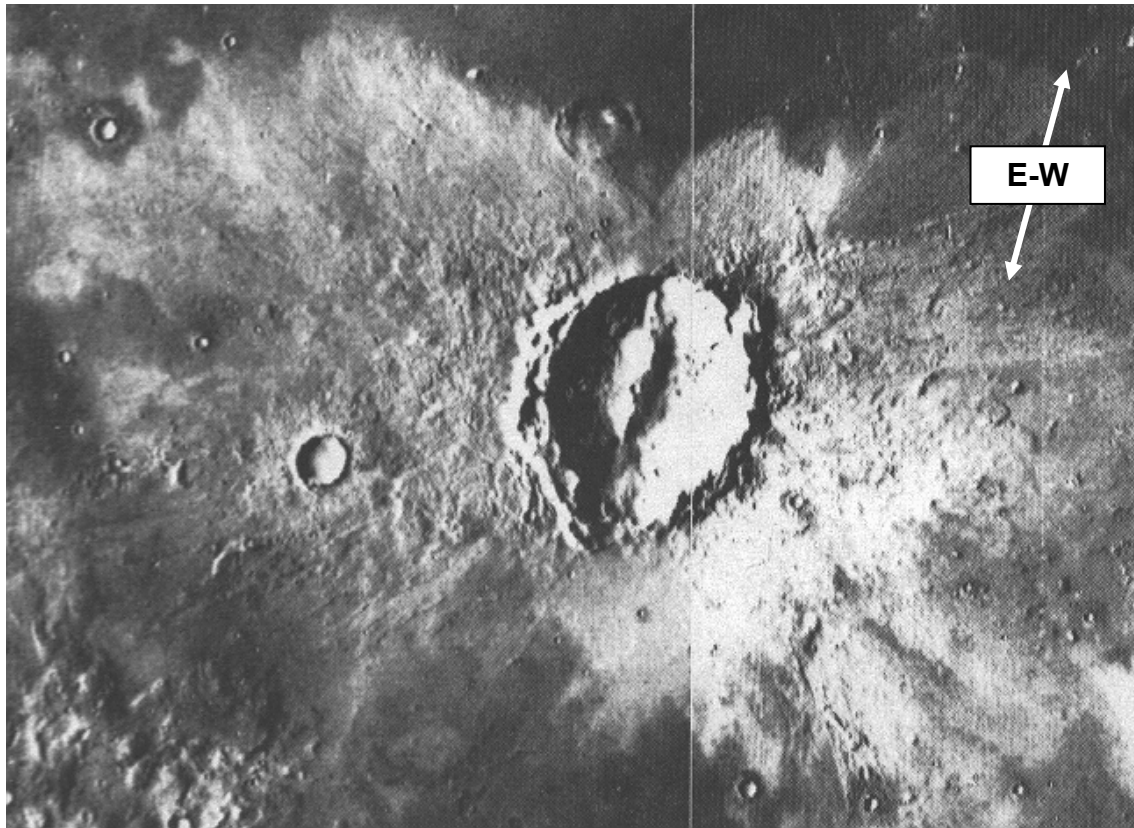
Si dovrebbe dunque attribuire la maggior parte di questi crateri alla caduta di antichi satelliti la cui orbita si è abbassata gradualmente fino a causare l'impatto radente. Effettivamente anche gli attuali Phobos e Deimos sono piccoli corpi le cui orbite si stanno vistosamente restringendo.

Questa ipotesi implica un impatto radente lungo una traiettoria più o meno equatoriale e la conseguente formazione di crateri a circo il cui asse maggiore risulterà parallelo all'equatore. In realtà la casistica marziana evidenzia una distribuzione degli orientamenti spiccatamente modale e, nei più recenti, coerente alla direzione E-W.

In conclusione, l'asse maggiore di questo tipo di crateri indica la direzione E-W se si trovano nella fascia equatoriale o, in alternativa, la linea di un paleoequatore. Risulta infatti che l'asse di rotazione del pianeta ha subito nel tempo diverse fasi di inclinazione anomala con massimi (presunti) di 45° rispetto alla posizione attuale. Questo fenomeno implica naturalmente mutamenti climatici e ambientali da non sottovalutare.

---

<sup>7</sup> “La migrazione dei poli su Marte” – Peter H. Schultz – “Le Scienze” n. 211, marzo 1986



( Fig. 11 - modificata da "La migrazione dei poli su Marte" di P. H. Schultz )

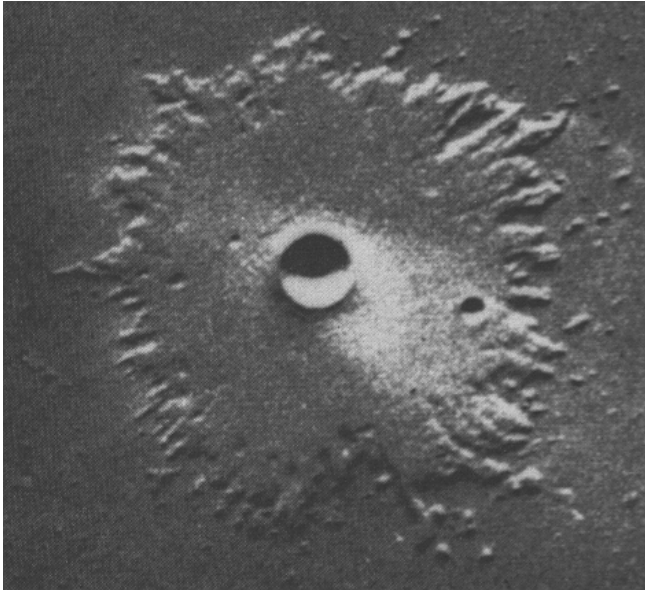
**Crateri "a piedistallo":** questa morfologia non è consueta sul nostro pianeta. Si tratta di crateri da impatto centrati su un altopiano il cui rilievo si stacca nettamente dal terreno circostante con contorni a frange radiali (fig.12).

Questa morfologia si ritiene<sup>8</sup> possa essere causata da un profondo impatto meteoritico su una calotta di ghiaccio. Gli ejecta, di provenienza profonda e dunque privi di ghiaccio, avrebbero ricoperto parte della calotta circostante. Successivamente una variazione delle condizioni ambientali (ancora la migrazione dei poli) avrebbe causato lo scioglimento della calotta ma non dei ghiacci coperti dai detriti, lasciando così un piedistallo intorno al cratere.

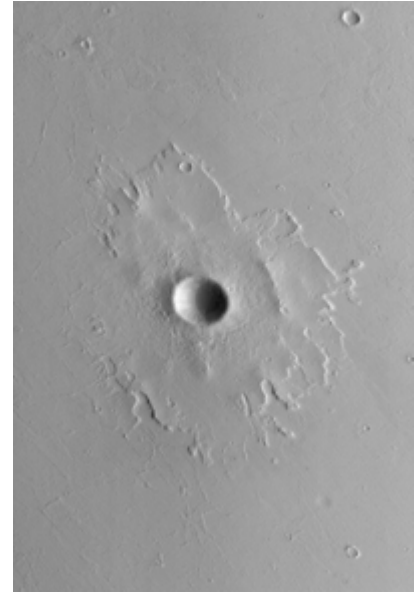
Questa particolare morfologia, tipica di regioni ex glaciali, rappresenta dunque un interessante indicatore paleoambientale e suggerisce la presenza di ghiaccio nel sottosuolo.

---

<sup>8</sup> Ancora Schultz 1986



12a



12b

*Fig. 12a - da "La migrazione dei poli su Marte" di P. H. Schultz*

*Fig. 12b - Cratere a piedistallo in Amazonis Planitia, lat. 12,4 N (Foto MGS)*

## **4.0 - ANALISI GEOMORFOLOGICA**

Nel corso di questa ricerca si è progressivamente concretizzata l'intuizione iniziale che gli elementi in grado di supportare l'ipotesi della presenza di acqua sul pianeta sembravano presentare una gerarchia dimensionale che ricalcava coerentemente la loro stessa cronologia. Questo aspetto riflette probabilmente un progressivo declino del ciclo dell'acqua e verrà ora utilizzato come filo logico nella descrizione delle morfologie.

Si procederà dunque dalle tracce più evidenti ed antiche a quelle più nascoste e recenti, tentando parallelamente di ricostruire un'evoluzione ambientale coerente con la storia geologica del pianeta.

### **4.1 - TRACCE ANTICHE**

Confrontando con un ellissoide di riferimento la distribuzione percentuale delle quote rilevate dallo strumento MOLA, è stato evidenziato un andamento bimodale (fig.14) che conferma una differenza di livello tra i due emisferi visibile nettamente ad occhio nudo: l'emisfero meridionale è mediamente più elevato di quello settentrionale (fig.13).

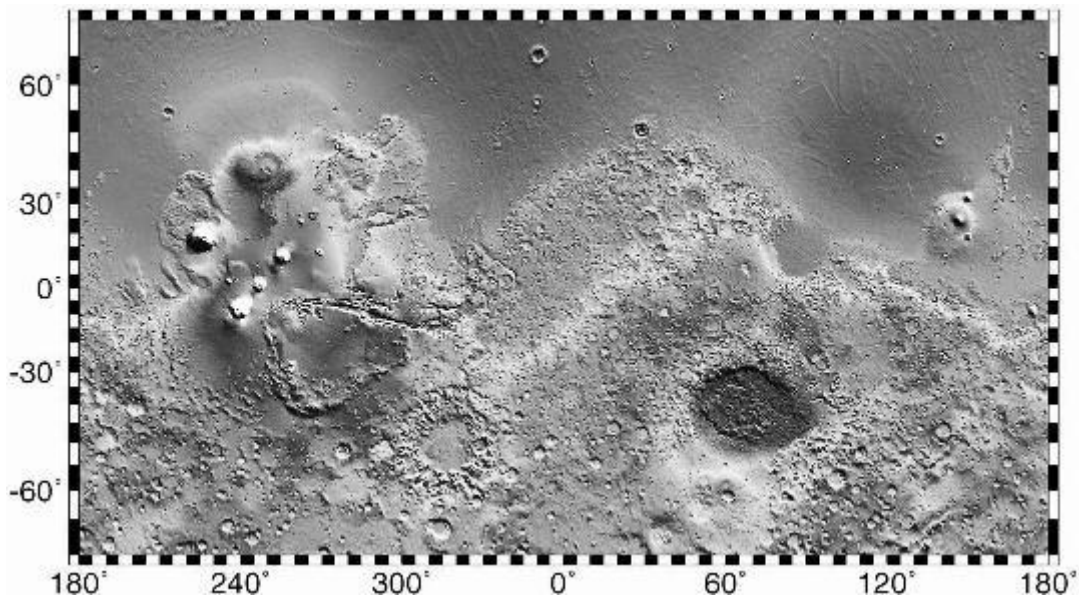


Fig. 13 - Mappatura altimetrica globale (fonte MOLA)  
 Anche a questa scala è evidente il dimorfismo tra gli emisferi.

Questo è l'aspetto più macroscopico della superficie di Marte. L'ipotetica linea di demarcazione è pressoché diametrica e quasi in posizione equatoriale. Questa conformazione suggerisce a priori l'esistenza di un continente australe bagnato da un oceano boreale, qualora si ammettesse un'abbondante presenza di acqua liquida sul pianeta.

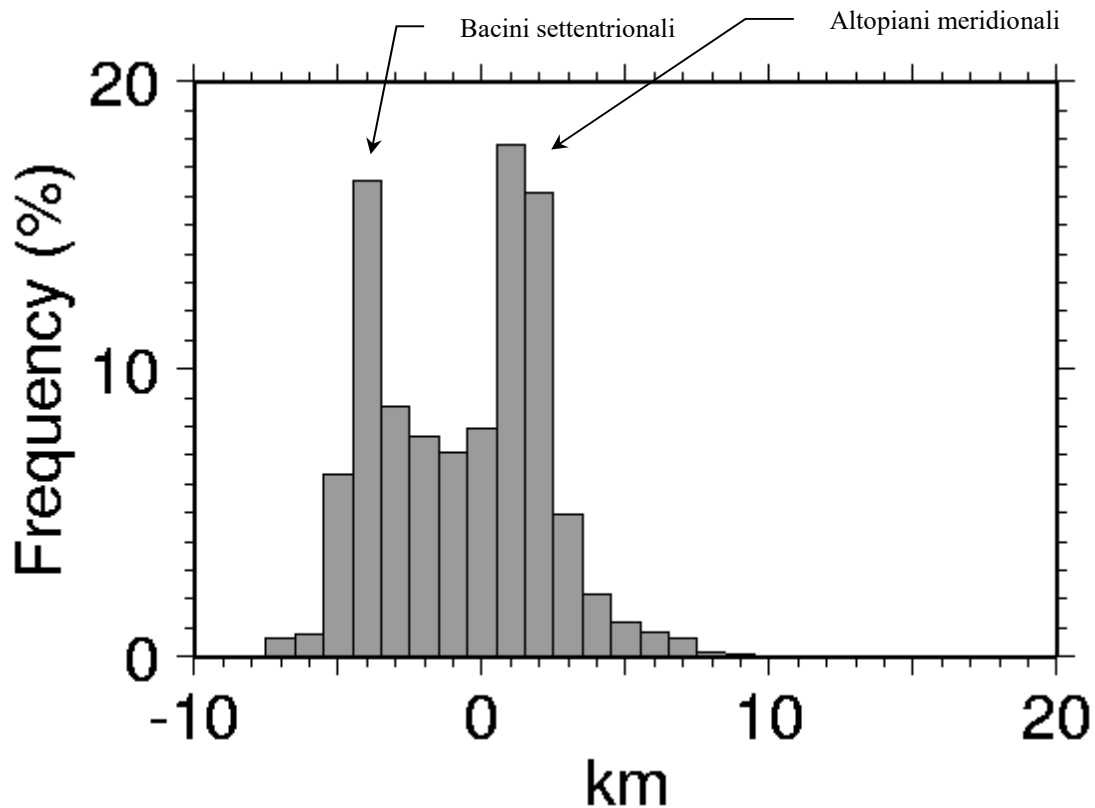


Fig. 14 - Distribuzione percentuale delle quote rispetto all'ellissoide (fonte MOLA)



Un'altra caratteristica visibile ad occhio nudo e su scala macroscopica è la differenza di craterizzazione tra i due emisferi. Sui terreni rilevati meridionali la craterizzazione è più densa e presenta ancora le tracce di impatti di enormi dimensioni (Hellas, Argyre) e quindi antichissimi. Il grande bacino settentrionale invece appare più "liscio", ovvero pianeggiante, povero di craterizzazione e caratterizzato da crateri relativamente più piccoli. Sono inoltre ben visibili i resti dell'erosione di grandi crateri.

Ciò suggerisce evidentemente una più giovane età per i terreni settentrionali (depressi). Questo dato però non deve essere interpretato in senso terrestre. Si potrebbe pensare infatti ad una crosta oceanica rigenerata da processi tettonici, tuttavia non vi sono tracce di dorsali né di margini di placca, né di orogeni. Poiché le superfici non sono coperte da oceani, la cosa appare con evidenza.

Se però ammettiamo la possibilità che il bacino possa avere ospitato una massa oceanica in un'epoca molto antica, questa avrebbe chiaramente agito da filtro sulla densità di craterizzazione, proteggendo la superficie dagli impatti minori. Avrebbe causato l'erosione dei crateri antichi (grandi) e quindi, alla sua scomparsa, lasciato una superficie liscia e pianeggiante esposta alla pioggia meteoritica, ormai ridotta ai corpi minori. Una grande massa d'acqua, da sola, spiegherebbe dunque ogni aspetto di questo singolare dimorfismo.

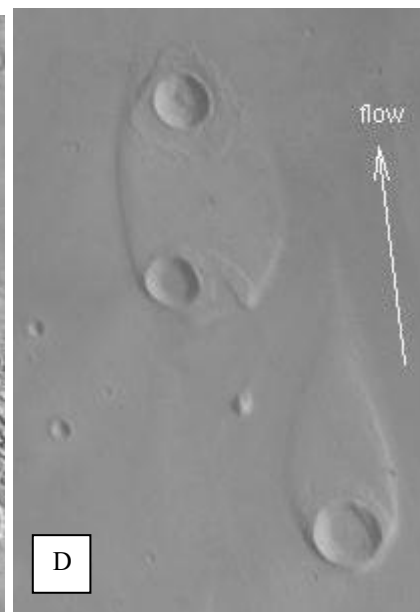
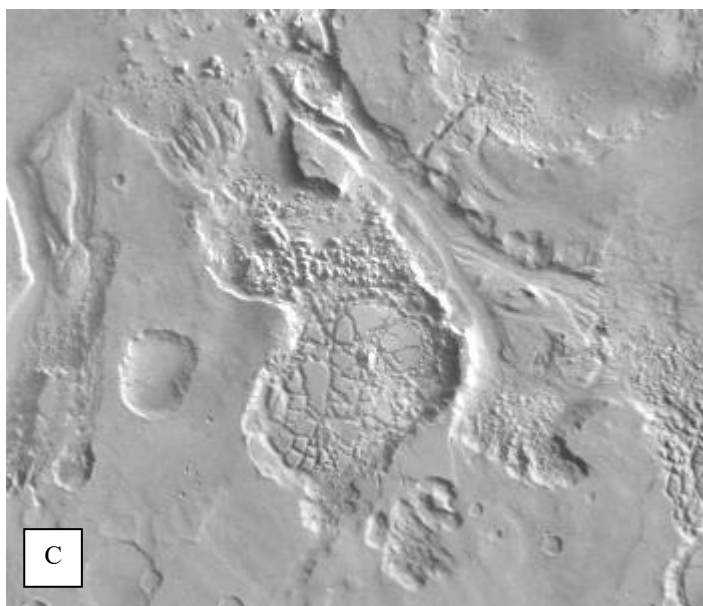
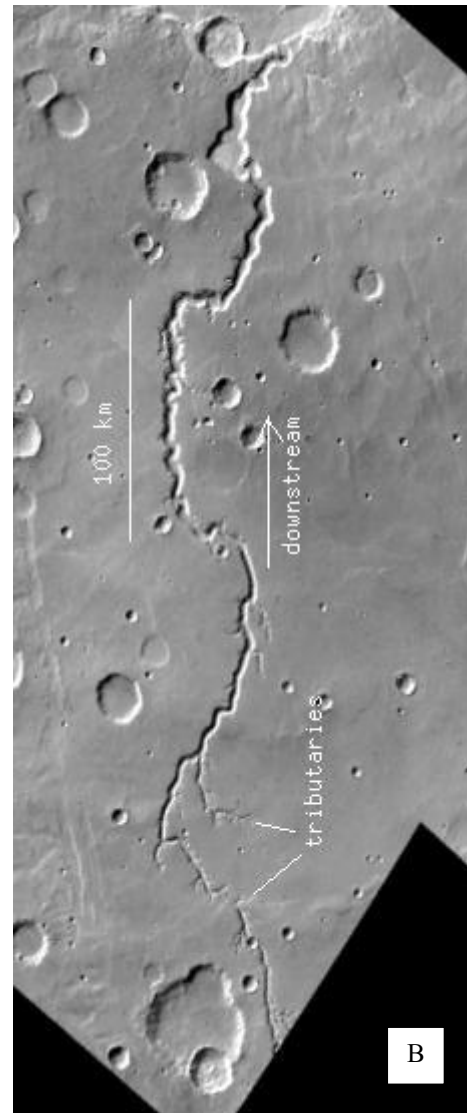
E' opinione diffusa che, se mai su Marte siano esistiti degli oceani, questi devono necessariamente risalire all'era "Noachiana" (4,5 – 3,5 miliardi di anni fa) la più antica del pianeta e corrispondente alla nostra eone Archeano o età Prearcheozoica. In questo periodo su Marte, Venere e la Terra dovevano esistere più o meno le stesse condizioni ambientali. Collochiamo quindi senza difficoltà l'oceano boreale in un'epoca posteriore a 3.5 miliardi di anni.

