

Universidade do Minho
Escola de Ciências

Joana Filipa Neto Costa Lima

**Evolução de Superfícies Planetárias:
Marte - Planeta Dinâmico**

**Evolução de Superfícies Planetárias:
Marte - Planeta Dinâmico**

Joana Filipa Neto Costa Lima

UMinho | 2021

Novembro de 2021



Universidade do Minho

Escola de Ciências

Joana Filipa Neto Costa Lima

Evolução de Superfícies Planetárias:

Marte - Planeta Dinâmico

Dissertação de Mestrado

Mestrado em Geociências

Dinâmica Externa e Mudanças Globais

Trabalho realizado sob a orientação do

Professor Doutor Renato Filipe Faria Henriques

Novembro de 2021

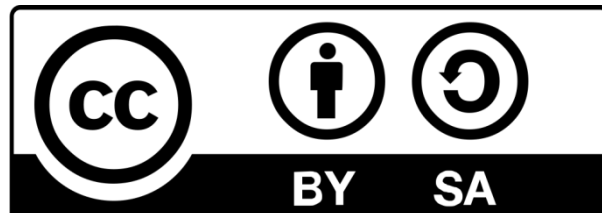
Direitos de Autor e Condições de Utilização do Trabalho por Terceiros

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho:



<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

Agradecimentos

Ad Astra, Per Aspera

A autora deseja agradecer a todos quantos de uma forma mais ou menos presente ajudaram à realização deste trabalho de dissertação. Um obrigado muito especial: para os meus pais, que sem eles não teria sido capaz de realizar nem terminar mais uma etapa do meu percurso académico, por vezes é difícil demonstrar quanto a sua presença ao nosso lado nos dá forças para continuar, para a minha família (tanto de sangue como da que nós escolhemos) que sempre me dá força e me mostra que por vezes temos que olhar para baixo para ver o que realmente importa e um ainda mais especial para a força motriz que nunca deixou de acreditar em mim, mesmo quando eu fraquejava e não acreditava que seria capaz, muchas gracias Esteban por recordarme que yo soy más fuerte que mis muchas debilidades.

Foi um longo, árduo e tortuoso caminho até chegarmos a este ponto e nem as estrelas serão o limite, com este trabalho foram alargadas fronteiras do conhecimento, conquistadas verdadeiras “montanhas” e o crescimento técnico e científico apenas foi possível com a ajuda, apoio e incentivo de todos quantos me rodearam. Muitos momentos existiram em que as forças me falharam mas tive sempre alguém que me ajudava a retomar o meu caminho, a minha escrita e me lembrava de todo o trabalho, esforço e empenho que seria perdido caso desistisse.

O caminho da ciência é árduo, e só através de sacrificios podemos chegar ao nosso objectivo final e aí sim poder usufruir dos frutos do nosso trabalho.

“Failure is not an option” Gene Kranz, NASA Flight Director (Frase apócrifa, com origem nas preparações para o filme “Apollo 13” (2000) que foi mais tarde adoptada por Kranz como título da sua autobiografia.

Joana Neto-Lima

Declaração de Integridade

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Joana Neto-Lima

Abstract

The present MSc dissertation entitled “Planetary Surfaces Evolution: Mars – Dynamic Planet”, allows a global view of the martian surface, its evolution and the processes responsible for the present geomorphology and geochemistry. In this work we analyse the path that we, as a species had to thread through in order to reach the present moment in Planetary Geology.

The martian locations selected for this work were specifically chosen, in conjunction with their Earth analogue counterpart, thus demonstrating the Principle of Uniformitarianism at work on both planets and how to interpret the constant stream of information arriving from the fleet of planetary and space missions on other celestial bodies beyond Earth.

Resumo

O presente trabalho de Dissertação de Mestrado, com o título “ Evolução de Superfícies Planetárias: Marte – Planeta Dinâmica” abrange o período histórico desde a missão Luna 2 em 1959 até ao presente, de estudo de superfícies de outros corpos celestes para além da Terra. Em 60 anos e recorrendo a variadas técnicas de análise, estudo e exploração a Humanidade passou do quase desconhecimento quanto aos processos responsáveis pela modelação e transformação de variadas superfícies planetárias para a capacidade de além de os identificar, ser capaz de os prever e em laboratório ou com visitas a locais análogos no nosso próprio planeta replicar esses mesmos processos e dessa forma poder ajudar ao avanço científico do campo científico da Geologia Planetária.

Este trabalho pretende dar uma visão global da superfície do planeta Marte, da sua evolução e dos processos responsáveis pela presente geomorfologia e geoquímica. Foram escolhidos locais específicos de Marte, procurando análogos terrestres, demonstrando assim o uniformitarismo dos processos de modelação em distintas superfícies planetárias.

Para ajudar à compreensão do largo caminho percorrido, até ao momento em que um rover de cerca de uma tonelada de peso e um pequeno helicóptero autónomos tocam o solo marciano, este trabalho foi dividido em três capítulos: o primeiro é completamente dedicada aos Pais Fundadores da Aeronáutica, e a uma pequena revisão histórica da exploração planetária e monitorização da evolução de superfícies planetárias; o segundo aborda a formação e a evolução do nosso Sistema Solar e a diversificação das superfícies planetárias e o terceiro é a parte central deste trabalho, na qual analisamos imagens obtidas pelo orbitador da NASA - *Mars Reconnaissance Orbiter* (MRO), estudando o seu contexto geomorfológico (recorrendo ao HiRISE) e geoquímico (recorrendo ao CRISM), fazendo analogias com locais terrestres.

O futuro das ciências planetárias, passará por missões cada vez mais complexas abrindo lentamente caminho para missões tripuladas. À medida que esta nova corrida espacial evolui, poderemos observar a conquista e derrube de cada vez mais barreiras e fronteiras, facilitando informação (e acesso a amostras) cada vez mais detalhada, ajudando a perceber donde vimos e para onde vamos enquanto espécie, enquanto habitantes do vasto Universo

Palavras-Chave: Geomorfologia, Análise Remota, Ciências Planetárias, Geologia

Summary

The present MSc Dissertation entitled “Planetary Surfaces Evolution: Mars – Dynamic Planet” comprises the historical period from the Luna 2 mission in 1959 up to the present day, of the study the surfaces of other celestial bodies beyond Earth. Spanning over sixty years and using a vast array of analytical techniques and exploration methods we from almost absolute obscurity about the processes behind the transformation of different types of planetary surfaces, to the ability to not only identify them, but also predict them, while using our laboratories and the study of Earth analogues to replicate and better understand these phenomena and thus allow significant scientific breakthroughs allowing the birth an evolution of a new field of science, Planetary Geology.

This dissertation work allows a global view of the Martian surface, its evolution and the processes responsible for the present geomorphology and geochemistry. The locations selected for the present work were specifically chosen, in conjunction with their Earth analogue counterpart, thus demonstrating the uniformitarianism of the processes at work on both planets and how to interpret the information arriving from other celestial bodies beyond Earth.

In order to allow a better understanding of the long path that took us to the moment when a rover weighing over a tonne, and a tiny autonomous helicopter drone touch martian soil, the present work was divided into four main chapters: the first is completely dedicated to the Founding Fathers of Aeronautics, including a short historical review of space missions that contributed for planetary exploration and monitoring the evolution of planetary surfaces; the second chapter approaches the formation and evolution of our Solar System and the diversification of planetary surfaces; the third chapter is the central part of this dissertation work, in which imagery obtained by NASA’s orbiter – Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) is analyzed, by studying its geomorphological (using HiRISE) and geochemical context (using CRISM), using analogue studies of locations on planet Earth.

The future of planetary sciences, will be ever more challenging, aided by increasingly complex missions until we reach the moment when crewed missions can once again step into new worlds. As we witness this new space race unfold, we will see more frontiers being broken and conquered, facilitating ever more detailed information (and eventually access to samples), allowing us to understand where we come from and where are we headed, as a species, as inhabitants of the vast Universe.

Keywords: Geomorphology, Remote Sensing; Planetary Sciences, Geology

Índice

Folha de Rosto	i
Direitos de Autor e Condições de Utilização por Terceiros	ii
Agradecimentos	iii
Declaração de Integridade	iv
Abstract	v
Resumo (Português)	vi
Summary (English)	vii
Índice	viii
Índice de Figuras	x
Índice de Tabelas	xvi
Introdução	1
Parte I – O Nascimento da Aeronáutica e a Idealização do Estudo do Universo	
1. Primórdios da Humanidade e Primeiros Passos da Ciência	3
2. Pais Fundadores da Aeronáutica	8
2.1. Konstantin Eduardovich Tsiolkovsky	9
2.2. Robert Esnault-Pelterie	14
2.3. Robert Hutchings Goddard	17
2.4. Hermann Oberth	20
3. Revisão Histórica da Exploração Planetária	23
Parte II – Formação e Evolução de Superfícies Planetárias	
1. Sistema Solar	28
1.1. Formação e Evolução do Sistema Solar	30
1.2. Formação de Planetas	34

1.3. Evolução e Diversificação das Superfícies Planetárias	38
Parte III – Caso de Estudo – <i>Marte – Planeta Dinâmico</i>	
1. Teoria do Uniformitarismo	40
2. A Terra como Análogo Marciano	41
3. Monitorização da Evolução da Superfície de Marte usando Análise Remota	
3.1. MRO – Mars Reconnaissance Orbiter	42
3.1.1. HiRISE – High Resolution Imaging Science Experiment	45
3.1.2. CRISM – Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars	48
4. Lugares de Estudo – Análise Geomorfológica e Geoquímica	50
4.1. Modelação Eólica	53
4.2. Modelação Hidrológica	63
4.3. Ravinas (Gullies)	75
4.4. Avalanches e Desmoronamento de Ravinas	81
Conclusões	86
Bibliografia	89
Anexos	94

Índice de Figuras

Figura 1 Sumário do Julgamento de Giordano Bruno. (<i>Crédito</i> : Arquivo Vaticano).....	5
Figura 2 “ <i>Le Voyage dans la Lune</i> ” de Georges Méliès (1902). (<i>Crédito</i> : George Méliès).	8
Figura 3 K.E. Tsiolkovsky cerca de 1930 (<i>Crédito</i> : Copyright Free)	9
Figura 4 [Esquerda] Konstantin Eduardovich Tsiolkovsky. (<i>Crédito</i> : K.E.Tsiolkovsky Museum, Kaluga, Rússia); [Direita] Desenho de uma nave espacial. (<i>Crédito</i> : K.E. Tsiolkovsky, no livro “The Call of Cosmos”, tradução de 1960)	11
Figura 5 Ilustração de A. E. Gofman do livro educacional publicado em 1893 “A Lua”, da autoria de K.E. Tsiolkovsky (em cirílico, К. Э. Циолковский "На Луне", 1893. Москва, тип. И. Д. Сытина)	12
Figura 6 Robert Esnault-Pelterie (também conhecido como REP) (<i>Crédito</i> : Agence de Presse Meurisse – Bibliothèque Nationale de France)	14
Figura 7 Fotografia de Robert Esnault-Pelterie, pode-se distinguir a sigla pela qual ficou conhecido na cauda do avião – REP (<i>Crédito</i> : Domínio Público).	15
Figura 8 Robert Hutchings Goddard (<i>Crédito</i> : Domínio Público).....	17
Figura 9 Robert Hutchings Goddard, explicando como chegar à Lua usando os seus cálculos. (<i>Crédito</i> : NASA)	18
Figura 10 Robert Hutchings Goddard, ao lado do primeiro foguetão de combustível líquido, no dia 16 de Março de 1926. (<i>Crédito</i> : Esther C. Goddard e NASA)	19
Figura 11 Hermann Oberth. (<i>Crédito</i> : Domínio Público).....	21
Figura 12 Hermann Oberth e Wernher von Braun (<i>Crédito</i> : NASA)	22
Figura 13 Fotografia do Cometa designado por 1P/Halley, captada a oito de Março de 1986, na Ilha da Páscoa. Foto adquirida no âmbito do programa International Halley Watch (IHW - Observatório Internacional do Halley), parte integrante do Large Scale Phenomena Network (Rede de Fenómenos de Larga Escala) (<i>Crédito</i> : W.Liller e IHW).	24
Figura 14 Inventário dos corpos e/ou objectos celestes que se conhece até ao momento, em órbita do Sol. (<i>Crédito</i> : John Spencer, adaptado do livro “ <i>Fundamental Planetary Science</i> ” (Lissauer e de Pater, 2013)).....	30

Figura 15 [Superior Esquerda] HH-30 (Crédito: C. Burrows (STScI (Space Telescope Science Institute) e ESA, WFPC 2 Investigation Definition Team e NASA); [Superior Direita] HH-34. (Crédito: J. Hester (Arizona State University), WFPC 2 Investigation Definition Team e NASA); [Inferior] HH-47 (Crédito: J. Morse/STScI e NASA). A escala nas imagens representa 93 milhões de milhas, e todas as imagens foram captadas pela WFPC 2 no espectro visível (Crédito: NASA e STScI, Release ID 1995-24).....32

Figura 16 [Esquerda] Diagrama esquematizado do disco circumestelar e disco de acreção da HH-30. (Crédito: NASA e STScI; [Direita] HH-30 fotografado pelo WFPC 2. (Crédito: C. Burrows (STScI e NASA), WFPC 2 Investigation Definition Team e NASA; Co-Investigadores: K.Stapelfeldt (JPL) e A. Watson (Lowell Observatory). (Crédito: NASA e STScI, Release ID 1995-24).....34

Figura 17 [Esquerda] Diagrama representativo dos estádios de formação de um sistema solar. (Crédito: adaptado de Shu et al. 1987); [Direita] Imagem da estrela recém-formada HL-Tauri. (Crédito: ALMA (NRAO/ESO/NAOJ), C. Brogan, B. Saxton (NRAO/AUI/NSF).....36

Figura 18 Representação artística do nosso Sistema Solar, não respeitando a escala. (Crédito: NASA/Jet Propulsion Laboratory – Caltech).....37

Figura 19 Comparação das estruturas internas entre os planetas terrestres e os planetas gasosos (o planeta Terra é utilizado como referência, a verde). Adaptado de Fundamentals of Physical Geology (2014).....38

Figura 20 Gráfico Representativo da Definição Clássica da Zona Habitável em redor de estrelas de sequência principal (no caso do nosso Sol, é uma estrela de categoria G – zona assinalada pelo rectângulo azul). (Crédito: Adaptado do *Astrobiology Primer* - 2006).....39

Figura 21 Escala do tempo geológico da Terra e de Marte, com referência aos eventos mais significativos que marcaram cada um dos planetas (Ga = Mil Milhões em português). (Crédito: Akos Kereszturi e Kelsi Singer, Adaptado para este trabalho a partir do *The Astrobiology Primer 2.0* (2016))41

Figura 22 Imagem da parte ventral da Mars Reconnaissance Orbiter, a preto podemos ver a câmara HiRISE (com o seu revestimento térmico de cor negra) e à sua direita podemos ver o instrumento CRISM. (Crédito: NASA/JPL)43

Figura 23 Foto do instrumento HiRISE, durante os últimos preparativos pré-montagem no orbitador MRO. (Crédito: NASA/JPL).....45

Figura 24 Nesta imagem podemos ver um exemplo prático da grande capacidade resolutive do HiRISE comparando com o MOC. (Crédito: NASA/JPL)46

Figura 25 Composição fotográfica dos três elementos que constituem o instrumento CRISM, antes de serem montados no orbitador MRO. (<i>Crédito</i> : NASA/JHUAPL)	49
Figura 27 Mapa topográfico de Marte, obtido pelo instrumento MOLA do MGS. A branco estão assinalados os locais aproximados das fotografias usadas para este trabalho. (<i>Crédito</i> : NASA/JPL/USGS e Joana Neto-Lima)	51
Figura 28 Mapa de Elevação MOLA, destacando os locais onde se pode observar a presença de dunas e formação de estruturas devido à acção do vento. (<i>Crédito</i> : NASA/JPL)	53
Figura 29 Representação esquemática das diferentes formas de transporte eólico e o tipo de partículas transportado. (<i>Crédito</i> : Adaptado de "The Physics of wind-blown sand and dust", Kok (2012))	54
Figura 30 Os seis tipos principais de dunas de areia, conforme observado no planeta Terra. A. Dunas Barcan. B. Dunas Transversais. C. Dunas Barcanóides. D. Dunas Longitudinais. E. Dunas Parabólicas. F. Dunas Estrela. (<i>Crédito</i> : Pearson Prentice Hall, Inc. (2006))	55
Figura 31 Imagem de um local cerca do equador marciano em que podemos distinguir claramente centenas de marcas da passagem de <i>dust devils</i> . Imagem obtida pelo HiRISE (ESP_014413_2065_RED) (<i>Crédito</i> : NASA/JPL/University of Arizona)	57
Figura 32 Estudo do Local 1 – Cratera Schiaparelli em Marte. (Descrição das Imagens, no sentido dos ponteiros do relógio) Imagem obtida pelo HiRISE (PSP_008323_1735); Detalhe das dunas em forma de estrela e dos TARs; Imagens obtida pelo CRISM: Cores Reais (HRS0000AB91_07_IF174S_TRU1), Materiais Férricos (HRS0000AB91_07_IF174S_FEM). (<i>Crédito</i> : NASA/JPL/University of Arizona, Joana Neto-Lima, NASA/JHUAPL)	58
Figura 33 Fotografia aérea das dunas em forma de estrela do Campo de Dunas de Dumont (Deserto do Mojave, Estados Unidos da América) (<i>Crédito</i> : Doc Searls).....	59
Figura 34 Estudo do Local 2 – Localizado no Pólo Norte de Marte. (Descrição das Imagens, no sentido dos ponteiros do relógio) Imagem obtida pelo HiRISE (PSP_009656_2780); Imagens obtida pelo CRISM: Cores Reais (HRS0000C36B_07_IF77S_TRU1), Materiais Férricos (HRS0000C36B_07_IF177S_FEM1). (<i>Crédito</i> : NASA/JPL/University of Arizona, NASA/JHUAPL)	61
Figura 35 Campo de Dunas de Gesso, na antiga bacia hidrográfica de Tularosa no Monumento Nacional de White Sands (Novo México, Estados Unidos da América) (<i>Crédito</i> : Material de divulgação da National Parks Society)	62
Figura 36 Representação esquemática dos quatro Períodos da história geológica de Marte, fazendo referência aos principais eventos geológicos de cada uma e as formações que ainda hoje podemos	

observar na superfície do planeta. (<i>Crédito</i> : Emily Lakdawalla, adaptação de Tanaka & Hartmann (2012)).....	64
Figura 37 Representação Esquemática da evolução da paisagem provocada por um rio. (<i>Crédito</i> : “ <i>Fundamental Physical Geology</i> ” de Sreepat Jain (2014))	65
Figura 38 Estudo do Local 3 – Secção da Nili Fossae em Marte. (Descrição das Imagens, no sentido dos ponteiros do relógio) Imagem obtida pelo HiRISE (PSP_009929_2020); Detalhe das dunas paralelas no interior de um dos canais secundários; Imagens obtida pelo CRISM: Cores Reais (FRT00003E12_07_IF166S_TRU1), Materiais Férricos (FRT00003E12_07_IF166S_FEM1), Materiais Hidratados (FRT00003E12_07_IF166L_HYD1). (<i>Crédito</i> : NASA/JPL/University of Arizona, Joana Neto-Lima, NASA/JHUAPL)	67
Figura 39 Vista aérea da secção norte do Grand Canyon, vale escavado pelo rio Little Colorado (um afluente do Rio Colorado), localizado no Arizona (Estados Unidos da América) (<i>Crédito</i> : Hendric Stattmann)	68
Figura 40 Estudo do Local 6 – Localizado na Cratera Jezero em Marte. (Descrição das Imagens, no sentido dos ponteiros do relógio) Imagem obtida pelo HiRISE (ESP_035985_1985); Imagens obtida pelo CRISM: Cores Reais (Imagem rodada 90° para a direita) (HRL000040FF_071F183S_TRU1), Materiais Hidratados (HRL000040FF_07_IF183L_HYD1), Materiais Férricos (HRL000040FF_07_IF183S_FEM1). (<i>Crédito</i> : NASA/JPL/University of Arizona, NASA/JHUAPL).....	70
Figura 41 Estudo do Local 6 - - Localizado na Cratera Jezero em Marte. (Descrição das Imagens, no sentido dos ponteiros do relógio) Imagem obtida pelo HiRISE (PSP_002387_1985);Detalhe de dunas transversais num dos canais do antigo delta deposicional; Imagens obtida pelo CRISM: Cores Reais (FRT00005C5E_07_IF166S_TRU1), Filossilicatos (FRT000047A3_07_IF166L_PHY1). (<i>Crédito</i> : NASA/JPL/University of Arizona, Joana Neto-Lima; NASA/JHUAPL).....	71
Figura 42 Delta na Baía Kachemak, esta secção é denominada como Lower Cook Inlet (Alaska nos Estados Unidos da América) (<i>Crédito</i> : Hendric Stattmann).....	72
Figura 43 Estudo do Local 9 – Localizado em Kasei Valles. (Descrição das Imagens, no sentido dos ponteiros do relógio) Imagem obtida pelo HiRISE (ESP_024703_2010), Detalhes do canal formado por água líquida, com crescente resolução. (<i>Crédito</i> : NASA/JPL/University of Arizona, Joana Neto-Lima)	74
Figura 44 Estudo do Local 5 – Localizado na Cratera Henry em Marte. (Descrição das Imagens, no sentido dos ponteiros do relógio) Imagem obtida pelo HiRISE (PSP_009929_2020); Detalhe das RSL	

(Recurrent Slope Lines) observadas na parede da cratera. (<i>Crédito:</i> NASA/JPL/University of Arizona, Joana Neto-Lima)	77
Figura 45 Estudo do Local 7 - Localizado numa das paredes da Caldeira Tharsis Tholus em Marte. (Descrição das Imagens, no sentido dos ponteiros do relógio) Imagem obtida pelo HiRISE (PSP_002387_1985); Detalhe de um local onde ocorrem numerosos episódios de derrocada (Imagem foi rodada 90° para a esquerda para facilitar a sua inclusão nesta página). Imagens obtida pelo CRISM. Cores Reais (FRT00005C5E_07_IF166S_TRU1), Filossilicatos (FRT000047A3_07_IF166L_PHY1). (<i>Crédito:</i> NASA/JPL/University of Arizona, Joana Neto-Lima; NASA/JHUAPL)	79
Figura 46 Caldeira do vulcão Mauna Loa com o Mauna Kea à distância (Havai, USA) (<i>Crédito:</i> Joshua Stevens e NASA Earth Observatory)	80
Figura 47 Representação esquemática dos vários tipos de desmoronamentos que podem ocorrer em superfícies planetárias, em zonas de declive acentuado (como p.e. bordos de crateras em Marte) (<i>Crédito:</i> “ <i>Fundamental Physical Geology</i> ” de Sreepat Jain (2014), adaptado de USGS (2004))	82
Figura 48 Estudo do Local 8 – Localizado no Pólo Norte de Marte. (Descrição das imagens, no sentido dos ponteiros do relógio) Imagem obtida pelo HiRISE de avalanche numa escarpa (ESP_016228_2650), Duas imagens obtidas pelo HiRISE de várias nuvens de poeira produzidas em episódios distintos de avalanche (ESP_016423_2640), (<i>Crédito:</i> NASA/JPL/University of Arizona, Joana Neto-Lima)	83
Figura 49 Avalanche numa das encostas das Montanhas Rochosas. (Colorado, Estados Unidos da América) (<i>Crédito:</i> Rocky Mountain National Park)	85
Figura 50 Planet-Encircling Dust Event (PEDE) de 2018 (<i>Crédito:</i> ESA/DLR)	86
Figura 51 Pólo Norte Marciano. Imagem obtida pelo HiRISE (PSP_007140_2640), (<i>Crédito:</i> NASA/JPL/University of Arizona, Joana Neto-Lima).....	87

Índice de Tabelas

Tabela 1 Lista detalhada de todos os “primeiros” da história da exploração espacial e interplanetária.	26
Tabela 2 Especificações Técnicas do orbitador Mars Reconnaissance Orbiter (Crédito: NASA/JPL)	44
Tabela 3 Especificações Técnicas do instrumento HiRISE (<i>Crédito:</i> NASA/JPL)	47
Tabela 4 Especificações Técnicas do instrumento CRISM (<i>Crédito:</i> NASA/JHUAPL).....	50
Tabela 5 Especificações Técnicas das Imagens HiRISE utilizadas para a realização da análise geomorfológica dos locais considerados para este estudo. (Nota: A informação do Local de Estudo 4, foi deixada propositadamente sem preencher.)	52
Tabela 6 Sumário da área ocupada por dunas da superfície marciana. (<i>Crédito:</i> Adaptado de "Mars Global Digital Dune Database (MGD ³): Global Dune Distribution and wind pattern observations, Hayward et al. (2014))	54
Tabela 7 Tipos de processos de vertente que ocorrem nas encostas marcianas, adaptado de <i>The Atlas of Mars (2019)</i> reproduzido de <i>Diniaga et al. (2014)</i> (Crédito: NASA/JPL-CalTech).....	76

Introdução

Desde a missão Luna 2 em 1959 que a Humanidade e a comunidade científica se tem empenhado em estudar as superfícies de outros corpos celestes para além da Terra. Durante mais de sessenta anos e recorrendo a variadas técnicas de análise, estudo e exploração passamos, do quase desconhecimento quanto aos processos responsáveis pela modelação e transformação de variadas superfícies planetárias para a capacidade de além de os identificar, ser capaz de os prever e em laboratório ou com visitas a locais análogos no nosso próprio planeta replicar esses mesmos processos e dessa forma poder ajudar ao avanço científico do campo científico da Geologia Planetária.

O presente trabalho pretende dar uma visão global da superfície do planeta Marte, da sua evolução e dos processos responsáveis pela presente geomorfologia e geoquímica. Foram seleccionados locais específicos de Marte, representativos de cada um dos principais processos de modelação (eólica, hidrológica, ravinhas (gullies) e avalanches e desmoronamento de ravinhas) procurando análogos terrestres, demonstrando assim o uniformitarismo dos processos de modelação em distintas superfícies planetárias. Actualmente, usamos a Terra como um análogo dos processos que ocorreram, ocorrem ou podem ocorrer no futuro em Marte. Com este trabalho, pretendemos demonstrar que estas analogias não são unidireccionais, com o estudo de Marte e da sua dinâmica podemos usar este planeta como análogo da própria Terra.

Para ajudar à compreensão do largo caminho percorrido, até ao momento em que um rover de cerca de uma tonelada de peso e um pequeno helicóptero autónomo tocam o solo marciano, este trabalho foi estruturado em três capítulos principais: o primeiro é completamente dedicado aos Pais Fundadores da Aeronáutica, e a uma pequena revisão histórica da exploração planetária e monitorização da evolução de superfícies planetárias; o segundo aborda a formação e a evolução do nosso Sistema Solar e a diversificação das superfícies planetárias; o terceiro é a parte central deste trabalho, no qual analisamos imagens obtidas pelo orbitador da NASA (National Aeronautics and Space Administration) *Mars Reconnaissance Orbiter* (MRO), de nove locais (Cratera Schiaparelli, Pólo Norte, Nili Fossae, Cratera Henry, Cratera e Delta Depositional de Jezero, Caldeira do Tharsis Tholus e Kasei Valles) estudando o seu contexto geomorfológico (recorrendo ao instrumento HiRISE (High-Resolution Imaging Science Experiment)) e geoquímico (recorrendo ao instrumento CRISM (Compact

Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars)). Estes locais de estudo foram selecionados, devido à qualidade das imagens obtidas pelo HiRISE, qualidade dos dados de espectroscopia obtidos pelo CRISM, para poder assegurar a fiabilidade da análise de cada um deles (p.e. presença de água líquida, minerais hidratados ou resultado de interacções prolongadas com água líquida, e a presença de gelo de água ou de dióxido de carbono).

Trabalhos como o presente são importantes tanto para o avanço do conhecimento científico como para o possível advento da exploração humana de outras superfícies planetárias. Fazendo uso dos dados obtidos do estudo da complexa dinâmica marciana, podemos compreender, acompanhar e possivelmente prever processos análogos no planeta Terra, podemos também preparar o caminho para ajudar a escolher melhores locais de estudo por rovers ou outras plataformas directamente em superfícies planetárias extraterrestres (ajudando a diminuir factores de risco, prevendo condições e processos que podem ocorrer de forma cíclica), e mesmo em futuras missões tripuladas.

O futuro das ciências planetárias, passará pela concepção de missões cada vez mais complexas abrindo lentamente caminho para missões tripuladas. À medida que esta nova corrida espacial evolui veremos cada vez mais barreiras e fronteiras serem conquistadas e derrubadas, facilitando informação (e recuperação de amostras de outras superfícies planetárias) cada vez mais detalhada, ajudando a perceber de onde vimos e para onde vamos enquanto espécie, enquanto habitantes do vasto Universo.

Parte I – O Nascimento da Aeronáutica e a Idealização do Estudo do Universo

“It is difficult to say what is impossible, for the dream of yesterday is the hope of today and the reality of tomorrow.”

Dr. Robert Hutchings Goddard (1882-1945)

1. Primórdios da Humanidade e Primeiros Passos da Aeronáutica

A primeira parte do presente trabalho foi dividida em três capítulos: Primórdios da Humanidade, Pais Fundadores da Aeronáutica e Revisão Histórica da Exploração Planetária. Facilitando desta forma a compreensão, as motivações, inovações e paixões dos que estiveram por detrás da corrida pela conquista do Universo...levando a Humanidade a sonhar para lá das amarras da gravidade terrestre.

Desde os primórdios da Humanidade que, como espécie, olhamos o Universo e de uma forma ou de outra compreendemos que muitas das respostas necessárias para o avanço da nossa civilização, se encontram para lá do nosso planeta, para lá da Terra... que o nosso futuro está por entre as estrelas do firmamento.

O primeiro contacto da Humanidade com o Universo, foi o visual. O olhar o firmamento e observar o contínuo bailado das estrelas e dos corpos celestes, com o evoluir do tempo e da percepção Humana, ajudou a lentamente perceber como as estações do ano estavam interligadas com as estrelas, como as fases da Lua influenciavam as marés. Antes do pensamento científico imperava a superstição e a fortuita observação de algum fenómeno astronómico era interpretada como prenúncio de morte ou de alguma tragédia.

No século XVI, um monge italiano chamado Giordano Bruno, seguindo as pisadas de Copérnico (1473-1543) que defendia a Teoria Heliocêntrica, escreve uma série de textos, nos quais refere quebrar a barreira de cristal e viajar através do Universo infinito, “olhando do nosso globo para outros, olhando para lá do céu eterno” (“*On the Infinite Universe and Worlds*” (1584)). Dessa forma

expandindo a visão de Copérnico e explorando a possibilidade da existência de outros mundos, a existência de mais globos cheios de vida, um número infinito e incalculável de mundos à espera de ser conhecidos.

Giordano Bruno foi interrogado e julgado entre 1593 e 1599, sendo executado em Campo d'Fiori em Roma por heresia, a 17 de Fevereiro de 1600, devido à natureza herética das suas ideias heliocêntricas, às suas declarações sobre outros mundos para além do nosso e à sua teimosia em renunciar a elas. Existem alguns documentos que sobreviveram ao passar do tempo, e à perseguição religiosa das ideias professadas por Bruno, mas é possível encontrar alguns trabalhos de tradução dos trabalhos, poemas e reflexões deste mártir da ciência. O livro utilizado para este trabalho, para um entendimento mais detalhado das visões e escritos deste monge, é uma biografia muito completa que possui traduções de muitos dos arquivos sobreviventes do trabalho de Giordano Bruno, organizado, compilado e traduzido por William Boulding em 1914.

No mesmo local, nas mesmas habitações nas quais Giordano Bruno foi interrogado, dezasseis anos mais tarde, o mesmo inquisidor, o Cardinal Bellarmino, convocou Galileo Galilei exactamente pelos mesmos motivos: a relação entre o avanço do conhecimento científico e a fé, o nascimento da astronomia como ciência e o pensamento filosófico aristotélico que até aí vigorava e regia o mundo conhecido. Ao contrário de Giordano Bruno, Galileo Galilei (1564-1642) simplesmente renunciou às suas ideias heréticas e assim evitou o mesmo destino que o monge.



Figura 1 Sumário do Julgamento de Giordano Bruno. (Crédito: Arquivo Vaticano)

A ideia de que a Terra orbitava em torno do Sol, Teoria Heliocêntrica, circulava entre os meios académicos europeus desde as primeiras décadas do século XVI mas a ideia de Bruno da possibilidade de outras Terras e dos seus habitantes era revolucionária e foram precisos séculos para que a exploração e o estudo de outros mundos para além da simples observação, fosse tomada em sério e passasse a ser vista como uma disciplina científica e não apenas devaneios poéticos ou inspiração para reflexões filosóficas.

As ideias postuladas por Giordano Bruno foram mantidas debaixo do maior segredo possível, pelas autoridades vigentes, mas o avanço científico não conseguiu ser parado, pois no século XVI e XVII quatro cientistas revolucionaram a forma da Humanidade observar o céu, alterando de forma irrevocável tanto a dinâmica como as verdadeiras dimensões do Universo: Copérnico, Kepler, Galileo e Newton (os autores do livro “*Fundamental Planetary Science*” (Lissauer e de Pater, 2013) chamam-lhe a “Revolução Copernicaniana-Kepleriana-Galileiana-Newtoniana”). Devido à repressão religiosa, à perseguição aos que desafiavam a ideia geocêntrica de Ptolomeu (Alexandria, 2 AC) que vigorava e era a que a Igreja, e as autoridades vigentes, defendia como prova da intervenção divina criacionista (a Terra como centro do Universo era usada como prova irrefutável da criação do Homem à imagem de Deus, por esse motivo outras teorias que colocam o planeta como algo que não era figura central e de destaque eram consideradas ataques directos a estes pensamentos e doutrinas), apenas pequenos

avanços científicos puderam acontecer nos próximos séculos (muitas vezes de forma secreta e dissimulada através de comunicações pessoais por meio de cartas e alguns folhetos que circulavam nos núcleos científicos e intelectuais).

Rising on wing secure, with burning heart,
what fate may scare me, smiling at the tomb,
Bursting all bonds and scorning gates of doom,
Whence few are chosen for such lofty part?

I soar beyond the mortal years, and start
For regions where grim iron cast no gloom
Nor adamant restrains. Forth from the womb

Of darkness, free and passionate, I dart. I dread no barrier of banished spheres;
I cleave the sky, and other suns behold;
Celestial worlds innumerable I see; One left, another company appears;
My pinion fails not, and my heart is bold
To journey on through all infinity.

Soneto composto por Giordano Bruno

(“*On the Infinite Universe and Worlds*” (1584)

Traduzido para o inglês por William Boulting

(*Crédito*: Boulting, W., Giordano Bruno – His Life, Thought, and Martyrdom (1914), Kegan Paul, Trench, Trübner & Co.Ltd – London)

Mas a partir do século XIX começou um novo gênero literário (ficção-científica) que se aliou a uma nova tecnologia (cinema), que ajudou a inspirar uma nova geração de “revolucionários” que agora não sofreriam as limitações da Igreja, nem o espectro da Inquisição para os impedir de sonhar e “viajar” para além do planeta Terra. Agora, tal como Giordano Bruno sonhou no século XVI, a mente humana podia voar por entre as esferas celestes e visitar outros mundos para além da Terra. Essas primeiras obras literárias e cinematográficas, foram inspirando lentamente uma nova geração de inventores e visionários para tornar ficção em realidade.

As primeiras obras que desenvolviam a exploração de outros corpos celestes, foram publicadas a partir da segunda metade do século XIX, com as novelas de Jules Verne (“*De la terre à la Lune*” (From the Earth to the Moon – Da Terra à Lua) em 1865 e “*Autour de la Lune*” (Around the

Moon – Volta à Lua) em 1870), ilustradas por Henri de Montaut. Os trabalhos de Jules Verne, foram um ponto de viragem para entusiastas do novo género de ficção que aqui nascia e foram uma inspiração para mentes mais científicas, o impacto que as publicações destas obras tiveram nos destinos e nas escolhas dos “pais fundadores” da aeronáutica, ciência da propulsão (rocketry) e astronáutica é muito difícil de quantificar, mas é impossível negar. Estes quatro homens, não foram os únicos, mas os seus trabalhos, a sua persistência e o seu legado tecnológico-científico é tal que se torna incontornável, esses homens são: Konstantin Eduardovich Tsiolkovky (1857-1935), Robert Esnault-Pelterie (1881-1957), Robert Hutchings Goddard (1882-1945) e Hermann Oberth (1894-1989).

Em termos culturais, começou-se a assistir à proliferação de cada vez mais obras cujo cenário era a exploração do espaço e dos corpos celestes imediatamente mais próximos da Terra, o mais influente depois das novelas de Jules Verne, foi “*The First Man in the Moon*” (O Primeiro Homem na Lua) de Herbert George Wells em 1901. As repercussões das criações de H.G.Wells e Jules Verne ainda hoje se fazem sentir, tanto na produção cultural como científica, mas no imediato um inventor francês, chamado George Méliès, usando as mais modernas técnicas de fotografia e das imagens em movimento criou o primeiro filme do género que depois seria conhecido como ficção-científica, “*Le Voyage dans la Lune*” (A Viagem à Lua) em 1902.

“*Le Voyage dans la Lune*” é reconhecidamente o primeiro filme de ficção-científica e é considerado como um dos filmes mais influentes da história do cinema, e tal como na época em que estreou ainda hoje continua a surpreender com o nível técnico necessário para o produzir e pelo imaginário de Méliès, pela forma como trouxe à vida a tecnologia de viajar pelo espaço e como explorou a existência das Selenitas (as criaturas que vivem na Lua), os primeiros extraterrestres imaginados e retratados em cinema.



Figura 2 “*Le Voyage dans la Lune*” de Georges Méliès (1902). (Crédito: George Méliès).

A **Figura 2** representa a imagem mais icônica do filme “*Le Voyage dans la Lune*”, o momento em que a nave chega à Lua aterrando no seu olho esquerdo. Este fotograma tornou-se um dos símbolos do gênero da ficção-científica e “alimentou” a imaginação de muitos criadores artísticos e muitos cientistas e investigadores desde a sua primeira exibição pública.

2. Pais Fundadores da Aeronáutica

Estes são os “revolucionários” referidos anteriormente, e que de maneiras diferentes levaram a Humanidade a libertar-se das “grilhetas” da gravidade terrestre, começar a explorar o nosso Sistema Solar e estudar as peculiaridades do Universo.

São reconhecidos como os “pais fundadores” da aeronáutica, ciência da propulsão (*rocketry*) e astronáutica, quatro homens que apesar de separados pela distância e pelo tempo exploravam o mesmo objetivo, o mesmo sonho: o de conquistar a derradeira fronteira da Humanidade, o Espaço. Esses quatro homens foram: Konstantin Eduardovich Tsiolkovsky (Rússia), Robert Esnault-Pelterie (França), Robert Hutchings Goddard (Estados Unidos da América) e Hermann Oberth (Alemanha). O trabalho destes quatro homens foi fundamental e serviu como ponto de partida para os programas espaciais das duas super-potências, Estados Unidos da América e União das Repúblicas Socialistas (URSS) que se degladiaram pelo domínio e conquista do Espaço e dos planetas/corpos

celestes do nosso Sistema Solar. Ainda hoje, podemos ver o impacto das ideias e do trabalho destes homens na forma como se explora o Sistema Solar. Neste trabalho a forma escolhida para ordenar estes quatro homens foi por data de nascimento, uma vez que não foi possível quantificar o impacto e influência individual de cada um deles.

Nota: Segundo os autores, Asif A. Siddiqi (“Challenge to Apollo: The Soviet Union and the Space Race”, 2000) e W.T. Huntress Jr. et al. (“Lunar and Planetary Robotic Exploration Missions in the 20th Century”, 2003) apenas consideram três Pais Fundadores: K.E. Tsiolkovsky, R.H. Goddard e H. Oberth (São considerados os Pais Fundadores da Aeronáutica Moderna, uma vez que chegaram à mesma conclusão de que o uso de combustíveis líquidos era fundamental para que um foguetão tivesse potência suficiente para escapar à gravidade terrestre). Mas neste trabalho foi decidido seguir a linha de pensamento dos quatro Pais Fundadores de Arthur C. Clarke (“Interplanetary Flight – An Introduction to Astronautics”, 1953), uma vez que Tsiolkovsky e Esnault-Pelterie chegaram às mesmas conclusões em termos de teorizar as viagens espaciais e formularam em paralelo, versões muito semelhantes da que depois ficou conhecida por Equação da Aviação Clássica.

2.1. Konstantin Eduardovich Tsiolkovsky (em Cirílico: Константин Эдуардович Циолковский) (1857-1935)



Figura 3 K.E. Tsiolkovsky cerca de 1930 (*Crédito:* Copyright Free)

“Earth is the cradle of Humanity, but one cannot remain in the cradle forever.” K.E. Tsiolkovsky

Nasceu em Izherskoye (agora chamado Distrito Spassky, em Ryazan Oblast (54° 24'N 40° 23'E), no antigo Império Russo, a 17 de Setembro de 1857 (segundo o antigo sistema, 5 de Setembro) e faleceu em 1935 na cidade de Kaluga localizada a cerca de 150km a sudoeste de Moscovo (54° 33'N 36° 17'E).

K.E. Tsiolkovsky, representado na **Figura 3** em 1930, cerca de cinco anos antes do seu falecimento, nasceu no seio de uma família modesta, em que o pai, Eduard Ignatyevich Tsiolkovky era de origem polaca e nobre por nascimento, trabalhando como Oficial Florestal da Província; a mãe, Mariya Ivanovna Yumasheva, era de origem étnica Russo-Tátara. Segundo as informações que foi possível averiguar (de biógrafos e historiadores), a família não teve mais nenhum filho para além de Konstantin.

Os seus primeiros anos de vida foram bastante duros e marcantes para Konstantin, e devido a dois eventos especialmente dramáticos, a sua personalidade foi moldada e deu origem ao personagem quase mítico que os historiadores descrevem (principalmente o historiador sénior da NASA, Asif A. Safiqqi): aos nove anos de idade, devido à febre escarlatina perdeu a audição quase por completo e aos treze anos de idade a morte da sua mãe, Mariya. Neste período de quatro anos, a vida de Konstantin foi completamente alterada e devido a isso tornou-se numa pessoa solitária e retraída, cujo único refúgio eram os livros. Os seus melhores amigos viviam por entre as páginas dos livros que conseguia ler, entre os quais encontrou os trabalhos de Jules Verne que lhe abriram a mente para a possibilidade de explorar outros mundos, assim nasceu o seu interesse quanto à exploração espacial e a exploração planetária, mas não apenas numa óptica da ficção mas de uma forma muito mais séria, começando a aplicar os seus conhecimentos científicos para resolver problemas concretos como p.e. a propulsão de uma nave espacial como as descritas por Jules Verne.

Os seus problemas auditivos levaram a que nenhuma das escolas o aceitassem como aluno, e Konstantin, de forma completamente autónoma aprendeu sozinho tudo o que precisava para prosseguir os seus estudos em Moscovo.

Aos dezasseis anos viajou para a capital, onde permaneceu três anos e com a ajuda de uma corneta auditiva, conseguiu assistir a palestras onde aprendeu Química, Matemática, Astronomia e Mecânica. Também teve a possibilidade conhecer e falar com o filósofo Nikolai Fyodorovich Fyodorov

(pai do Cosmicismo Russo, um precursor do Transhumanismo) que trabalhava na Biblioteca Rumyantsev, também conhecida como Leninka (hoje, Biblioteca Estatal da Rússia), em Moscovo. Konstantin Eduardovich Tsiolkovsky, passou a defender que a evolução e aperfeiçoamento da raça humana passavam pela exploração e colonização espacial e isso fez com que investisse cada vez mais tempo em projectos relacionados com a propulsão e viagens espaciais.

Os três anos que permaneceu em Moscovo, entre 1873 e 1876 foram fulcrais para o resto da vida do jovem Tsiolkovsky. Aos 19 anos, ao descobrir que o filho estava a passar privações e a descuidar a sua saúde em detrimento dos seus estudos, Eduard Tsiolkovsky levou o filho para Borosk, um município perto da capital e incentivou-o a preparar-se para o exame estatal de professor. Enquanto se preparava para o exame, Konstantin Tsiolkovsky conheceu a sua mulher Varvara Sokolova que depois o acompanhou até à pequena cidade de Kaluga.

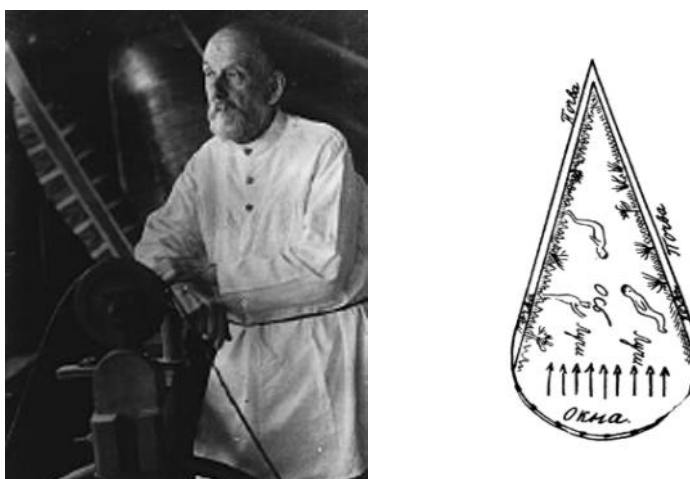


Figura 4 [Esquerda] Konstantin Eduardovich Tsiolkovsky. (*Crédito*: K.E.Tsiolkovsky Museum, Kaluga, Russia); [Direita] Desenho de uma nave espacial. (*Crédito*: K.E. Tsiolkovsky, no livro “The Call of Cosmos”, tradução de 1960)

Mesmo afastado dos centros de investigação e das grandes universidades do seu tempo, e nos intervalos da sua actividade como professor de matemática do ensino secundário, Tsiolkovsky continuou a sua produção científica e a publicar alguns livros de ficção, na **Figura 4** podemos ver uma fotografia sua no interior da sua oficina de trabalho (esquerda) e um desenho de uma nave espacial rudimentar (direita) em que podemos distinguir cosmonautas em gravidade zero e um ecossistema cultivado nas paredes da nave. Estes trabalhos publicados por Tsiolkovsky, tiveram muito impacto no imaginário russo-czarista, que havia sido capturado pelas novelas de Jules Verne, e como este descreviam viagens pelo Espaço e a conquista da Lua como forma de chegar a outros planetas do

nosso Sistema Solar, mas enquanto o resto do Mundo olhava a Lua, os russos tinham uma especial ligação com o planeta Marte.



Figura 5 Ilustração de A. E. Gofman do livro educacional publicado em 1893 “A Lua”, da autoria de K.E. Tsiolkovsky (em cirílico, К. Э. Циолковский "На Луне", 1893. Москва, тип. И. Д. Сытина)

Em 1895, inspirado pela Torre Eiffel em Paris (inaugurada em 31 de Março de 1889, aquando da Exposicion Universelle, que comemorava o Centenário da Revolução Francesa), Konstantin Tsiolkovsky imaginou pela primeira vez o conceito de Elevador Espacial. Inspirado por tudo o que havia visto apresentado na Exposicion Universelle, publicou um livro intitulado “A Lua” em 1893, uma das ilustrações desse livro está reproduzida na **Figura 5**.

Anos mais tarde e após algumas rejeições por parte da Academia de Ciências Russa, Tsiolkovsky publica em 1903 a Equação do Foguetão Ideal, depois conhecida como Equação da Aviação Clássica ou também como Equação de Tsiolkovsky. Estas equações foram publicadas num manuscrito chamado *The Call of the Cosmos*, cuja primeira tradução para o inglês foi apenas em 1960.

$$\Delta v = v_e \ln \frac{m_{inicial}}{m_{final}}$$

Δ_v é a aceleração produzida pelo uso do motor do foguetão, não incluindo a interação de outras fontes como o atrito ou a gravidade.

v_e representa a velocidade efetiva da Exaustão dos produtos da combustão do motor.

$$v_e = I_{sp} g_0$$

I_{sp} representa a propulsão do foguetão tendo em conta o tempo de combustão do motor.

g_0 Valor da Gravidade Standard

\ln é o logaritmo natural

$m_{inicial}$ representa o valor da massa total inicial, incluindo o propulsante (também conhecido como *wet mass*).

m_{final} representa o valor da total final, sem o propulsante (também conhecido como *dry mass*).

Longe ser revolucionária, esta equação usa princípios de matemática e de física do século XVII e século XVIII (apoiando-se fortemente nas Leis do Movimento de Newton referidas no trabalho seminal de Isaac Newton, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (em português Princípios Matemáticos da Filosofia Natural) publicado pela primeira vez a 5 de Julho de 1687, com duas versões ampliadas e corrigidas pelo próprio em 1713 e 1726) e mesmo assim, esta fórmula continua a ser utilizada e mantém-se relevante no desenho e desenvolvimento das missões de exploração espacial do século XXI.

Outro impacto duradouro do trabalho e dedicação de Konstantin Eduardovich Tsiolkovsky foi a sua capacidade de inspirar e ser a base para o trabalho de pioneiros como Robert Hutchings Goddard e Hermann Oberth. Estes conseguiram ir um pouco mais para além dos trabalhos fundamentalmente teóricos de Tsiolkovsky e chegaram ao desenho e lançamento dos primeiros foguetões e a aplicar inovações que não estavam disponíveis para o pioneiro russo em Kaluga.

Pode-se mesmo considerar que mais que um dos pais fundadores da “pais fundadores” da aeronáutica, ciência da propulsão (*rocketry*) e astronáutica, K.E. Tsiolkovsky é o avô destas disciplinas... abrindo portas a todos os que se seguiram e inspirando a exploração planetária e a colonização do Espaço.

2.2. Robert Esnault-Pelterie (1881-1957)



Figura 6 Robert Esnault-Pelterie (também conhecido como REP) (*Crédito*: Agence de Presse Meurisse – Bibliothèque Nationale de France)

Robert Esnault-Pelterie, muitas vezes referido pela sigla REP, foi um engenheiro e piloto francês, que podemos ver fotografado em 1930 na **Figura 6**, nascido em 1881 na cidade de Paris e faleceu em 1957 na cidade de Nice.

Filho de um empresário têxtil, desde cedo demonstrou uma grande facilidade e paixão pela mecânica e engenharia. O seu pai, reconhecendo as capacidades do filho, disponibilizou-lhe uma pequena oficina para que este pudesse experimentar e trabalhar, Robert rapidamente a transformou num laboratório de física e de química. Nesse pequeno laboratório improvisado, o jovem Robert construiu uma série de dispositivos e focou-se no estudo da telegrafia sem fios. Com apenas 21 anos, em 1902, obteve a sua primeira patente para um *relé* eléctrico. Ao longo de toda a sua vida, conseguiu obter mais de 120 patentes para as suas invenções e ideias inovadoras, em diversos campos.



Figura 7 Fotografia de Robert Esnault-Pelterie, pode-se distinguir a sigla pela qual ficou conhecido na cauda do avião – REP (*Crédito*: Domínio Público).

Em 1904 depois de obter a licenciatura em Engenharia (na altura designada por Ciências Físicas) na Faculté de Sciences Sorbonne, enveredou pela área da aviação. Actualmente é considerado um dos maiores aviadores franceses, que ajudou a melhorar e avançar a forma como se construíam aviões e engenhos voadores. Em menos de três anos, já havia construído um inovador monoplane metálico (tradicionalmente, nesta altura, os aviões ainda eram maioritariamente construídos a partir de madeira), colocando o motor à frente do piloto e não atrás deste como até aí, e com a sua mais famosa invenção (que revolucionou toda a aeronáutica até aos dias de hoje), o *joystick* de controlo, e havia desenvolvido uma série de tecnologias para melhorar a segurança dos pilotos (p.e. velocímetro, trem de aterragem de duas rodas, paraquedas de ejeção e cinto de segurança). Podemos observar o próprio Robert Esnault-Pelterie sentado ao comando de um dos seus pioneiros monoplanos numa fotografia de 1909, reproduzida na **Figura 7**. É a partir de esta altura, mais ou menos, que começa ele próprio a pilotar as suas invenções, tornando-se um experiente piloto que o ajudou ainda mais a perceber o que havia para melhorar e inventar nesse campo.

Durante o ano 1908, Esnault-Pelterie começou a olhar para além do horizonte e para o que estava para além dele, ele considerava as viagens interplanetárias como o seguimento natural da aviação, ou seja, a evolução lógica da tecnologia. Sem saber das descobertas nem conhecer o trabalho de Konstantin E. Tsiolkovsky, calculou as constantes e equações matemáticas necessárias para levar a cabo um voo espacial, incluindo as constantes necessárias para ajustar a utilização de motores

auxiliares e calcular os dados necessários para determinar o momento óptimos para a sua ejeção. Num dos seus trabalhos posteriores, calculou e postulou a possível duração de viagens interplanetárias a Marte, Vénus, p.e.

Em 1912, Robert Esnault-Pelterie deu duas conferências pioneiras e que constituem as primeiras abordagens científicas e teóricas da astronáutica em França. A primeira intitulada “*Considérations sur les résultats d’un allègement indefini des moteurs*” (Considerações sobre os resultados obtidos pela deflagração de um foguetão por tempo indefinido), foi apresentada à *Société Française de Physique*, a segunda tinha um título muito mais explícito “*L’Exploration par fusées de la très haute atmosphère et la possibilité des voyages interplanétaires*” (A exploração da atmosfera superior por foguetões e a possibilidade das viagens interplanetárias), apresentada à *Société Astronomique de France*. Estas conferências foram publicadas e chegaram às mãos de outro dos Pais Fundadores, Robert H. Goddard, que ficou de tal forma impressionado com o trabalho de Esnault-Pelterie que acabou por colaborar na compilação dos dados que depois foram publicados na obra seminal do inventor francês.

Devido ao grande interesse da comunidade científica por esta nova área tecnológica e científica, e ao surgimento de algumas individualidades que pouco a pouco se destacavam e inovavam em aeronáutica e criavam lentamente as fundações da cosmonáutica, Robert Esnault-Pelterie (que muitas vezes usava a sigla REP) e um amigo banqueiro chamado André-Louis Hirsch, criaram um prémio internacional – REP-Hirsch Prix – destinado a premiar os trabalhos mais notáveis e revolucionários nestes campos. Curiosamente, Hermann Oberth foi o primeiro contemplado em 1929.

Em 1930, Esnault-Pelterie publicou a sua obra seminal, “*L’Astronomique*”, um tratado detalhado, que se tornou uma referência na área, abrangia todo o conhecimento da sua época sobre voos espaciais e exploração interplanetária, que cinco anos mais tarde adicionou um suplemento para actualizar e enriquecer a sua publicação.

O pioneiro francês era sobretudo um teórico da astronáutica, mas também estava envolvido em experimentação prática com o objectivo de desenvolver um foguetão de 100kg e capaz de atingir cerca de 100km de altitude. Enquanto levava a cabo experiências, testando diferentes tipos de combustíveis e diferentes misturas, decorria o ano 1931, quando uma forte explosão lhe arrancou três dedos da sua mão direita (outras fontes consultadas para este trabalho referem que foram quatro

dedos da mão esquerda). Em 1936 foi eleito para pertencer à L'Académie des Sciences, o que lhe deu ainda mais prestígio e aceitação por parte dos seus pares, pois pensavam em Esnault-Pelterie como um sonhador e que o seu trabalho não aportava nada de importante para a ciência.

A Segunda Guerra Mundial interrompeu todo o trabalho de Robert Esnault-Pelterie, este focou-se na luta pela defesa do seu país na luta contra o Terceiro Reich, ficou conhecido pelos seus dotes de aviador e de ajudar a melhorar os aviões à medida que alguma necessidade surgia. Depois da guerra, refugiou-se na Suíça, levando consigo todos os seus documentos para poder passar os últimos anos da sua vida completamente imerso no seu trabalho. Faleceu durante uma viagem a Nice, dois meses depois da colocação em órbita do primeiro satélite artificial terrestre pela URSS, o Sputnik.

2.3. Robert Hutchings Goddard (1882-1945)



Figura 8 Robert Hutchings Goddard (*Crédito*: Domínio Público)

Robert Hutchings Goddard (**Figura 8**), nasceu em Worcester Massachusetts no dia cinco de Outubro de 1882, e além do seu trabalho como cientista teórico também é reconhecido pelas suas experiências e avanços na área da engenharia prática, principalmente em aeronáutica. O seu maior sonho era conquistar a atmosfera superior e chegar até ao espaço, fora da influência da atmosfera terrestre, através do uso de foguetões.

Com apenas dezasseis anos, em 1898, ficou fascinado com o realismo do trabalho de H. G. Wells, o livro *War of the Worlds* (Guerra dos Mundos), enchendo incontáveis cadernos de notas com ideias de como deixar o planeta Terra e chegar a Marte. Segundo as suas próprias palavras, registadas

num dos seus cadernos pessoais dessa época “... *how wonderful it would be to make some device which had even the possibility of ascending to Mars.*” (... quão maravilhoso seria poder fazer um dispositivo que tivesse a possibilidade de subir até Marte). A partir desse momento, Robert que sempre foi fascinado pela ciência, descobriu a sua vocação, que o iria guiar por toda a vida e lutar muitas vezes contra a falta de reconhecimento das suas descobertas e sobretudo das suas invenções, dos seus foguetes.

Em 1907, o então estudante universitário no Instituto Politécnico de Worcester começou a atrair atenção quando um dia, tentou lançar um foguete de pólvora a partir da cave do Departamento de Física. Em vez de o expulsarem, os seus professores alimentaram a sua curiosidade mas com a condição de deixar as experiências para o exterior e longe dos edifícios. Depois ingressou na Universidade de Clark para fazer o seu Mestrado e Doutoramento em Física.

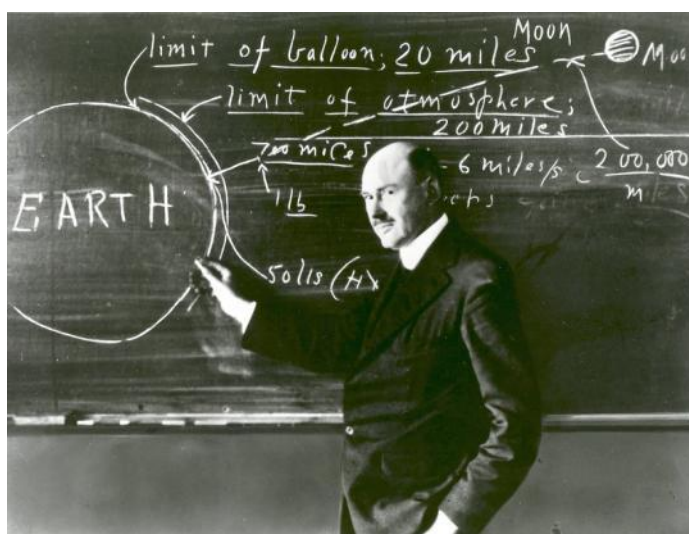


Figura 9 Robert Hutchings Goddard, explicando como chegar à Lua usando os seus cálculos. (Crédito: NASA)

Os primeiros trabalhos de aeronáutica de Robert H. Goddard, não tinham qualquer tipo de financiamento e era ele pessoalmente que pagava pelos materiais. Só em 1917 é que conseguiu uma bolsa de \$5000 dólares da Instituição Smithsonian (Washington D.C), para continuar as suas experiências e estudar a parte superior da atmosfera do planeta Terra.

Em Janeiro de 1920, o resultado do trabalho de Goddard apoiado pela Instituição Smithsonian foi publicado com o título “*A Method of Reaching Extreme Altitudes*” (Smithsonian Miscellaneous

Publication n° 2540), na **Figura 9** podemos observá-lo durante uma palestra sobre esse trabalho. Apesar da publicação se focar em métodos de registo de condições metereológicas e fórmulas matemáticas para permitir voos de foguetes a grandes altitudes, foi um pequeno comentário no documento que chamou a atenção de todos, principalmente de jornalistas que ridicularizaram o trabalho de Robert Hutchings Goddard, esse comentário referia que um dia, um foguetão poderia um dia viajar até à Lua e marcar a sua chegada com uma explosão controlada de pólvora para assinalar a sua chegada (sendo visível desde a superfície terrestre). Robert nunca se esqueceu do ridículo a que foi submetido durante anos, e tornou-se numa pessoa ainda mais reservada, principalmente quanto aos meios jornalísticos. Em 1969, o jornal The New York Times, publicou uma correcção de um artigo escrito nessa altura, aquando da chegada do Homem à Lua com a Apollo 11, cuja tecnologia era um legado directo do trabalho de Goddard.