Il secondo aspetto più macroscopico è rappresentato dai famosi canali di deflusso osservati già dalla missione Mariner 9 (primi anni '70). Sono situati sui terreni rilevati, prevalentemente meridionali. Sembrerebbero piuttosto antichi ma almeno tardo-noachiani, poiché sono impressi profondamente su craterizzazioni precedenti (a volte formando dei laghi). Il pattern può presentarsi di tipo dendritico (per lo più nella fascia equatoriale; fig.14a) o lineare, con pochi cortissimi immissari (per lo più alle medie latitudini; fig.14b) e, correlato alle caratteristiche dimensionali e geografiche, fornisce indicazioni spesso contrastanti.

La povera ramificazione è tipica (sulla Terra) di zone a basso tasso di precipitazioni ma l'ampiezza della sezione e l'assenza di terrazzamenti suggeriscono una portata imponente. L'aspetto lineare è indice di una spiccata pendenza del terreno e/o una fase giovanile ma, per contro, le poche sinuosità meandriche e profonde sembrano indicare un'età avanzata ed escludono le alte pendenze.

Fig. 14 - Tracce antiche di acqua liquida.

- A) Canale dendritico 42°S, 93°W
- B) Canalone "Nirgal Vallis"
- C) Terreno caotico "Hydapsis Chaos"
- D) Particolare dell'area alluvionata "Ares Vallis"



Le ramificazioni possono essere anche localmente diffuse per poi scomparire del tutto nelle zone limitrofe. Questo richiederebbe una rapida e anomala variazione di permeabilità dei terreni o delle precipitazioni abbondanti ma estremamente localizzate.

Oggi tutti i canali presentano un fondo piatto (foto MGS) con dune isoorientate, certamente di origine eolica.

Esistono molte teorie sulla natura dei canali e tutte ormai invocano uno scorrimento di acqua (l'ipotesi della lava non contrasta più l'evidenza) ma si propongono diverse origini per questa acqua. Esistono evidentemente opinioni contrastanti che spesso vedono geologi contro fisici e già per questo (a mio parere) si possono considerare sterili.

L'obiettivo di questa ricerca è quello di individuare le tracce lasciate dall'acqua liquida e di determinare semmai le condizioni attualmente necessarie. Non ci addentreremo dunque nell'ambito delle controversie ma ci limiteremo all'analisi delle evidenze.

Molti di questi canali sfociano nella depressione settentrionale praticamente sempre allo stesso livello. La differenza massima risulta di 350 m su una distanza di 2200 km (misure MOLA). Le presunte linee di costa presentano tutte la medesima quota. Anche questi elementi portano dunque a supporre l'esistenza di un bacino di raccolta e di un preciso livello di base delle acque.

Le foci dei canali presentano altri aspetti contrastanti. Sono solitamente a singolo estuario, sia nel bacino settentrionale che nei laghi interni, i quali spesso sono depressioni crateriche. Questo lascerebbe presumere un'intensa azione del moto ondoso, incompatibile con i laghi. Si dovrebbe allora ipotizzare una scarsissima portata, incompatibile però con la conformazione dei canali. Oltre la foce talvolta prosegue una breve incisione che lascia supporre il protrarsi di un'attività erosiva in periodi di secca.

Ci sono poi zone che presentano tracce di alluvionamenti diffusi su aree vastissime. Spesso queste regioni sono associate a formazioni molto caratteristiche definite "terreni caotici" (fig.14c). Si tratta di altopiani fratturati in un reticolato di blocchi collassati in sequenza probabilmente a causa del disgelo del permafrost, al quale si può anche attribuire l'episodio alluvionale delle aree limitrofe. Qui ancora una volta i crateri meteoritici hanno fornito un importante servizio. Infatti la craterizzazione preesistente ha costituito un ostacolo al flusso causando la deposizione di sedimenti nella tipica conformazione di un'isola fluviale (fig.14d). E' quindi facile determinare la direzione del flusso e valutarne orientativamente l'energia.

Infine alcuni canali sembrano generarsi da crateri da impatto, pur non presentando le caratteristiche dei canali di lava lunari (sono chiaramente prodotti da un fluido poco denso).

Tentando di trarre qualche conclusione da tutte queste incongruenze, appare abbastanza probabile che i canali siano il frutto di un breve periodo di intensa attività seguito da una lenta estinzione. Anche questi aspetti dunque possono essere inseriti nella cornice di una progressiva degenerazione del ciclo dell'acqua. Gli episodi più importanti e realmente pluviali risalgono certamente all'era Noachiana per poi proseguire, in età Esperiana, verso condizioni progressivamente sempre più aride. Sembra però evidente qualche temporanea ripresa, soprattutto di carattere locale. Le cause di queste riprese potrebbero essere suddivise in 3 categorie:

- Periodiche intensificazioni dovute alla temporanea migrazione dei poli, con effetti di portata planetaria, analogamente alle glaciazioni del nostro pianeta.
- Locali episodi alluvionali dovuti all'attività vulcanica Esperiana con il doppio effetto della fusione del permafrost (recente e molto abbondante) e di un temporaneo aumento della pressione atmosferica, sia pure di carattere locale.
- Locali episodi di intenso deflusso a seguito di occasionali fusioni del permafrost causate da grandi impatti meteoritici (non si era ancora raggiunto l'equilibrio dei 6,1 mB).

Questi tre effetti vanno visti comunque all'interno di un generale declino del ciclo dell'acqua causato dalla progressiva perdita di pressione atmosferica. In età Amazzoniana, al cessare dell'attività vulcanica, devono essersi stabilite definitivamente le condizioni di evaporazione precoce e di sublimazione che hanno portato alla scomparsa definitiva dell'acqua liquida. Tutto il vapore di cui ancora disponeva l'atmosfera non poteva far altro che nevicare ai poli formando l'attuale calotta inferiore di H<sub>2</sub>O, alimentando dunque un semiciclo privo di fase liquida. L'ulteriore abbassamento di temperatura ha quindi seppellito il ghiaccio d'acqua sotto una coltre di ghiaccio di CO<sub>2</sub>. Questo processo spiegherebbe anche i rilevamenti delle missioni Viking, che hanno evidenziato una maggiore quantità di acqua nella calotta boreale rispetto a quella australe.

In questa visione, le attuali condizioni di equilibrio intorno alla pressione critica rappresentano dunque l'arresto del ciclo dell'acqua. Un ciclo degenerato principalmente a causa dell'assottigliamento dell'atmosfera, con un effetto amplificato dal conseguente abbassamento della temperatura media sul quale non ha potuto neppure influire un'attività tettonico-vulcanica intensa come quella terrestre.

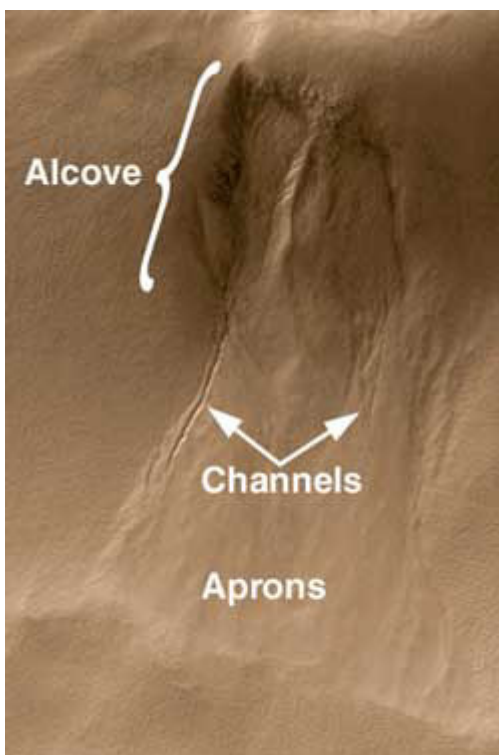
## **4.2 - TRACCE RECENTI**

Le tracce di acqua a più piccola scala sono i ruscellamenti di recentissima scoperta. Soltanto la risoluzione delle immagini MOC (fino a 1,4 m per pixel) ha potuto mostrare queste strutture. La prima pubblicazione ufficiale, nella quale si

rende nota la scoperta, è il famoso articolo apparso il 30 giugno 2000 sulla rivista *Science*, dopo una conferenza stampa indetta in gran fretta a causa di una fuga di notizie dagli effetti incontrollabili.

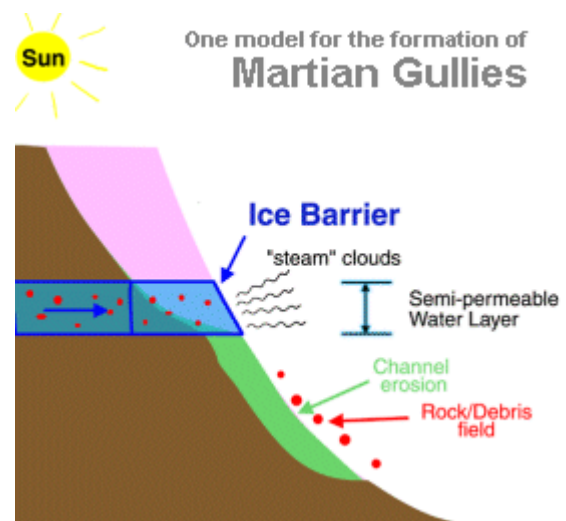
Si tratta di un fluido (certamente acqua) che sgorga su versanti ripidi, poche centinaia di metri al di sotto dell'orlo di canali, canyons o crateri meteoritici. Il ruscellamento causa un'erosione regressiva in prossimità della sorgente, tale da produrre delle nicchie denominate *alcove*. I corsi d'acqua sono generalmente associati in serie parallele di solchi verticali ma non di rado convergono in un unico collettore. Spesso alla base del pendio sono visibili i materiali rimossi dall'erosione apicale, a formare dei conoidi sul fondovalle.

Quelle che seguono sono tra le prime immagini pubblicate: una foto molto evidente e una sezione didattica (fig.15, fonte NASA):



*Fig. 15 - Una foto che evidenzia il fenomeno di ruscellamento e una sezione che lo descrive. (Fonte NASA)*

*Il ripido pendio è il versante esposto a sud di un cratere da impatto situato alla latitudine 55°S.*



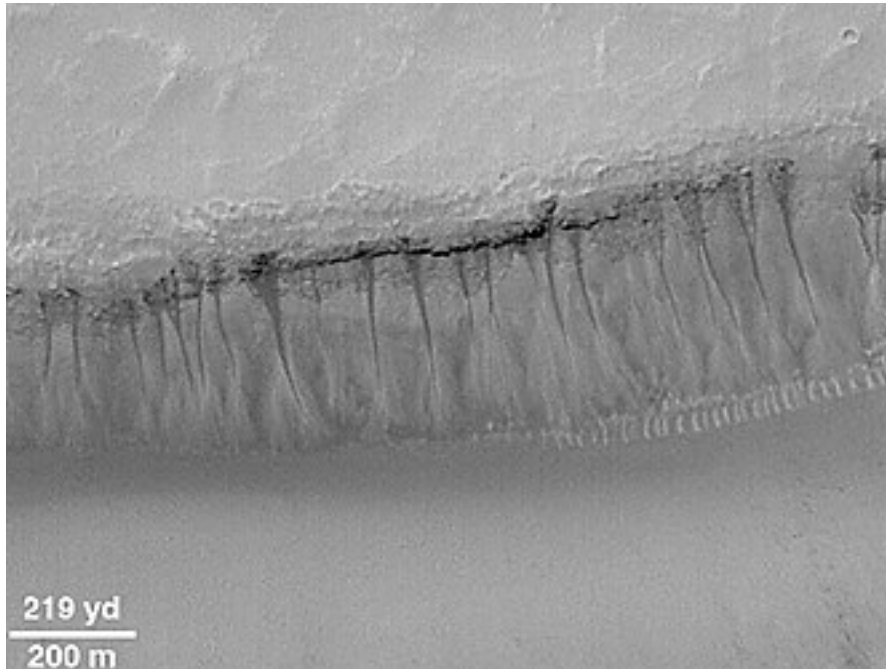
E' straordinario notare che, appena è stato possibile osservare il pianeta ad alta risoluzione, 250 immagini su 65.000 (120 differenti siti, lo 0,5% della mappatura HR) hanno mostrato queste morfologie. E' pure sorprendente (non per noi) che la maggior parte di queste tracce si trova nell'emisfero settentrionale a latitudini inaspettatamente alte: dai 30° ai 70° S, dove si prevedevano (NASA) temperature troppo basse per ammettere la presenza di acqua.

I ricercatori Malin e Edgett del MSSS<sup>9</sup> ritengono infatti possibile che temporanei e copiosi affioramenti di acqua liquida possano aver prodotto questi ruscelli ma

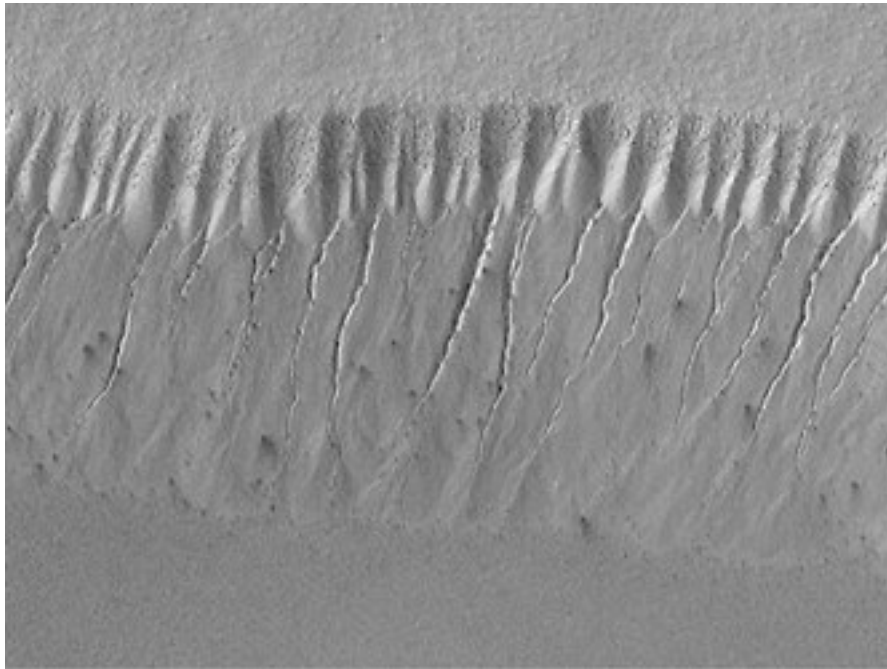
<sup>9</sup> I laboratori Malin (MSSS) sono quelli che hanno realizzato la fotocamera MOC e che curano l'acquisizione e l'elaborazione delle immagini.

nei loro modelli non riescono a spiegare la presenza di acqua in regioni così fredde, pur potendo con certezza escludere una fusione del permafrost da imputare ad attività vulcanica.

*Fig.16 - Due esempi di “ruscellamenti recenti”*



*Gorgonum Chaos: 37,9°S ; 170,2°W – L’erosione ha prodotto un solco lungo la linea delle sorgenti.*



*Polar Pit Walls: 70,7°S ; 355,7°W – Il materiale asportato a monte è subito depresso a valle.*

Essi ritengono tuttavia evidente che queste tracce (fig.16) risalgano a tempi relativamente recenti: da qualche milione di anni fa fino a letteralmente ieri. Stanno dunque studiando ipotesi per giustificare un clima differente appena qualche milione di anni fa, tirando in ballo ancora l'inclinazione dell'asse di rotazione, la sublimazione delle calotte polari, un effetto serra dovuto alla sospensione di particelle ghiacciate nell'atmosfera, ecc. In alternativa si invoca un effetto di abbassamento crioscopico per la presenza in soluzione di sali di sodio o acidi non comuni sul nostro pianeta, o addirittura se ne attribuisce l'origine a fuoriuscite di olii, la cui origine non-biologica è tuttavia difficile da dimostrare.

### 4.3 - TRACCE ATTUALI

Con questa definizione in realtà non si intende descrivere un ulteriore tipo di strutture ma quei fenomeni che si possono individuare nelle aree indicate dalla simulazione *RABDOMARTE*.

Il programma, come si è detto, fornisce indicazioni sulla fascia climatica in cui, allo stato attuale, possono ancora verificarsi le condizioni favorevoli all'intervallo liquido. Questa fascia è condizionata dalla latitudine e dalla quota:

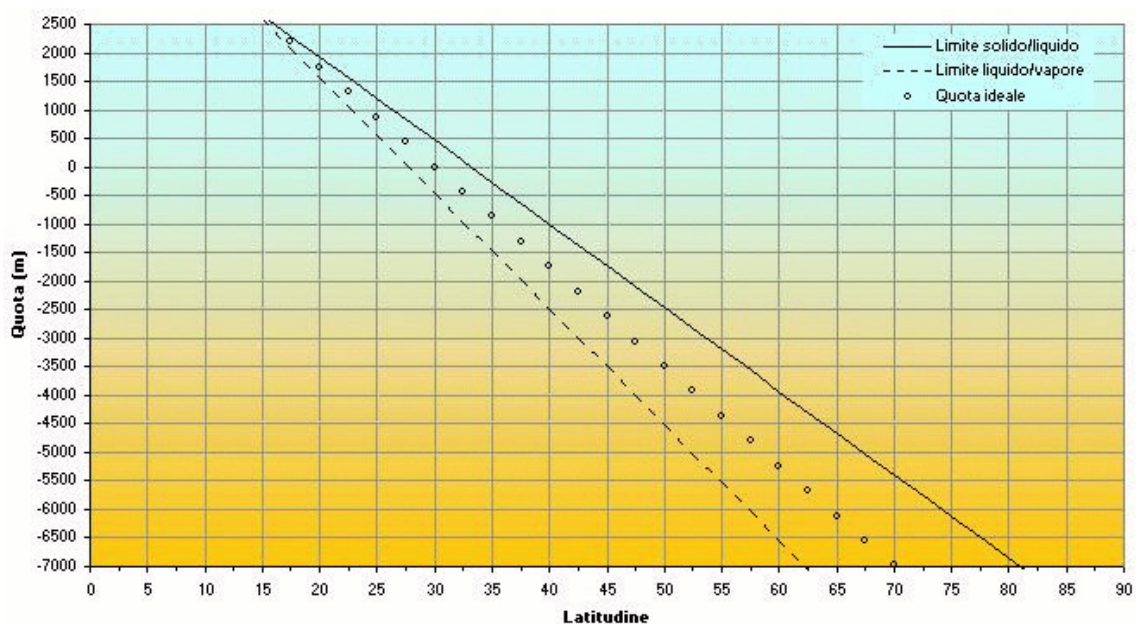


Fig. 17 - Schermata "Condizioni favorevoli" del programma *RABDOMARTE*

La prima cosa da notare è che le migliori condizioni richiedono quote molto basse (trovandosi maggiore temperatura e pressione) ma tuttavia non si verificano alle basse latitudini ma anzi l'intervallo altimetrico si allarga spostandosi verso i poli (fig.17).

La latitudine 30° presenta un dislivello massimo di 1 km, all'interno del quale l'acqua può mantenersi liquida. Questo valore rappresenta probabilmente un

requisito minimo per garantire una buona stabilità dell'acqua alle variazioni climatiche diurne e stagionali.

Questi dati suggeriscono di puntare la ricerca alle medie latitudini dell'emisfero Sud e a quelle medio-alte dell'emisfero Nord, dove però sarà necessario scendere all'interno di crateri, canyons e canali.

Seguendo queste indicazioni si è potuto individuare moltissimi siti che presentano caratteri interessanti e caratteristiche del tutto analoghe ai "ruscellamenti recenti", salvo che per la scala e la "qualità" piuttosto deludenti. In realtà nella nostra ricerca sono stati individuati probabili ruscellamenti anche nell'emisfero settentrionale (quasi tutti quelli pubblicizzati dalla NASA provengono dagli altopiani meridionali). Si è anche osservato però che nei bacini settentrionali la maggior parte dei versanti esposti a Nord sono stati fotografati in ombra, probabilmente a causa della stagione. Forse è anche per questo motivo che, attualmente, gli esempi più eclatanti sono stati osservati in un solo emisfero. Tuttavia è evidentissimo che tutti i ruscellamenti già individuati dagli operatori NASA corrispondono perfettamente al target del programma (regolato sugli input di default, senza alcun ritocco). E' chiaro che gli operatori NASA hanno avuto a disposizione tutta la produzione fotografica, comprese le foto ancora inedite<sup>10</sup>, ed hanno pubblicato come esempi di ruscellamento quelle più evidenti e suggestive.

Si potrebbe pensare quindi che abbiamo solo scoperto l'acqua calda. In realtà, come vedremo, si è davvero dimostrata l'esistenza dell'acqua fredda...

Infatti il modello di *RABDOMARTE* indica palesemente i siti già scoperti ma è anche in grado di spiegare tutti i fenomeni osservabili al di là delle perplessità che hanno indotto nei ricercatori che li hanno ottenuti "alla cieca". Sembra anzi (e lo vedremo in seguito) che più i fenomeni appaiono paradossali agli addetti ai lavori, più risultano aderenti al modello di *RABDOMARTE*.

Come è evidenziato dal grafico (fig.17) le zone favorevoli sono delimitate in senso verticale dall'equilibrio fisico solido/liquido in alto e dall'equilibrio liquido/vapore in basso. Ciò significa che, alla medesima latitudine, a quote relativamente alte l'acqua può essere presente soltanto allo stato di ghiaccio e può al massimo sublimare (situazione standard). Per un ristretto intervallo di altitudini l'acqua potrà anche liquefare (in particolari condizioni) ma non può mai scendere al di sotto di una quota limite senza evaporare. L'esistenza di un bacino di raccolta è dunque subordinata all'esistenza di un letto impermeabile all'interno dell'intervallo liquido.

---

<sup>10</sup> La pubblicazione e la libera diffusione delle immagini è concessa soltanto 6 mesi dopo l'acquisizione, salvo i soggetti particolarmente significativi (come questi) che, selezionati, vengono rilasciati in via eccezionale con tanto di descrizione e commenti.



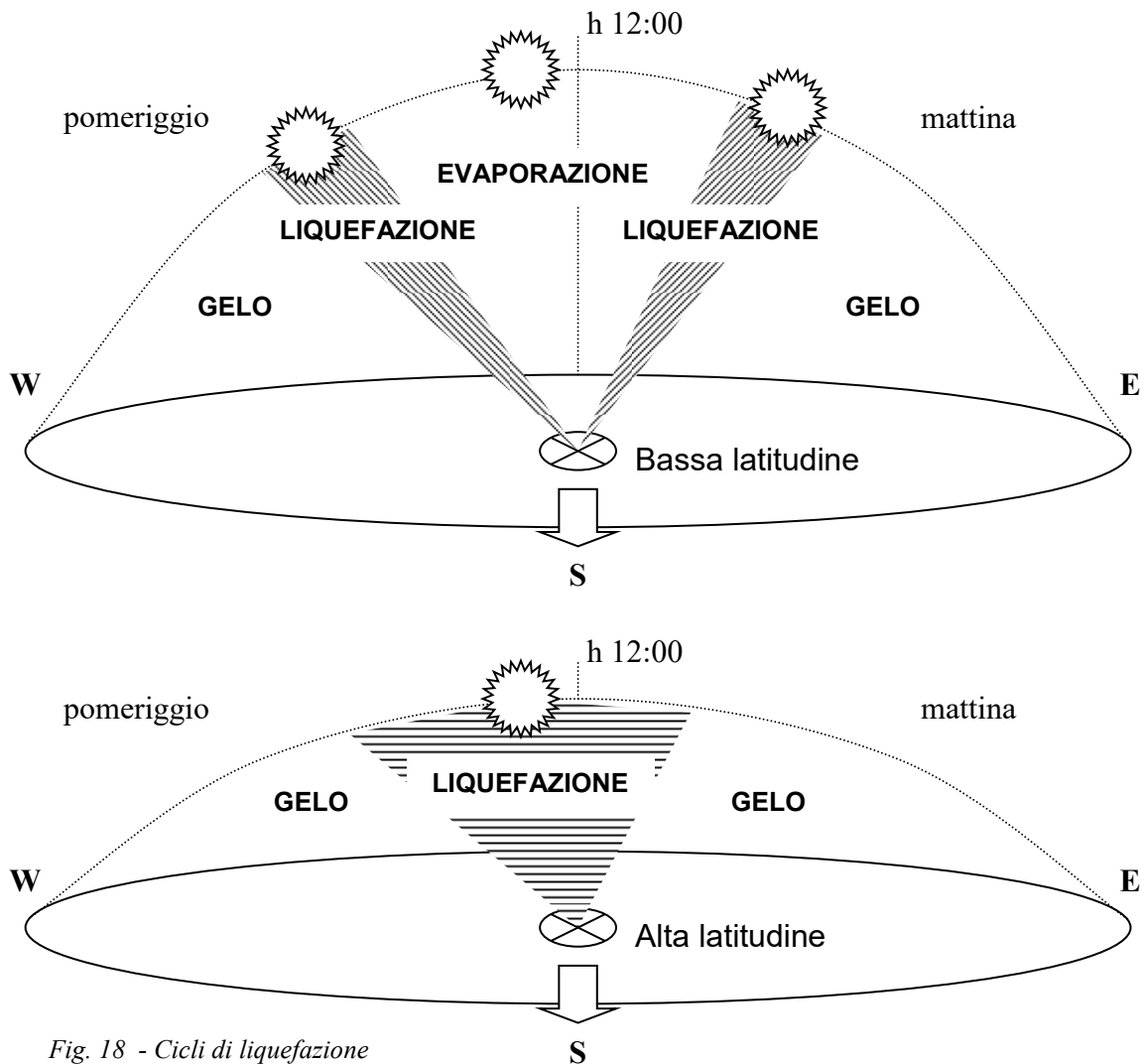


Fig. 18 - Cicli di liquefazione

Si era già detto a proposito del modello fisico (cfr. pag.16) che queste condizioni però sussistono soltanto con carattere stagionale ma, soprattutto, sono estremamente mutevoli nell'arco della giornata. Inoltre l'insolazione diretta ha una grande influenza sul microclima locale favorendo le condizioni di ebollizione e rendendo generalmente molto difficile la permanenza di un bacino di raccolta.

L'influenza della temperatura diurna locale sui cicli di liquefazione può essere sintetizzata nello schema della (fig.18) disegnato per l'emisfero meridionale.

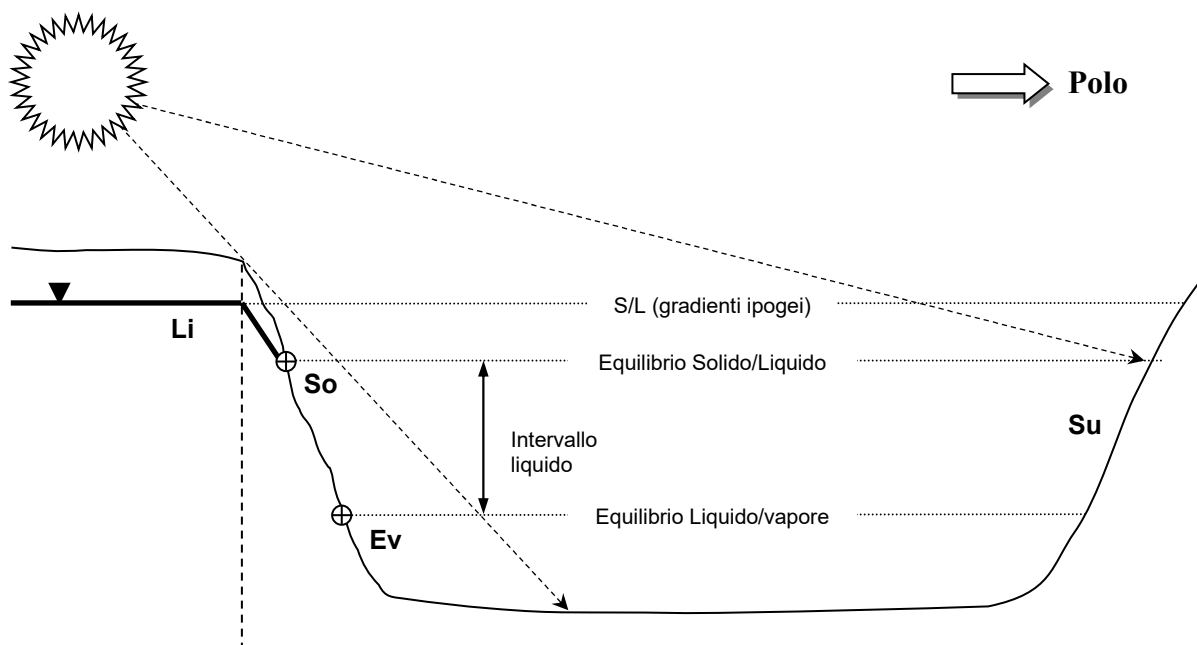


Fig. 19 - Modello generale delle condizioni di liquefazione. La prima condizione favorevole si manifesta in ambiente ipogeo, a causa dei più rapido incremento dei gradienti. L'acqua viene alla luce là dove trova un equilibrio tra gradienti ipogei (che regrediscono a causa del pendio) e i gradienti atmosferici. In corrispondenza dell'equilibrio atmosferico Solido/Liquido, l'acqua viene alla luce, a condizione che il versante sia riparato dall'esposizione solare. Occorre infatti che la temperatura non salga oltre quella teorica. Il ruscellamento avviene all'interno dell'intervallo liquido. Raggiunta la quota dell'equilibrio atmosferico Liquido/Vapore, l'acqua evapora e tutti i canali cessano quasi simultaneamente (con un ritardo proporzionale alla portata). Sul versante opposto l'acqua può soltanto sublimare. [ Li = liquefazione ; So = sorgente ; Ev = evaporazione ; Su = sublimazione ]

Questi episodi di liquefazione avvengono nell'ambito di una quota compatibile all'intervallo liquido e subordinatamente ad una corretta esposizione dei versanti, che durante questi periodi non devono essere direttamente colpiti dalla radiazione solare. Ciò che avviene durante i periodi di liquefazione è visibile nella fig. 19 in una sezione molto schematica.

Vedremo tra breve sulle immagini della sonda MGS che questo schema (derivato da precisi calcoli basati sulle attuali condizioni ambientali) può essere adattato con successo a tutti i casi di ruscellamento "recente", dimostrando che non sono affatto antichi.

Elencheremo ora quegli elementi che accomunano tutti i fenomeni osservabili per interpretarli in una chiave basata sul nostro modello. Successivamente studieremo nei dettagli alcuni siti tra i più significativi, dimostrando l'aderenza del modello.

- I versanti interessati sono ripidi ed esposti al Nord nell'emisfero nord e al Sud nell'emisfero sud. Il fenomeno evidentemente richiede la minore

insolazione ovvero la minima temperatura, che altrimenti causerebbe immediatamente la sublimazione.

- Le sorgenti sgorgano qualche centinaia di metri al di sotto dell'orlo della scarpata. La profondità dell'acqua nel terreno non può superare un certo limite a causa dei gradienti ipogei di pressione e temperatura che sono più elevati di quelli atmosferici.
- Le sorgenti seguono una linea orizzontale non necessariamente parallela al margine del pendio. Corrispondono evidentemente non tanto al letto di un bacino impermeabile ma alla quota di equilibrio solido/liquido.
- Le sorgenti sono causa di erosione regressiva che si manifesta con nicchie di distacco. L'estensione verticale della nicchia corrisponde pressappoco all'intervallo liquido nel terreno. Al di sotto di essa l'erosione è lineare e incide i canali.
- Ogni serie di canali presenta solchi lineari e della medesima lunghezza. Talvolta, se il versante è concavo, più canali confluiscono in un collettore, ma mai un singolo canale prosegue autonomamente per distanze maggiori degli altri della stessa serie. La lunghezza dei canali è condizionata infatti dall'estensione verticale dell'intervallo liquido in atmosfera. Ogni serie di canali ha una determinata estensione che è funzione dell'esposizione media ai raggi solari. I versanti più ombreggiati presentano i canali di massima estensione.
- La profondità dell'incisione dei canali non dipende soltanto dalla pendenza e dalla natura del versante ma, su tratti omogenei, diminuisce comunque al diminuire della quota, svanendo del tutto in corrispondenza del livello di equilibrio Liquido/Vapore.
- A parità di condizioni microclimatiche, tutti i canali sublimano simultaneamente alla medesima quota. Piccole differenze sono imputabili alla differente portata.
- Al termine dei canali si formano spesso conoidi di deposizione. I conoidi sono alti e stretti, con pendenze prossime al limite di riposo del materiale<sup>11</sup>. Piuttosto che a conoidi di deiezione, assomigliano a depositi di frana, morfologicamente compatibili con la nicchia di distacco ma molto distanti da essa. La loro natura infatti non è imputabile ad una progressiva perdita di energia legata alla variazione della pendenza ma piuttosto ad una precipitazione gravitativa causata dall'improvvisa mancanza di supporto del fluido (evaporato).

---

<sup>11</sup> L'angolo di riposo su Marte ha valori è più alti di quelli "abituali" a causa della minore forza di gravità che agisce sul il materiale.

- I conoidi non ricoprono i canali (con poche e giustificate eccezioni) e raramente i canali incidono i depositi. Il deposito compare solitamente allo svanire del canale. Occasionalmente, là dove le condizioni climatiche presentano una certa variabilità, il canale può eccezionalmente incidere il conoide per un brevissimo tratto.

Nella figura 20 vengono riassunte queste caratteristiche in uno schema più particolareggiato del precedente dal punto di vista morfologico.

Attraverso una rassegna di schede monografiche, vediamo dunque di analizzare nei dettagli alcuni casi tra quelli maggiormente pubblicizzati (che sono i più evidenti) selezionati non per essere conformi al nostro modello (lo sono tutti) ma per la capacità di evidenziare particolari aspetti o varianti del modello stesso.

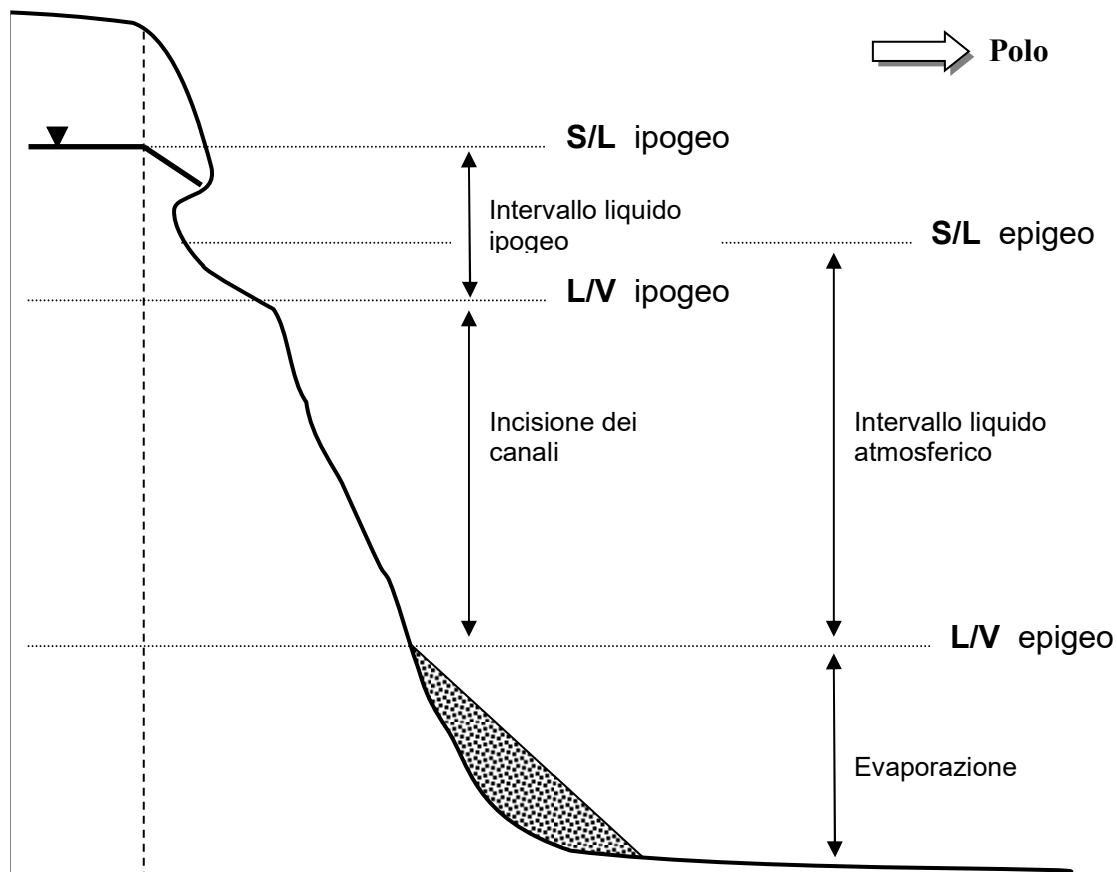


Fig. 20 - Profilo dei versanti interessati da ruscellamento. Sono indicati i livelli di equilibrio solido-liquido (S/L) e liquido-vapore (L/V) sia in ambiente aereo che ipogeo.