Figura 10 Robert Hutchings Goddard, ao lado do primeiro foguetão de combustível líquido, no dia 16 de Março de 1926. (*Crédito:* Esther C. Goddard e NASA)

No dia 16 de Março de 1926, Robert Goddard lançou o primeiro foguetão de combustível líquido (uma combinação de gasolina e oxigénio líquido), na **Figura 10** podemos ver uma fotografia antes do lançamento. Duas linhas de combustível iam desde os depósitos até à câmara de combustão, e usava a linha do oxigénio líquido para arrefecer a câmara de combustão para aumentar o

rendimento da reacção, esta técnica é utilizada ainda hoje. Este primeiro foguetão demorou 20 segundos a levantar vôo, em menos de 3 segundos chegou a uma altitude de quase 1,5 metros, atingindo uma velocidade perto dos 100Km/h, aterrando num campo de couves a 56 metros de distância.

O trabalho deste pioneiro, que de forma independente chegou às mesmas conclusões que dois outros dos Pais Fundadores, quanto à necessidade de recorrer a combustíveis líquidos para aumentar a potência dos foguetões, antecipou muitos dos desenvolvimentos da ciência da aeronáutica como p.e. o uso de giroscópios, como guiar o trajecto de um foguetão através de varas instaladas no próprio motor. Em 1929, um dos seus foguetões foi o primeiro da história da aeronáutica a transportar instrumentos científicos, um barómetro e uma câmara fotográfica.

Goddard morreu em 1945, antes do início da Corrida Espacial e da materialização dos seus sonhos, mas é considerado como o impulsor da Idade Espacial da mesma forma que os irmãos Wright são responsáveis pelo início da conquista dos céus pelas máquinas voadoras “descendentes” do primeiro avião (*Spirit of Saint Louis*). Mas não podemos esquecer que durante a sua vida, o trabalho de Goddard não atraiu grande atenção, contudo, quando os Estado Unidos da América começaram a preparar a sua entrada na corrida para a conquista do espaço no final dos anos 50, os primeiros cientistas americanos das ciências de propulsão e de construção de foguetões começaram a reconhecer a contribuição do professor universitário de New England.

Os primeiros projectos desenhados para o início do programa espacial americano, eram de uma ou outra maneira herança do trabalho de Robert H. Goddard, pois o seu trabalho era incontornável.

2.4. Hermann Oberth (1894-1989)

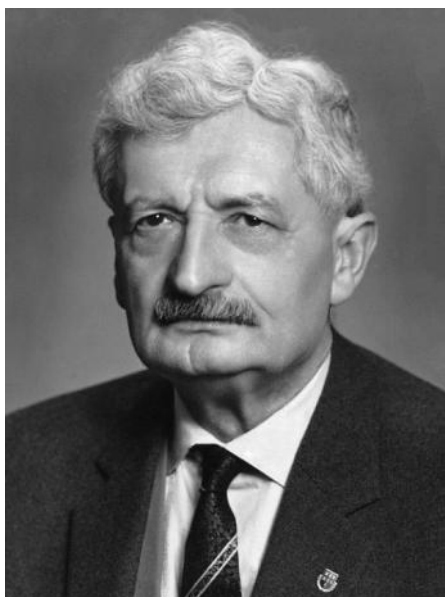


Figura 11 Hermann Oberth. (*Crédito:* Domínio Público)

Hermann Julius Oberth (**Figura 11**) foi um dos grandes visionários da aeronáutica, juntamente com Konstantin Tsiolkovsky, mas foi também uma figura muito polémica, uma vez que foi um dos cientistas que contribuíram activamente para o desenvolvimento e construção dos infames V2, que bombardearam a Inglaterra durante a Segunda Guerra Mundial e forma responsáveis pela morte de três mil pessoas e ferindo muitos milhares de civis. Esteve também envolvido nas operações em Peenemünde, local onde se fabricavam os misseis V2, usando mão-de-obra escrava de prisioneiros de campos de concentração nazi.

Hermann Oberth nasceu a 25 de Junho de 1894 em Nagyszeben (agora Hermannstadt), na Transilvânia (agora Roménia), numa família de raízes étnicas alemãs, filho de um médico. Enquanto recuperava da febre escarlatina, começou a ler os livros de Jules Verne, o seu favorito era *From the Earth to the Moon*. Foi de tal forma influenciado, que começou a estudar matemática porque entendia que para poder realizar o feito retratado no livro de Jules Verne, necessitaria de dominar essa ciência. Aos 14 anos desenhou o seu primeiro foguetão, que usava jactos de gás como propulsor.

Em 1912 ingressou na Universidade de Munique para estudar medicina como o pai, mas quando começou a Primeira Guerra Mundial foi enviado para um hospital na frente de combate. e rapidamente Oberth entendeu que a sua vocação não era ser médico. Durante o seu trabalho na frente de combate levou a cabo uma série de experiências nele mesmo que comprovavam que o corpo humano poderia aguentar as pressões de uma viagem espacial e condições de gravidade zero. Antes

da guerra terminar propôs ao exército o desenvolvimento de mísseis de longo alcance usando combustível líquido, mas foi rapidamente recusado e um pouco ridiculizado.

Quando regressou à Alemanha, ingressou na Universidade de Heidelberg para estudar Física e não Medicina, em 1922 entregou a sua Tese de Doutoramento sobre o desenho de foguetões. A Universidade recusou o seu trabalho e a partir desse momento Oberth decidiu seguir o seu próprio caminho. Pouco tempo depois publicou a sua Tese de Doutoramento com o título *Die Rakete zu den Planetenräumen* (By Rocket into Planetary Space) que foi posteriormente aumentado e republicado. Este livro demonstrava matematicamente que era possível enviar um foguetão para o Espaço, saindo da influência da gravidade terrestre e que os foguetões podiam funcionar no vazio do Espaço. (De recordar que dois anos antes Robert Goddard havia chegado de forma independente às mesmas conclusões e teve de enfrentar o ridículo).

Em 1929, Hermann Oberth lançou o primeiro foguetão completamente desenhado por ele, este lançamento e posteriores experiências contavam com a ajuda de estudantes da Universidade Técnica de Berlim, um desses estudantes era Wernher von Braun (que mais tarde foi o Director Técnico de Peenemünde, e o principal responsável por todo o programa dos mísseis de longo alcance V2). Os dois cientistas mantiveram uma longa relação de amizade de colaboração o resto das suas vidas, na **Figura 12** podemos ver os dois na cerimónia de entrega do Prémio Oberth em Outubro de 1961 na qual o seu antigo estudante foi um dos galardoados.



Figura 12 Hermann Oberth e Wernher von Braun (*Crédito: NASA*)

Depois da Segunda Guerra Mundial Hermann Oberth mudou-se para a Suíça, onde continuou o seu trabalho, mas de 1955 a 1958 viveu nos Estados Unidos da América onde trabalhou com o seu antigo estudante, mas desta vez no desenvolvimento de foguetões para levar o Homem ao Espaço. A colaboração entre os dois cientistas, levou a grandes desenvolvimentos que culminaram na criação do Saturn V, que levou o Homem à Lua em 1969.

Hermann Oberth morreu em Dezembro de 1989, pouco tempo depois da queda do muro de Berlim. Vivia na parte Ocidental da Alemanha, na cidade de Nuremberga.

3. Revisão Histórica da Exploração Planetária

Dos anos 50 até meados dos anos 80, o panorama da exploração espacial e planetárias apenas tem dois jogadores (que nesta dissertação optamos por classificar de potências espaciais clássicas), a esta fase se costuma designar como Corrida Espacial. Foi uma época em que dois adversários, os Estados Unidos da América e a União das Republicas Sociais Soviéticas (URSS), se enfrentavam num perigoso “jogo” que poderia levar à aniquilação de milhões de vidas, vivíamos a Guerra Fria. A utilização do deterrente nuclear não podia ser utilizado, sem ter em conta as consequências, como se havia visto em Hiroshima e Nagasaki (Japão) no final da Segunda Guerra Mundial, o desafio de enviar um satélite para a órbita terrestre, lançado pela União Internacional de Física provou ser melhor substituto, pois as superpotências poderiam demonstrar a capacidade dos seus mísseis balísticos intercontinentais sem provocar vítimas, nem desencadear uma Terceira Guerra Mundial.

Durante quase três décadas, o Espaço era apenas dominado pelas potências espaciais clássicas, mas a partir de 1985 começam a entrar novas nações na corrida pela exploração e estudo do espaço e ciências planetárias (Japão e Europa, com missões planetárias de estudo ao cometa Halley (**Figura 13**)). Esta tendência tem vindo a sofrer uma constante aceleração, principalmente nos últimos dez ou quinze anos, que aliado com a partilha livre dos resultados científicos obtidos tem permitido que aumente também a variedade de missões e de alvos a explorar. Desta forma, e se as

nações se juntam ou concertam os seus esforços exploratórios poderemos ir mais longe, estudar de forma mais detalhada os alvos científicos e levar a cabo missões altamente especializadas (como p.e. enviar várias missões, com o objectivo de durante um longo período de tempo estudar uma das várias luas do sistema joviano, um pouco como se faz hoje com Marte, para dessa forma realizar trabalhos comparativos detalhados).



Figura 13 Fotografia do Cometa designado por 1P/Halley, captada a oito de Março de 1986, na Ilha da Páscoa. Foto adquirida no âmbito do programa International Halley Watch (IHW - Observatório Internacional do Halley), parte integrante do Large Scale Phenomena Network (Rede de Fenómenos de Larga Escala) (*Crédito*: W.Liller e IHW).

Neste trabalho a nomenclatura utilizada será a mesma que é sugerida pela NASA e pelos trabalhos de Asif A. Siddiqi, durante a elaboração desta dissertação passaram a ser utilizados os nomes oficiais soviéticos que até muito recentemente estavam classificados ou não existiam traduções directas do cirílico (alfabeto oficial das línguas de origem russa).

Ano	Missão	País	Objectivo
1957	Sputnik 1	URSS	Primeiro satélite artificial a orbitar a Terra
	Sputnik 2	URSS	Primeiro animal no Espaço - Laika
1958	Explorer 1	USA	Primeira descoberta científica no Espaço – Radiação de Van Allen
1959	Explorer 6	USA	Primeiras imagens da Terra vista do Espaço transmitidas na Televisão
	Luna 1	URSS	Primeira nave espacial a escapar a gravidade terrestre; Primeiro “planeta” artificial a orbitar o Sol
	Luna 2	URSS	Primeira nave espacial a impactar outro corpo celeste, a Lua
	Luna 3	URSS	Primeira missão a registar imagens do lado distante da

			Lua
1961	Vostok 1	URSS	Primeiro humano no Espaço – Yuri Gagarin; Primeiro humano a orbitar a Terra – Yuri Gagarin
	Venera 1	URSS	Primeira nave espacial a realizar Flyby a outro planeta, a Vénus
1962	Marsnik 1	URSS	Primeira nave espacial a realizar um Flyby a Marte
	Mariner 2	USA	Primeira descoberta científica no Espaço Interplanetário – Observação directa do Vento Solar; Primeira missão científica completada com sucesso em Vénus
	OSO - 1	USA	Primeiro observatório astronómico no Espaço
1963	Vostok 6	URSS	Primeira mulher no Espaço – Valentina Tereshkova
1964	Voskhod 1	URSS	Primeira missão espacial com mais de um tripulante
1965	Voskhod 2	URSS	Primeiro “passeio” espacial – Alexei Leonov
1966	Venera 3	URSS	Primeira nave espacial a realizar uma entrada atmosférica noutra planeta, Vénus
	Luna 9	URSS	Primeira aterragem controlada noutra corpo celeste, a Lua
	Luna 10	URSS	Primeira nave espacial a orbitar outro corpo celeste, a Lua
1968	Apollo 8	USA	Primeira missão tripulada em órbita de outro corpo celeste
1969	Apollo 11	USA	Primeira missão tripulada a aterrar em outro corpo celeste, a Lua; Primeiras amostras de outro corpo celestes, a Lua a serem trazidas para a Terra
1970	Luna 16	URSS	Primeira missão robótica a conseguir trazer para a Terra amostras de outro corpo celeste, a Lua
	Luna 17	URSS	Primeiro veículo não-tripulado manobrado remotamente noutra corpo celeste, a Lua
1971	Apollo 15	USA	Primeiro veículo tripulado manobrado noutra corpo celeste, a Lua
	Mariner 9	USA	Primeira nave espacial a orbitar outro planeta, Marte
	Marsnik 3	URSS	Primeira aterragem controlada noutra planeta, Marte
1972	Venera 8	URSS	Primeira aterragem cientificamente significativa noutra planeta, Vénus
1973	Pioneer 10	USA	Primeiro Flyby Joviano
1974	Mariner 10	USA	Primeira missão dual planetária, Vénus e Mercúrio; Primeiro Flyby de Mercúrio
1976	Viking 1	USA	Primeira aterragem com sucesso em Marte; Primeira nave espacial cuja missão é buscar sinais de vida noutra corpo celeste
1977	Pioneer 11	USA	Primeiros flybys de Saturno
1980	Solar Maximum Mission	USA	Primeiro satélite a ser recuperado, reparado e lançado novamente, em 1984
	Souyz 35	URSS	Primeira missão tripulada de longa duração (aproximadamente um ano, uma aproximação do tempo

			necessário para uma nave tripulada chegar a Marte)
1981	Shuttle Transport System – 1 [STS-1]	USA	Primeira nave espacial tripulada reutilizável
1983	Venera 15	URSS	Primeiro mapeamento orbital completo de outro planeta, Vénus
1985	International Cometary Explorer	USA	Primeira nave espacial a realizar um rendez-vous cometário distante, com o cometa Giacobini - Zimmer
	Sakigake	Japão	Primeira missão planetária japonesa
	Giotto	Europa	Primeira missão planetária europeia
1986	Voyager 2	USA	Primeiro flyby uraniano
	Vega 1	URSS	Primeiro rendez-vous com um cometa – Cometa Halley
	Mir	URSS	Primeira estação espacial permanentemente habitada por tripulações rotativas
1989	Voyager 2	USA	Primeiro flyby neptuniano
1992	Voyager 1, 2	USA	Primeira vez que se detecta a heliopausa
	Galileo	USA	Primeiro rendez-vous com um asteroide do Cinturão de Asteróides, o Gaspra
1994	Galileo	USA	Primeira vez que se detecta a existência de uma lua de um asteroide, a Ida
1997	Cassini-Huygens	Europa e USA	Primeiro orbitador saturniano – Cassini; Primeira sonda a aterrar na lua Titã
2003	Hayabusa (Muses-C)	Japão	Primeira nave espacial a aterrar num asteroide; Primeira nave espacial a recolher amostras de um asteroide
2004	Rosetta-Philae	Europa	Primeira nave espacial a aterrar num cometa
2006	New Horizons	USA	Primeira missão a Plutão, Caronte e ao Cinturão de Kuiper
2007	Chang’e 1	China	Primeira missão planetária chinesa
2008	Chandryaan-1	Índia	Primeira missão planetária indiana
2011	Juno	USA	Primeiro orbitador joviano
2019	Beresheet	Israel	Primeira missão lunar completamente financiada por privados
2021	Perseverance - Ingenuity	USA	Primeiro voo de um veículo usando rotores como método de propulsão noutra planeta, Marte - Ingenuity
	Al-Amal	UAE	Primeira missão interplanetária de um país árabe.

Tabela 1 Lista detalhada de todos os “primeiros” da história da exploração espacial e interplanetária.

A **Tabela 1** é uma actualização da lista de missões apresentadas por Carl Sagan, no livro “*Pale Blue Dot*”, aqui se adicionam todas as conquistas a partir de 1994 e missões soviéticas que entretanto foram desclassificadas, e tornadas públicas.

Mais do que listar as conquistas de uma outra nação ou consórcio, esta tabela ajuda a colocar em perspectiva tudo o que mesmo contra as correntes menos favoráveis (principalmente no período Pós-Guerra Fria, devido ao desinvestimento) já se conseguiu atingir.

Parte II – Formação e Evolução de Superfícies Planetárias

“Astronomy compels the soul to look upwards and leads us from this world to another.”

Plato (427-347 BCE), The Republic

Antes de começar a listar e analisar os mais de 60 anos de exploração espacial e planetárias, e o seu legado tecnológico-científico, primeiro necessitamos perceber as origens e a evolução do local onde se localizam os objectos de estudo: o Sistema Solar. Possuindo esse conhecimento e entendendo como a partir da formação de um disco circumestelar de gás e poeira, acompanhando o nascimento da estrela que denominamos Sol, se formaram planetas, luas e asteróides), podemos escolher melhor os alvos de missões planetárias. Desta maneira, optimizamos os nossos recursos para que se obtenham os dados mais relevantes para a compreensão do nosso passado, presente e futuro, tanto como espécie como do planeta Terra.

Depois de realizar uma análise da parte histórica da exploração espacial e planetária na primeira parte deste trabalho, necessária para entender o legado deixado pelos Pais Fundadores da Propulsão e do legado que a comunidade científica possui e que foi “conquistado”, missão a missão, até ao ponto tecnológico-científico em que nos encontramos. Sem esta retrospectiva, não seria possível discutirmos o tema central deste trabalho, percebendo que para a existência de naves espaciais interplanetárias, com instrumentos de alta resolução a bordo, foi necessário um dia alguém questionar, sacrificar e experimentar. Foi decidido que o tema central deste trabalho seria a evolução de superfícies planetárias, com especial enfoque nas alterações hidrológicas devido à sua importância para estudos de cariz astrobiológico e de futuras missões de exploração tripuladas.

1. Sistema Solar

Neste momento o inventário oficial do nosso Sistema Solar, segundo a NASA, é o seguinte: 8 planetas, 5 planetas-anões, mais de 200 luas, cerca de 1088297 asteróides e 3723 cometas (e todos os dias o número de objectos sobe). Existe, portanto, uma enorme variedade de superfícies planetárias, condições e ambientes à espera de ser estudados, e mesmo após 60 anos de exploração espacial existe muito por descobrir e explorar.

Nesta secção do trabalho será feita uma abordagem à origem e à evolução do Sistema Solar, o enfoque será dado aos chamados planetas terrestres e em especial aos corpos celestes que entram na categoria dos Mundos Oceânicos (que engloba tanto planetas, como planetas-anões e luas). Esta nova forma de classificação de superfícies planetárias, estabelecida pelo grupo de trabalho OPAG (Outer Planet Assessment Group – Grupo de Análise dos Planetas Exteriores em português) é a que actualmente mais interesse desperta, uma vez que os Mundos Oceânicos são os que mais condições de habitabilidade apresentam, devido ao facto de estarem neste grupo que em algum momento da sua evolução possuíram uma grande quantidade de água líquida disponível (tanto no passado como no presente).

Segundo o livro “*Life Beyond Earth*” (Coustenis e Encrenaz, 2013), a presença de água líquida num corpo celeste é um dos melhores factores para avaliar a capacidade de certo objecto poder albergar vida, aliado à estabilidade ambiental e à disponibilidades de elementos considerados essenciais para o surgimento de vida (CHNOPS – Carbono, Hidrogénio, Azoto, Oxigénio, Fósforo e Enxofre).

Como se pode observar no gráfico seguinte (**Figura 14**), a maioria dos objectos que orbitam o sol são asteroides de variadas categorias e características, mas a grande parte das missões ou dos trabalhos de ciências planetárias e de exploração focam-se nos planetas, que compõem menos de 1% do total. E dessa percentagem, apenas uma ínfima parte entra na categoria mais estudada de todos os planetas, os designados planetas terrestres (nesta dissertação seguiremos a convenção das ciências planetárias e astronomia, de denominar terrestres os planetas que se “parecem” com a Terra).

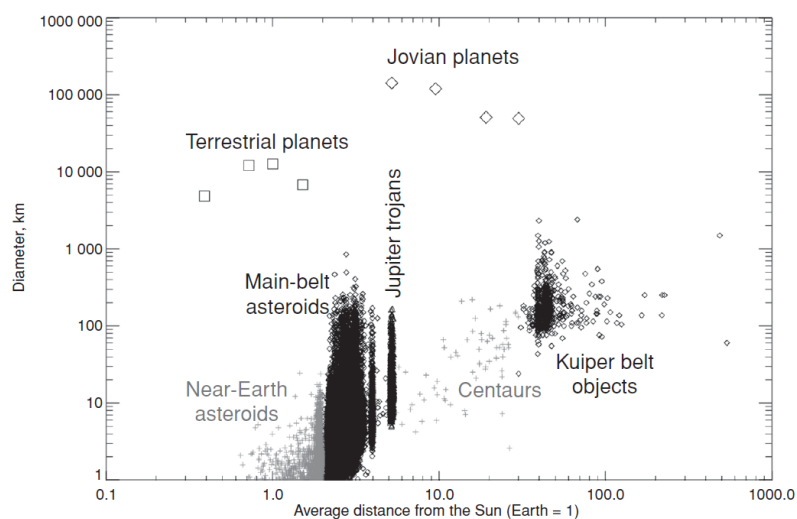


Figura 14 Inventário dos corpos e/ou objectos celestes que se conhece até ao momento, em órbita do Sol. (Crédito: John Spencer, adaptado do livro “*Fundamental Planetary Science*” (Lissauer e de Pater, 2013))

A escolha destes planetas como principais objectivos dos mais de 60 anos de exploração espacial, prende-se com a ligação “emocional” da Humanidade com o único planeta terrestre do nosso Sistema Solar que alberga vida, a Terra. Sendo o único exemplo de planeta habitado de que temos conhecimento, o único a desenvolver e a permitir a evolução de vida complexa, por isso todos os corpos celestes com características “terrestres” são os que mais interesse apresentam para a comunidade científica e para focar os escassos recursos disponíveis para a exploração neles, podendo assim obter dados científicos mais representativos e mais significativos para podermos entender também o que faz do planeta Terra tão único no cenário galáctico.

1.1. Formação do Sistema Solar

Antes de podermos falar de planetas e das suas características ou composição, temos de analisar como se formou o Sistema Solar no qual o planeta Terra está inserido.

Com o advento dos telescópios espaciais, cujo mais conhecido é o Hubble Space Telescope (Telescópio Espacial Hubble em português), nas quase três décadas de operação, tem-nos dado a conhecer as primeiras pistas sobre a formação de sistemas planetários em órbita de estrelas distantes. À medida que telescópios (tanto terrestres, em locais muito específicos com as melhores

condições de observação; como espaciais), mais potentes uniram esforços mais e mais detalhes e exemplos foram sendo descobertos como iremos expor nesta secção.

Depois de anos a elaborar simulações em computador ou através de fórmulas matemáticas, os cientistas podiam finalmente ver o que teorizavam, podiam observar directamente a formação de um sistema solar, de um sistema planetário ou de vários sistemas planetários em distintas fases da sua formação e evolução. Dessa forma, conseguiriam entender os mecanismos responsáveis pela formação e evolução do nosso Sistema Solar e conseqüentemente entender os mecanismos por trás da condição única do planeta Terra, a existência de vida complexa.

De todas as ferramentas, o Telescópio Espacial Hubble e o seu instrumento WFPC 2 (Wide Field Planetary Camera 2) têm providenciado imagens detalhadas dos processos por detrás da formação de estrelas, os passos evolutivos e as forças que influenciam seus discos circumestelares de acreção. Uma vez que este não é um tema que se pretende analisar em muito detalhe neste trabalho, sendo apenas uma pequena nota quanto aos mecanismos de formação do nosso objecto de estudo, o Sistema Solar, foram escolhidos três exemplos de estrelas nos últimos estádios de formação: HH-30, HH-34 e HH-47, representadas na **Figura 15**. A designação HH advém do nomes dos cientistas que caracterizaram pela primeira vez estes objectos, daí o nome de objectos de Herbig-Haro para designar zonas de nuvens de pó e gás que aparentemente se “escapam” das protoestrelas a elas associadas.

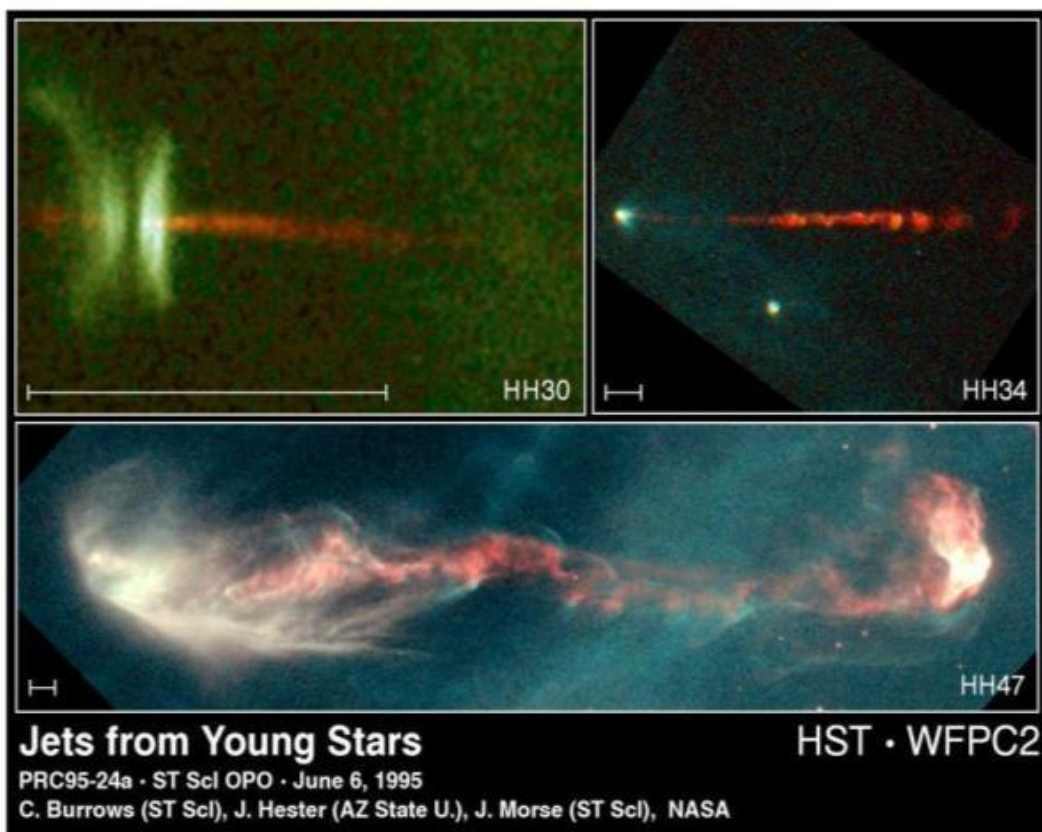


Figura 15 [Superior Esquerda] HH-30 (*Crédito*: C. Burrows (STScI (Space Telescope Science Institute) e ESA, WFPC 2 Investigation Definition Team e NASA); [Superior Direita] HH-34. (*Crédito*: J. Hester (Arizona State University), WFPC 2 Investigation Definition Team e NASA); [Inferior] HH-47 (*Crédito*: J. Morse/STScI e NASA). A escala nas imagens representa 93 milhões de milhas, e todas as imagens foram captadas pela WFPC 2 no espectro visível (*Crédito*: NASA e STScI, Release ID 1995-24).

Os três exemplos apresentados na **Figura 15** dão-nos uma visão privilegiada, do colapso dos discos circumestelares compostos por gás e pó estelar que além de providenciarem os ingredientes para a formação de estrelas, também possuem tudo o necessário para a formação, consolidação e evolução de um futuro sistema planetário.

Na primeira imagem, localizada no canto superior esquerdo, podemos observar o objecto protossolar chamado HH-30, nesta fotografia conseguimos distinguir o disco circumestelar em torno da estrela recém-formada. O HH-30 está a 450 anos-luz na constelação Touro. Podemos observar a evolução deste objecto no período de um ano terrestre e um diagrama esquematizado do disco circumestelar e disco de acreção do que se pode perceber na **Figura 16**. Na segunda imagem, localizada no canto superior direito, podemos observar um objecto mais distante e de características distintas ao objecto anterior, o HH-34. Este apresenta uma clara e espetacular formação tipo colar de pérolas (a vermelho), estrutura que é formada na sequência da ejeção de densas nuvens de gás da

estrela em formação a velocidades de cerca de meio milhão de milhas por hora. Este objecto protossolar está a 1500 anos-luz e na proximidade da Nebulosa de Oriente, numa região conhecida como “berçário de estrelas”. Na parte inferior, podemos observar uma estrutura de mais de três bilhões de milhas de comprimento, denominada HH-47. Esta fotografia revela um padrão de ejeção complexo que parece indicar que a estrela, que se encontra oculta dentro de uma densa nuvem de pó cerca da extremidade esquerda da imagem sofre oscilações na sua órbita, possivelmente devido à atracção gravitacional de uma estrela próxima. Os filamentos brancos na esquerda refletem a luz da estrela recém-formada. O sistema onde se localiza o objecto HH-47 está a 1500 anos-luz e próximo da Nebulosa de Gum, que é o resquício da explosão de uma supernova que pode ser observada actualmente no Hemisfério Sul terrestre. A escala nas imagens representa 93 milhões de milhas, e todas as imagens foram captadas pelo instrumento WFPC 2 (Wide Field Planetary Camera 2 – Câmara Planetária de Campo Largo 2) no espectro visível.

O instrumento WFPC 2, esteve em funcionamento durante treze anos até 2009 quando foi substituído pelo WFPC 3. Esta câmara foi o instrumento mais utilizado do Telescópio Espacial Hubble, e as imagens captadas foram utilizadas como forma de divulgar ao público em geral os últimos descobrimentos da comunidade científica. O WFPC 2 estava composto por quarenta e oito filtros que abrangiam comprimentos de onda desde o ultravioleta longínquo (far-ultraviolet) até ao infravermelho cercano (near-infrared), num intervalo entre os 120nm até aos 1000nm.

As observações do Telescópio Espacial Hubble contribuem para o entendimento de uma das questões fundamentais da astronomia: como, partindo de uma tênue nuvem de gás e poeira interestelar se podem formar estrelas como o Sol e um sistema solar complexo como o nosso.