In tutte le foto verrà indicata la direzione di un polo, che sarà quello corrispondente all'emisfero in cui è localizzato il sito. Questo criterio è stato adottato per evidenziare la tendenza delle sorgenti ad affiorare sui versanti meno esposti all'insolazione, cioè nella direzione della freccia, appunto.

La direzione della luce è indicata da una piccola freccia bianca ma non è necessariamente la stessa su tutte le foto dello stesso soggetto. Infatti le immagini a largo campo che introducono la discussione nel contesto geografico appartengono al repertorio Viking mentre quelle ad alta risoluzione provengono dall'archivio MGS.

Tutte le immagini presentate sono accompagnate dal relativo numero di codice (es: "nirgal\_cstx\_100") per poter essere reperite in versione originale negli archivi NASA. Le foto stampate qui infatti non rendono giustizia alla straordinaria risoluzione della fotocamera MOC.

Tutte le foto sorgente delle immagini qui utilizzate sono tratte dalla release:

**"MOC Images Suggest Recent Sources of Liquid Water on Mars"**

( MOC2-234 to MOC2-245 )

Publicata sul sito WEB:

**MSSS:** [http://www.msss.com/moc\\_gallery](http://www.msss.com/moc_gallery)

e sono state realizzate da:

**NASA / GPL / Malin Space Science System**

M. C. Malin, K. S. Edgett, S. D. Davis, M. A. Caplinger, E. Jensen,  
K. D. Supulver, J. Sandoval, L. Posiolova, and R. Zimdar

Malin Space Science Systems and the California Institute of Technology built the Mars Orbiter Camera (MOC) using spare hardware from the Mars Observer mission. MSSS operates the camera from its facilities in San Diego, CA. The Jet Propulsion Laboratory's Mars Surveyor Operations Project operates the Mars Global Surveyor spacecraft with its industrial partner, Lockheed Martin Astronautics, from facilities in Pasadena, CA and Denver, CO.

**Nirgal Vallis ( 29.7°S ; 38,6°W )**: ci troviamo su un altopiano meridionale compreso tra la foce della Valles Marineris (a nord) e il grande cratere Argyre (a sud). Qui scorre da NW verso SE l'antico canale *Nirgal*, già osservato a proposito dell'attività idrologica di età Esperiana. Un'inquadratura ad alta risoluzione (area evidenziata dal riquadro bianco nella fig.21) ha colto i particolari di un versante esposto (c.v.d.) verso Sud che presenta evidenti tracce di ruscellamento.

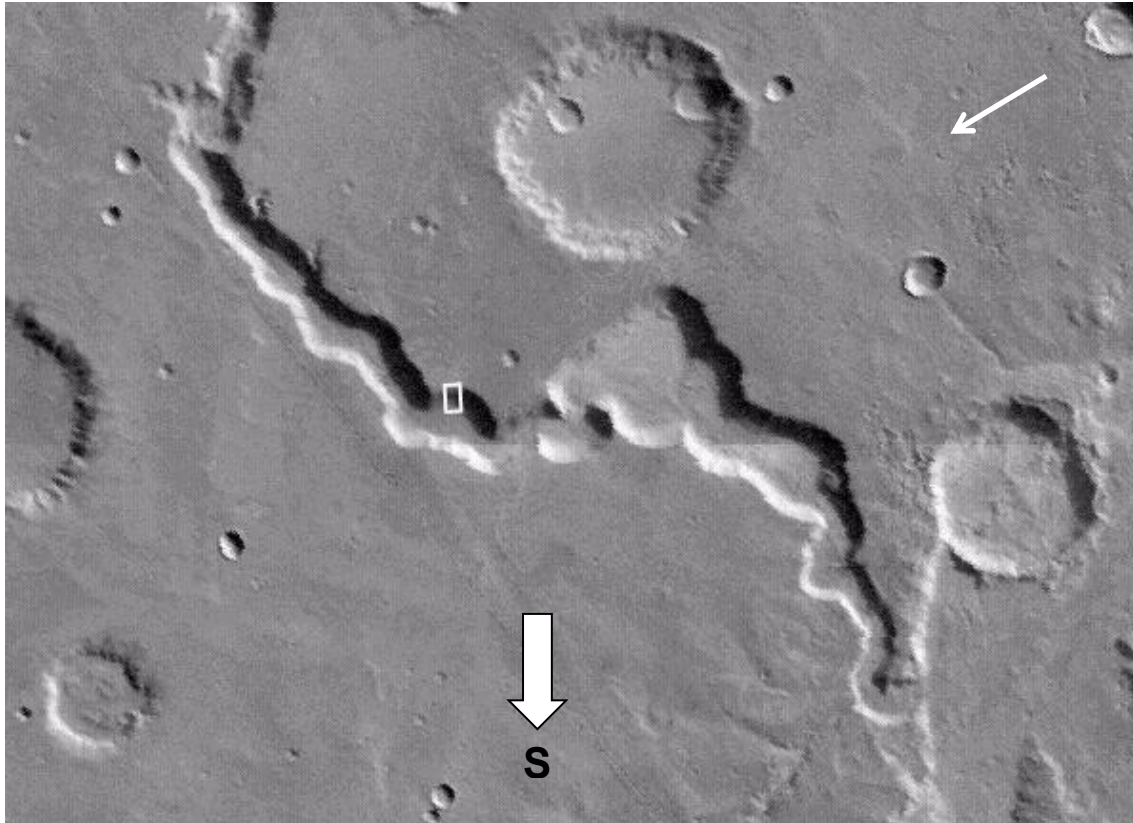


Fig.21 - "nirgal\_cstx\_100"

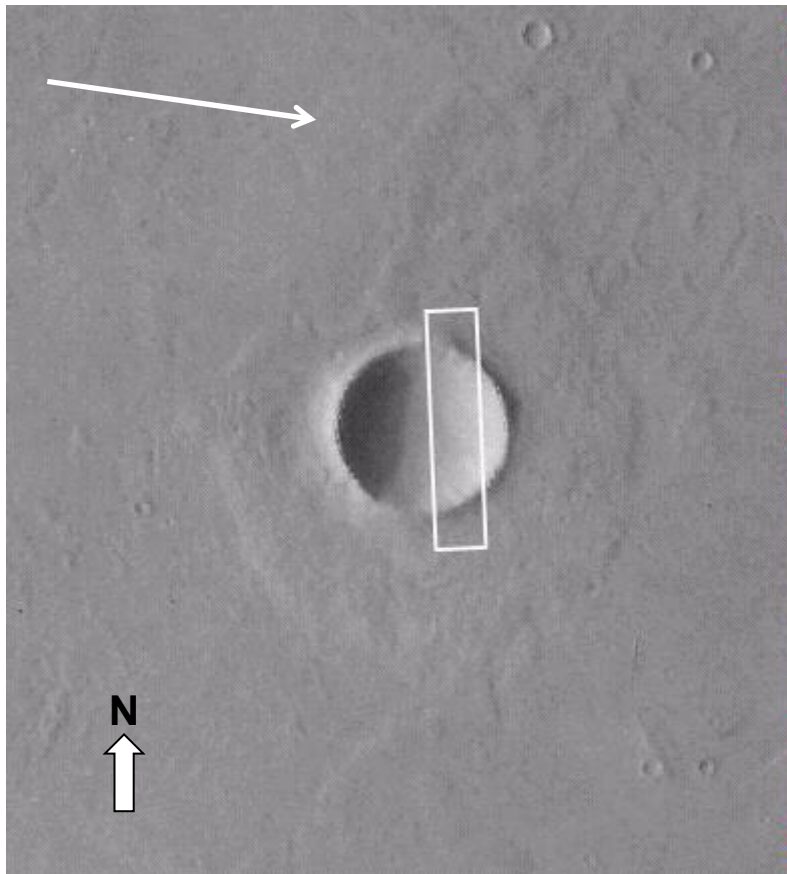
L'immagine ad alta risoluzione (illuminata dall'alto a sinistra) mostra una serie di ruscellamenti che partono tutti dalla stessa quota, corrispondente presumibilmente al livello di equilibrio S/L. La lunghezza dei tracciati, in questo caso variabile, ha un massimo di circa 1 km. Notare però che se la parte destra è orientata esattamente a sud, nel lato sinistro dell'inquadratura il versante è meno ripido e maggiormente esposto verso est. Si può dedurre ciò dall'inclinazione verso destra dei tracciati, dalla base del pendio e, sulla foto a largo campo, dall'andamento generale del versante e dall'orientamento del riquadro. Per una latitudine così bassa, proprio la maggiore esposizione alla luce solare è probabilmente la causa della maggiore lunghezza dei canali a destra rispetto alla serie sul lato destro. Come si può vedere chiaramente, l'accorciamento è progressivo e segue l'esposizione del versante. E' estremamente importante notare anche che i conoidi dei canali più lunghi sembrano coprire le dune eoliche del fondovalle, dimostrando di avere una recentissima età.

*Fig.22 - "Nirgal\_100"*



**Cratere da impatto in Elysium Planitia ( 36,7°N ; 252,3°W ):** ci troviamo questa volta sul fondo di un bacino settentrionale. Il cratere meteoritico, dal diametro di 10 km, potrebbe essere del tipo a piedistallo (la foto è poco contrastata ma il cratere sembra sormontare piccolo altopiano concentrico). Se questa fosse davvero la sua natura si può facilmente giustificare la presenza di permafrost nel sottosuolo. La foto ad alta risoluzione riesce ad inquadrare due versanti opposti orientati in direzione SW e NW.

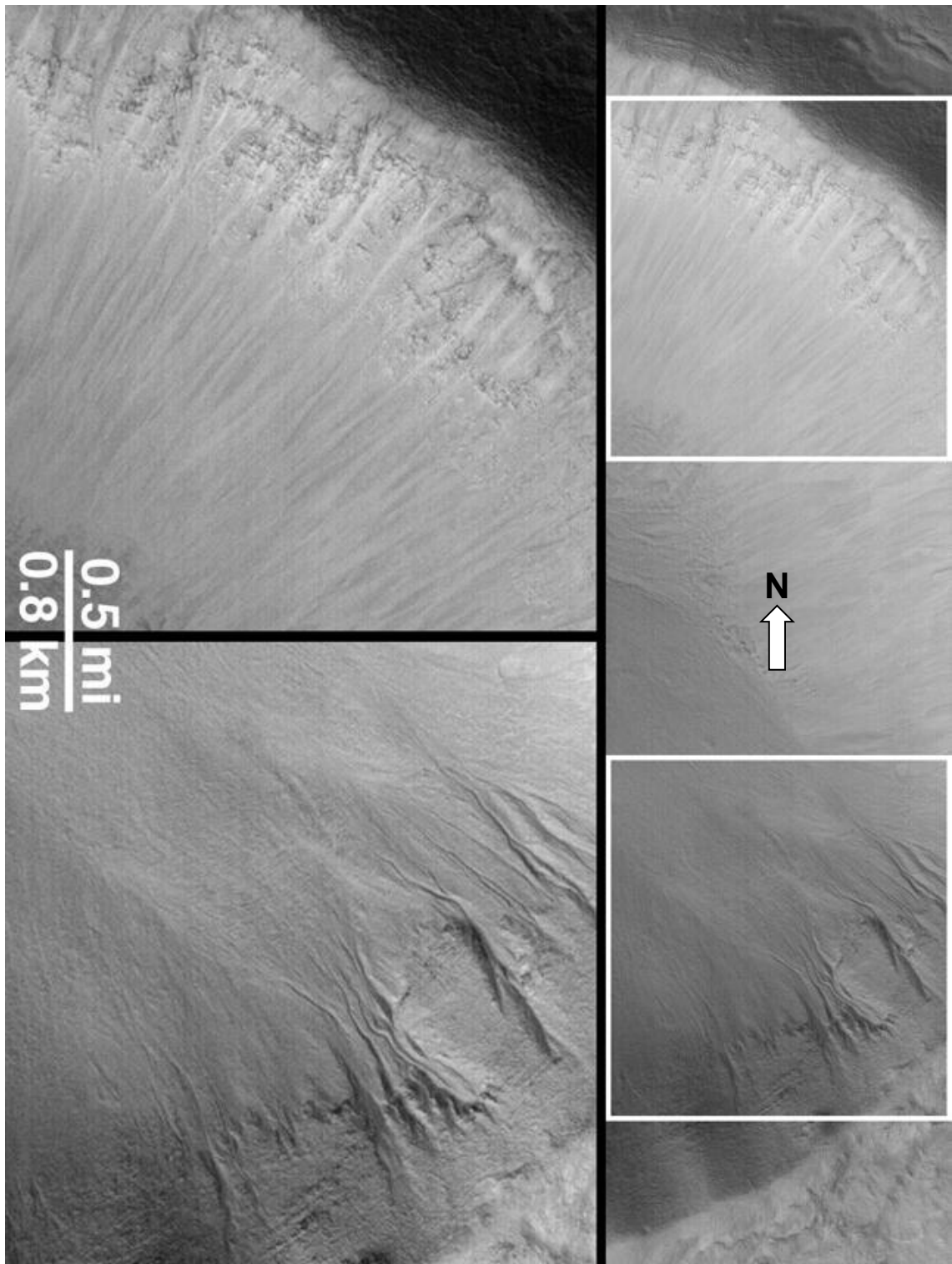
*Fig.23 - "elysium\_cntx\_573A14"*



L'area visualizzata a sinistra ha un'estensione di 3x14 km. Due particolari sono stati ulteriormente ingranditi per evidenziare la differenza tra i due versanti: quello esposto alla maggiore insolazione (in questo caso SW) presenta normali tracce di cedimento mentre quello meno esposto (NW) mostra i famosi ruscellamenti. Si potrebbe obiettare che in fin dei conti questi canali sono molto più esposti del caso precedente in cui tendevano a svanire alla minima variazione dalla direzione NS. E' anche vero però che qui ci troviamo non più sugli altopiani ma in un bacino dell'oceano settentrionale. La latitudine più alta e la quota notevolmente più bassa sono caratteristiche che conferiscono una più



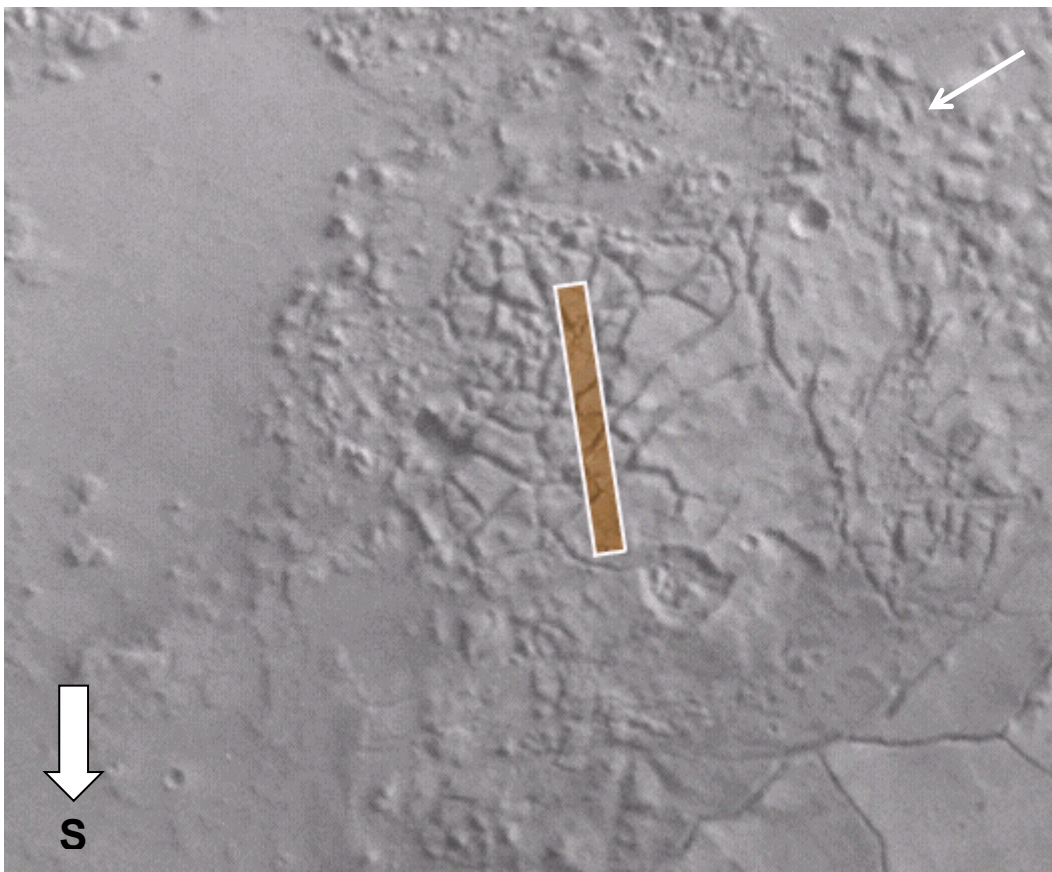
ampia stabilità delle condizioni favorevoli (vedere grafico 17). Notare che invece questa foto è stata presentata come esempio di “incongruenza” poiché dimostra che in entrambi gli emisferi i ruscelli sono rivolti nella direzione “sbagliata”.



*Fig.24 - “elysium\_fig”*

**Gorgonum Chaos ( 37,5°S ; 170,5°W )** : siamo tornati sugli altipiani meridionali, in uno dei caratteristici “terreni caotici” osservati sulla superficie marziana già dalla missione Mariner 9. Si tratta, in generale, di superfici fratturate in zolle visibilmente pendenti verso quote più basse degli altipiani da cui sembrano staccarsi. Il meccanismo di formazione è controverso ma si attribuisce generalmente a cedimenti progressivi di terreni ad alto contenuto di ghiaccio nel sottosuolo. Le zolle delimitano canali all’interno dei quali soltanto la missione MGS ha potuto scrutare. Qui la presenza del permafrost è quasi scontata, come pure quella dei canali, considerando anche la latitudine e una quota relativamente bassa (per gli altipiani meridionali).

*Fig.25 - “gorgonum\_cntx\_100”*



I ruscelli infatti ci sono (fig.26, ritagliata dalla striscia evidenziata) e si può notare molto chiaramente come la lunghezza massima corrisponde proprio ai versanti rivolti con più precisione in direzione Sud e diminuisce gradatamente, seguendo le sinuosità, al variare delle esposizioni. Il particolare più interessante però è un altro, evidenziato proprio dalla particolare natura di questi terreni.



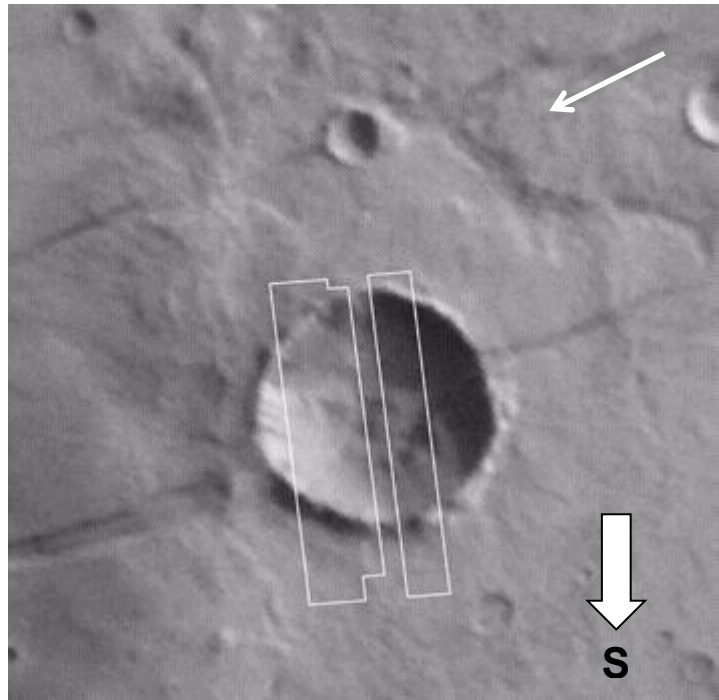
*Fig.26 - " Fig.25 - "gorgonum2\_bw50"*

Se non ci si lascia ingannare dalla pendenza della valle centrale, che scende in direzione SE, si può notare che la superficie del blocco a destra immerge in realtà in direzione SW (lo si evince dalla confluenza della valle laterale).

Si possono vedere inoltre (indicati dalle frecce) degli speroni rocciosi che corrispondono a strati più resistenti all'erosione. Facendo riferimento a queste rupi si può notare che nella "zolla" a destra la linea delle sorgenti non è parallela alla superficie inclinata dell'altopiano ma probabilmente orizzontale, convergendo con la superficie stessa proprio a NW. Questo supporta l'ipotesi che la linea delle sorgenti corrisponde in realtà alla quota dell'equilibrio Solido/Liquido piuttosto che ad un letto impermeabile.

In una regione così ricca di ghiaccio, quasi certamente l'acqua sgorga anche dai versanti mal esposti (una banda "sospetta" è indicata dalla freccia più piccola e contrassegnata dalla lettera B) ma sublima troppo facilmente, non consentendo la formazione dei canali di scolo. In queste circostanze l'erosione è più uniforme e i depositi, questa volta prismatici, iniziano subito sotto la linea delle sorgenti.

**Gorgonum Crater ( 37,4°S ; 168°W )**: siamo rimasti nella stessa regione, non lontano dai terreni caotici, ma questa volta entriamo all'interno di un cratere da impatto del diametro di 12 km. Questo sito è molto interessante perché mette il nostro modello a dura prova ma ne conferma il successo.



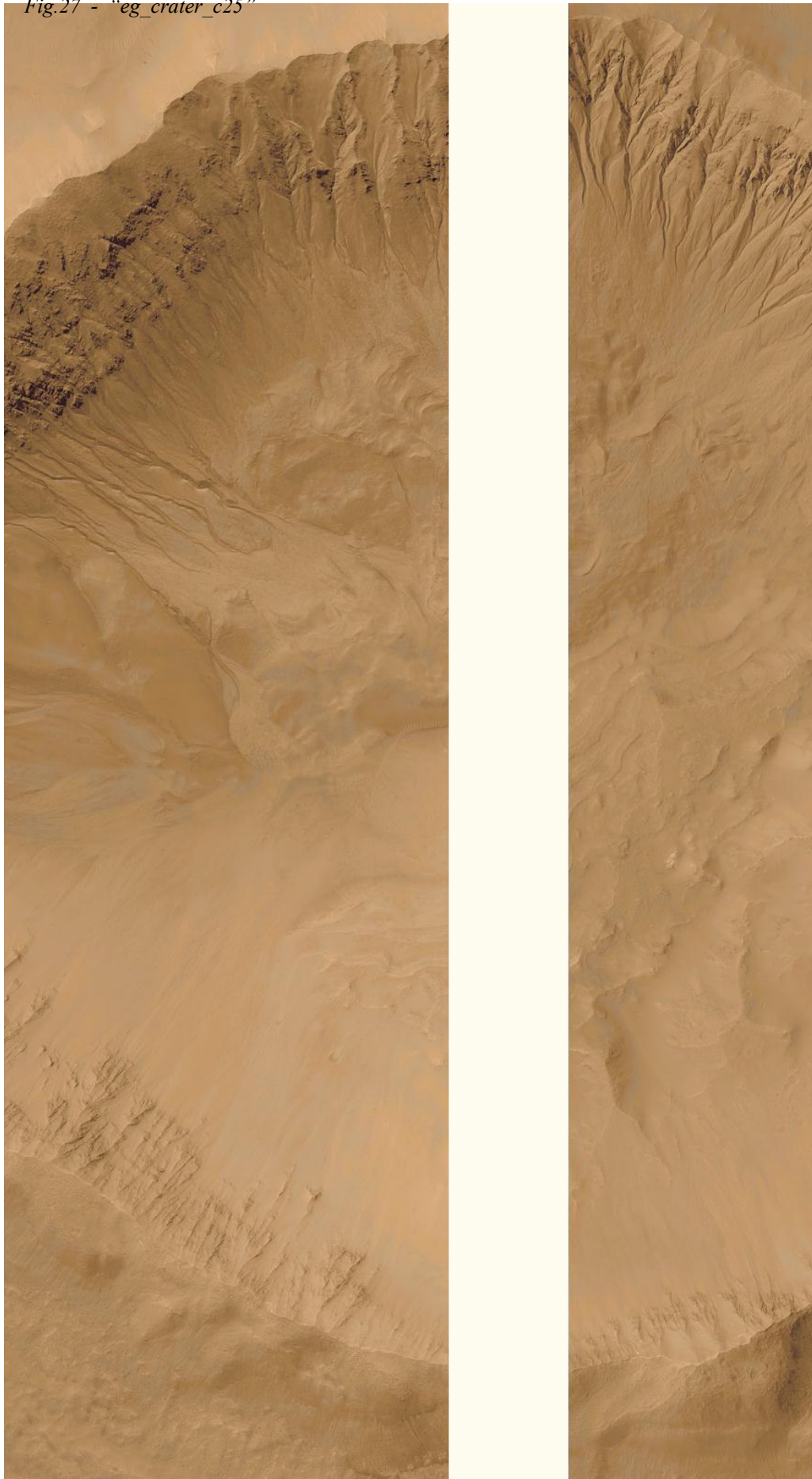
*Fig.26 - "eg\_crater\_cntx\_50"*

*Nei riquadri le fasce fotografate ad alta risoluzione*

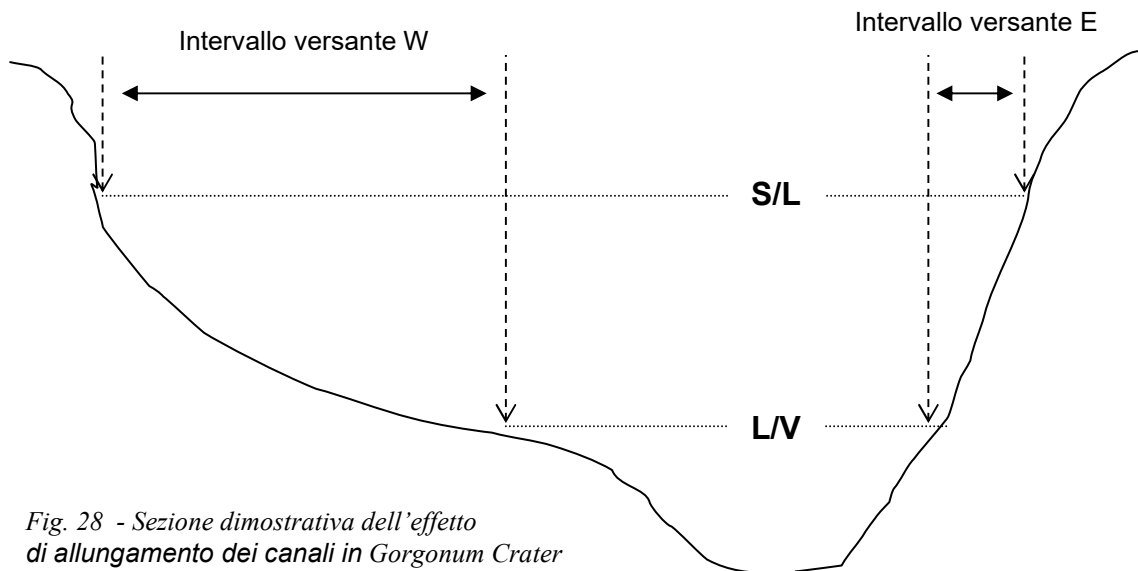
Le due immagini ad alta risoluzione (fig.27) mostrano chiaramente che i ruscelli sgorgano soltanto sotto l'arcata superiore (esposta a sud) e sono del tutto assenti sotto l'arcata inferiore (più esposta al sole) caratterizzata da semplice franamento. Però è anche evidente che i ruscelli del versante W sono più lunghi di tutti gli altri e addirittura, per la prima volta, vediamo un tracciato incidere profondamente il proprio deposito e proseguire oltre. Come si spiega?

In realtà non bisogna lasciarsi ingannare dall'appiattimento dell'immagine, tipico delle riprese a stretto campo, né dalla falsa prospettiva dell'angolo di ripresa. Osservando molto attentamente si può notare infatti che il versante W è notevolmente meno ripido degli altri e costituito da una ingente massa detritica che invade il centro del cratere. La cresta del cratere in quella zona presenta infatti una parete rupestre scoperta mentre nelle altre zone è evidente una copertura sormontata da dune (che caratterizzano tutto il terreno circostante).

Fig.27 - "eg\_crater\_c25"

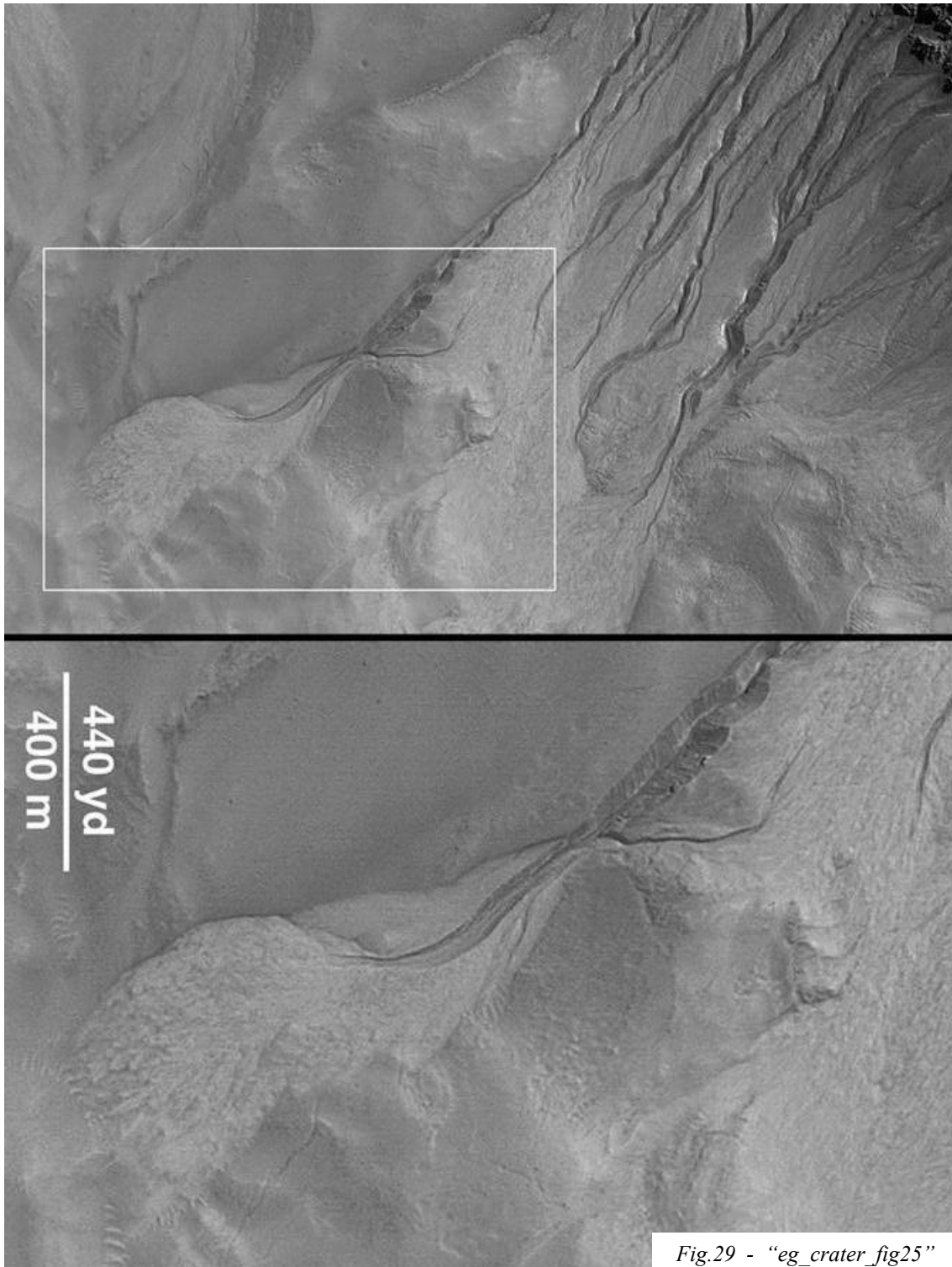


La bassa pendenza del versante W è anche evidenziata dal reticolo orografico, ben diverso dal pattern lineare dei canali ripidi. In conclusione la differenza è semplicemente nel fatto che il versante W, a causa della bassa inclinazione, interseca l'intervallo di liquidità per una maggiore estensione, concedendo una maggiore lunghezza ai suoi canali. La sezione qui sotto schematizza la situazione:



*Fig. 28 - Sezione dimostrativa dell'effetto di allungamento dei canali in Gorgonum Crater*

Il secondo problema era il canale più lungo della serie W. Esso si estende ancora oltre, incidendo parzialmente anche il proprio conoide. In realtà questo canale scorre al margine Sud della lingua detritica su cui sono adagiati gli altri ruscelli della serie W. Rimanendo sotto il margine prima di svanire rimane protetto dall'esposizione solare (notare inoltre la profondità del solco), quindi addirittura scivola lungo una vallecola che vira proprio in direzione Sud, lungo la quale è dunque in grado di proseguire e di depositare il suo conoide, chiaramente rivolto a Sud. La fig.29 mostra un ulteriore ingrandimento. Notare anche la confluenza di un piccolo tributario nasce da una risorgenza sotto il detrito e percorre proprio il lato più ripido e rivolto a Sud. Il tratto in cui successivamente viene inciso il conoide è poi proprio la zona di flesso in cui l'esposizione sta variando dall'Est al Sud. E' evidente che per qualche periodo l'insolazione da W non consente al torrente di proseguire oltre il flesso mentre in altri, l'insolazione da N e da E gli sono favorevoli per un ulteriore tratto, lungo il quale erode il suo precedente deposito.



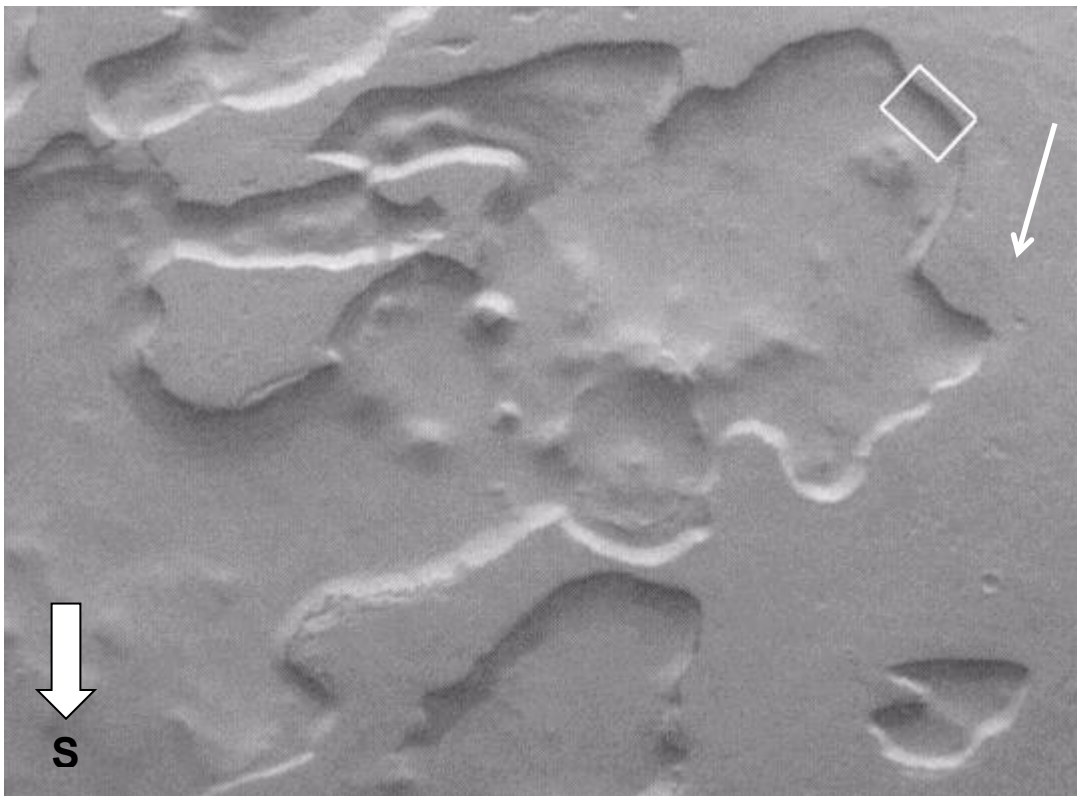
*Fig.29 - "eg\_crater\_fig25"*

L'ultima osservazione che facciamo è anche l'unico commento deduttivo riportato dalla NASA a proposito di queste foto: l'intera area di 12 km di diametro non presenta nessun cratere da impatto (a parte quello grande che la contiene) e quindi si deve ritenere "relativamente" recente.