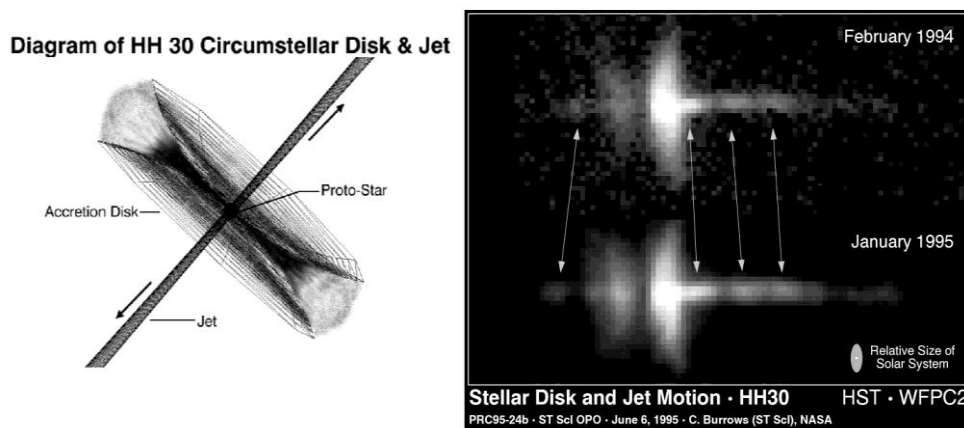


Figura 16 [Esquerda] Diagrama esquematizado do disco circunestelar e disco de acreção da HH-30. (*Crédito:* NASA e STScI; [Direita] HH-30 fotografado pelo WFPC 2. (*Crédito:* C. Burrows (STScI e NASA), WFPC 2 Investigation Definition Team e NASA; Co-Investigadores: K.Stapelfeldt (JPL) e A. Watson (Lowell Observatory). (*Crédito:* NASA e STScI, Release ID 1995-24)

Entendendo como se formam as estrelas, entendemos como os planetas e os diversos corpos celestes em órbita delas se formaram. Devido às observações de zonas de formação estelar, hoje sabemos que cerca de metade das estrelas recém-formadas possuem um disco de acreção protoplanetário. Actualmente, existem missões espaciais que nos últimos anos se têm dedicado em descobrir e caracterizar exoplanetas, descobertos às centenas, que se formaram no interior destes discos. Devido à distância e às limitações tecnológicas actuais, as únicas superfícies planetárias que podemos estudar de forma detalhada são as que estão na vizinhança mais imediata do planeta Terra, no nosso Sistema Solar.

Uma das propriedades que fazem destacar o nosso Sistema Solar como único, é a clara divisão dos planetas em duas classes distintas: planetas terrestres, mais próximos do Sol, e os distantes planetas denominados gigantes gasosos. Os planetas terrestres – Mercúrio, Vénus, Terra e Marte – têm dimensões relativamente pequenas, altas densidades, uma superfície sólida e um número reduzido de satélites, enquanto os gigantes gasosos – Júpiter, Saturno, Urano e Neptuno – têm dimensões muito superiores às dos planetas terrestres, baixa densidade, atmosferas ricas em hidrogénio e um grande número de satélites.

1.2. Formação de planetas

Antes de avançar mais nesta secção é essencial antes de mais nada, entender o que é um planeta e o que diferencia este de outro corpo celeste. Esta definição é fulcral importância para capítulos deste trabalho nos quais iremos abordar a evolução destes objectos, para podermos compreender os processos evolutivos em acção há que primeiro entender o ponto de partida e a forma como se catalogou os distintos objectos do nosso Sistema Solar para a realização do presente trabalho.

Depois do nascimento de uma estrela, da consolidação do disco circumestelar, usando as ferramentas à disposição para observar estes processos, podemos observar directamente os primeiros estádios de acreção, quando as partículas de poeira e gás começam a agregar-se até à formação de objectos planetários. Na **Figura 17**, a imagem à esquerda é um diagrama representativo dos estádios pelos que um sistema solar passa, até chegar ao ponto em que o nosso Sistema Solar se encontra neste momento (da esquerda para a direita e de cima para baixo): uma protoestrela encontra-se rodeada por uma nuvem de gás e poeiras, depois da sua formação mantém-se um disco de material (maioritariamente gás e poeiras) denominado por disco circumestelar, depois esse material em órbita da estrela forma um disco mais compacto, onde começam a ocorrer processos de acreção em que pequenos planetesimais começam a chocar entre eles e a agregar-se em protoplanetas ou outros corpos celestes; no diagrama final temos um sistema solar como o nosso, com uma estrela no centro e uma série de diversos objectos planetários na sua órbita. Na imagem da direita, podemos observar uma fotografia da estrela recém-formada HL-Tauri e o seu disco de acreção protoplanetário captada pelo telescópio terrestre ALMA (Atacama Large Millimeter Array), contém um objecto HH-150 no seu centro. Esta é a imagem mais detalhada e nítida das primeiras fases da formação de planetas (equivalente à terceira imagem do diagrama da esquerda), nela podemos facilmente distinguir vários anéis e “falhas” que denunciam a presença de protoplanetas ou planetesimais que vão capturando material do disco de acreção à medida que realizam as suas órbitas (Shu et al.,1987).

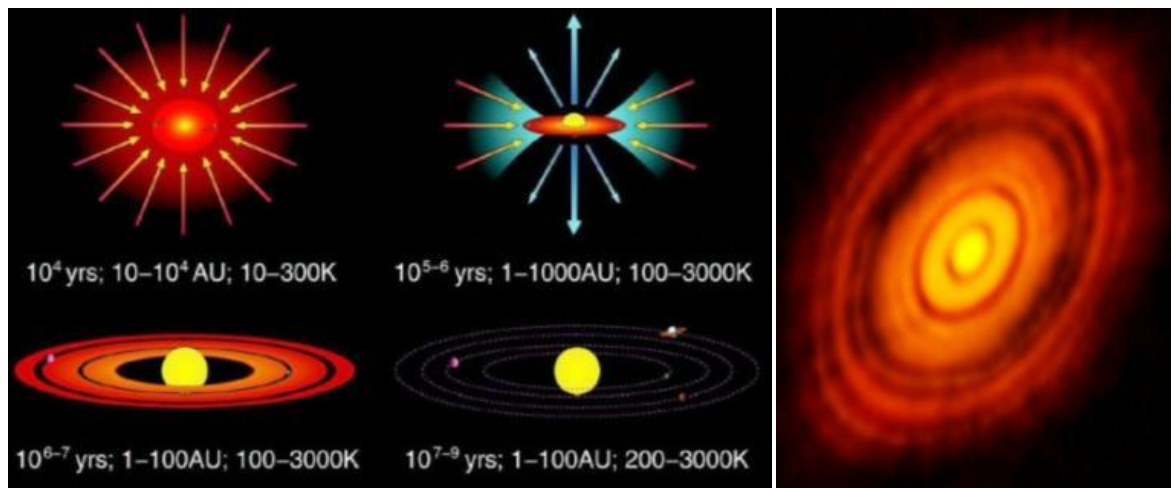


Figura 17 [Esquerda] Diagrama representativo dos estádios de formação de um sistema solar. (*Crédito:* adaptado de Shu et al. 1987); [Direita] Imagem da estrela recém-formada HL-Tauri. (*Crédito:* ALMA (NRAO/ESO/NAOJ), C. Brogan, B. Saxton (NRAO/AUI/NSF))

O nosso Sistema Solar é composto por diversos corpos celestes, de diferentes dimensões, composições e características, como podemos observar na representação artística da **Figura 18**. De todas as categorias de objectos, este trabalho irá focar-se numa muito especial entre todos os corpos celestes em órbita do Sol: os planetas (incluindo os planetas-anões).

Até 2006, o nosso Sistema Solar possuía nove planetas principais (Mercúrio, Vénus, Terra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano, Neptuno e Plutão), altura em que devido à descoberta de alguns objectos do Cinturão de Kuiper a União Astronómica Internacional (International Astronomical Union) iniciou um debate na comunidade científica que culminou em Agosto desse ano com a resolução de actualizar a definição de planeta e introdução de uma nova categoria, planeta-anão. Segue a transcrição, traduzida para português das definições destas categorias:

- Um **planeta** é um corpo celeste que: orbita em torno do Sol; possui suficiente massa para que a sua própria atracção gravítica supere as forças físicas de corpos rígidos de tal forma que esteja em equilíbrio hidroestático e tenha uma forma quase esférica, e foi capaz de “limpar” a zona cercana da sua órbita (atinge dominância orbital).
- Um **planeta-anão** é um corpo celeste que: orbita em torno do Sol, possui suficiente massa para que a sua própria atracção gravítica supere as forças físicas de corpos rígidos de tal forma que esteja em equilíbrio hidroestático e tenha uma forma quase esférica, não foi capaz de “limpar ou acrecionar partículas” da zona próxima da sua órbita (não atinge dominância orbital), e não é um satélite.

O ano 2006, é um ponto de viragem pois a partir da resolução da União Astronómica Internacional, o Sistema Solar perdeu um planeta (Plutão) e ganhou cinco planetas-anões (Ceres (descoberto em 1801), Plutão (descoberto em 1930), Haumea (descoberto em 2004), Eris e Makemake (descobertos em 2005)). A decisão entre adicionar mais planetas à lista dos nove originais ou criar uma nova categoria para ajudar a classificar os novos corpos celestes de características similares a Plutão e Ceres que se começavam a descobrir no Cinturão de Kuiper, a escolha da segunda opção ainda hoje é bastante polémica, havendo críticas de vários cientistas de renome quanto às características usadas para diferenciar as duas novas categorias.



Figura 18 Representação artística do nosso Sistema Solar, não respeitando a escala. (*Crédito:* NASA/Jet Propulsion Laboratory – Caltech)

Como foi referido no início desta secção, existem dois tipos de planetas no nosso Sistema Solar: planetas terrestres e os gigantes gasosos. Para este trabalho e para a grande maioria dos cientistas planetários, os planetas terrestres são os mais apelativos, tanto pela parecença com a Terra como pelo facto de terem sofrido pressões evolutivas distintas, levando a que os quatro planetas do Sistema Solar interior (assim designado por estarem localizados entre o Cinturão de Asteróides e o Sol) sofressem evoluções divergentes.

1.3. Evolução e Diversificação das Superfícies Planetárias

Ao longo da evolução do Sistema Solar, os planetas em órbita do Sol evoluíram em duas categorias: planetas terrestres e planetas gasosos. Destes dois grupos e em termos de importância para a habitabilidade e exploração planetária directa (através do recurso a *rovers* ou plataformas estacionárias), é o grupo dos planetas rochosos o que mais interessa para o presente trabalho.

A representação esquemática da **Figura 19**, ajuda a perceber as características que fazem com que se agrupem os planetas desta forma. Existem outras formas de caracterizar os planetas mas esta é a que mais interessa em termos de estudos geomorfológicos e geoquímicos.

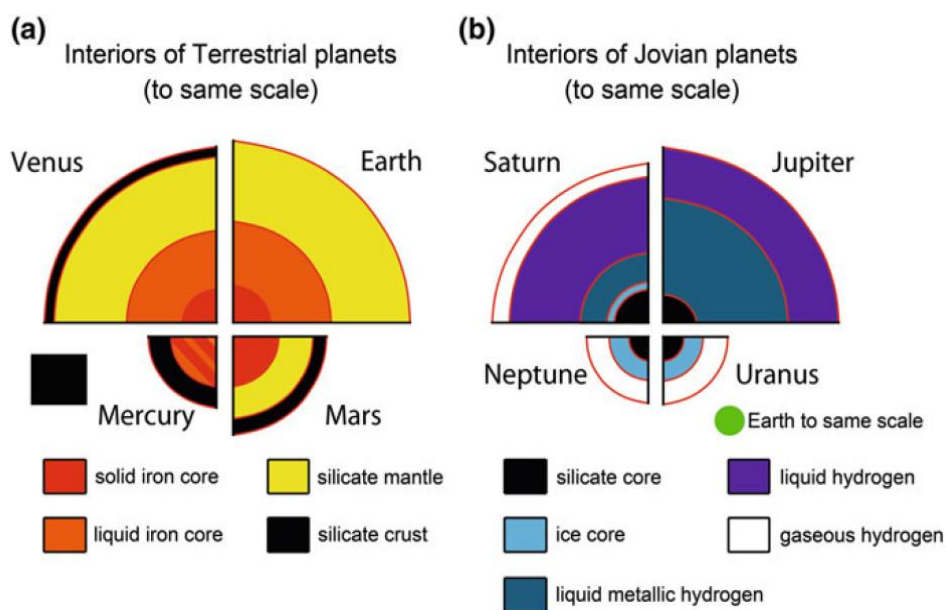


Figura 19 Comparação das estruturas internas entre os planetas terrestres e os planetas gasosos (o planeta Terra é utilizado como referência, a verde). Adaptado de Fundamentals of Physical Geology (2014)

Uma das características mais importantes para determinar a capacidade de um planeta poder albergar vida, é este se encontrar dentro da chamada zona habitável (neste trabalho iremos trabalhar com a clássica definição, a chamada **linha da água líquida**. Nos últimos anos, devido à descoberta de oceanos de água líquida em luas de Júpiter e Saturno que estão muito para além da clássica zona habitável do nosso Sistema Solar, levou a comunidade científica a repensar numa nova forma de caracterizar uma zona habitável), no caso do nosso Sistema Solar a zona habitável clássica abrange

três dos quatro planetas terrestres (Vénus, Terra e Marte – ficando Mercúrio de fora, devido à proximidade ao Sol), como podemos observar na **Figura 20**. Analisando este gráfico podemos verificar que o planeta Terra se encontra no mesmo no centro da Zona Habitável do nosso Sistema Solar, e nos extremos se encontram Vénus e Marte (que está mesmo na fronteira da definição clássica).

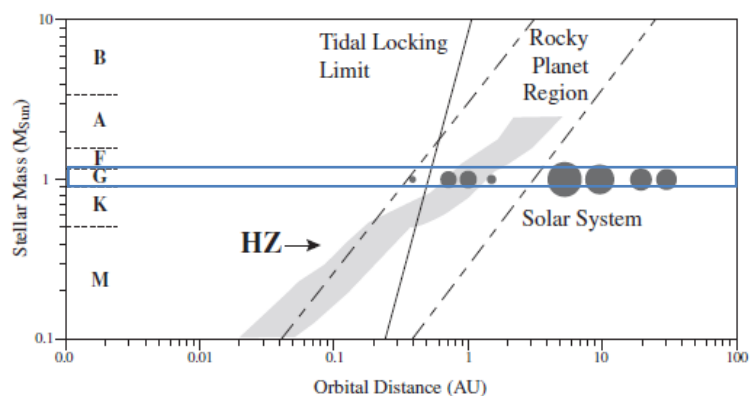


Figura 20 Gráfico Representativo da Definição Clássica da Zona Habitável em redor de estrelas de sequência principal (no caso do nosso Sol, é uma estrela de categoria G – zona assinalada pelo rectângulo azul). (*Crédito*: Adaptado do *Astrobiology Primer* - 2006)

Devido ao facto de até este momento apenas conhecermos um planeta que alberga vida, a Terra, e de o termos podido estudar durante séculos recorrendo a todas as ferramentas e métodos disponíveis, este é sempre usado como um análogo para o estudo dos restantes planetas (abrangidos ou não pela Zona Habitável).

Parte III – Caso de Estudo: Marte – Planeta Dinâmico

1. Uniformitarismo Planetário

A geologia e a astronomia são dois campos científicos com algo em comum, as suas escalas de tempo são difíceis de compreender quando comparadas com a duração de uma vida humana. São escalas temporais que não podem ser medidas em anos ou décadas, mas sim em termos de milhares e milhões de anos.

São estes dois ramos da ciência que se conjugam para originar as ciências planetárias (ou geologia planetária, segundo algumas preferências). Para podermos compreender como é possível utilizar o estudo de uma superfície planetária para podermos interpretar eventos passados ou presentes (em alguns casos entender como irão evoluir e as forças de modelação responsáveis), há primeiro que olhar para os inícios da geologia enquanto ciência e para uma das “pedras basilares”:

Princípio do Uniformitarismo.

Os processos de modelação e alteração da paisagem (de natureza geomorfológica, topográfica e geoquímica), que observamos actualmente à nossa volta e no nosso planeta, também ocorrem em condições muito parecidas (seguindo as restrições de cada local) em outras superfícies planetárias como planetas, luas, asteroides, etc. Olhando para estes processos e as suas consequências na paisagem, podemos entender também os eventos que moldaram as diversas superfícies planetárias, ao longo do tempo.

Na **Figura 21** foi colocado lado a lado a escala do tempo geológico da Terra e de Marte, de forma a visualizar mais facilmente a evolução dos dois planetas e perceber os eventos mais significativos que caracterizaram cada um dos Eons (Terra) e Períodos (Marte). Neste trabalho é de grande importância compreender em que Períodos marcianos água líquida em quantidades significativas esteve presente à superfície do planeta, dessa forma é possível datar as formações e a sequência dos processos identificados neste trabalho.

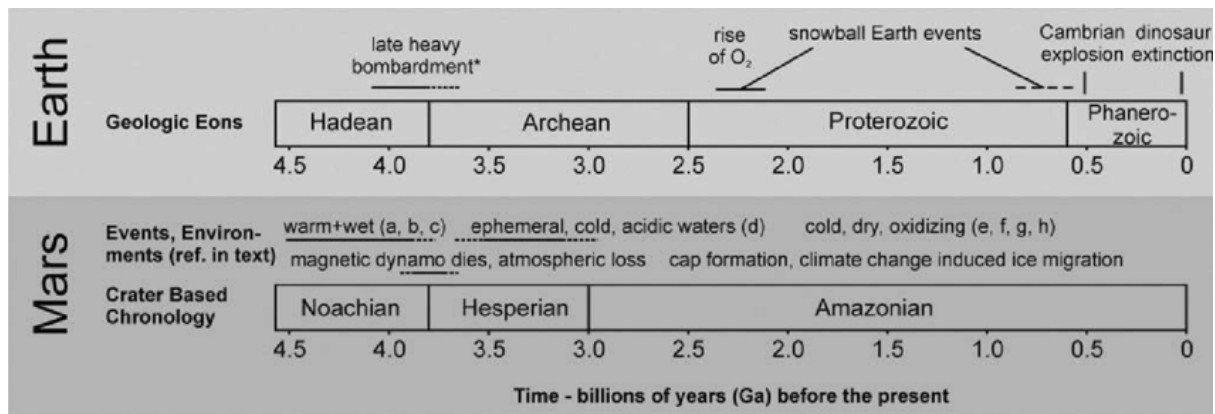


Figura 21 Escala do tempo geológico da Terra e de Marte, com referência aos eventos mais significativos que marcaram cada um dos planetas (Ga = Mil Milhões em português). (Crédito: Akos Kereszturi e Kelsi Singer, Adaptado para este trabalho a partir do *The Astrobiology Primer 2.0* (2016))

A evolução e modelação das superfícies planetárias do nosso sistema solar, é um processo contínuo e complexo que, muitas vezes, está sujeito a eventos catastróficos e não previsíveis, que de forma dramática alteram a paisagem. Exemplos destes eventos são erupções vulcânicas, impactos de asteroides, inundações, derrocadas e terremotos.

2. A Terra como Análogo Marciano

Neste trabalho será observado de forma mais detalhada algumas formações marcianas, usando o estudo comparativo entre a Terra e Marte, que são consideradas como as mais significativas, e que mais informação aporta para o estudo da evolução das superfícies planetárias rochosas. São também as que mais impacto provoca em termos visuais e que podemos estudar, tanto recorrendo aos dados obtidos pelos orbitadores como pelos veículos robóticos que estão actualmente em operação na superfície marciana.

Elegemos locais de estudo modelados por diferentes processos, em alguns foi possível identificar mais do que um processo: modelação eólica, modelação hidrológica, modelação devido à acção da gravidade e eventos catastróficos (avalanches e derrocadas de ravinas). Muitos dos locais escolhidos têm análogos terrestres que ajudam a compreender o que ocorreu no passado geológico de Marte

para que estes fossem formados (tendo em conta as restrições/diferenças entre o planeta Terra e Marte tanto no passado como no presente, p.e. as características distintas das atmosferas dos dois planetas, a gravidade e as condições ambientais).

A identificação de minerais em Marte usando técnicas de espectroscopia, é geralmente realizada recorrendo a informações recolhidas de amostras terrestres de locais considerados de interesse e classificados como análogos terrestres (p.e. Deserto do Atacama (Chile), Depressão de Danakil (Etiópia)). Para além da análise directa de amostras naturais, são realizados uma série de protocolos experimentais de forma a explorar os mecanismos, processos e condições ambientais necessárias para que determinados minerais se possam formar, primeiro em condições terrestres e segundo em condições marcianas. Assim se obtém dados suficientes para poder correlacionar dados de Marte com o obtido em laboratório e nas análises de amostras naturais.

3. Monitorização da Evolução da Superfície de Marte usando Análise Remota

3.1. Mars Reconnaissance Orbiter

O orbitador *Mars Reconnaissance Orbiter* (Orbitador de Reconhecimento Marciano) ou MRO (**Figura 22**) é uma nave espacial que foi desenhada e preparada para estudar a geologia e a dinâmica atmosférica do planeta Marte. Para além dessas missões este orbitador irá ajudar a caracterizar e estudar potenciais locais para serem estudados por futuras missões e servirá como uma espécie de estação de retransmissão de dados entre as missões que se encontram na superfície do planeta e a Terra, diminuindo assim os períodos em que se perde a ligação devido à rotação de Marte.

O MRO foi lançado a 12 de Agosto de 2005 e chegou a Marte no dia 10 de Março de 2006. O período de desaceleração recorrendo ao *aerobraking* (técnica de diminuição de velocidade de uma nave usando o atrito desta com a atmosfera) demorou cerca de cinco meses, e em Novembro de 2006 começou as suas operações primárias continuando em operação até ao dia de hoje com apenas

um par de episódios em que foi necessário reiniciar o orbitador para restabelecer o seu pleno funcionamento.

Os mais de quinze anos de funcionamento deste orbitador, superam em muito o período de funcionamento inicialmente projectado, algo que ocorre muitas vezes neste tipo de missões interplanetárias. Desde que chegou à órbita de Marte, o Mars Reconnaissance Orbiter já efectuou mais de 60.000 órbitas.

A missão de suporte do MRO, como “ponte” entre os rovers e a Terra provou ser crítico e a NASA tem planeado manter esta missão em funcionamento o máximo de tempo possível, muito para além dos anos 2020’s. Possivelmente, num futuro, relativamente próximo haverá um novo orbitador que irá cumprir esta mesma missão, uma vez que se conseguiu provar a importância deste tipo de suporte às comunicações entre a superfície e a Terra na diminuição do tempo necessário para transmissão dos dados, na diminuição de erros produzidos durante essa operação e numa menor probabilidade de perda de informação.

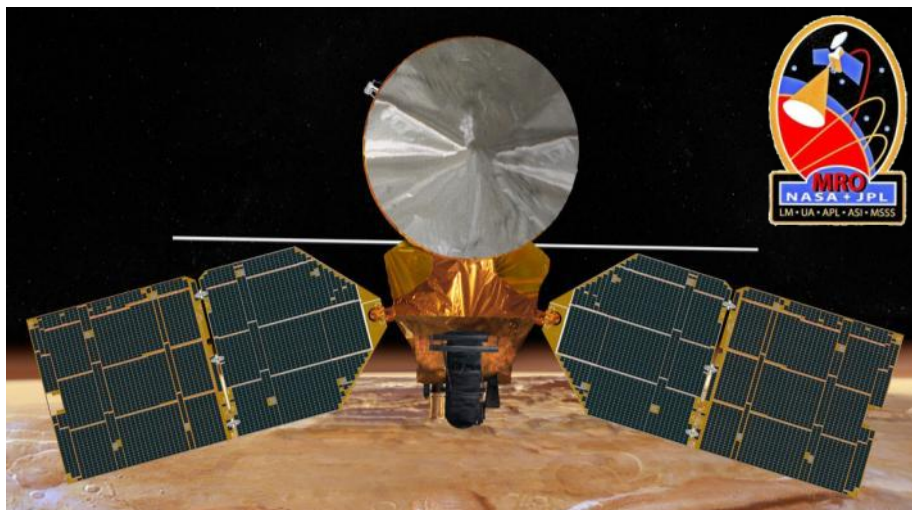


Figura 22 Imagem da parte ventral da Mars Reconnaissance Orbiter, a preto podemos ver a câmara HiRISE (com o seu revestimento térmico de cor negra) e à sua direita podemos ver o instrumento CRISM. (*Credito:* NASA/JPL)

De seguida na **Tabela 2**, apresento de uma forma resumida as especificações técnicas e operacionais mais relevantes para o trabalho que foi desenvolvido para esta dissertação. Com estas informações, facilmente se compreende porque o Mars Reconnaissance Orbiter foi seleccionado para a realização deste trabalho de caracterização e identificação de formações geológicas na superfície do

planeta Marte e os possíveis processos que podem ser os responsáveis pela sua formação e evolução (neste trabalho irei abordar principalmente processos eólicos e hidrológicos).

País	Estados Unidos da América (USA)
Objectivos	Científicos ou Principais (Monitorizar o clima actual em Marte, em especial a dinâmica atmosférica e as variações ao longo do ano; Buscar sinais da presença de água, tanto no passado como no presente e perceber de que forma alterou e modelou a superfície do planeta; Mapear e caracterizar os processos geológicos responsáveis pela evolução do planeta) Técnicos ou de Suporte (Providenciar serviços de retransmissão de dados das missões na superfície de Marte para a Terra; Identificar potenciais riscos e a aplicabilidade de futuras missões, locais de aterragem e as rotas dos rovers marcianos)
Massa	2 180Kg
Desenho/Gestão da Missão	NASA/JPL
Veículo de Lançamento	Atlas V 401 (AV-007)
Lançamento	12 de Agosto de 2005, às 11.43.00 UTC A partir do Cabo Canaveral, Florida – SLC-41
Instrumentos	HiRISE (High-Resolution Imaging Science Experiment Camera); CTX (Context Camera); MARCI (Mars Color Imager); CRISM (Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars); MCS (Mars Climate Sounder); SHARAD (Shallow Subsurface Radar); Electra Communications Package; Optical Navigation Camera; Gravity Field Investigation Package; Atmospheric Structure Investigation

Tabela 2 Especificações Técnicas do orbitador Mars Reconnaissance Orbiter (Crédito: NASA/JPL)

A escolha deste orbitador, em detrimento de outros mesmo mais recentes, foi devido aos instrumentos que este tem a bordo, em especial o HiRISE (High Resolution Imaging Science Experiment) e o CRISM (Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars). Estes dois instrumentos são os que iremos usar para realizar a nossa análise geomorfológica e geoquímica de locais de especial interesse, escolhidos para ilustrar os diferentes tipos de estruturas formadas devido à modelação eólica e hidrológica (tanto passada como presente), e a alguns fenómenos pontuais e recorrentes como avalanches, derrocadas, as Recurrent Slope Lineae (RSL) e Gullies.

3.1.1. HiRISE – High Resolution Imaging Science Experiment

A maioria das imagens utilizadas para este trabalho, foram obtidas através do instrumento HiRISE (High Resolution Imaging Science Experiment ou Câmara de Visualização Científica de Alta Resolução)(**Figura 23**). Esta câmara é a que melhor resolução tem de todas as que foram enviadas para órbita de Marte. Devido a este grande salto tecnológico foi possível, pela primeira vez observar em quasi-tempo real e com grande detalhe, eventos pontuais e cíclicos como avalanches e a grande tempestade de pó de 2018, designada por PEDE (Planet-Encircling Dust Event) que levou ao aumento exponencial de RSL (Recurring Slope Lineae).

O HiRISE providenciou imagens da superfície marciana com a maior resolução de sempre, a partir da órbita de Marte, continuando em funcionamento até ao dia de hoje. Estas imagens que serão capazes de visualizar objectos com cerca de um metro, dependendo da órbita (i.e. a altitude da nave na altura da captura da imagem) esta melhoria imensa da resolução da câmara a bordo do MRO em relação ao MOC (Mars Observation Camera) a bordo do MGS (Mars Global Surveyor) irá permitir estudar com muito mais detalhe a morfologia da superfície marciana como podemos visualizar na **Figura 24**.



Figura 23 Foto do instrumento HiRISE, durante os últimos preparativos pré-montagem no orbitador MRO. (Crédito: NASA/JPL)

Até ao dia de hoje, o HiRISE fotografou centenas de alvos na superfície do planeta Marte, com um detalhe nunca antes visto. Muitos dos locais foram escolhidos tendo em conta dados recolhidos por missões anteriores como a Mars Global Surveyor (MGS) ou a Mars Odyssey, conjuntamente com os dados de levantamentos de áreas mais amplas realizados pelos restantes instrumentos a bordo do MRO. Desta forma, foi possível visitar locais estudados anteriormente, melhorando consideravelmente o seu registo fotográfico e monitorizar alguma alteração que pudesse ter ocorrido nesse intervalo de tempo. E também seleccionar de forma mais criteriosa quais os locais de maior interesse, para serem estudados pela primeira vez.

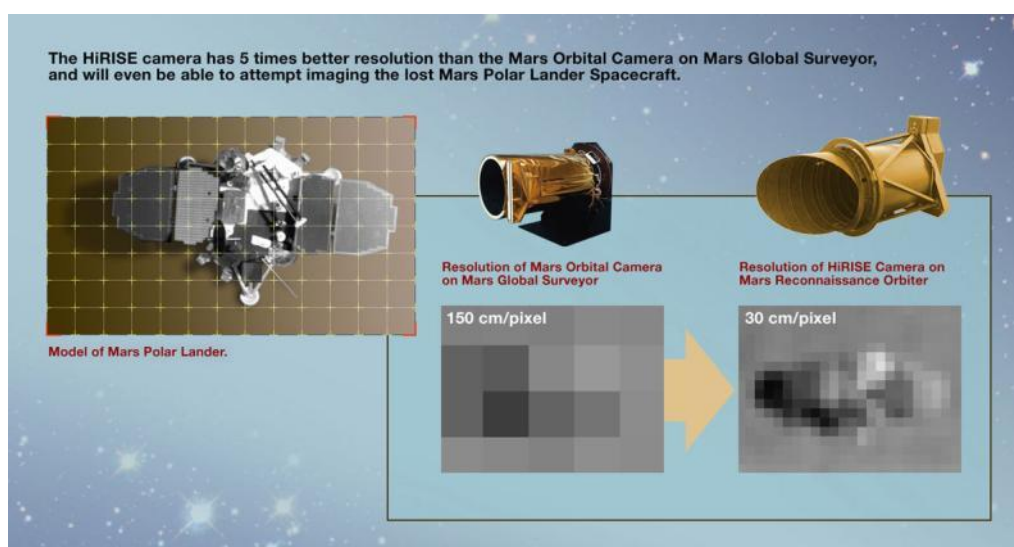


Figura 24 Nesta imagem podemos ver um exemplo prático da grande capacidade resolutive do HiRISE comparando com o MOC. (*Crédito:* NASA/JPL)

A forma como o HiRISE funciona tem muitos paralelismos com a forma como funciona um olho humano (porque opera capturando a luz no comprimento de onda na zona do espectro designada visível), com uma lente telescópica que é capaz de obter imagens com resoluções nunca antes vistas em missões interplanetárias. Esta qualidade de imagem permite aos cientistas planetários diferenciar estruturas na superfície de Marte de apenas um metro, permitindo um estudo geomorfológico a um nível nunca antes visto e que possibilitou perceber melhor muitos dos processos dinâmicos observados por missões anteriores.

Para além das observações no espectro do visível, o instrumento HiRISE, recorrendo a um conjunto de filtros e detectores electrónicos, que permitem a observação em diferentes zonas do

espectro de comprimentos de onda do espectro infravermelho cercano (400 a 1000nm) e dessa maneira poder identificar os minerais presentes nos locais-alvo. Desta forma cumprindo um dos seus objectivos científicos primários, a identificação de minerais hidratados ou de água na superfície de Marte. As bandas de hidratação de minerais (conhecidas por *fingerprints* (impressões digitais) e que são características de cada grupo mineral), estão localizadas exactamente dentro do intervalo de detecção do HiRISE.

Na **Tabela 3**, é descrito de forma detalhada as especificações técnicas e operacionais mais relevantes para o desenvolvimento deste trabalho.

Objectivo Principal	Estudar os procesos activos na superfície e monitorizar a evolução da paisagem
Localização	Na zona ventral do orbitador, apontando directamente para Marte
Massa	~65Kg, incluindo o sistema de controlo térmico, cablagem, etc.
Potência	60w
Tamanho	1,6m de comprido por 0,9m de diâmetro
Recepção de Dados	Consegue adquirir imagens contendo até 28Gb de informação em cerca de 6 segundos
Qualidade da Imagem	Possui 14 detectores electrónicos, cada um com um filtro de uma das três bandas de comprimento de onda: 400 a 600nm (zona azul-verde do espectro), 550 a 850nm (zona vermelha do espectro), 800 a 1000nm (zona do infravermelho cercano). Desta forma produzindo uma imagem a cores na porção central do campo de visão
Tamanho da Imagem	O tamanho do pixel, de uma imagem captada a uma altitude de 300Km é de aproximadamente 30cm. No total o tamanho da imagem é uma franja de 6Km de largura por um comprimento que pode chegar aos 60Km
Resolução da Imagem	As estruturas mais pequenas que podem ser observadas são de cerca de ~1m
Distância Focal	~12 metros
Cientista Principal	Alfred McEwen (Lunar and Planetary Laboratory da Universidade do Arizona)

Tabela 3 Especificações Técnicas do instrumento HiRISE (*Crédito*: NASA/JPL)

O instrumento HiRISE será utilizado quando o orbitador MRO efectuar órbitas num intervalo de altitude entre 200 e 400Km, devido ao facto de ser o intervalo óptimo para poder maximizar a resolução das imagens obtidas. Nestas condições pode obter imagens da superfície em que cada pixel

corresponde a 30-60cm, permitindo visualizar elementos morfológicos da paisagem marciana de forma individual. Como já referido anteriormente, esta grande capacidade de resolução do HiRISE permitiu que pela primeira vez se pudesse analisar e caracterizar de forma exaustiva zonas de depósitos sedimentários, ravinas, canais, dunas e outros alvos de grande importância científica.

Recorrendo às imagens obtidas por este instrumento, aliado a outros a bordo do orbitador (p.e. o CRISM, que exploraremos de forma mais exaustiva no próximo capítulo) foi possível fazer levantamentos exaustivos de locais-candidatos para aterrar plataformas científicas ou rovers na superfície de Marte (p.e. Rover Perseverance e Helicóptero Ingenuity), trabalho que continuará a realizar, pelo menos nos próximos anos pois a missão tem sido constantemente alargada.

3.1.2. CRISM – Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars

O instrumento CRISM (Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars ou Espectrómetro Compacto de Visualização e Reconhecimento de Marte), tem como objectivo principal a busca de minerais hidratados ou minerais que apenas se formam na presença de água líquida por largos períodos de tempo. Esses minerais podem estar associados a vários ambientes que podemos observar na Terra, como fenómenos hidrológicos associados à actividade vulcânica como *geisers* ou fontes hidrotermais, lagos, pequenos charcos, rios e oceanos também podem ter existido em Marte em determinados períodos da história do planeta.

Algumas formações presentes na superfície de Marte, providenciam algumas evidências da presença de água líquida a fluir livremente no passado distante, mas a análise da morfologia do terreno não é suficiente para descartar outras possíveis origens. Para isso é necessário outro tipo de informação, que é providenciada por este novo espectrómetro orbital, dessa forma podemos identificar e providenciar dados que permitem distinguir que formações podem ser de origem hidrológica das que são de outra natureza.

O instrumento CRISM (**Figura 25**) é composto por três elementos localizados em partes distintas do orbitador: a GME (Gimbal Motor Electronics), a DPU (Data Processing Unit) e a principal designada por OSU (Optical Sensing Unit ou Unidade de Detecção Óptica), encontra-se na parte ventral apontando para a superfície de Marte do lado direito da HiRISE.

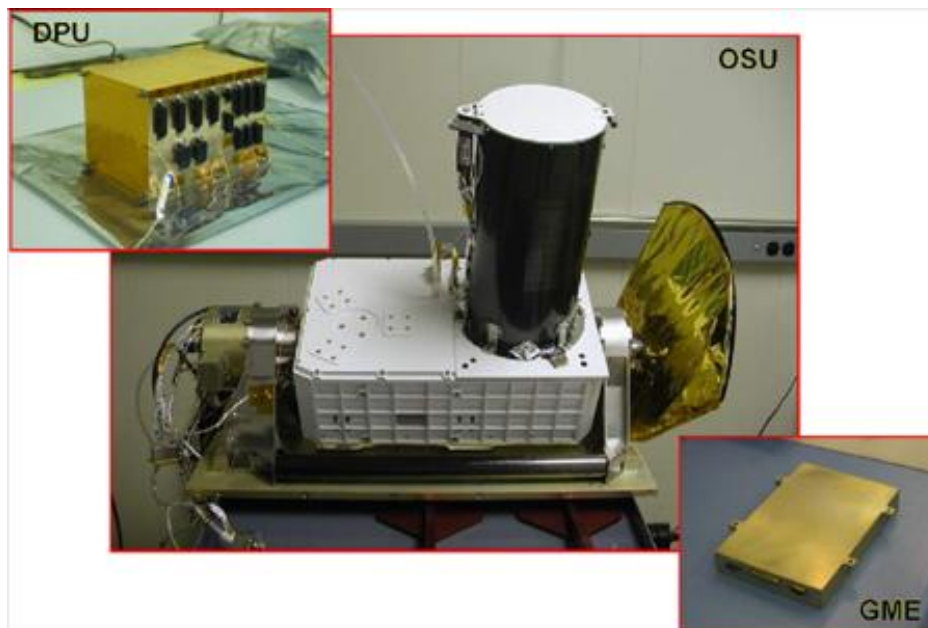


Figura 25 Composição fotográfica dos três elementos que constituem o instrumento CRISM, antes de serem montados no orbitador MRO. (*Crédito*: NASA/JHUAPL)

Os espectrómetros a bordo do CRISM, que são capazes de detectar espectros tanto na zona visível como na zona do infravermelho, são capazes de monitorizar a superfície marciana desde 300Km de altitude alvos seleccionados com o tamanho mínimo de cerca de 18 metros.

Na **Tabela 4**, é descrito de forma detalhada as especificações técnicas e operacionais mais relevantes para o desenvolvimento deste trabalho.

Objectivo Principal	Buscar vestígios de minerais que se formem na presença de água
Localização	Na zona ventral do orbitador, apontando directamente para Marte
Massa	~ 32,92Kg
Potência	Entre 44,4 e 47,3Watts durante as operações normais (~16Watts em standby)
Tamanho	A parte principal do instrumento, a Unidade de Detecção Óptica (Optical Sensing Unit (OSU)), caberia numa caixa com as dimensões 77,4cmx56,3cmx39,1cm
Recepção de Dados	Uma observação normal, designada por Full Resolution Targeted (FRT) tem entre 2 e 2,5Gb
Resolução	Consegue abranger o espectro de 362nm até 3920nm com uma

Espectral	sensibilidade de 6,55nm/canal
Tamanho da Imagem	O tamanho do pixel, de uma imagem captada a uma altitude de 300Km é de aproximadamente 18,4cm. No total o tamanho da imagem é uma franja entre 9,4 e 11,9Km de largura.
Distância Focal	~441mm
Cientista Principal	Scott Murchie (Applied Physics Lab da Universidade de Johns Hopkins)

Tabela 4 Especificações Técnicas do instrumento CRISM (*Crédito*: NASA/JHUAPL)

4. Lugares de Estudo – Análise Geomorfológica e Geoquímica

Aquando da selecção dos locais para estudo neste trabalho, foi tido em conta a variedade de processos responsáveis pela formação dos elementos dominantes nesse local da superfície marciana.

A **Figura 26** é o mapa global da topografia marciana, resultado do trabalho do instrumento MOLA (Mars Orbiter Laser Altimeter – Altimetro Laser do Orbitador de Marte), em que se pode observar a localização aproximada das fotografias que foram utilizadas para o estudo dos locais seleccionados para este trabalho (assinaladas a branco).

O MOLA era um dos cinco instrumentos que estavam em operação no orbitador MGS (Mars Global Surveyor), que esteve activo de Setembro de 1997 até Novembro de 2006. A sua actividade sobrepõe-se a chegada e início de operações do orbitador MRO. Com este instrumento foi possível calcular de forma precisa o tamanho das principais bacias hidrográficas marcianas, e o volume de água presente actualmente na superfície de Marte, que se localiza sob a forma de gelo nos pólos (segundo os cálculos existe entre 3,2 e 4,7 milhões de quilómetros cúbicos de gelo de água distribuída entre o Pólo Norte e o Pólo Sul) (E. Smith, D. et al., 1999).

Na **Tabela 5**, foi elaborada uma lista, em que foram enumeradas e caracterizadas as imagens obtidas pelo instrumento HiRISE seleccionadas para a realização deste trabalho. Tentou-se abranger uma grande variedade de terrenos e locais do globo marciano para que fosse o mais compreensiva possível, esta caracterização. Uma vez que o objectivo não é criar um atlas extensivo, foram escolhidos alguns locais que melhor exemplificam os processos de modelação da superfície marciana.

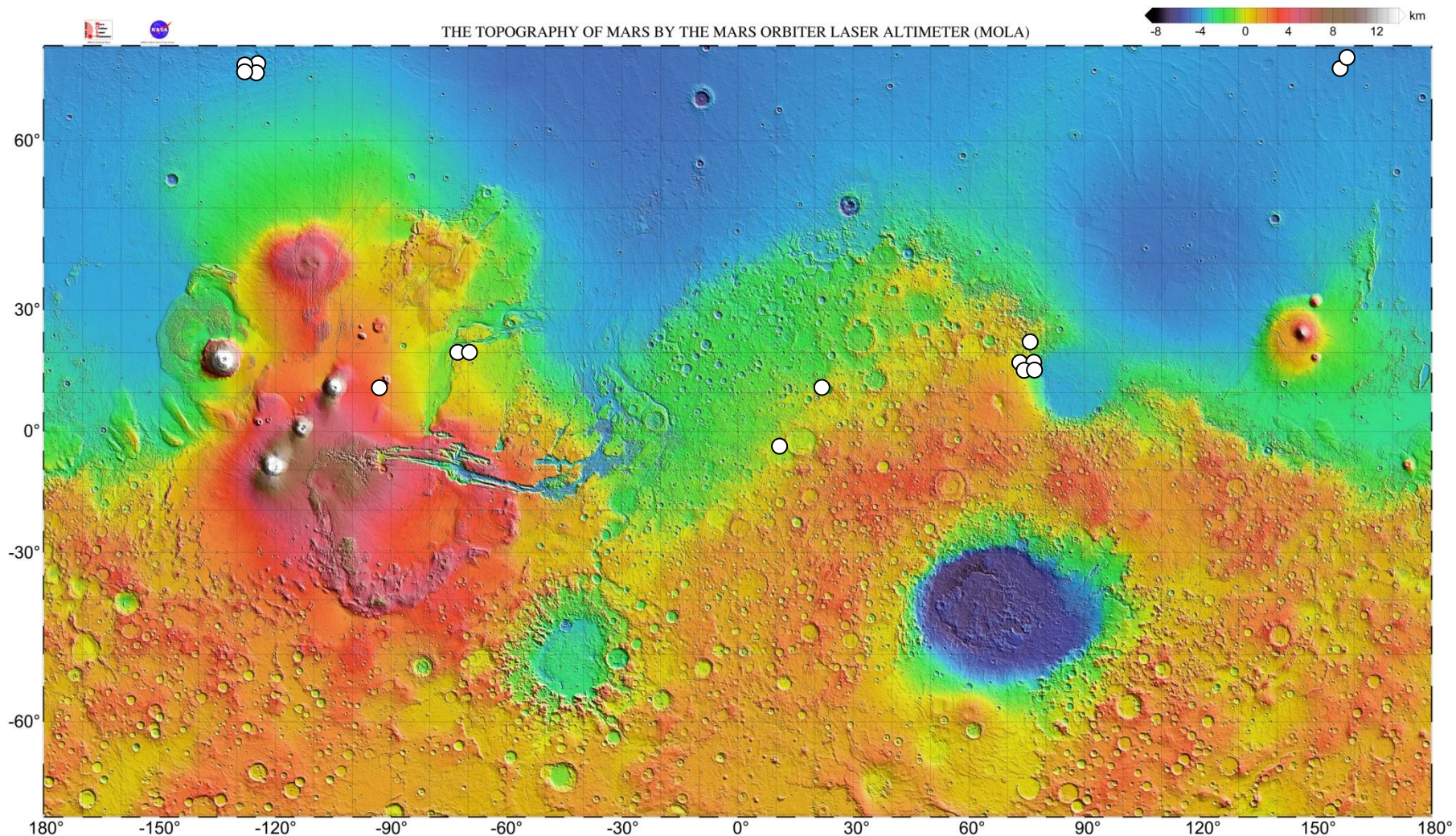


Figura 26 Mapa topográfico de Marte, obtido pelo instrumento MOLA do MGS. A branco estão assinalados os locais aproximados das fotografias usadas para este trabalho. (*Crédito:* NASA/JPL/USGS e Joana Neto-Lima)

Local de Estudo	HiRISE ID	Data	Latitude	Longitude	Altitude	Projeção	Escala
1	PSP_008323_1735	06/05/2008	-6.368°	11.822°	266,5Km	Equirectangular	26,7cm/pixel (~80cm)
2	PSP_009656_2780	17/08/2008	81.811°	158.711°	318,2Km	Polarstereographic	32,3cm/pixel a 64,5cm/pixel
3	PSP_009929_2020	08/09/2008	21.669°	78.737°	280,7Km	Equirectangular	28,6cm/pixel (~86cm)
4							
5	PSP_006991_1905	23/01/2008	10.504°	22.099°	275,9Km	Equirectangular	27,9cm/pixel (~84cm)
6	ESP_035985_1985	31/03/2014	18.526°	77.246°	280,3Km	Equirectangular	28,8cm/pixel (~86cm)
	PSP_001820_1985	16/12/2006	18.259°	77.331°	279,9Km	Equirectangular	55,9cm/pixel (~168cm)
	ESP_037396_1985	19/07/2017	18.460°	77.371°	279,4Km	Equirectangular	28,3cm/pixel (~85cm)
	PSP_002387_1985	29/01/2007	18.488°	77.404°	280,5Km	Equirectangular	28,1cm/pixel (~84cm)
7	PSP_002169_1940	12/01/2007	13.575°	268.761°	271,3Km	Equirectangular	54,9cm/pixel (~165cm)
8	PSP_007338_2640	19/02/2008	83.738°	235.776°	318,2Km	Polarstereographic	31,8cm/pixel (~95cm)
	PSP_007140_2640	03/02/2008	83.715°	235.745°	316,2Km	Polarstereographic	31,9cm/pixel (~96cm)
	ESP_016423_2640	27/01/2010	83.827°	235.325°	318,8Km	Polarstereographic	31,9cm/pixel (~96cm)
	ESP_016173_2640	07/01/2010	83.828°	235.295°	317,4Km	Polarstereographic	33,0cm/pixel (~99cm)
	ESP_016228_2650	12/01/2010	84.993°	151.472°	319,4Km	Polarstereographic	32,0cm/pixel (~96cm)
9	ESP_024703_2010	03/11/2011	20.841°	287.433°	280,4Km	Equirectangular	30,1cm/pixel (~90cm)
	ESP_024202_2010	25/09/2011	20.844°	287.437°	281,8Km	Equirectangular	28,3cm/pixel (~85cm)

Tabela 5 Especificações Técnicas das Imagens HiRISE utilizadas para a realização da análise geomorfológica dos locais considerados para este estudo. (Nota: A informação do Local de Estudo 4, foi deixada propositadamente sem preencher.)

Foram escolhidos locais que apresentam na sua superfície sinais de modelação eólica, hidrológica (ou em alguns casos, uma sucessão destes dois processos, p.e. Nili Fossae e Cratera Jezero, ambas modeladas por actividade hidrológica e depois cobertas por poeira, que com o passar do tempo resulta na formação de diversos tipos de dunas).

4.1. Modelação Eólica

Na **Figura 27**, estão representados os locais onde, até ao momento foram identificadas estruturas criadas e modeladas pela acção do vento, assinalado a azul e vermelho são dunas (tanto campos de dunas como estruturas individuais de origem eólica) e a amarelo são locais onde podemos encontrar algumas estruturas insípidas (p.e. dunas em estágio inicial) ou estruturas pontuais sem classificação bem definida (ou seja, estruturas únicas que não se pode colocar numa categoria como as referidas anteriormente).

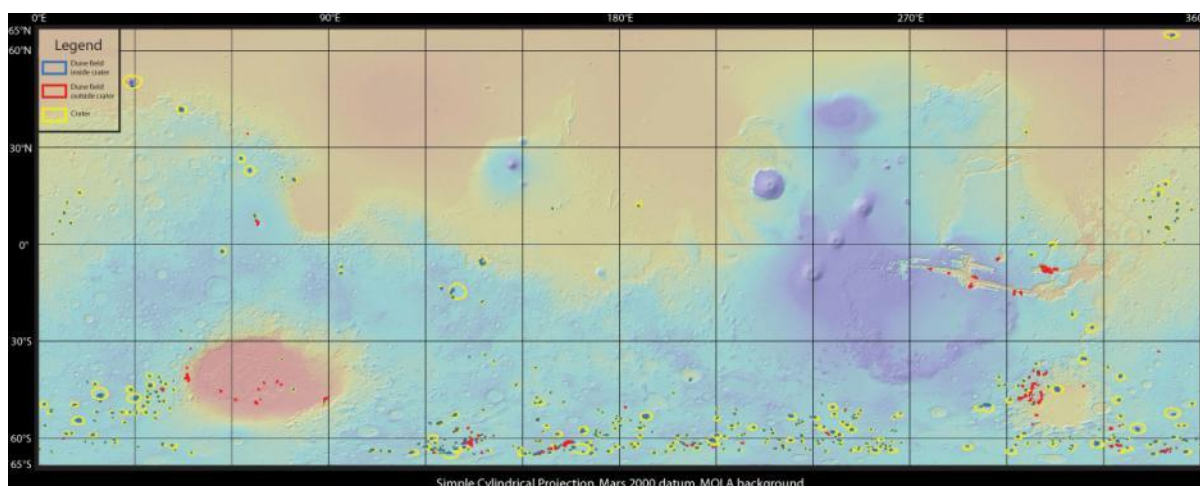


Figura 27 Mapa de Elevação MOLA, destacando os locais onde se pode observar a presença de dunas e formação de estruturas devido à acção do vento. (*Crédito*: NASA/JPL)

O Mars Global Digital Dune Database (MGD³), que tal como o nome indica é um repositório de todas as estruturas dunares, identificadas até ao momento em formato online de acesso livre a toda a comunidade, possui um censo da área total ocupada por estas formações. Segundo esta base de dados, a maior área de dunas no planeta Marte está localizada nas latitudes altas e no Pólo Norte (as

latitudes altas e os pólos não se encontram representados no mapa MOLA anterior devido a constrangimentos da projecção cilíndrica utilizada para o elaborar).

Região	Lat. Mínima	Lat. Máxima	Área (Km ²)
Equatorial	-65°	+65°	70.000
Pólo Norte	+65°	+90°	845.000
Pólo Sul	-90°	-65°	60.000
Total			975.000

Tabela 6 Sumário da área ocupada por dunas da superfície marciana. (*Crédito:* Adaptado de "Mars Global Digital Dune Database (MGD³): Global Dune Distribution and wind pattern observations, Hayward et al. (2014))

Os cinco locais incluídos neste trabalho e que apresentam estruturas de natureza eólica estão localizados entre a latitude -6° e 81°: Sudoeste da Cratera Schiaparelli (Local 1), Campo de Dunas no Pólo Norte (Local 2), Antigo Canal Secundário em Nili Fossae (Local 3), Cratera e Delta Depositional de Jezero (Local 6) e Caldeira de Tharsis Tholus (Local 7). Alguns destes locais de estudo apresentam dois tipos de modelação e por esse motivo foram incorporados noutras secções deste estudo geomorfológico e geoquímico, este pormenor ajuda a demonstrar que, actualmente em Marte o vento é uma presença constante sendo o principal responsável pelo transporte de partículas pela superfície de todo o planeta. Isso é facilmente comprovado pela presença de minerais ferromagnéticos (óxidos de ferro p.e.) em locais onde a presença de água líquida por longos períodos de tempo não foi comprovada.

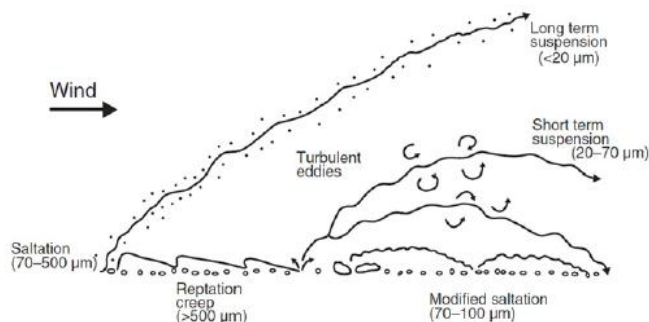


Figura 28 Representação esquemática das diferentes formas de transporte eólico e o tipo de partículas transportadas. (*Crédito:* Adaptado de "The Physics of wind-blown sand and dust", Kok (2012))

Apesar da atmosfera marciana não possuir a mesma densidade da atmosfera terrestre (é praticamente rarefeita e quase completamente composta por dióxido de carbono), e não produzir tempestades com a mesma intensidade e força como na Terra. Mesmo tendo em conta as diferenças atmosféricas entre os dois planetas, o processo do transporte eólico em Marte é efectuado seguindo as mesmas regras que na Terra como podemos observar na representação esquemática da **Figura 28**, a principal diferença entre os dois planetas é o tamanho, o tipo de partículas e a distância do transporte (i.e. em Marte as partículas e os materiais transportados são de dimensões menores do que na Terra, devido à densidade da sua atmosfera e ao valor da gravidade marciana ($3,721 \text{ m/s}^2$) comparada com a terrestre ($9,807 \text{ m/s}^2$))

Periodicamente ocorrem fenómenos designados por PEDE (Planet-Encircling Dust Event), cujo equivalente terrestre são as tempestades de areia que ficam circunscritas a uma região (devido às células de circulação atmosférica, as células Hadley) e que em Marte envolvem o planeta vermelho por completo. O último PEDE foi particularmente denso e prolongado no tempo, ocorreu em 2018 e provocou a desactivação do rover Opportunity (cuja fonte de energia eram os seus painéis solares que devido à acumulação de pó ficaram inutilizados, o que levou à descarga completa das baterias do rover e a sua desactivação).

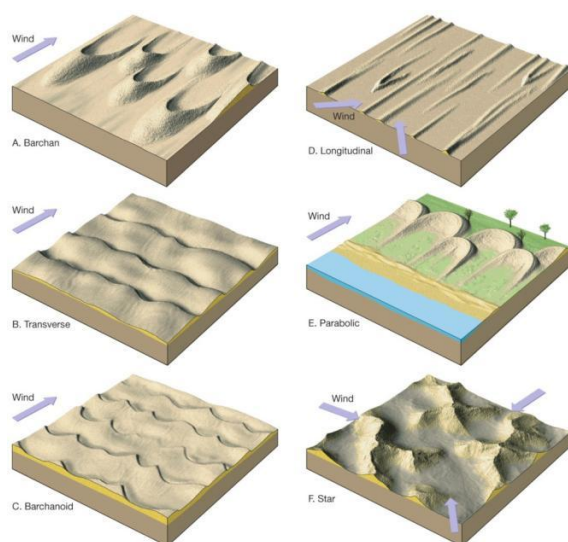


Figura 29 Os seis tipos principais de dunas de areia, conforme observado no planeta Terra. A. Dunas Barcan. B. Dunas Transversais. C. Dunas Barcanóides. D. Dunas Longitudinais. E. Dunas Parabólicas. F. Dunas Estrela. (*Crédito*: Pearson Prentice Hall, Inc. (2006))

Nesta secção do presente trabalho foram seleccionados exemplos de alguns dos tipos de dunas mais comuns na superfície marciana (p.e. as dunas em forma de estrela que raramente ocorrem no planeta Terra, enquanto que em Marte são relativamente comuns e ocupam grandes áreas que estão constantemente em mutação, como poderemos observar num dos exemplos que foi seleccionado para esta secção). Dos seis tipos principais de dunas que foram identificados na Terra, representados esquematicamente na **Figura 29**

Em Marte, ocorrem outros fenómenos de origem eólica e que pode ser observado na Terra em diversos ambientes (ambientes aquáticos, terrestres e mesmo de fogo devido às fortes correntes convectivas que se geram neste tipo de cenários), são os chamados *dust devils* (demónios de poeira). Apesar de neste trabalho não aprofundarmos muito o estudo deste fenómeno, não se podia deixar de lhe fazer referência, uma vez que é mais uma prova/demonstração da quão dinâmica é a paisagem marciana. Assim sendo, as formações que observamos (estudamos neste trabalho), não resultam apenas de processos lentos e que se prolongam muito no tempo, mas que existem processos como os *dust devils* que podem transformar rapidamente a paisagem e transportam materiais longas distâncias.

Na **Figura 30** podemos observar a fotografia de um local cerca do equador marciano, com a superfície marcada pela passagem de centenas (ou mesmo milhares) de *dust devils*. Estes fenómenos atmosféricos são vulgar ocorrência, especialmente nas estações do ano com temperaturas mais elevadas.