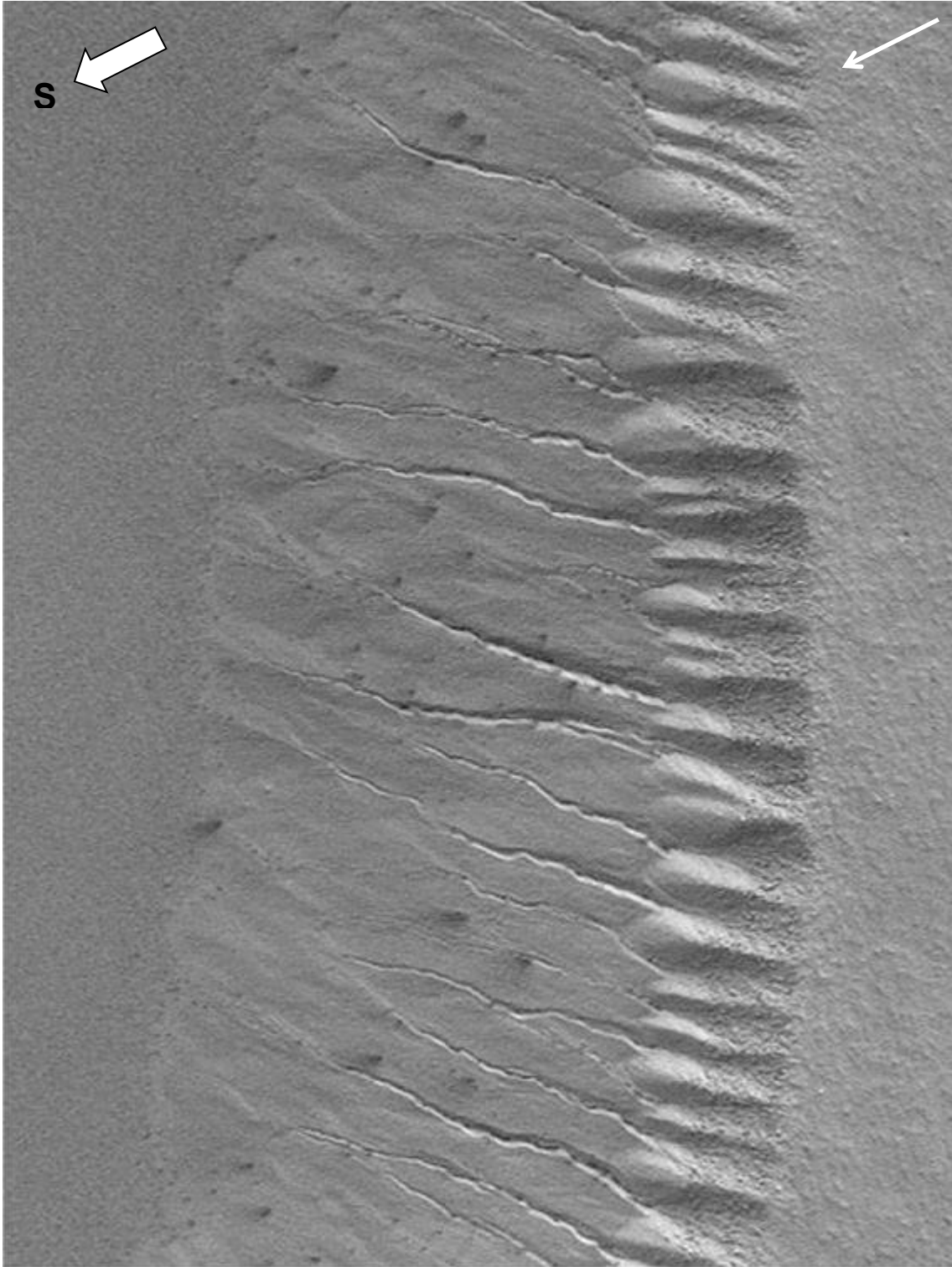


**Polar Pit Walls ( 70,7°S ; 355,7°W ):** ci troviamo in una zona piuttosto depressa dei terreni settentrionali ad una latitudine estremamente alta, praticamente entro il circolo polare Sud. Naturalmente fenomeni sorgivi appaiono paradossali a chi osserva solo latitudine e temperatura media. Le temperature infatti sono molto basse ma è pur vero che nei mesi estivi l'insolazione è piuttosto scarsa e inoltre la quota è sufficiente bassa da garantire, in particolari periodi, una sorgività perfino su versanti non perfettamente esposti al Sud.

*Fig.30 - "sp\_pit\_cntx\_100"*

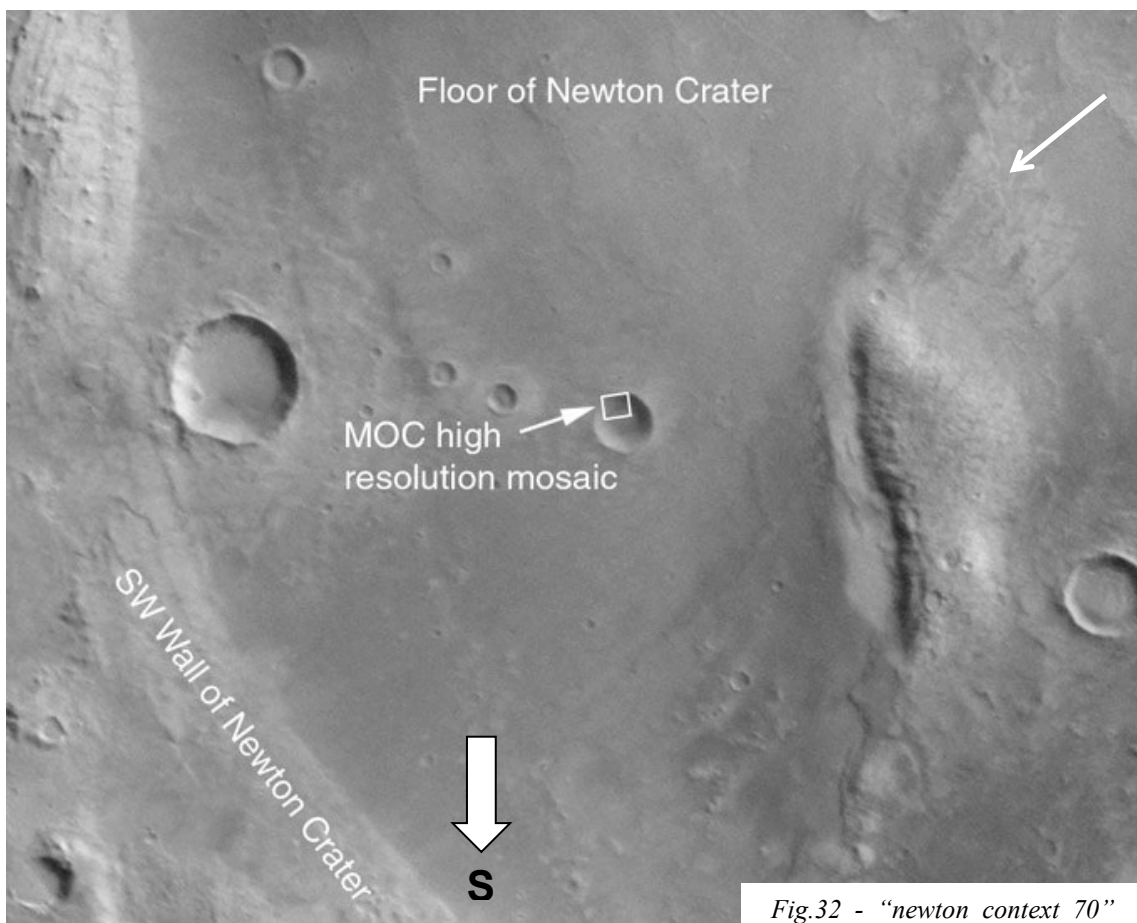


L'erosione regressiva causa delle nicchie di crollo e il materiale convogliato dai canali di scolo forma dei conoidi ai piedi del tracciato. In questa foto si può notare bene come, nonostante la pendenza uniforme, l'incisione si presenta via via meno marcata fino a scomparire del tutto in corrispondenza dell'apice dei conoidi. I conoidi non seppelliscono i canali, che raramente li incidono e per un brevissimo tratto. La deposizione non è causata tanto da una diminuzione di energia del flusso quanto da una vera e propria precipitazione gravitativa a causa dell'improvvisa scomparsa del mezzo di trasporto.



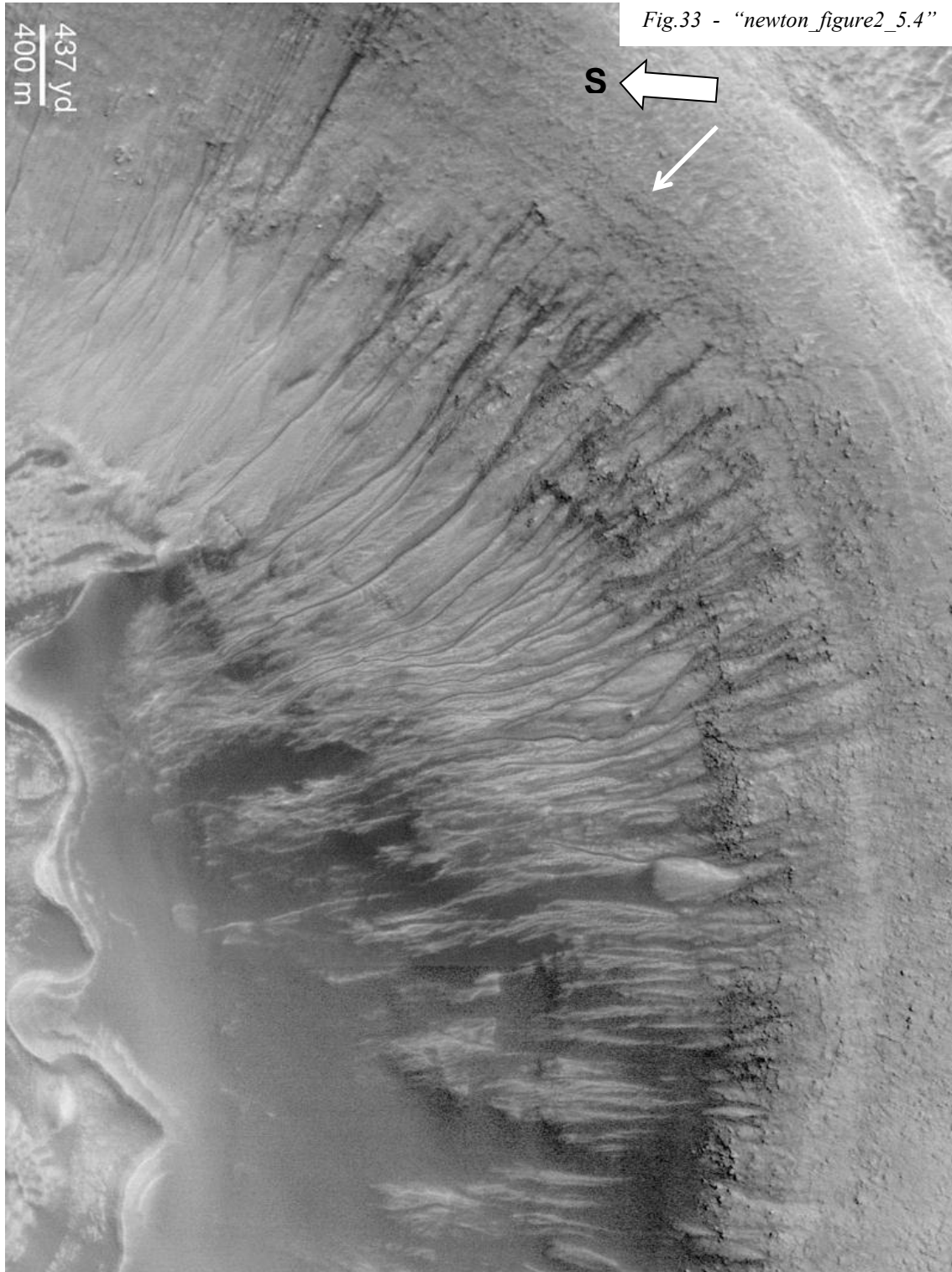
*Fig.31 - "sp\_pit\_100"*

**Cratere da impatto interno al Newton Crater ( 41,1°S ; 159,8°W ):** stiamo osservando un cratere da impatto di 7 km di diametro collocato all'interno del grande cratere Newton, anch'esso da impatto ma talmente esteso (287 km di diametro) da essere databile più di 3 miliardi di anni (stima NASA). Ciò che troveremo qui dentro è la chiave di un problema che non era stato ancora affrontato: quello dei bacini di raccolta delle acque sorgive. Il cratere Newton, essendo di età Esperia, deve aver rappresentato un bacino endoerico quando sull'altopiano poteva ancora piovere. Poteva sicuramente essere stato un lago e non ci sarebbe da meravigliarsi se il fondo fosse attualmente costituito da sedimenti ghiacciati. Un secondo impatto ha poi scavato un piccolo bacino ancor più profondo, scoprendo il permafrost e consentendone la fusione.



Il fondo di un antico cratere da impatto è già un'area considerevolmente depressa per la media degli altopiani meridionali, ma cosa accadrebbe se un secondo impatto vi causasse un'ulteriore depressione? Il fondo del secondo cratere potrebbe rimanere all'interno dell'intervallo liquido?

L'immagine ad alta risoluzione mostra una situazione molto diversa dal solito: i ruscelli sono sufficientemente lunghi da raggiungere il fondo! Si vede chiaramente che in questo caso i depositi di fondovalle vengono incisi dai ruscelli e che questi non muoiono deponendo i soliti conoidi ma incidendo un'ampia superficie scura sulla quale sembrano formare diramazioni deltizie.



Questo esempio è straordinariamente significativo. Naturalmente non c'è acqua in questo momento: l'acqua liquida è un fenomeno transitorio, ma possiamo immaginare che parte del fondale sia rimasto temporaneamente sommerso.

Ma procediamo per ordine:

- La parte alta del versante, che rappresenta una sezione indisturbata del fondale di Newton Crater, mostra un terreno costituito da regolite disomogeneo, apparentemente a gradazione inversa e forse anche debolmente stratificato. Questo poteva costituire un sedimento lacustre e comunque una trappola per l'ultima acqua raccolta nel bacino e poi congelata nel sottosuolo.
- I ruscelli sul versante W, come ormai sappiamo, sono più corti e tendono a scomparire.
- I ruscelli sul versante NW raggiungono il fondo solcando profondamente i loro stessi conoidi, costituiti come sempre da materiale chiaro. Questo significa che nell'arco dei cicli di liquefazione ci sono periodi in cui terminano precocemente e periodi di più estesa stabilità del liquido in cui procedono fino al fondovalle. Sul fondale percorrono per breve tratto del materiale scuro, diramandosi e scomparendo su di esso. Anche queste strutture apicali mostrano però un altro episodio di troncamento netto e di successiva ripresa dei soli tracciati di maggiore portata, seguita questa volta da una terminazione lobata. La nostra ipotesi è che questo aspetto indica la presenza transitoria ma regolare di un certo spessore di acqua liquida. Al culmine delle condizioni favorevoli probabilmente l'acqua raggiunge il livello sinuoso tracciato dal troncamento deltizio. Durante il periodo di declino i canali di maggiore portata raggiungono il centro del sedimento scuro, probabilmente fangoso. Nella fase finale, probabilmente più rapida, i ruscelli regrediscono fino all'apice dei depositi chiari e quindi scompaiono<sup>12</sup> (fig.34).

---

<sup>12</sup> A questo punto c'è da chiedersi che differenza c'è tra i depositi chiari e quelli scuri e come mai i ruscelli del versante Nord sono più corti degli altri.

- Il versante Nord presenta un aspetto decisamente anomalo. Sono visibilmente presenti numerosi tracciati di ruscellamento, a diverse quote, ma appaiono interrotti sia in alto che in basso. Tutto il versante è inoltre cosparso dallo stesso materiale scuro del fondale. Se si interpreta il chiaroscuro non già in funzione delle ombre ma della vivacità del presunto colore rosso<sup>13</sup>, la polarità del rilievo si inverte e vediamo chiaramente la convessità dei depositi e la concavità delle depressioni attraverso le quali vengono alla luce dei canaletti sepolti. (Se la stampa non rendesse bene è consigliabile osservare la spettacolare foto sorgente all'URL: [ [http://www.msss.com/mars\\_images/moc/june2000/newton/newton\\_figure2\\_5.4.jpg](http://www.msss.com/mars_images/moc/june2000/newton/newton_figure2_5.4.jpg) ] ) Questo deposito parte dal versante Nord dove la presenza d'acqua è più copiosa e persistente, e si estende arealmente verso il basso fino a riempire il bacino là dove l'acqua può persistere più a lungo. La sua distribuzione areale coincide con l'area di diffusione della massima persistenza di acqua liquida, confermando l'ipotesi che possa trattarsi di un prodotto di alterazione. Inoltre il deposito scuro ha visibilmente una gradazione di colore lungo la linea di massima pendenza, indipendente dall'illuminazione e associabile dunque alla gradazione del sedimento. Possiamo quindi dedurre che, all'interno della tinta bruna, il deposito più a monte, di colore nero (probabilmente rosso rubino), è più grossolano e consente il drenaggio sotterraneo dei canali mentre e quello più a valle, grigio scuro (probabilmente rosso ruggine), è più fine, probabilmente argilloso e addirittura impermeabile<sup>14</sup> (fig.35).

---

<sup>13</sup> Qui l'enigma è celato probabilmente dalla scala monocromatica della fotografia. Se infatti interpretiamo il chiaroscuro in modo differente scopriamo che il materiale scuro copre i ruscelli. Dobbiamo partire da un'ipotesi precostituita: se la superficie del pianeta, costituita prevalentemente di roccia basaltica, appare visibilmente rossastra, evidentemente è cosparsa di minerali di alterazione del basalto, probabilmente ossidi di ferro. Nei punti dove l'acqua sgorga avevamo già notato degli aloni scuri in tutte le immagini precedenti. Possiamo immaginare che l'acqua possa causare una forte alterazione delle rocce anidre marziane, con la formazione di ossidi e idrossidi di ferro, ovvero minerali argillosi di colore rossastro bruno. Il rosso al B/N rende un tono decisamente scuro. Più è rosso acceso e più tende al nero. La normale sabbia rosata appare evidentemente in grigio chiaro. La conclusione è che là dove avviene la più copiosa fuoriuscita di acqua, si formano grandi depositi residuali.

<sup>14</sup> Questa deduzione può sembrare un po' macchinosa ma fa concordare armoniosamente il rilievo, il colore, il chimismo, la diffusione areale, l'energia di sedimentazione, il drenaggio e l'impermeabilità del suolo. Ci appare tutto sommato accettabile.

- Il fondo del bacino è cosparso dal materiale di alterazione che, nella sua componente più fine, probabilmente costituisce un letto argilloso impermeabile. La zona più depressa, in basso, è delimitata da un bordo sinuoso che evidentemente delimita i contorni di un piccolo specchio d'acqua (ora assente). Sono visibili dei terrazzamenti lungo la "linea di costa" e dei sedimenti più chiari là dove la minima energia del flusso favorisce la decantazione del sedimento più fine. I versanti ripidi causano probabilmente un flusso radiale convergente sulla presunta linea di costa.