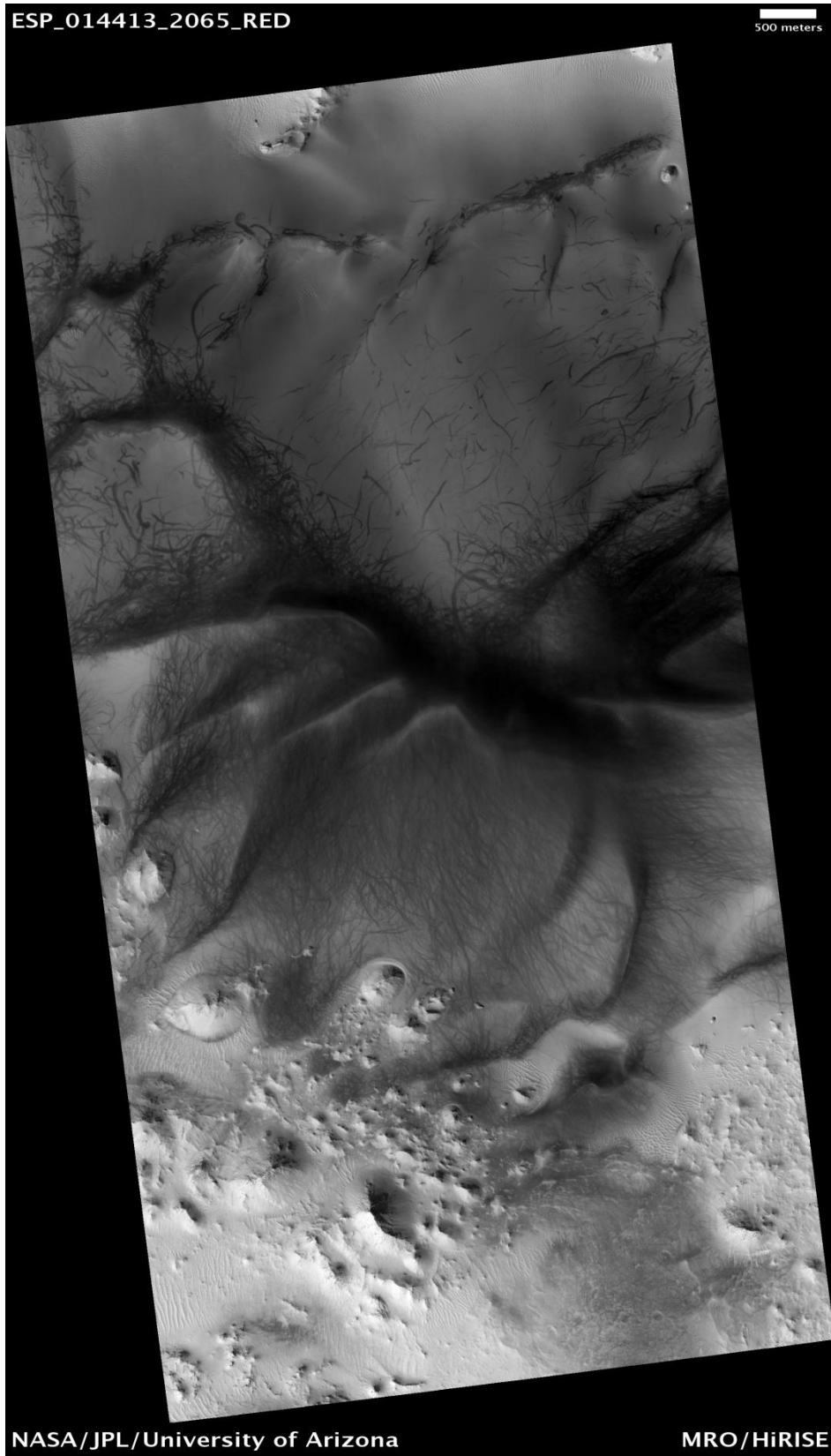


Figura 30 Imagem de um local cerca do equador marciano em que podemos distinguir claramente centenas de marcas da passagem de *dust devils*. Imagem obtida pelo HiRISE (ESP_014413_2065_RED) (Crédito: NASA/JPL/University of Arizona)

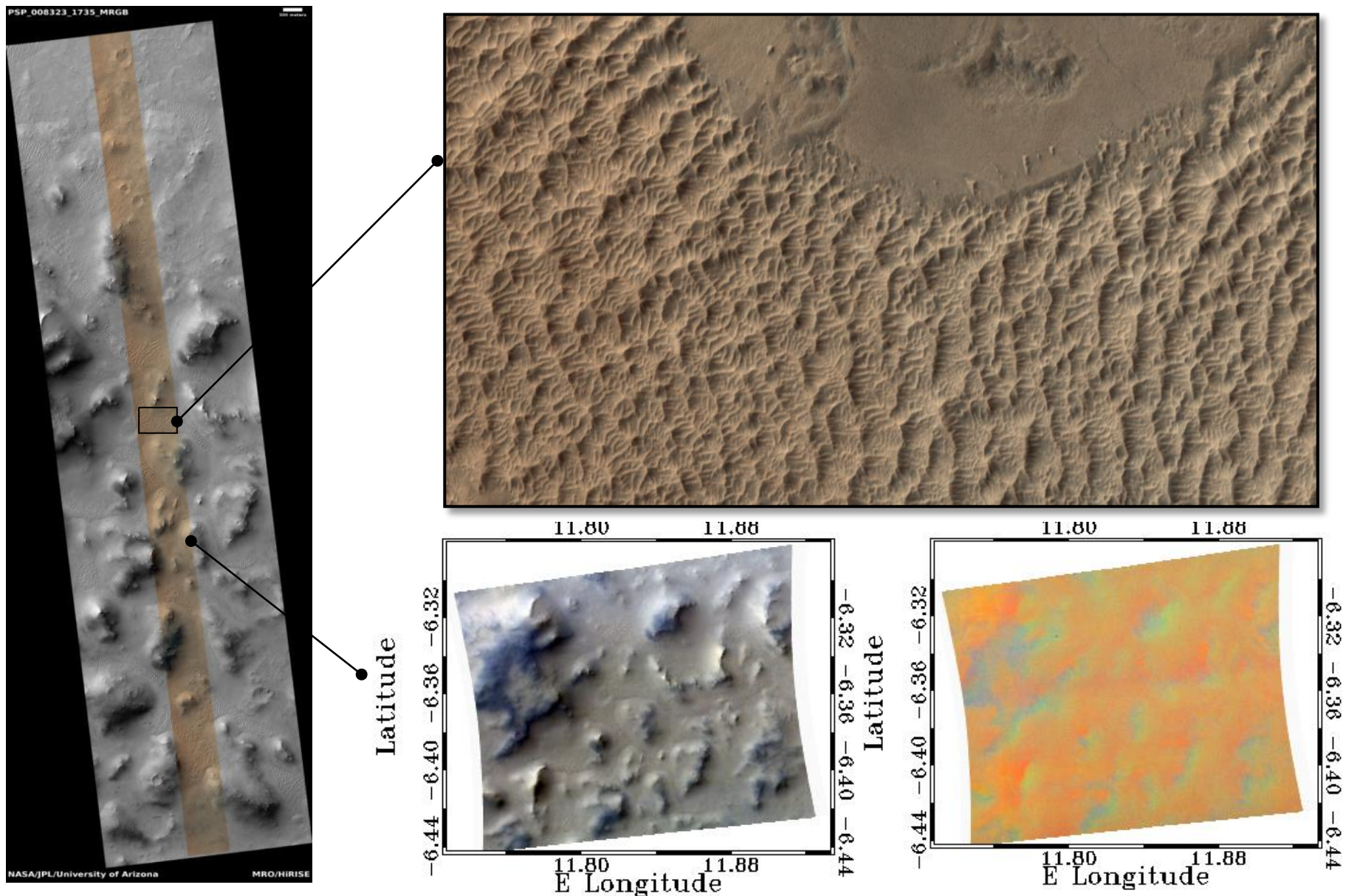


Figura 31 Estudo do Local 1 – Cratera Schiaparelli em Marte. (Descrição das Imagens, no sentido dos ponteiros do relógio) Imagem obtida pelo HiRISE (PSP_008323_1735); Detalhe das dunas em forma de estrela e dos TARs; Imagens obtida pelo CRISM: Cores Reais (HRS0000AB91_07_IF174S_TRU1), Materiais Férricos (HRS0000AB91_07_IF174S_FEM). (*Crédito:* NASA/JPL/University of Arizona, Joana Neto-Lima, NASA/JHUAPL)

No local de estudo, designado por Local 1 (**Figura 32**), um campo de dunas em forma de estrela a sudoeste da Cratera Schiaparelli, podemos observar na imagem de detalhe (uma secção da imagem HiRISE PSP_008323_1735) as dunas em forma de estrela no lado esquerdo, enquanto do lado direito podemos observar as designadas TARs (Transverse Aeolian Ridges – Crestas Eólicas Transversais), dunas transversais que com a continuada acção do tempo serão modeladas em dunas como as do lado esquerdo. As estruturas mais pequenas que se pode distinguir individualmente, são de aproximadamente oitenta centímetros.

Isto ocorre pois essa zona possui uma série de obstáculos à circulação do vento e ao transporte de partículas, como podemos observar na imagem original, levando à deposição dos materiais neste formato tão característico. Este tipo de dunas forma-se também pela existência de vento forte mas que muda de direcção de tempo a tempo, criando prolongamentos em várias direcções e conferindo a estas dunas a sua forma característica em estrela.

Na Terra, podemos observar dunas em forma de estrela, numa secção do deserto do Mojave (**Figura 32**) conhecida por Campo de Dunas Dumont (cerca do Death Valley (Vale da Morte)), se bem que aqui não ocupam uma área tão grande nem são tão bem definidas como as que podemos observar em Marte.

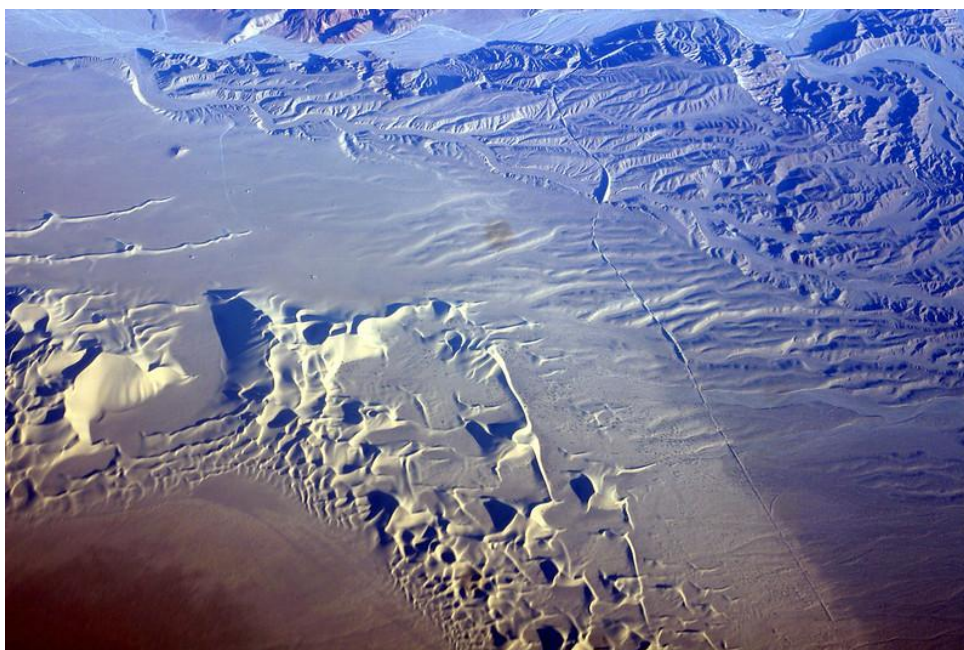


Figura 32 Fotografia aérea das dunas em forma de estrela do Campo de Dunas de Dumont (Deserto do Mojave, Estados Unidos da América) (*Crédito*: Doc Searls)

Apesar de na Cratera Schiaparelli, não existir registo de grandes extensões de água líquida durante largos períodos da história de Marte, segundo os dados obtidos pelo instrumento CRISM (HRS0000AB91_07IF174S_FEM) podemos detectar a presença de minerais férricos oxidados (Vermelho: Minerais Férricos; Azul: Variedade de minerais de ferro; Verde: Revestimentos de ferro oxidado) pela área analisada.

Pela deposição dos minerais de ferro, em conjunto com a forma das próprias dunas podemos inferir que a direcção do vento dominante nesta zona é de oeste para este, com algumas variações devidos aos obstáculos do terreno.

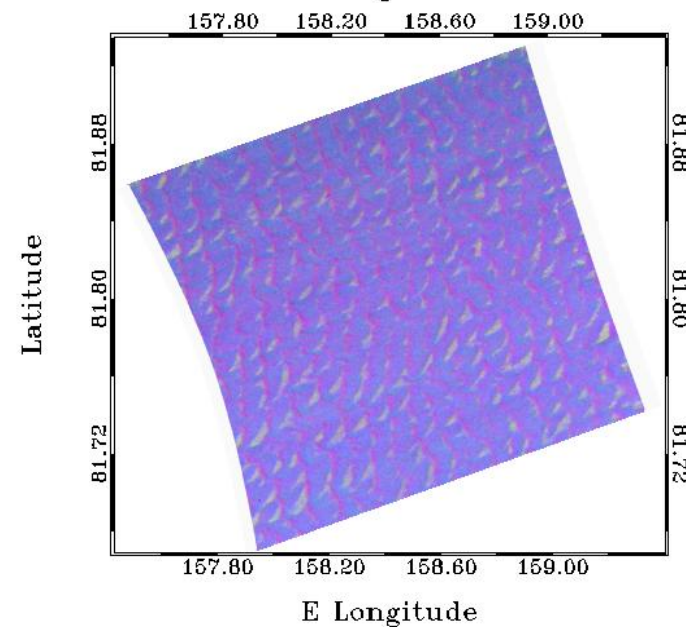
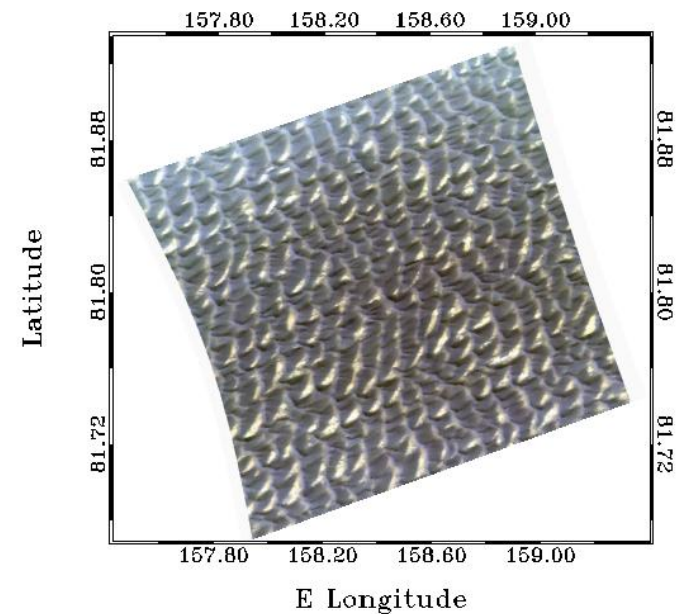
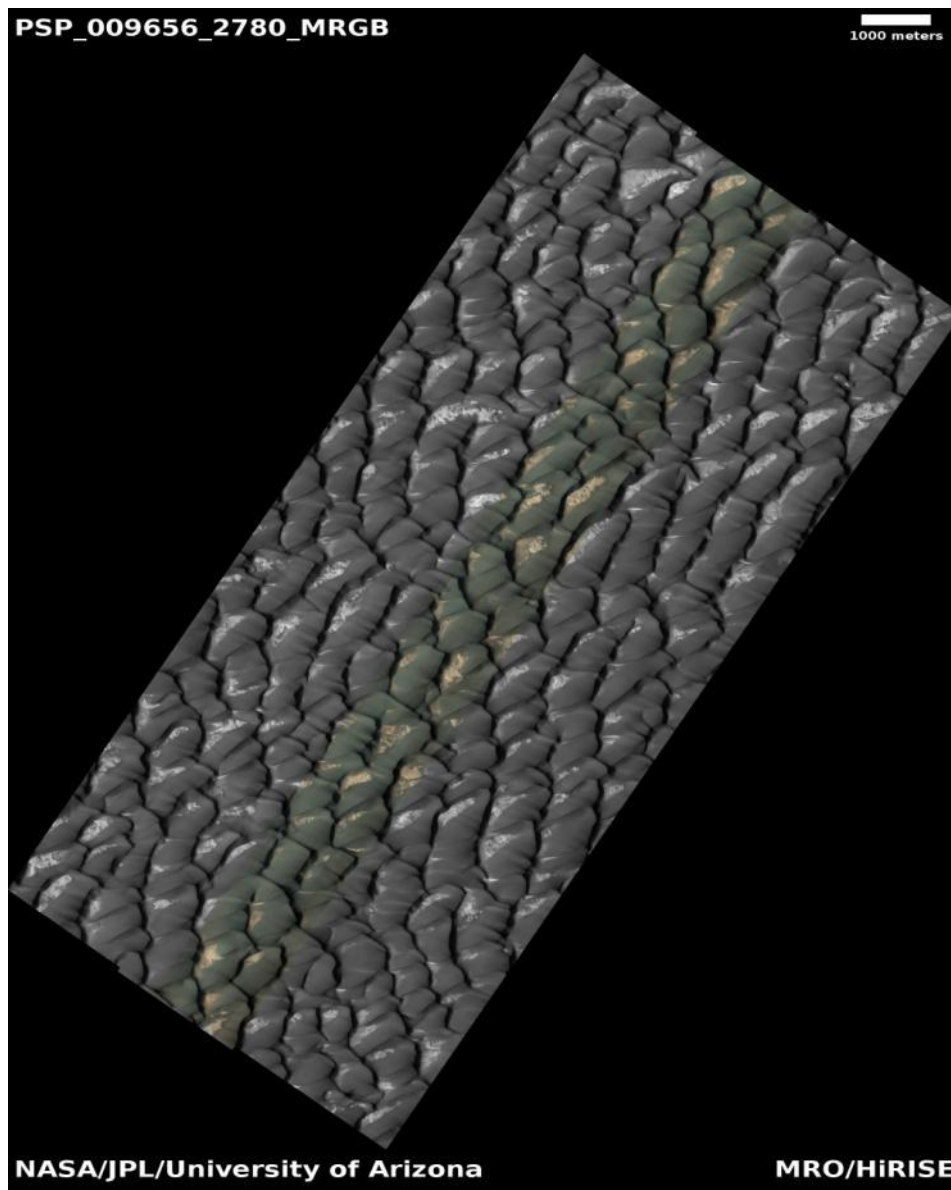


Figura 33 Estudo do Local 2 – Localizado no Pólo Norte de Marte. (Descrição das Imagens, no sentido dos ponteiros do relógio) Imagem obtida pelo HiRISE (PSP_009656_2780); Imagens obtida pelo CRISM: Cores Reais (HRS0000C36B_07_IF77S_TRU1), Materiais Férricos (HRS0000C36B_07_IF177S_FEM1). (*Crédito:* NASA/JPL/University of Arizona, NASA/JHUAPL)

No local de estudo, designado por Local 2 (**Figura 34**), pode ser observado um campo de dunas no Pólo Norte. As dunas são predominantemente escuras devido à acumulação de material de origem vulcânico (sobretudo basalto), com uma estrutura transversal, e dunas lineares e barcanóides em transição para transversais. As zonas brancas são depósitos de gesso, que na Terra dificilmente se depositam em tão grande quantidade à superfície, devido à solubilidade deste mineral em condições terrestres.

Existem duas direcções predominantes do vento nesta zona do Pólo Norte marciano, de oeste-noroeste e oeste-sudoeste e estas vão alterando de acordo com as estações do ano em Marte (se bem que ainda não foi possível, de forma definitiva entender estas flutuações na direcção do vento).

Na Terra, podemos observar este fenómeno, no White Sands National Monument (Monumento Nacional de White Sands) (**Figura 34**), mesmo sendo o maior campo de dunas de evaporitos de gesso da Terra, não se compara com a extensão deste em Marte.



Figura 34 Campo de Dunas de Gesso, na antiga bacia hidrográfica de Tularosa no Monumento Nacional de White Sands (Novo México, Estados Unidos da América) (*Crédito:* Material de divulgação da National Parks Society)

Usando a informação obtida através do CRISM (HRS0000C36B_07_IF177S_FEM1), pode ser observada a deposição de materiais férricos seguindo o característico padrão das dunas (Vermelho: Minerais Férricos; Azul: Variedade de minerais de ferro; Verde: Revestimentos de ferro oxidado). O CRISM não detectou nenhum material hidratado, mas outro instrumento chamado OMEGA (Observatoire pour la Minéralogie, l'Eau, les Glaces et l'Activité) do orbitador Mars Express (em operação desde 2003) da ESA (European Space Agency) foi capaz de detectar e identificar de forma definitiva a natureza dos depósitos brancos na crista destas dunas (Carter J. et al., 2013).

4.2. Modelação Hidrológica

Um pouco por toda a superfície marciana, podem ser observadas várias estruturas e formações que se assemelham muito ao que podemos observar na Terra e que sabemos resultar da acção e presença prolongada de água líquida no ambiente. Podemos observar antigos canais de rios, deltas deposicionais, e zonas onde se deixa antever a influência de um grande oceano que envolveu, no passado, grande parte do hemisfério norte (Baker, V.R., 2006).

A história da existência de água líquida no planeta vermelho, está intrinsecamente ligada com a evolução do próprio planeta e a dinâmica dos seus processos deixou a paisagem modelada de maneira inconfundível (Carr, M.H. e Head III, J.W., 2010).

Por esse motivo, antes de se iniciar a análise dos locais de estudo escolhidos para este representar este tipo de modelação, há que aprofundar um pouco a história geológica de Marte. Segundo a bibliografia consultada para este trabalho, a história de Marte pode ser dividida em quatro Períodos (**Figura 35**): Pré-Noachiano (4,5-4,0Ga), Noachiano (4,0-3,6Ga), Hesperiano (3,6-3,2Ga) e Amazoniano (3,2Ga-Actualidade). Com base na análise das crateras de impacto, a maioria da actividade hidrológica na superfície do planeta tem vindo a ser interpretada como tendo ocorrido nos dois últimos Períodos da sua história geológica (Carr, M.H. e Head III, J.W., 2010).

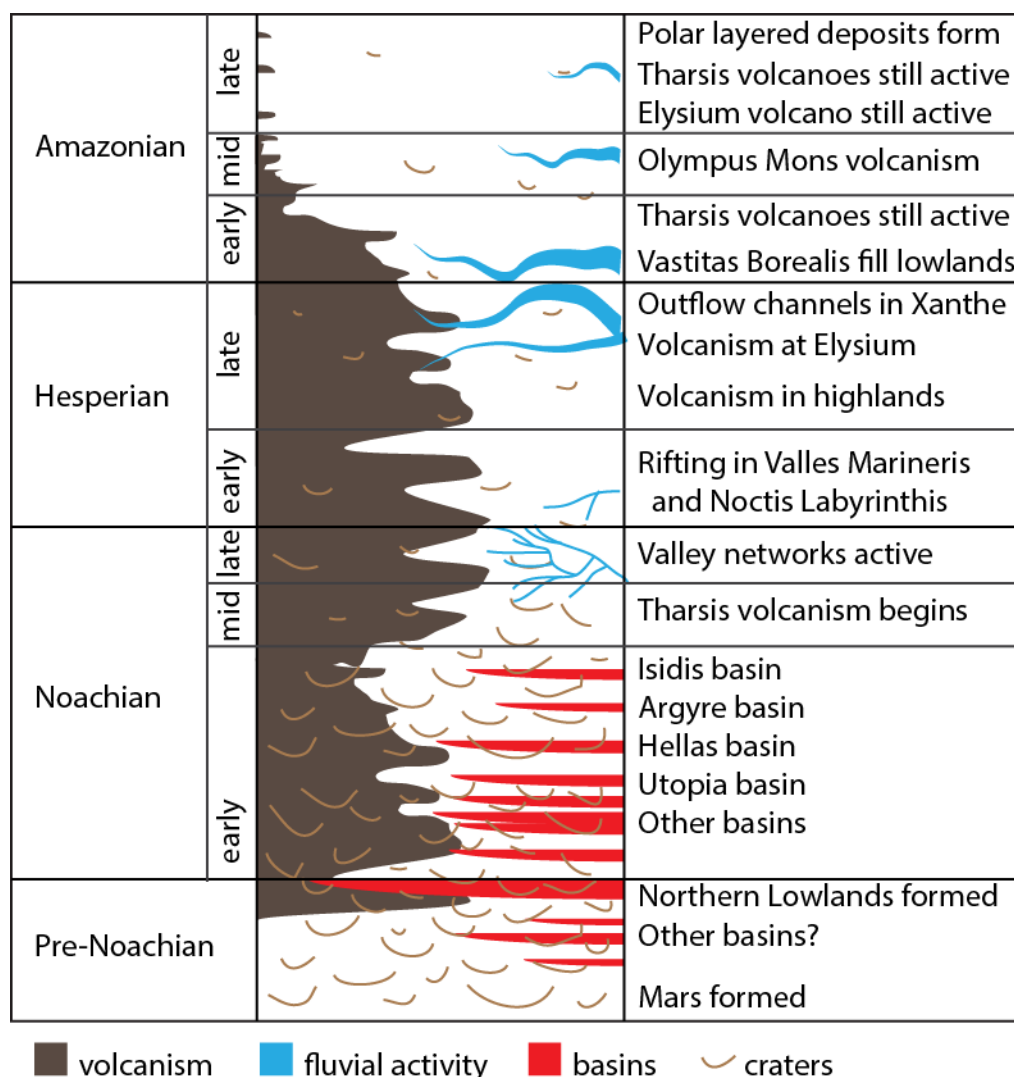


Figura 35 Representação esquemática dos quatro Períodos da história geológica de Marte, fazendo referência aos principais eventos geológicos de cada uma e as formações que ainda hoje podemos observar na superfície do planeta. (*Crédito:* Emily Lakdawalla, adaptação de Tanaka & Hartmann (2012)).

Marte foi extensivamente cartografado e estudado por numerosas missões (tanto recorrendo ao uso de telescópios espaciais, terrestres, orbitadores como de instrumentos directamente na superfície (plataformas imóveis, rovers e na última missão um pequeno helicóptero autónomo). Usando as informações obtidas, foram realizados mapas extensivos (como o mapa MOLA apresentado na secção anterior) que mostram a dicotomia entre o hemisfério norte e o hemisfério sul.

O hemisfério norte encontra-se numa cota ligeiramente abaixo em relação ao hemisfério sul, segundo *Lissauer e Pater (2013)* a diferença varia entre um e quatro quilómetros. Enquanto o hemisfério sul possui terrenos e formações complexas (como algumas que foram estudadas neste trabalho, p.e. Nili Fossae, Cratera Jezero), com a superfície marcada por impactos, o hemisfério norte é relativamente liso. Esta característica de Marte, é designada por *dicotomia crustal*, e a transição

entre estes dois terrenos está bastante definida com formações geológicas complexas e escarpas extensivas (estas características não serão exploradas neste trabalho, podem ser resultado da ocorrência de um oceano que cobria a maioria do hemisfério norte).

Na **Figura 36** podemos observar uma representação esquemática dos três estágios de evolução que modelam uma paisagem quando existe um curso de água líquida e corrente, como um rio. O primeiro cenário, denominado por Estágio Inicial, existe um curso de água que provoca alterações drásticas na superfície, erodindo a rocha, formando vales encaixados em forma de V ladeados por encostas de elevado declive; o segundo cenário, denominado por Estágio Maduro, o curso de água maduro (cuja existência e acção se tenha prolongado no tempo geológico), tem tendência a com o passar do tempo erodir as suas margens provocando o alargamento do vale em que se encontra inserido; no Estágio Final, um curso de água nesta fase, já não tem tanta capacidade erosiva e não altera muito a paisagem onde se localiza, procedendo à deposição de sedimentos (devido a velocidades mais reduzidas da água) nas suas margens, dando origem a uma planície de inundação plana. (Jain, S., 2014)

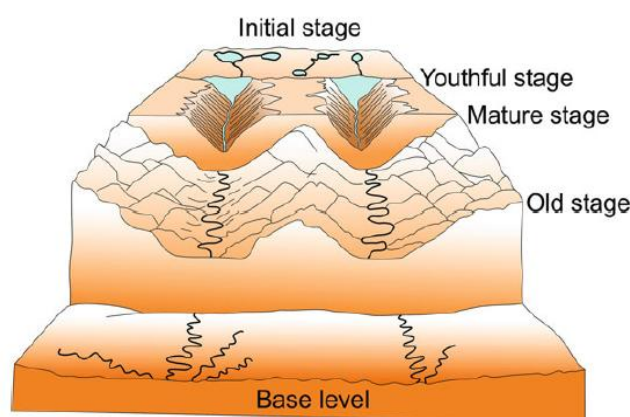


Figura 36 Representação Esquemática da evolução da paisagem provocada por um rio. (*Crédito: "Fundamental Physical Geology" de Sreepat Jain (2014)*)

Os quatro locais de estudo selecionados para exemplificar modelação hidrológica, estão localizados em latitudes cerca dos 20° (com a excepção de um que está localizado no Pólo Norte marciano, a 83°): Antigo Canal Secundário em Nili Fossae (Local 3); Cratera e Delta Depositional de Jezero (Local 6); Canal Escavado em Kasei Valles (Local 9) e Avalanches em Escarpas do Pólo Norte marciano (Local 8). Como na secção anterior, alguns destes locais de estudo, apresentam mais tipos

de modelação e por esse motivo estarão incorporados na secção anterior ou nas seguintes (segundo o processo dinâmico de modelação de paisagem que seja dominante nesse local de estudo específico).

A existência de água líquida na superfície de Marte é, nas condições actuais, muito instável e com tendência à sublimação e à sua perda para o espaço, uma vez que a pressão atmosférica no planeta vermelho não é suficiente para a manter nesse estado (~ 6 mbar (Marte) contra os $\sim 1013,25$ mbar (Terra)). A pequena quantidade de vapor de água existente na atmosfera marciana forma nuvens de gelo de água a altitudes de aproximadamente 10Km nas zonas equatoriais e muitas vezes podemos observar a sua convergência em torno dos vulcões marcianos. Nas imagens e dados obtidos pelo CRISM (e apresentados neste trabalho), não iremos ver a existência de água líquida por este motivo, observando apenas os resultados da sua presença (actualmente existem apenas algumas situações em que cerca dos rovers, se consegue detectar condensação de água em grãos de areia no amanhecer marciano durante o Inverno, num processo muito parecido com o que origina o orvalho na Terra).

Mesmo milhões de anos depois da existência de água a fluir livremente pela superfície de Marte, actualmente podemos facilmente distinguir bacias hidrográficas, canais de escoamento, antigos leitos de rios e lagos. A presença de água no passado e no presente (mesmo que em quantidades ínfimas), pode ser suportada pelos dados do instrumento CRISM (nalguns casos é necessária a confirmação por outro orbitador devido às restrições técnicas ou mesmo em termos de mecânica orbital dos próprios orbitadores, por isso a colaboração internacional e inter-agências é fundamental para as ciências planetárias).