Questo non è certo l'unico esempio di questo genere. L'analisi di questo sito suscita una serie di ulteriori considerazioni. Innanzi tutto bisogna riflettere sulla tonalità del presunto sedimento rosso. Un colore più vivace infatti potrebbe facilmente rappresentare la differenza tra un sedimento asciutto e un sedimento bagnato. Anche se il bacino è evidentemente vuoto (non mostrando riflessi della luce) forse la parte alta del versante Sud, dove le condizioni sono potenzialmente le più stabili, era umida proprio nel periodo in cui è stata ripresa l'immagine. Sarebbe davvero interessante vedere una seconda foto scattata ad una diversa ora del giorno.

Un altro particolare da sottolineare è che macchie scurissime sono presenti sul fondo di moltissimi crateri su entrambi gli emisferi. Sono ben visibili anche nelle foto a larga scala ed il primo particolare notato nell'ambito di questa ricerca fu proprio che questi depositi hanno solitamente una forma a mezzaluna e sono situati sotto il versante rivolto al polo omologo all'emisfero. Il criterio di diffusione appariva molto chiaro: erano sempre le zone più depresse e meno soleggiate. Entrando in queste aree, attraverso le immagini HR, si nota spesso la presenza di "dune nere", confermandone la natura di sedimento sciolto. Evidentemente, una volta asciutto, il sedimento è abbastanza fine da essere modellato dal vento anche in aree riparate come il fondo di un cratere.

La larga diffusione del fenomeno "macchia scura" fa supporre una diffusione dei ruscellamenti ben più ampia di quella prevedibile in base alle poche foto HR attualmente disponibili e al contempo una diffusione più eterogenea su entrambi gli emisferi.

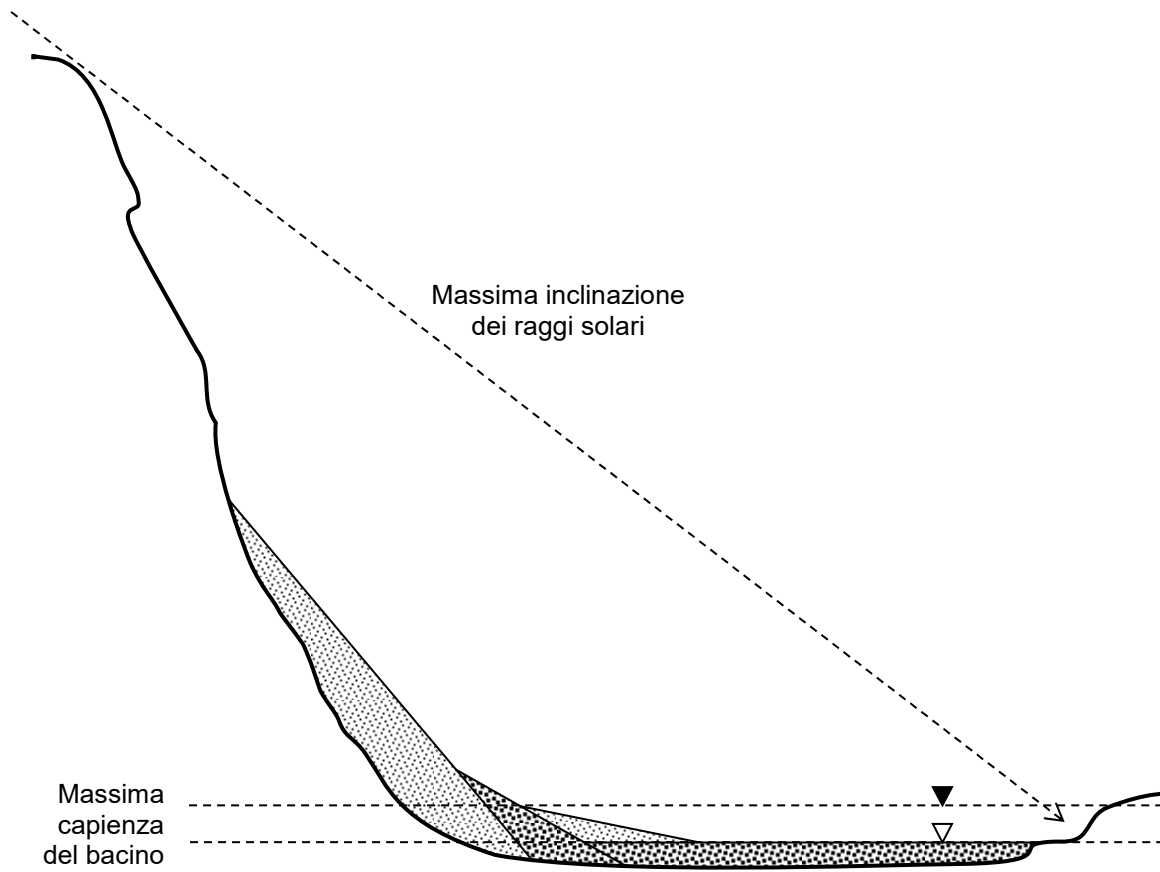


Fig. 34 - Sezione NW-SE del presunto bacino umido

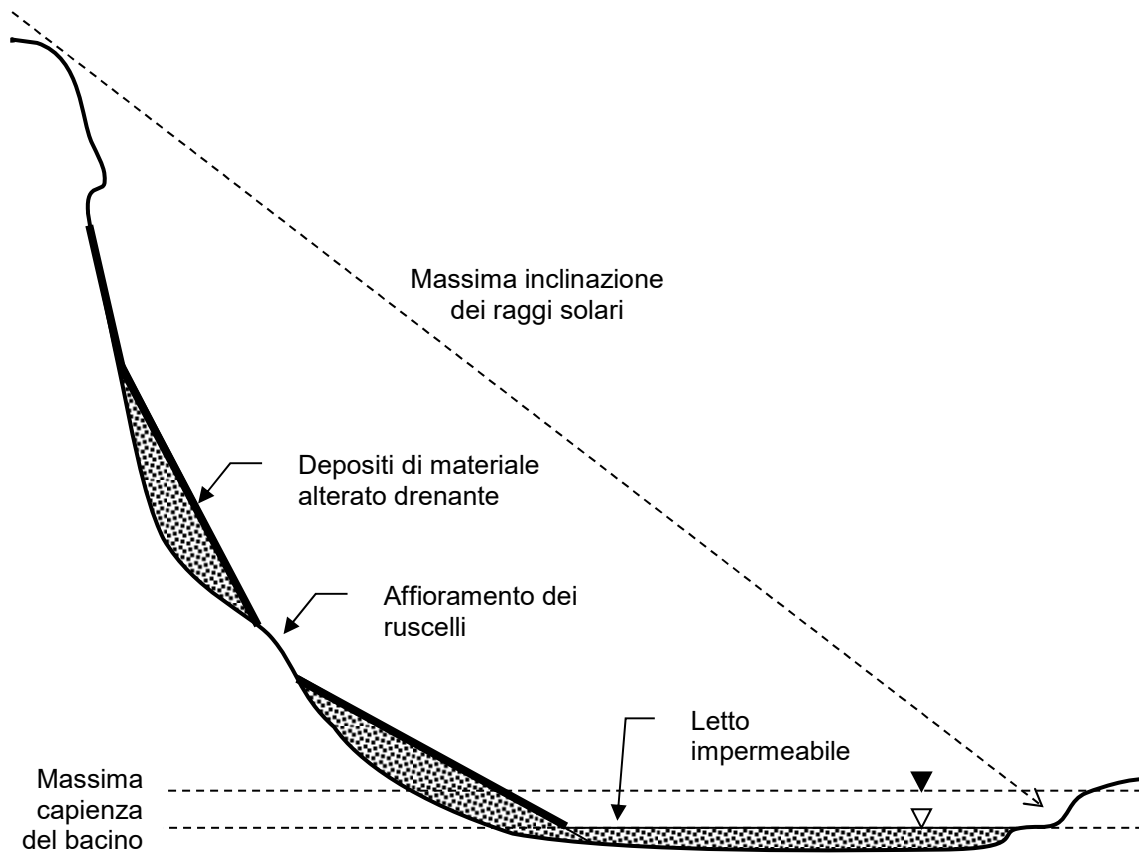


Fig. 35 - Sezione N-S del presunto bacino umido



## 6.0 - ANALISI GEOFISICA

Come già accennato, dopo una ricerca diretta sul pianeta, pilotata dalla simulazione *Rabdomarte*, si è preferito analizzare alcuni siti tra quelli già evidenziati dagli operatori NASA, in quanto risultavano in assoluto i più evidenti.

Verrà quindi effettuata ora, a posteriori, un'analisi delle condizioni fisiche previste negli stessi siti, per verificarne matematicamente l'idoneità alla liquefazione temporanea dell'acqua secondo il modello di *Rabdomarte*.

Sono state inserite nel programma le coordinate geografiche e la quota delle aree esaminate. Per ottenere la quota approssimativa, poiché non esiste ancora una mappatura MOLA ad alta risoluzione, è stata utilizzata la mappa globale, con una conseguente approssimazione. Nella fig. 39 si può vedere una riproduzione della mappa stessa (fonte MOLA, MGS) con l'indicazione dei siti.

Poiché tutti i torrenti nascono lungo i pendii e li percorrono per un breve tratto, si è dovuto considerare un intervallo di quote al di sotto di quella media regionale, valutato arbitrariamente intorno ai 1500 m, che corrispondono alla media dei dislivelli osservati. Il sito "Polar Pit Crater" è l'unico rimasto escluso dal test perché, essendo collocato ad una latitudine non cartografata, non è stato possibile stimarne la quota.

La schermata "Valutazione dei siti", riprodotta parzialmente nella fig.36, dà indicazioni aderenti alle osservazioni se si aggiusta un po' la quota nei margini dell'approssimazione. I livelli di equilibrio tra le fasi e di conseguenza le quote delle sorgenti e l'estensione verticale dei canali sono perfettamente compatibili con le immagini MOC.

Fig.36

RABDOMARTE - v 2.9 by Adriano Nardi

AREA INPUT: immissione dei dati geografici				Stima cond. Atm.		Ricerca H2O liquida		Ricerca bacino	
Sito	Lat.	Long.	Quota (m)	S/L (m)	L/V (m)	Livello (m)	Q.S.	Prof. (m)	H (m)
Nirgal Vallis	29,7 S	38,6 W	800	508	-397	-8	508	1197	905
Elysium Crater	36,7 N	252,3 W	-100	-518	-1816	-11	-518	1716	1299
Gorgonium Chaos	37,5 S	170,5 W	-200	-635	-1978	-11	-635	1778	1344
Gorgonium Crater	37,4 S	168,0 W	-500	-620	-1958	-3	-620	1458	1338
Newton Crater	41,1 S	159,8 W	-1000	-1162	-2708	-4	-1162	1708	1546
									0
									n

Spostando le quote al centro dell'intervallo liquido si può stimare l'indice di qualità "Q" delle condizioni ambientali (fig.37). Si può notare come tutti i siti osservati presentino caratteristiche simili e i valori più alti corrispondono al Newton Crater dove abbiamo trovato il presunto bacino.

Fig.37

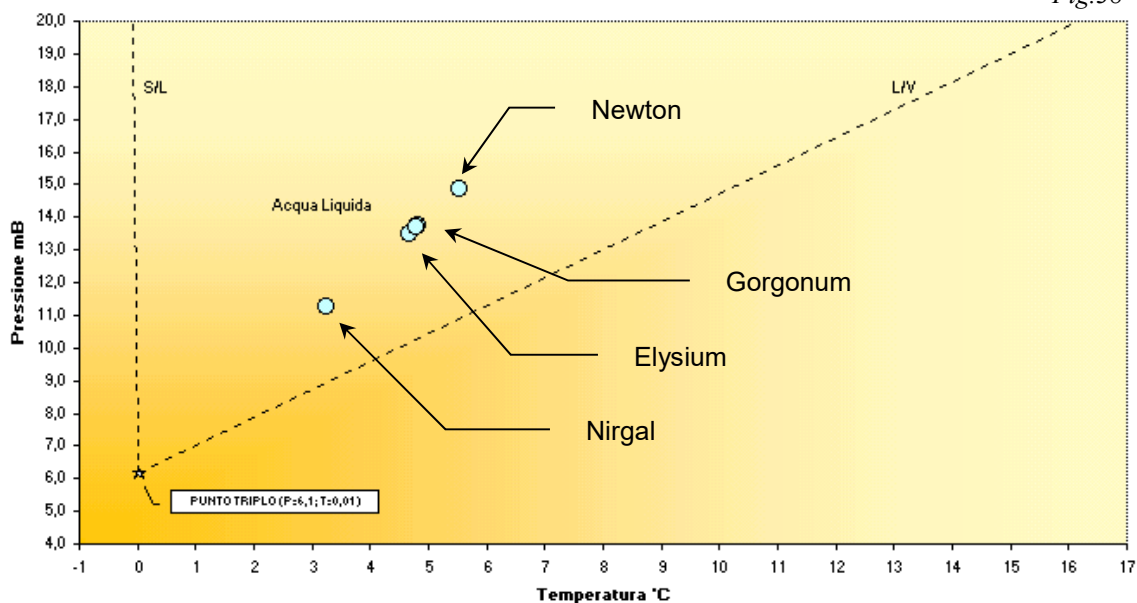
AREA INPUT: immissione dei dati geografici				Stima delle condizioni superficiali					
Sito	Lat.	Long.	Quota (m)	T (°C)	P (mB)	Acqua	+/- °C	+/- mB	"Q"
Nirgal Vallis	29,7 S	38,6 W	55	3,3	11,2	VERO	2,7	5,1	42
Elysium Crater	36,7 N	252,3 W	-1167	4,7	13,5	VERO	3,9	7,4	60
Gorgonum Chaos	37,5 S	170,5 W	-1306	4,8	13,7	VERO	4,1	7,6	62
Gorgonum Crater	37,4 S	168,0 W	-1289	4,8	13,7	VERO	4,0	7,6	62
Newton Crater	41,1 S	159,8 W	-1935	5,5	14,9	VERO	4,7	8,8	72

I valori di Q, moltiplicati per il fattore il 1.44, forniscono una stima approssimativa del tempo massimo di permanenza delle condizioni di liquefazione. I tempi calcolabili in base a questi dati sono:

<b>Nirgal Vallis</b>	60 min
<b>Elysium Crater</b>	86 min
<b>Gorgonum Chaos</b>	89 min
<b>Gorgonum Crater</b>	89 min
<b>Newton Crater</b>	104 min

La schermata "Diagramma di stato" (fig.38) colloca tutti i siti nell'area liquida.

Fig.38



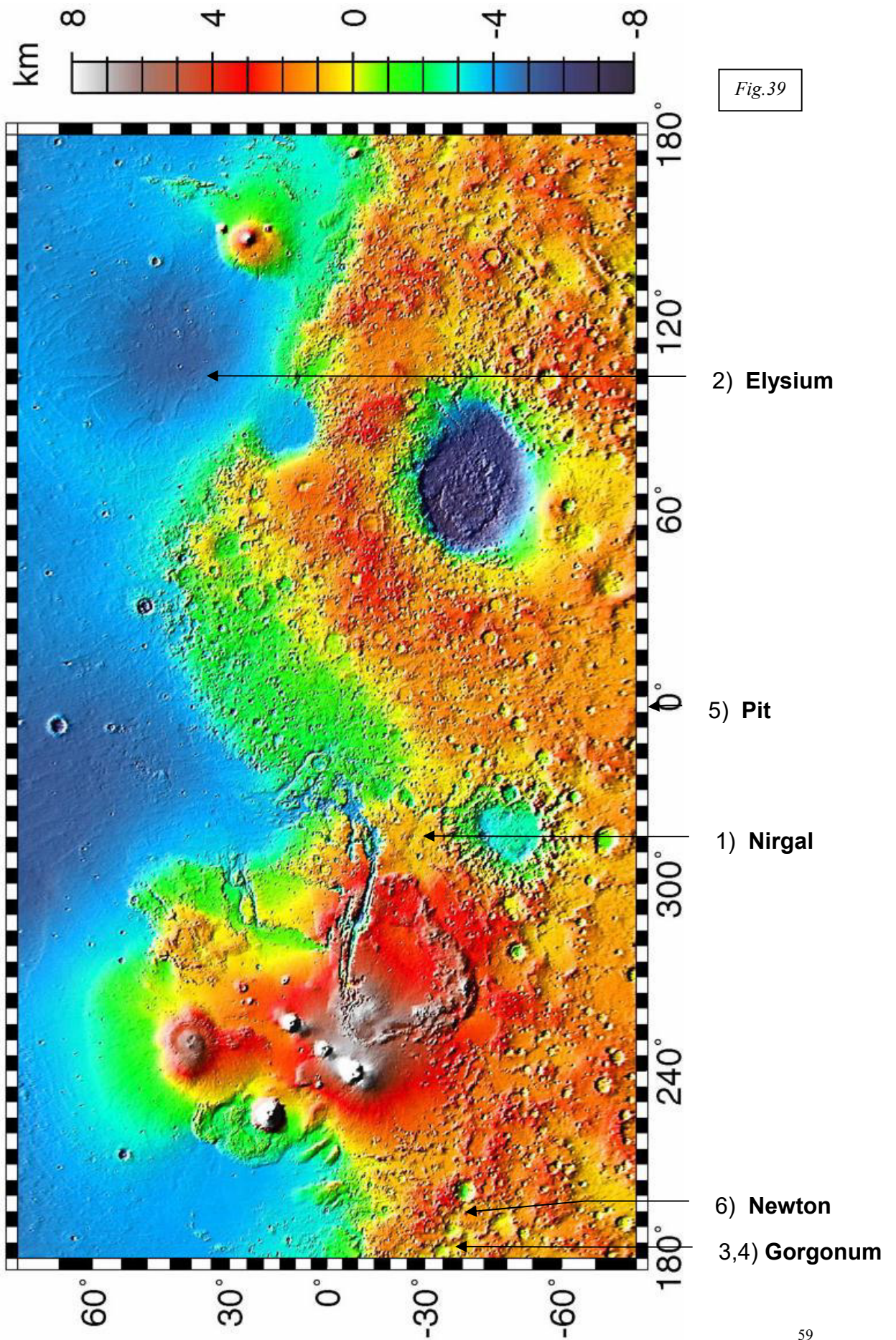


Fig.39

La schermata di valutazione della fascia climatica ideale è anch'essa conforme alle osservazioni. Nella figura 40 sono state riportate su di essa le posizioni dei siti analizzati, con il relativo dislivello medio. Come si vede chiaramente, tutti gli intervalli terminano sulla la linea di evaporazione, tranne quello corrispondente alla zona di Newton Crater, che infatti ha potuto supportare un piccolo bacino di raccolta.

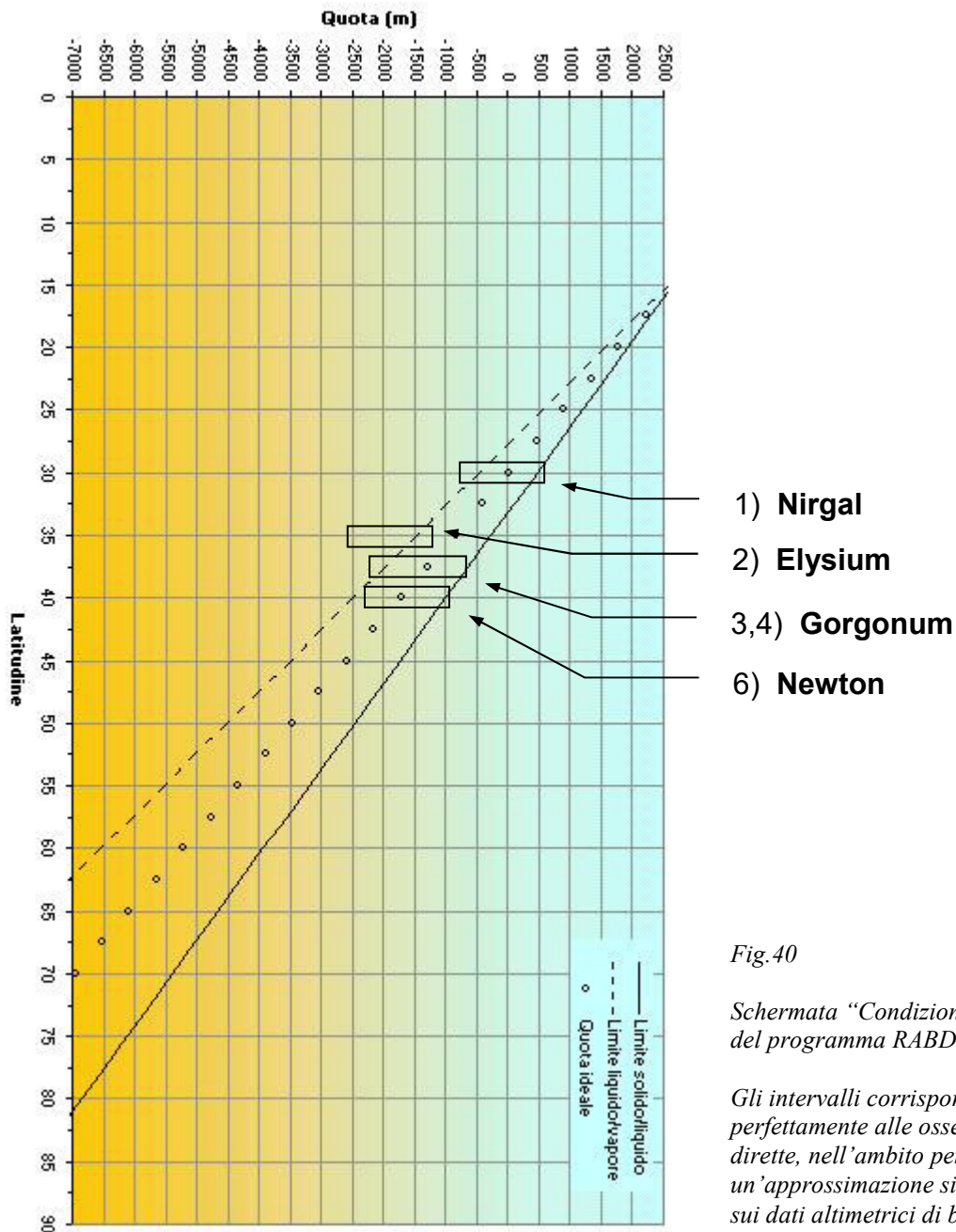


Fig.40

Schermata "Condizioni ideali" del programma RABDOMARTE.

Gli intervalli corrispondono perfettamente alle osservazioni dirette, nell'ambito però di un'approssimazione sistematica sui dati altimetrici di base.

## 5.0 - CONCLUSIONI E ASPETTATIVE

I fenomeni di ruscellamento di recente scoperta sono evidentemente piuttosto diffusi in alcune regioni del pianeta e sono molto probabilmente dei fenomeni attuali. Possono infatti essere previsti e spiegati in base ad un modello fisico basato sulle condizioni ambientali attuali.

Per interpretare correttamente i ruscellamenti osservati su Marte bisogna uscire dagli schemi consolidati della geologia. Ci troviamo naturalmente in un ambiente diverso da quello terrestre, ma questa “diversità” va ben oltre le differenze ambientali che siamo soliti valutare sul nostro pianeta. Occorre partire dal presupposto che un ciclo dell’acqua non esiste più e che, nella sua globalità, l’ambiente marziano è in un equilibrio fisico intorno al limite delle condizioni di liquefazione dell’acqua.

Accade così che come sulla Terra alle medie latitudini occasionalmente può piovere, su Marte in una certa fascia climatica (dipendente da latitudine e quota) si possono occasionalmente avere fenomeni di sorgività. Fenomeni sporadici e transitori ma localmente diffusi e consueti... come la pioggia.

Probabilmente è inutile invocare temperature più alte e precipitazioni locali, inutile invocare sorgenti idrotermali o soluti sconosciuti, inutile anche cercare condizioni nettamente migliori in un passato relativamente breve. Su Marte oggi non può più piovere, ma probabilmente, ciò che avviene con frequenza in quei luoghi dove scopriamo delle sorgenti, dipende soltanto dalla variabilità delle condizioni meteorologiche... esattamente come la pioggia. Si tratta di fenomeni che potremmo definire “meteogeologici”.

Tutto il vapore acqueo che entra in circolo nell’atmosfera (tutto sommato molto poco) non può far altro che brinare e sublimare sulla maggior parte della superficie del pianeta (e se ne vedono moltissimi esempi) finché non finirà ai poli per incrementare, nella lunga stagione autunnale, le calotte inferiori di H<sub>2</sub>O. Qui rimarrà per sempre, al di sotto della calotta stagionale di CO<sub>2</sub>.

Nell'ultimo periodo della storia umida del pianeta tutta l'acqua liquida si trovava certamente concentrata nei bacini dell'emisfero settentrionale, dove i valori di T e P gli erano ancora favorevoli. E' probabilmente per questo motivo che la calotta polare Nord è molto più ricca di ghiaccio d'acqua della calotta Sud. Possiamo però immaginare che una grande quantità di acqua si trovi tuttora nel permafrost degli altopiani meridionali, dove deve essersi congelata quando ancora esisteva un residuo di oceano boreale.

Possiamo quindi ipotizzare la realistica (almeno teorica) di poter trovare nelle regioni meridionali e in particolarissime condizioni climatiche stagionali, degli episodi lacustri a carattere transitorio. Qualora fosse possibile, dovrebbe trattarsi di bacini endoerici molto profondi e posti a latitudini estremamente alte. La luce solare che incide sullo specchio d'acqua non deve causare un'evaporazione più rapida dell'apporto liquido. Il bacino deve essere quindi estremamente meridionale e/o stretto e profondo. Il letto deve trovarsi necessariamente all'interno dell'intervallo liquido e sarà reso impermeabile dai sedimenti argillosi di alterazione depositi dalle acque stesse. La sede ideale è un cratere meteoritico. L'acqua, naturalmente, sarà molto fredda.

Al di là di queste considerazioni era stata già proposta la possibilità di trovare un mare interno nel bacino meridionale di Hellas (il maggiore cratere da impatto) che è l'area più depressa del pianeta. Alla nostra analisi risulta però globalmente troppo profondo e troppo poco meridionale. In breve, il fondo di Hellas dovrebbe trovarsi al di sotto dell'intervallo liquido regionale e dunque in condizioni prevalentemente evaporitiche. Inoltre è stato certamente l'unico mare attivo dell'emisfero meridionale nell'ultimo periodo umido del pianeta. Potrebbe quindi aver già incamerato ed evaporato tutta l'acqua dell'area circostante.

Piuttosto riteniamo di poter nutrire speranze circa il bacino meteoritico di Argyre e un altro cratere più piccolo e poco più meridionale di cui non è noto il nome. Argyre è centrato alla latitudine  $-50^\circ$ , è sufficientemente profondo ed è circondato da diverse serie di depressioni. Questo favorisce anche la formazione di numerosi bacini più stretti nelle regioni periferiche del cratere, che potenzialmente possono presentano condizioni ancor più stabili.

Chiunque abbia letto queste ultime righe starà pensando ad una conclusione estremamente remota e fantascientifica che forse si proietta troppo oltre la trattazione precedente, già al limite dell'ordinario.

Vorrei invece concludere questa tesina con un'ultima ricostruzione climatica legata al decadimento del ciclo dell'acqua e al deperimento dell'atmosfera.

In un ambiente privo di oceani, con un'atmosfera rarefatta e senza grandi differenze bariche orizzontali se non un gradiente con variabilità stagionale<sup>15</sup> tra l'equatore e i poli, l'improvvisa comparsa di un considerevole bacino lacustre (in realtà un mare interno) causerebbe indubbiamente un forte squilibrio barico. La capacità termica di questa massa d'acqua rappresenterebbe l'unico accumulatore termico del pianeta in grado di influire pesantemente con carattere regionale. Indubbiamente si creerebbe una zona anomala di bassa pressione (unica sul pianeta) in grado di creare uno squilibrio barico che, in un'atmosfera così poco densa e in un regime di bassa gravità, causerebbe fortissimi venti. L'influenza potrebbe estendersi progressivamente a tutto il pianeta, essendo questa l'unica significativa anomalia nei gradienti standard.

Questo scenario è tutt'altro che apocalittico. E' esattamente ciò che avviene in ogni estate australe, quando una tempesta di sabbia coinvolge progressivamente tutto il globo. E' quello che tutti gli astrofili (me compreso) hanno potuto facilmente osservare anche con strumenti non eccezionali durante l'opposizione del 1988, quando l'emisfero sud era in estate e il pianeta si trovava al perielio.

Queste tempeste hanno origine proprio nell'emisfero meridionale e, da quanto si vide chiaramente nell'88, proprio dalla regione di Argyre.

E' dunque almeno auspicabile la possibilità che la missione MGS, nell'ambito della mappatura MOC, possa portare in un futuro molto prossimo alla scoperta di uno o più bacini lacustri, tuttora stagionalmente attivi, presso le alte latitudini meridionali e probabilmente nella regione di Argyre.

---

<sup>15</sup> Dati Viking e Pathfinder confermano che i venti soffiano nella medesima direzione per lunghissimi periodi.

Un'ultima brevissima considerazione andrebbe fatta riguardo la possibilità di rinvenire sul pianeta tracce di vita indigena (il tema è poco attinente ma è impossibile parlare di acqua liquida senza porsi questo dubbio).

A questo proposito vogliamo soltanto far notare che la politica propagandistica della NASA (indispensabile a scongiurare ulteriori tagli agli stanziamenti) sta probabilmente sbagliando target. Stando alle attuali possibilità di indagine è perfettamente inutile teorizzare forme di vita tuttora adattate al clima marziano e fantasticare su fantomatici vermi che non uscirebbero mai dai loro cunicoli sotterranei. Siamo invece più realisti: la prima fase evolutiva del pianeta è stata esattamente identica a quella terrestre. A parità di condizioni climatiche è possibile (e abbiamo solo detto "possibile") che si siano potute sviluppare su Marte almeno le forme di vita più primitive. Da qui in poi le condizioni climatiche sono mutate e non possiamo più formulare ipotesi realistiche.

La potenziale presenza di oceani e di un clima temperato sono compatibili con lo sviluppo di forme di vita incrostanti del tipo bioherma e biostroma. Forme di vita naturalmente diverse da quelle che conosciamo ma necessariamente analoghe nello stile di vita, dovendosi adattare ad un ambiente analogo. Poiché queste strutture biogene sarebbero perfettamente alla portata delle immagini MOC, rappresentano l'unica reale opportunità all'attuale livello di esplorazione.

La recente scoperta di stratificazioni sedimentarie (missione MGS) e la necessaria ipotesi che grandi quantità del CO<sub>2</sub> atmosferico sia stata assorbita in processi litogenetici<sup>16</sup> giocano a favore di questa eventualità. Il periodo di tempo in cui l'ambiente marziano è stato (forse) favorevole allo sviluppo di forme di vita è però di soli 1,5 Ma: troppo poco per i canoni terrestri.

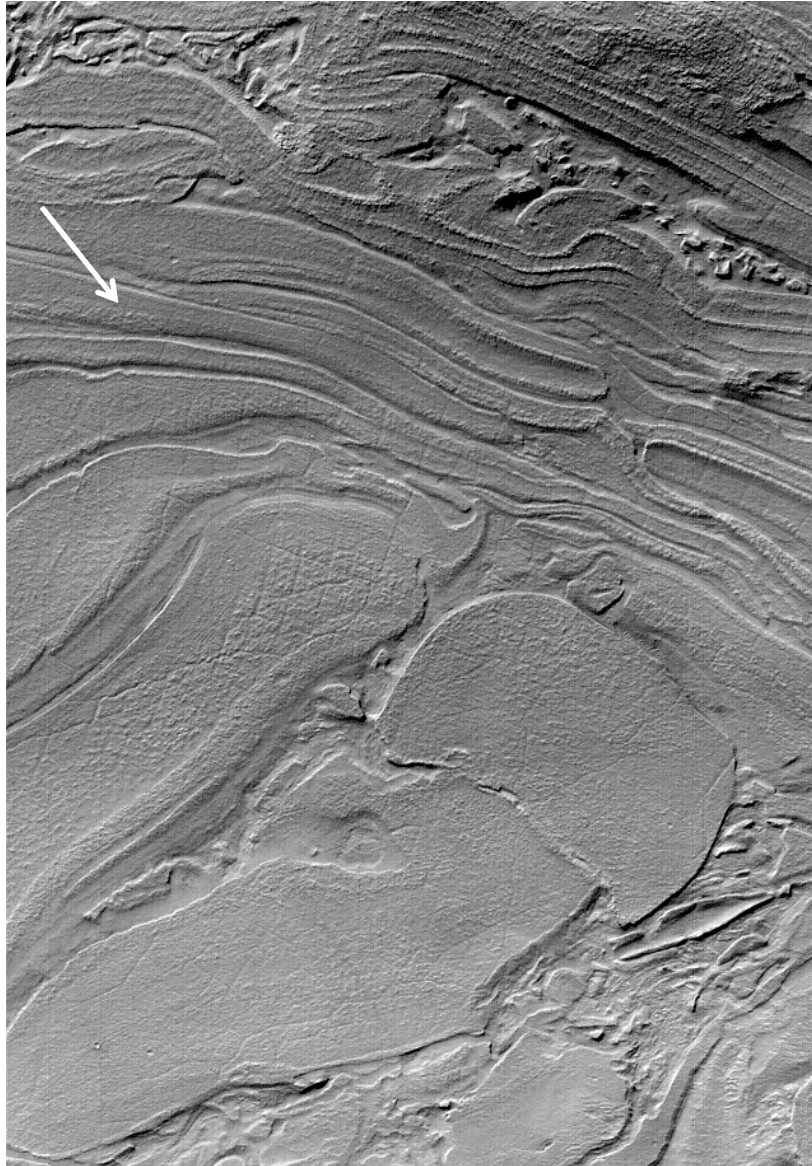
In conclusione, nell'attesa forse vana di vere indagini in sito, sarebbe comunque più utile che le ricerche esobiologiche si concentrassero sui dati disponibili. Sarebbe più utile sperare di individuare ipotetiche strutture biocostruite sui

---

<sup>16</sup> Uno studio di Robert M. Haderle sul clima di Marte ("Le Scienze" n.215, lug '86) per giustificare l'evidente deficit di anidride carbonica nell'atmosfera di Marte ritiene necessaria l'ipotesi di un assorbimento da parte delle rocce carbonatiche. Questo meccanismo viene presentato in analogia ai fenomeni litogenetici terrestri. Haderle però è un fisico e forse non era del tutto cosciente della reale natura delle rocce carbonatiche terrestri...



fondali dei paleobacini temperati come (per fare un esempio) la regione di Hellas Planitia. Proprio a titolo di esempio, presentiamo qui una suggestiva immagine che fornisce quantomeno uno spunto di riflessione su questa eventualità:



*Fig.41 - Particolare di un'area estesa 2,4 x 4,1 Km situata nella zona NW del bacino di Hellas (39,7°S;306,7W). Queste strutture, descritte come "bizzarre", risultano geologicamente inspiegabili e "La loro interpretazione potrebbe richiedere anni di studio" ( Archivio MSSS – Release MOC2 - 277 ) La freccia bianca indica la direzione della luce incidente.*

## 7.0 - BIBLIOGRAFIA<sup>17</sup>

### MISSIONE MARS GLOBAL SURVEYOR

- **MGS Home Page**  
Informazioni generali e dati tecnici su missione e apparecchiature di bordo  
[www.msss.com](http://www.msss.com)
- **MSSS MOC Archive**  
Laboratori Malin (MSSS): archivio delle immagini MOC  
[www.msss.com/mars\\_images/moc/mgs\\_moc\\_archive.html](http://www.msss.com/mars_images/moc/mgs_moc_archive.html)
- **Mars MOLA 3D map** - Mappatura altimetrica MOLA  
[www.msss.com/mars\\_images/moc/mgs\\_moc\\_archive.html](http://www.msss.com/mars_images/moc/mgs_moc_archive.html)

### ATMOSFERA

- **Mars Pathfinder Weater Data**  
[www\\_mars.cnes.fr/ops/asinet.html](http://www_mars.cnes.fr/ops/asinet.html)
- **Diagnostic Calculation of the Circulation in the Martian Atmosphere**  
(M. Santee e D. Crisp) - [www.lpi.usra.edu/meetings/programs/atmoswa.txt](http://www.lpi.usra.edu/meetings/programs/atmoswa.txt)
- **L'atmosfera di Marte** (C. B. Leovy)  
"Le Scienze" n.111, nov. 1977

---

<sup>17</sup> In questa ricerca sono state utilizzate informazioni aggiornate fino al dicembre 2000, quando non era ancora possibile reperire foto e dati recenti su pubblicazioni cartacee. La maggior parte delle fonti bibliografiche è costituita quindi da pagine web.

## LITOSFERA

- **Magma production and mantle convection on Mars** (W. S. Kiefer)  
[www.lpi.usra.edu/science/kiefer/Publications/lpsc00mars-abs.html](http://www.lpi.usra.edu/science/kiefer/Publications/lpsc00mars-abs.html)
- **I crateri nel sistema solare** (William K. Hartmann)  
"Le scienze" n.105, Maggio 1977
- **La migrazione dei poli su Marte** (Peter H. Schultz)  
"Le Scienze" n. 211, marzo 1986

## ACQUA SU MARTE

- **Liquid water and life on Mars** (G.V. Levin e R.L. Levinb)  
[www.biospherics.com/Mars/spie2/spie98.htm](http://www.biospherics.com/Mars/spie2/spie98.htm)
- **Il clima di Marte** (Robert M. Haberle)  
"Le scienze" n.215, lug. 1986
- **Acqua su Marte?** (V. Onofrio)  
"l'Astronomia" n.212, ago-sett 2000
- **I mari del pianeta rosso** (V. Onofrio)  
"l'Astronomia" n.483, gen 1998