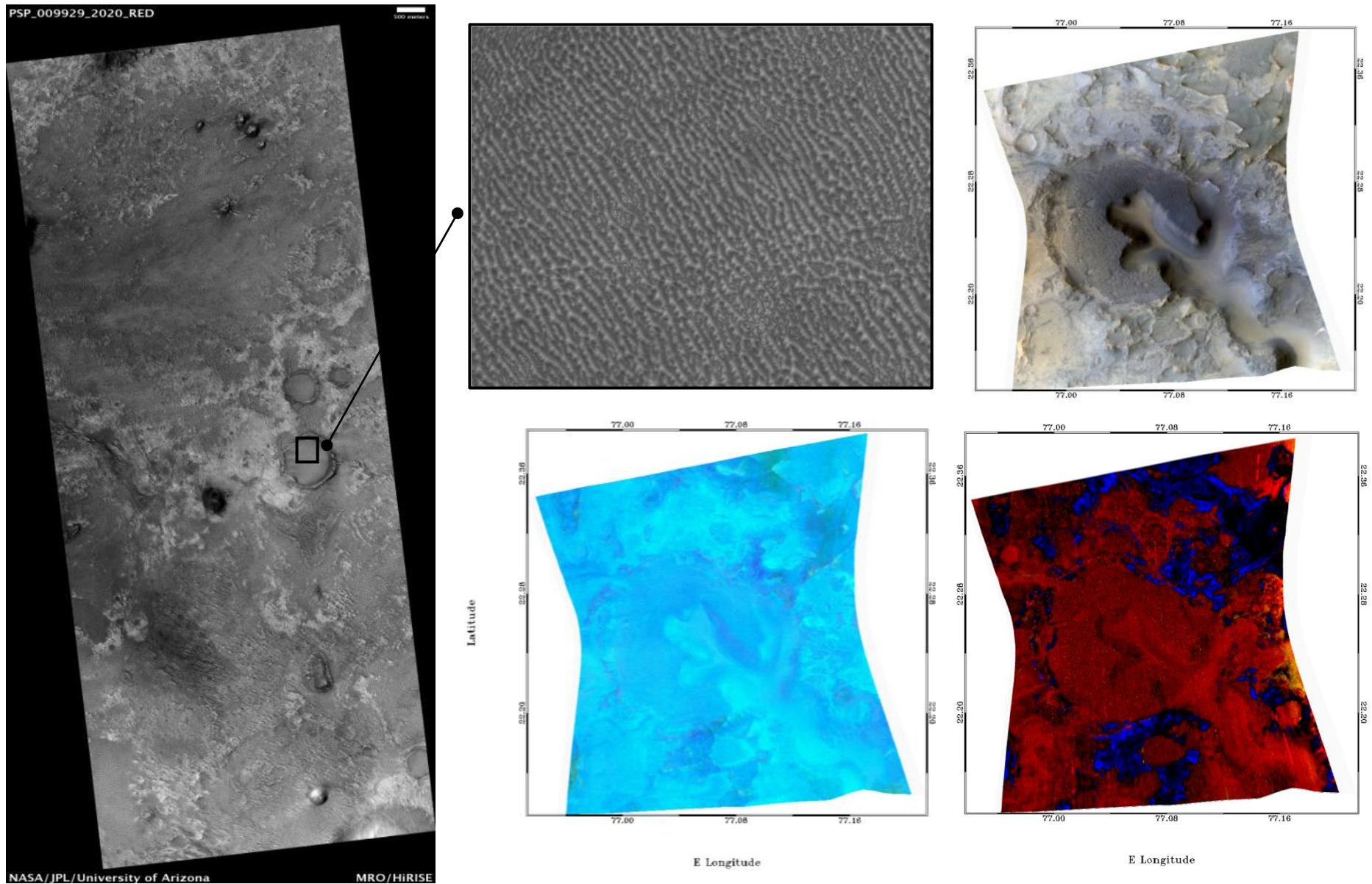


Figura 37 Estudo do Local 3 – Secção da Nili Fossae em Marte. (Descrição das Imagens, no sentido dos ponteiros do relógio) Imagem obtida pelo HiRISE (PSP_009929_2020); Detalhe das dunas paralelas no interior de um dos canais secundários; Imagens obtidas pelo CRISM: Cores Reais (FRT00003E12_07_IF166S_TRU1), Materiais Férricos (FRT00003E12_07_IF166S_FEM1), Materiais Hidratados (FRT00003E12_07_IF166L_HYD1). (Crédito: NASA/JPL/University of Arizona, Joana Neto-Lima, NASA/JHUAPL)

No local de estudo, designado por Local 3 (**Figura 37**), podemos observar um dos canais secundários de um antigo sistema de canais localizado em Nili Fossae, na imagem de detalhe nitidamente se pode distinguir a posterior formação de um complexo sistema de dunas transversais no interior tanto dos canais como das crateras de impacto, devido à deposição de poeira pelo vento nos últimos milhares ou milhões de anos.

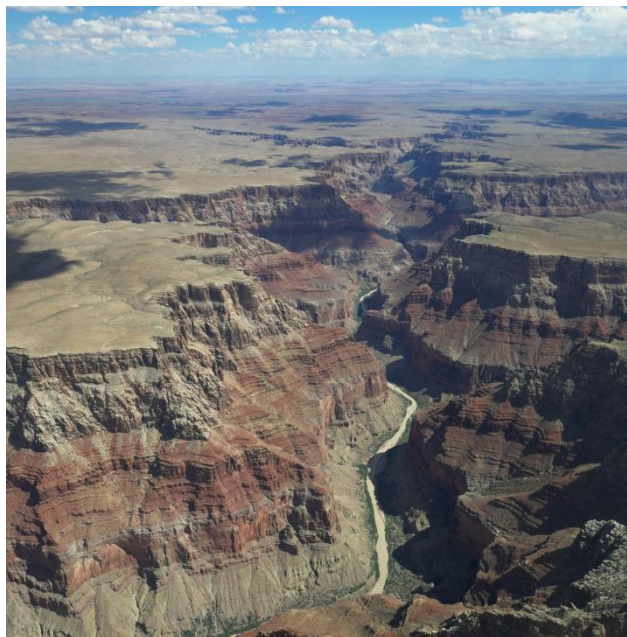


Figura 38 Vista aérea da secção norte do Grand Canyon, vale escavado pelo rio Little Colorado (um afluente do Rio Colorado), localizado no Arizona (Estados Unidos da América) (*Crédito*: Hendric Stattmann)

Na Terra, podemos observar este tipo de formação, de forma espectacular, no Grand Canyon (Arizona) (**Figura 38**), em que durante milhares de anos os tributários e o rio Colorado esculpiram a paisagem, deixando a descoberto milhões de anos da história geológica deste local. É como se fosse um livro aberto da história do planeta. Esta exposição das diversas camadas, é ainda mais evidente noutro local escolhido para este trabalho, o Local 9 (**Figura 42**) localizado em Kasei Valles que será analisado mais adiante.

Usando a informação obtida através do CRISM, de uma zona muito próxima da captada pelo HiRISE podemos observar a deposição de materiais férricos a norte do canal secundário com formato quase dendrítico (Vermelho: Minerais Férricos; Azul: Variedade de minerais de ferro; Verde: Revestimentos de ferro oxidado), sobrepondo-se ligeiramente ao local onde se conseguiu detectar materiais hidratados que podemos observar em azul (Vermelho: Minerais hidratados ou gelo de água;

Verde: Sulfatos monohidratados ou gelo de água; Azul: Sulfatos hidratados, argilas, silicatos tipo-vidro ou gelo de água), noutro conjunto de dados do CRISM, usando um diferente filtro, e devido ao facto dos espectros terem sido obtidos durante o Inverno marciano, consegue-se detectar a presença de gelo de água nos locais onde os minerais hidratados foram detectados.

De salientar que o local Nili Fossae, foi um dos locais seleccionados para a aterragem da missão Mars 2020 da NASA (Perseverance e Ingenuity), foi um dos locais finalistas, sendo preterido em detrimento da Cratera Jezero e o seu delta deposicional.

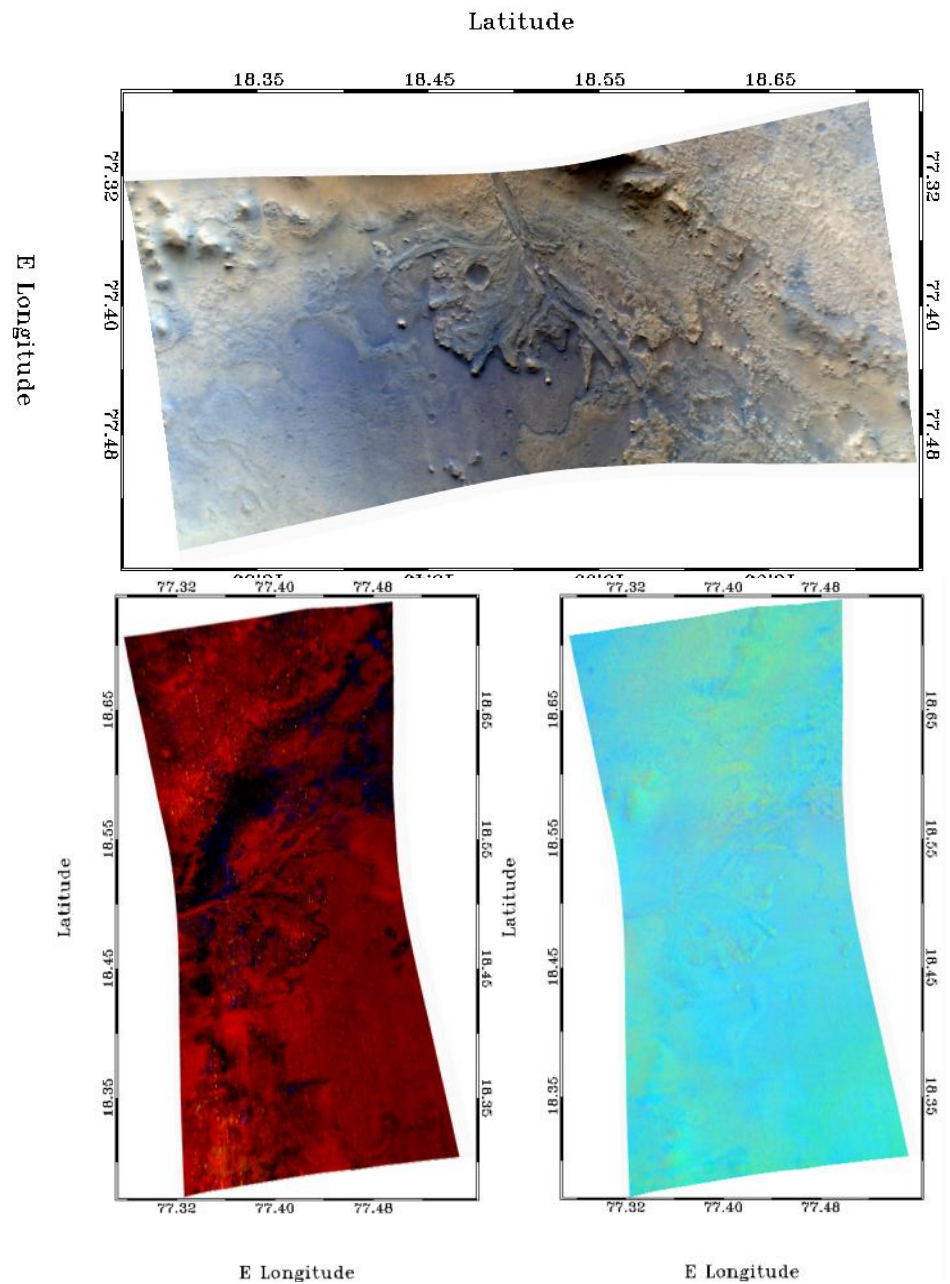
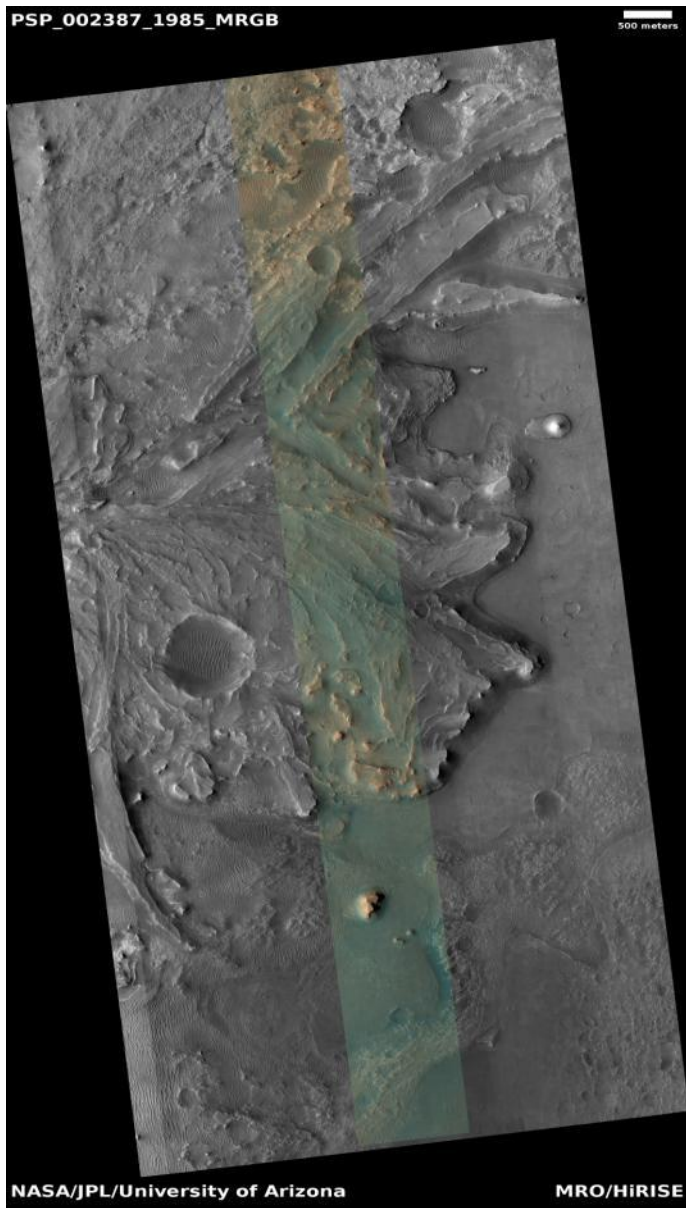


Figura 39 Estudo do Local 6 – Localizado na Cratera Jezero em Marte. (Descrição das Imagens, no sentido dos ponteiros do relógio) Imagem obtida pelo HiRISE (ESP_035985_1985); Imagens obtida pelo CRISM: Cores Reais (Imagem rodada 90° para a direita) (HRL000040FF_071F183S_TRU1), Materiais Hidratados (HRL000040FF_07_IF183L_HYD1), Materiais Férricos (HRL000040FF_07_IF183S_FEM1). (Crédito: NASA/JPL/University of Arizona, NASA/JHUAPL)

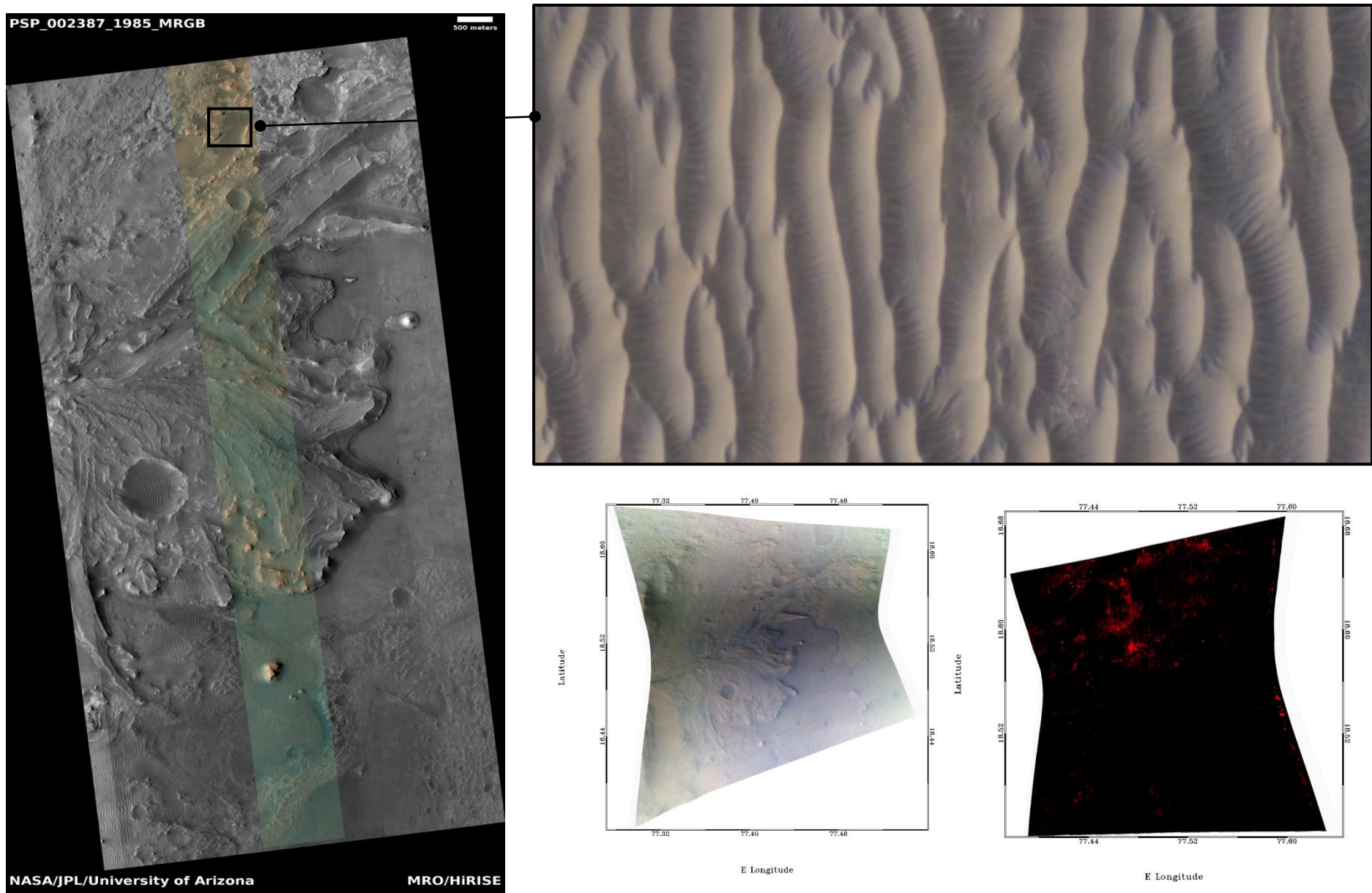


Figura 40 Estudo do Local 6 - - Localizado na Cratera Jezero em Marte. (Descrição das Imagens, no sentido dos ponteiros do relógio) Imagem obtida pelo HiRISE (PSP_002387_1985); Detalhe de dunas transversais num dos canais do antigo delta deposicional; Imagens obtida pelo CRISM: Cores Reais (FRT00005C5E_07_IF166S_TRU1), Filossilicatos (FRT000047A3_07_IF166L_PHY1). (Crédito: NASA/JPL/University of Arizona, Joana Neto-Lima; NASA/JHUAPL)

No local de estudo, designado por Local 6 (**Figura 39** e **Figura 40**), na Cratera Jezero em que podemos observar um delta deposicional no antigo leito de um paleolago.(Goudge, T.A. et al., 2015). Depois de perder toda a água, a cratera Jezero foi sendo lentamente preenchida por poeira, e podemos ver numerosos locais em que já se formaram complexos campos de dunas transversais, ou barcanóides (que nesta imagem e com esta resolução não é possível diferenciar).



Figura 41 Delta na Baía Kachemak, esta secção é denominada como Lower Cook Inlet (Alaska nos Estados Unidos da América) (*Crédito*: Hendric Stattmann)

Na Terra, podemos observar deltas numa variedade de ambientes e contextos geológicos. São zonas extremamente dinâmicas e em constante mutação, sendo locais de grande diversidade ecológica e com assinaturas geoquímicas muito específicas, permitindo a obtenção de dados sobre o clima e as alterações ambientais durante a sua história geológica. Por esse motivo, os geoquímicos desejavam que a Missão 2020 (Perseverance e Ingenuity) da NASA aterrasse em Jezero, finalmente se poderia desvendar o “mistério” da água em Marte, usando instrumentos que podem recolher dados directamente no terreno. Como análogo ao Local 6, foi escolhido o delta na Baía Kachemak, na **Figura 41** podemos observar a secção conhecida como Lower Cook Inlet, no Alaska.

Na **Figura 39**, podemos observar nos dados do CRISM, a presença de materiais hidratados a azul na cabeça do delta e em algumas encostas (Vermelho: Minerais hidratados ou gelo de água; Verde: Sulfatos monohidratados ou gelo de água; Azul: Sulfatos hidratados, argilas, silicatos tipo-vidro ou gelo de água), podemos também observar a presença de alguns materiais ferromagnéticos

distribuídos um pouco por toda a imagem, podendo ser um artefacto da imagem devido a baixa resolução (o CRISM não é capaz de diferenciar locais individuais onde estes minerais estão presentes).

Na **Figura 40**, nas imagens obtidas pelo CRISM, podemos observar nas ravinas a norte do delta deposicional, a existência de filosilicatos a vermelho (Vermelho: Filossilicatos de Fe/Mg; Verde: Filossilicatos de Al ou vidro hidratado; Azul: Sulfatos hidratados, argilas, silicatos tipo-vidro ou gelo de água). A presença desses filossilicatos de Ferro e Magnésio podem ser resultado de reacções de hidratação da olivina, dando origem à formação de serpentinite (uma reacção denominada serpentinização que, segundo os dados obtidos até ao momento pode ser a responsável pela formação do metano que periodicamente é detectado emanando da superfície marciana), este tipo de reacção necessita de tempo e de condições muito específicas que apenas com a chegada do rover Perseverance poderão ser finalmente conhecidas.

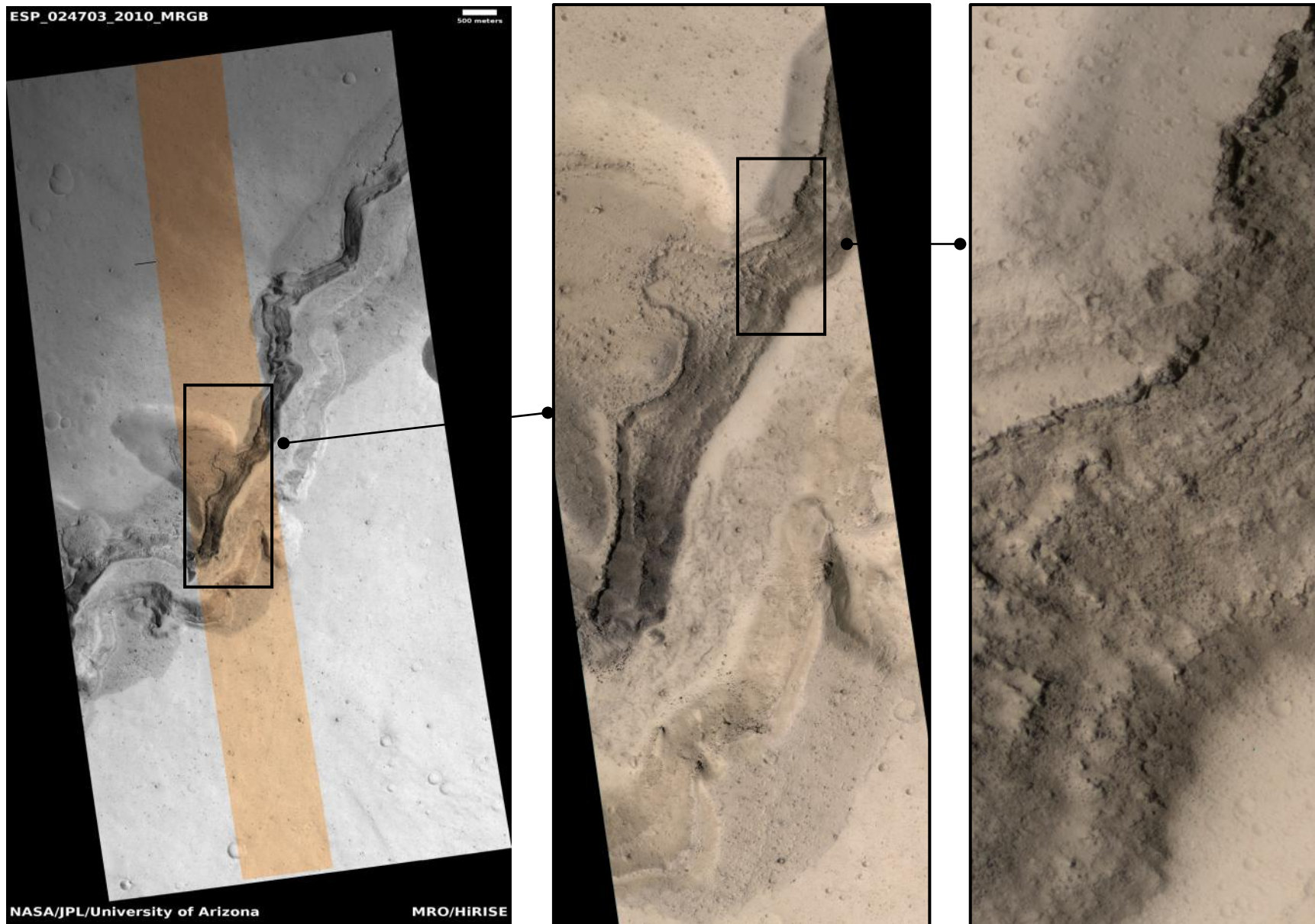


Figura 42 Estudo do Local 9 – Localizado em Kasei Valles. (Descrição das Imagens, no sentido dos ponteiros do relógio) Imagem obtida pelo HiRISE (ESP_024703_2010), Detalhes do canal formado por água líquida, com crescente resolução. (*Crédito*: NASA/JPL/University of Arizona, Joana Neto-Lima)

No local de estudo, designado por Local 9 (**Figura 42**), localizado em Kasei Valles podemos observar detalhadamente as distintas camadas rochosas que foram escavadas por consecutivas inundações ou por um rio que durante um período de tempo mais ou menos prolongado no tempo percorreu estes extensivos canais.

Kasei Valles, é um complexo de canais fluviais que se estende por cerca de 1780km na superfície de Marte, parecendo-se em muito ao Grand Canyon referido quando analisamos o Local 3, uma parte do complexo de canais em Nili Fossae.

4.3. Ravinas (*Gullies*)

Existem vários tipos de escorrimentos nas encostas marcianas, até ao momento foram identificados seis distintos: *Gullies* Clássicas, *Slope Streaks*, *Gullies* Lineares, *Recurring Slope Lineae* (RSL), *Dark Streaks* e Marcas de Rolamento. Neste trabalho, foram seleccionados apenas três tipos, cujas características são exploradas na **Tabela 7**, estes são os tipos de escorrimentos nas encostas marcianas que são mais numerosos e cuja presença e/ou aparecimento podem estar relacionados com a actividade da água.

Este tipo de estruturas só agora começam a ser entendidas, e mesmo assim muito ainda falta por definir, especialmente quanto ao papel da água na sua formação tanto no passado como no presente.

	Gullies Lineares	Slope Streaks	Recurring Slope Lines (RSL)
Tamanho	1-5x100m	1-10x10-1000m	2x100m
Profundidade	<2m	<1m	Muito superficiais
Material da Superfície	Arenoso (paredes de crateras ou dunas)	Poeira ou material de alto albedo	Rochoso e escuro
Orientação da Encosta	Orientados para os pólos	Variada (relacionada com o vento?)	Encostas quentes (Temperaturas > -23,15°C)
Abundância e Espaçamento Típico	Poucas – Centenas na encosta, espaçamento	Até dezenas na encosta, espaçamento	Até milhares na encosta, espaçamento

	irregular	irregular	reduzido
Inclinação da Encosta	Originadas em encostas de grande inclinação e podem ser extendidas a encostas com <math><15^\circ</math>	Grande inclinação	Grande inclinação
Distribuição Global	30-70°	Zonas equatoriais arenosas	40°N-60°S
Quando estão activas?	Início da Primavera	Todo o ano	Apenas estações mais quentes do ano
Se a actividade actual é representativa da sua história, qual o intervalo de tempo necessário para a sua formação?	Séculos ou milénios (Segundo extrapolação grosseira)	Segundos ou minutos	Semanas ou meses
Presença de água actualmente?	Pouco Provável	Pouco Provável	Provável
Presença de água no passado?	Indeterminado	N/D	N/D

Tabela 7 Tipos de processos de vertente que ocorrem nas encostas marcianas, adaptado de *The Atlas of Mars (2019)* reproduzido de *Dinięga et al. (2014)* (Crédito: NASA/JPL-CalTech)

A dinâmica observada nas encostas marcianas, é dos poucos processos geomorfológicos que se encontram activos no planeta e que são facilmente observáveis. São as estruturas mais recentes que se podem identificar na superfície do planeta vermelho.

Depois do evento PEDE (Planet-Encircling Dust Event) de 2018, foi registado um aumento exponencial deste tipo de estruturas nas encostas marcianas (devido ao transporte e acumulação de materiais em encostas que já reuniam outros factores que aumentavam a probabilidade da sua ocorrência, como p.e. grandes inclinações ou instabilidade estrutural).

Na Terra este tipo de estruturas pode ser observado em alguns campos dunares, mas estes processos geomorfológicos que actualmente ocorrem na superfície de Marte parecem ser algo muito característico desse planeta, produto das suas condições ambientais e atmosféricas.

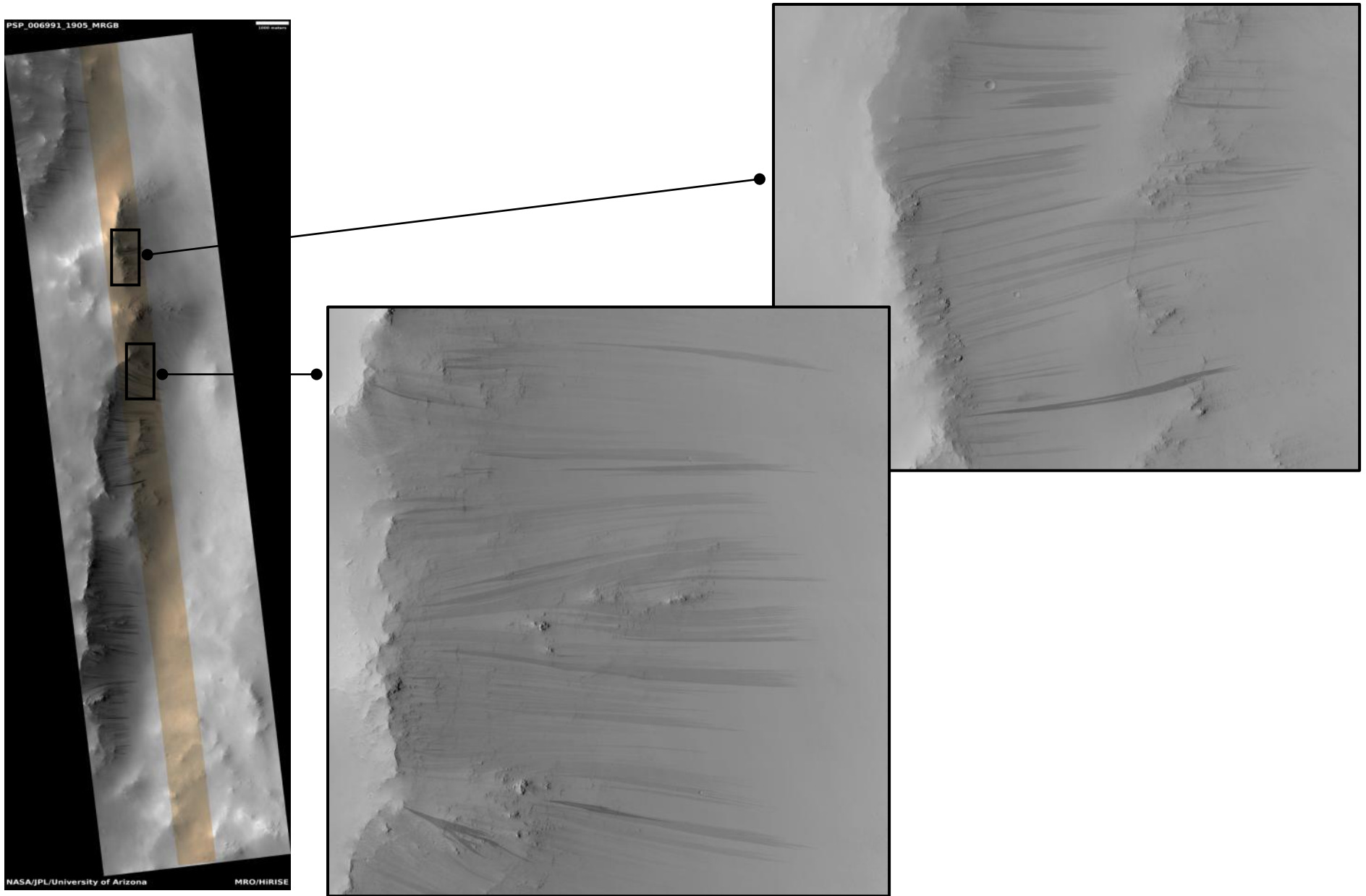


Figura 43 Estudo do Local 5 – Localizado na Cratera Henry em Marte. (Descrição das Imagens, no sentido dos ponteiros do relógio) Imagem obtida pelo HiRISE (PSP_009929_2020); Detalhe das RSL (Recurrent Slope Lines) observadas na parede da cratera. (*Crédito:* NASA/JPL/University of Arizona, Joana Neto-Lima)

No local de estudo, designado por Local 5 (**Figura 43**), localizado na Cratera Henry podemos observar a formação de centenas de *slope streaks* e RSL (*Recurring Slope Lineae*) ao longo de toda a parede da cratera. Nas imagens de detalhe, podemos distinguir individualmente estas formações e inclusivamente perceber os vários eventos ao longo da história geológica em que se formaram. Quanto mais escuro o material colocado a descoberto pela deslocação de material, mais recente a formação da *slope streak*.

Este tipo de alterações da paisagem marciana, como já referi anteriormente, ainda são muito mal entendidas, e existem muitas hipóteses para a sua formação e evolução. Por exemplo, as *slope streaks* podem ser o resultado de avalanches secas, degradação geoquímica dos minerais que compõem a encosta, fluxos ou manchas de fluidos com grande concentração de sais ou condensação de água nos minerais da encosta aumentando a instabilidade dos materiais.

Segundo as observações levadas a cabo pelo instrumento HiRISE, não foi detectada neste local a presença de água líquida. Medições recentes, revelaram que o interior mais escuro das *slope streaks* está numa cota mais abaixo do que o restante terreno, levando a concluir que a formação destas formações implica a remoção de uma parte da camada superficial da encosta da cratera.

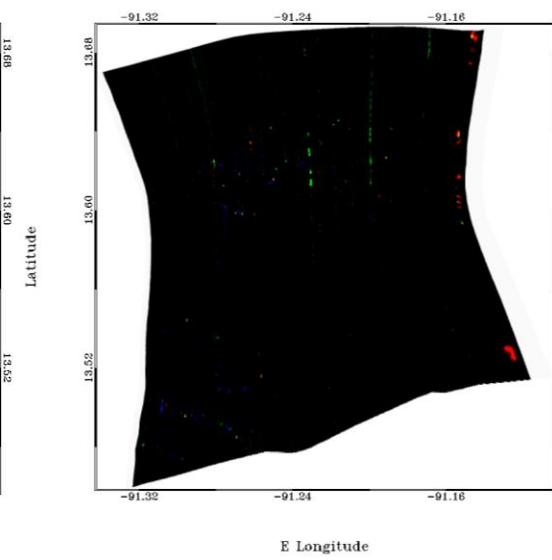
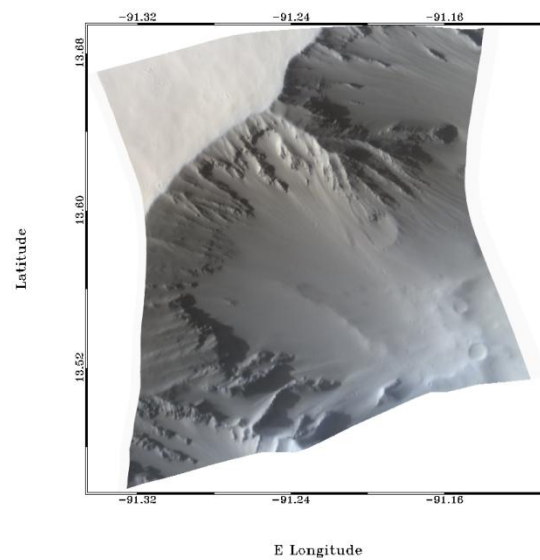
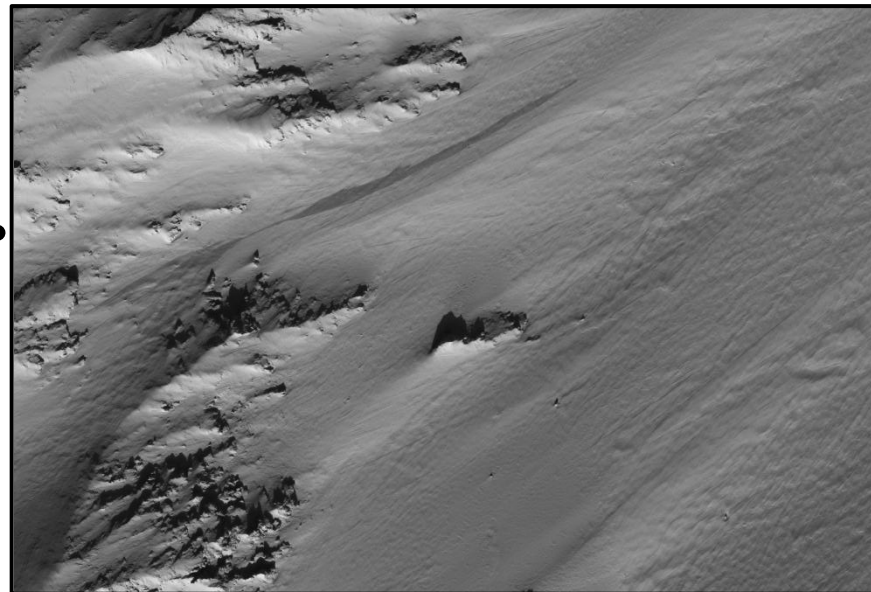
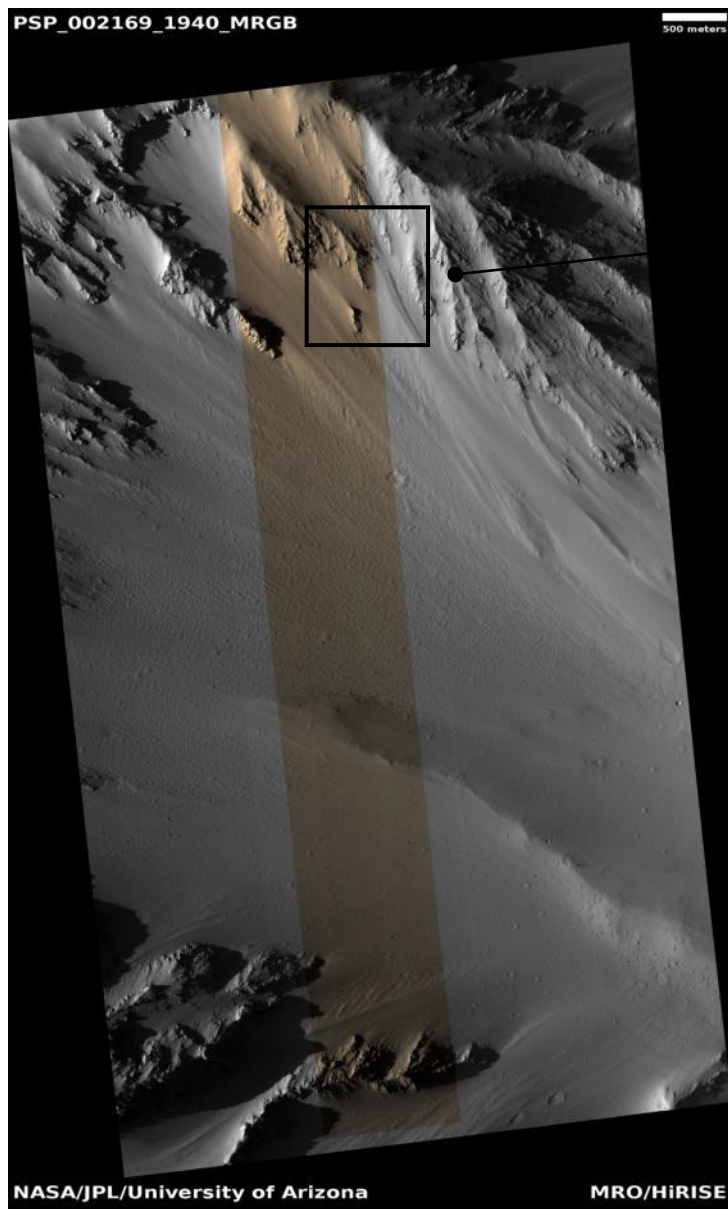


Figura 44 Estudo do Local 7 - Localizado numa das paredes da Caldeira Tharsis Tholus em Marte. (Descrição das Imagens, no sentido dos ponteiros do relógio) Imagem obtida pelo HiRISE (PSP_002387_1985); Detalhe de um local onde ocorrem numerosos episódios de derrocada (Imagem foi rodada 90° para a esquerda para facilitar a sua inclusão nesta página). Imagens obtida pelo CRISM. Cores Reais (FRT00005C5E_07_IF166S_TRU1), Filossilicatos (FRT000047A3_07_IF166L_PHY1). (Crédito: NASA/JPL/University of Arizona, Joana Neto-Lima; NASA/JHUAPL)

No local de estudo, designado por Local 7 (**Figura 44**), localizado na Caldeira Tharsis Tholus podemos observar a forma como o material arenoso se desloca encosta abaixo. Na imagem de detalhe podemos claramente distinguir uma *gully* linear.

Esta imagem do HiRISE (PSP_002387_1985), representa a zona menos caótica da caldeira deste vulcão em escudo (*shield volcano*). Em Marte, é considerado como um vulcão de dimensão mediana (mas comparando com a escala terrestre seria maior do que qualquer vulcão). Nesta secção, apesar de estear coberto por uma espessa camada de poeira e areia, podemos antever a rocha vulcânica por baixo, que vai sendo revelada com o movimento dos materiais encosta abaixo devido a acção do vento (acumulando materiais e destabilizando os materiais) e da própria gravidade.

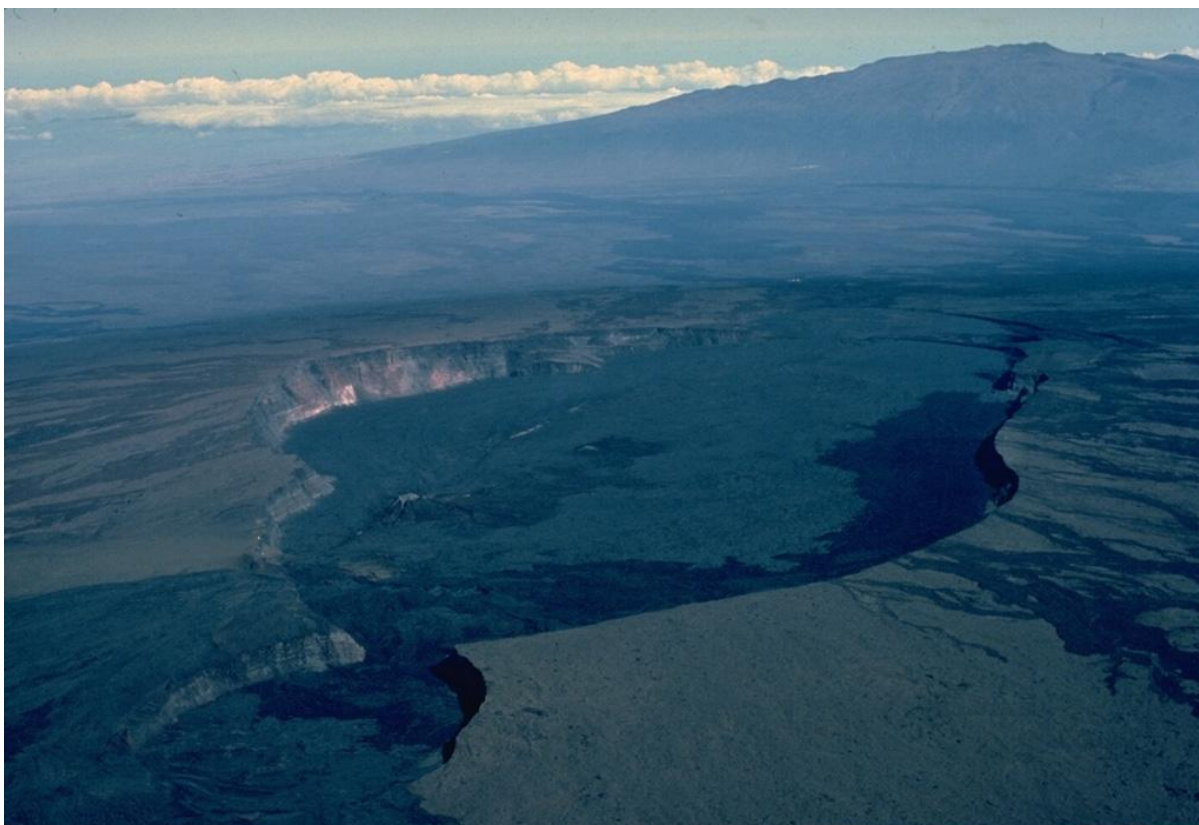


Figura 45 Caldeira do vulcão Mauna Loa com o Mauna Kea à distância (Havai, USA) (*Crédito*: Joshua Stevens e NASA Earth Observatory)

Na Terra, existem uma série de vulcões com características em muito parecidas com o Tharsis Tholus. De todos, o vulcão Mauna Loa é o que mais se aproxima em termos de estrutura e história evolutiva ao nosso local de estudo (. Este vulcão tal como o Tharsis Tholus, sofreu vários eventos eruptivos, que modelaram as zonas mais próximas, deixando uma caldeira vulcânica característica dos

vulcões em escudo. O Mauna Loa, cuja última erupção foi em 1984 (entre 24 de Março e 15 de Abril), tem por vezes o seu cume coberto por gelo e sofre a acção da água (quer sobre a forma de chuva como de eventos de condensação), enquanto o Tharsis Tholus apresenta sinais muito incipientes de actividade de água (possivelmente o próprio vapor de água expelido enquanto estava activo, durante os seus eventos eruptivos).

Nas imagens obtidas pelo CRISM, podemos observar que nos locais em que a rocha original da parede da caldeira está exposta, se pode detectar a existência de filosilicatos a vermelho e a verde (Vermelho: Filossilicatos de Fe/Mg; Verde: Filossilicatos de Al ou vidro hidratado; Azul: Sulfatos hidratados, argilas, silicatos tipo-vidro ou gelo de água). Este tipo de materiais é o resultado de alterações geoquímicas incipientes de rochas vulcânicas de cristalização rápida, como vidro vulcânico, devido à acção da água líquida.

4.4. Avalanches e Desmoronamento de Ravinas

Em alguns locais do planeta Marte podemos assistir a processos geológicos que rapidamente alteram as características da paisagem, avalanches e desmoronamento de ravinas. Este tipo de fenómenos ocorre de forma cíclica em alguns locais, como o Pólo Norte e o Pólo Sul.

Este tipo de movimentos de massas de material, alteram radicalmente a topografia dos locais onde ocorrem, e muitas vezes ajudam ao estudo desses locais ao expor as rochas e as camadas enterradas (isso é especialmente importante em locais remotos, tanto na Terra como em Marte, para que dessa forma se possam entender os mecanismos que desencadeiam estes movimentos e estudar a própria história geológica do local em questão).

Na Terra a importância vai para além do lado científico, pois a compreensão de como estes fenómenos são desencadeados leva à protecção de vidas e bens, enquanto em Marte (olhando para o futuro, em que se projecta o estabelecimento de viagens tripuladas ao planeta vermelho) servirá para se poder levar a cabo missões a estes locais sem colocar os astronautas em risco.

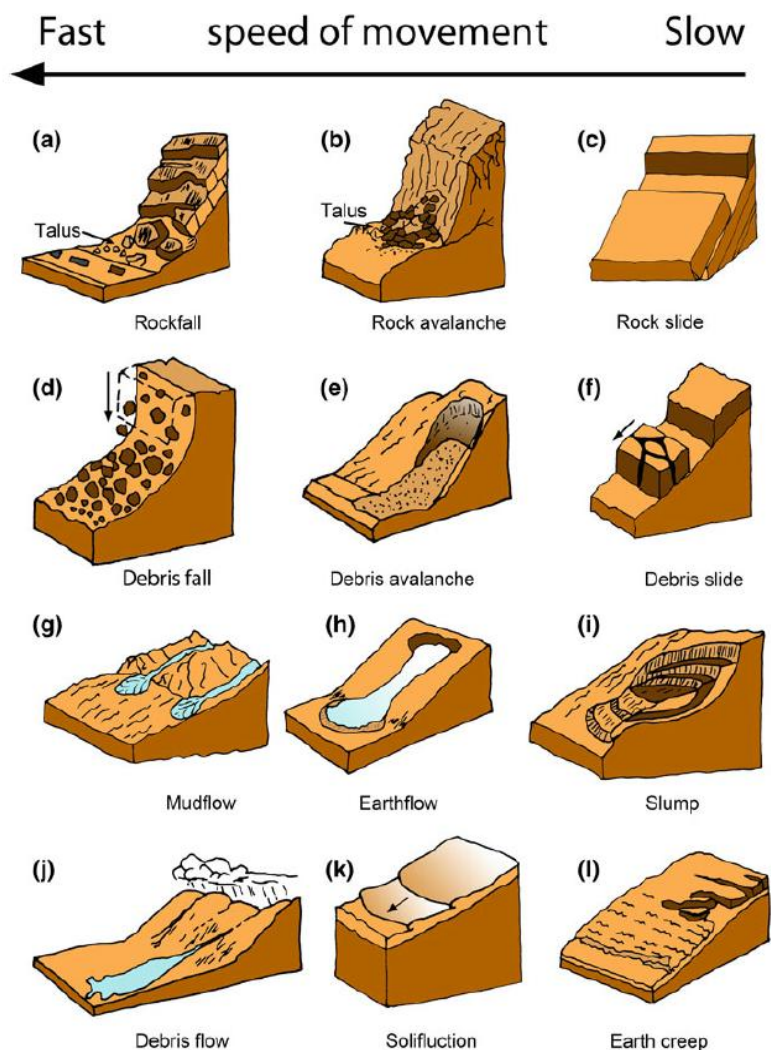


Figura 46 Representação esquemática dos vários tipos de desmoronamentos que podem ocorrer em superfícies planetárias, em zonas de declive acentuado (como p.e. bordos de crateras em Marte) (Crédito: “*Fundamental Physical Geology*” de Sreepat Jain (2014), adaptado de USGS (2004))

Existem vários tipos de desmoronamento ou movimento de massas, provocados pela conjugação de uma série de factores, que na Terra muitas vezes estão associados com processos hidrológicos (como p.e. excesso de água em vertentes com grande inclinação e material pouco consolidado). Em Marte não podemos falar em chuvas ou excesso de água infiltrando-se no substrato, mas podemos falar da acumulação de materiais até ao ponto de colapso da vertente ou como é o caso de estudo seleccionado para ilustrar este tipo de processo, de eventos cíclicos de sublimação de gelo de dióxido de carbono e de água que levam ao desmoronamento de grandes extensões de terreno no pólo norte marciano (sendo um dos locais que é regularmente monitorizado para verificar e documentar as alterações topográficas e geomorfológicas ao longo das estações).

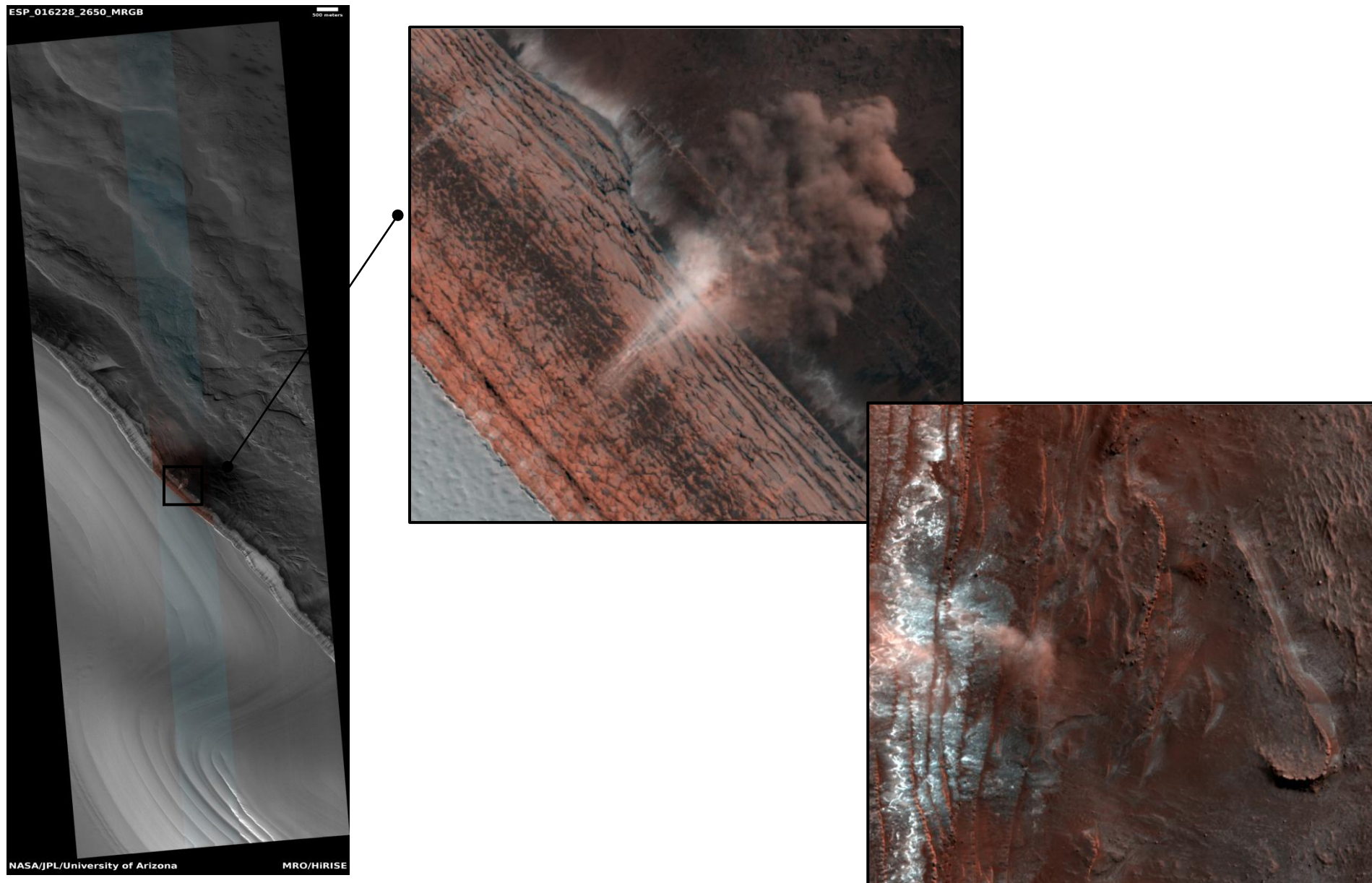


Figura 47 Estudo do Local 8 – Localizado no Pólo Norte de Marte. (Descrição das imagens, no sentido dos ponteiros do relógio) Imagem obtida pelo HiRISE de avalanche numa escarpa (ESP_016228_2650), Duas imagens obtidas pelo HiRISE de várias nuvens de poeira produzidas em episódios distintos de avalanche (ESP_016423_2640), (Crédito: NASA/JPL/University of Arizona, Joana Neto-Lima)

No local de estudo, designado por Local 8 (**Figura 47**), localizado no Pólo Norte de Marte é um local de grande dinamismo e grande variedade de formações geológicas, pautado pelas condições atmosféricas ao longo do ano marciano.

Estas imagens captadas pelo HiRISE, são do mesmo local, mas registadas em dias distintos (ESP_16228_2650 foi captada a 12 de Janeiro de 2010 e a ESP_016423_2640 a 27 de Janeiro de 2010). Podemos observar na primeira imagem (na foto de detalhe), a derrocada de material a ocorrer formando uma grande nuvem de poeira e despoletando outras avalanches secundárias em zonas inferiores da encosta; na segunda imagem podemos observar algumas nuvens de poeira provocadas por avalanches de menor dimensão. Este movimento de massas, deixa a descoberto uma grande área de grande albedo, que depois de analisada pelos orbitadores da Agência Espacial Europeia, o orbitador Mars Express, foi possível determinar (antes do seu desaparecimento, por sublimação) que esse material é gelo de dióxido de carbono.

A encosta escolhida para este trabalho, está localizada numa das zonas terminais dos designados *layered deposits* (depósitos por camadas) que estão localizados no Pólo Norte marciano, e é um local que normalmente regista este tipo de ocorrências. Por esse motivo é regularmente monitorizada pelos orbitadores tanto da NASA como da ESA.

Devido à constante monitorização deste local, é possível ter mais informações sobre a topografia e a geomorfologia desta encosta. A parte mais elevada encontra-se a 700 metros de altura, relativamente ao plano base do Planum Boreum e algumas das encostas têm uma inclinação que pode atingir os 60°. Normalmente estas avalanches ocorrem a partir do início da Primavera marciana, em que as temperaturas aumentam e desestabilizam camadas de dióxido de carbono debaixo das camadas de poeira depositadas durante o resto do ano, estas constantes movimentações de grandes quantidades de material fazem com que a encosta, principalmente as camadas directamente abaixo da camada de dióxido de carbono sublimado sofram fracturas (podemos observar nas imagens de HiRISE usadas para ilustrar este processo), fazendo com o material fique mais fragilizado e cada vez mais material sofra movimento.

Um ponto interessante e que é mais um exemplo da dinâmica e da variedade de formações na superfície de Marte, é a presença de dunas barcanóides no sopé da encosta e que para além da modelação eólica também sofrem a influência deste processo cíclico.



Figura 48 Avalanche numa das encostas das Montanhas Rochosas. (Colorado, Estados Unidos da América) (*Crédito*: Rocky Mountain National Park)

Na Terra, ocorrem avalanches em locais em que a acumulação de neve, e uma grande inclinação das encostas, leva à derrocada das camadas superiores de material. Como análogo do processo em acção no Local 8 (**Figura 48**), foi escolhido um evento de desmoronamento de uma das encostas das Montanhas Rochosas, no Colorado. Enquanto esta avalanche terrestre acontece devido à destabilização de camadas de neve e gelo de água, em Marte o gelo é maioritariamente de dióxido de carbono. Este tipo de ocorrências coloca muitas vezes em risco a vida humana e a propriedade no planeta Terra. O mecanismo por detrás das avalanches na Terra tem algumas diferenças relativamente a Marte, mas as consequências são em muito semelhantes, e podem ser um real perigo para futuras missões ao planeta vermelho.

Conclusões

Da mesma maneira que usamos a Terra para podermos estudar e compreender os processos por detrás dos processos dinâmicos que modelaram e continuam a modelar a superfície de Marte, podemos ver o que nos reserva um futuro num planeta que, devido à natural evolução e o decorrer do tempo, perderá o calor do seu núcleo. Esse progressivo arrefecimento levará a que a Terra perda a sua magnetosfera, o vento solar levará à destruição da nossa atmosfera e à perda da água para o espaço, restando apenas os minerais e as rochas da superfície terrestre.

Ao estudar Marte, podemos assim antever que tipo de processos irão modelar a paisagem e como podemos escapar ao destino de antigas espécies do planeta Terra que foram extintas por eventos catastróficos, aos quais não puderam escapar. O estudo extensivo dos processos dinâmicos marcianos, a sua monitorização e a evolução da tecnologia de exploração interplanetária levará a que a Humanidade se torne numa espécie que já não se encontra presa ao seu ponto de partida planetário.

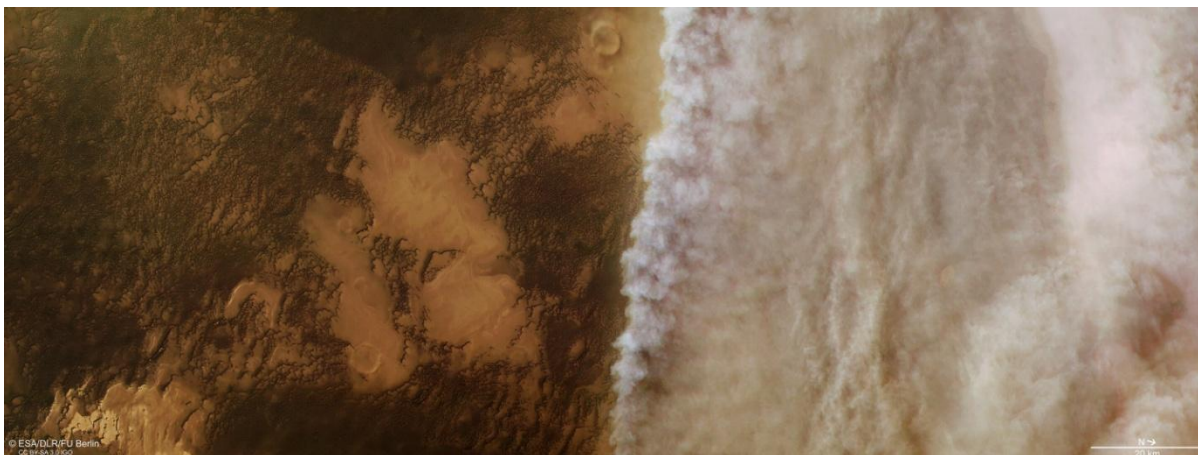


Figura 49 Planet-Encircling Dust Event (PEDE) de 2018 (*Crédito:* ESA/DLR)

Trabalhos como o presente são fundamentais para a preparação de futuras missões, tanto robóticas como tripuladas, pois ajudam a antecipar quais os perigos ou ambientes poderão esperar aquando da sua chegada ao planeta vermelho.

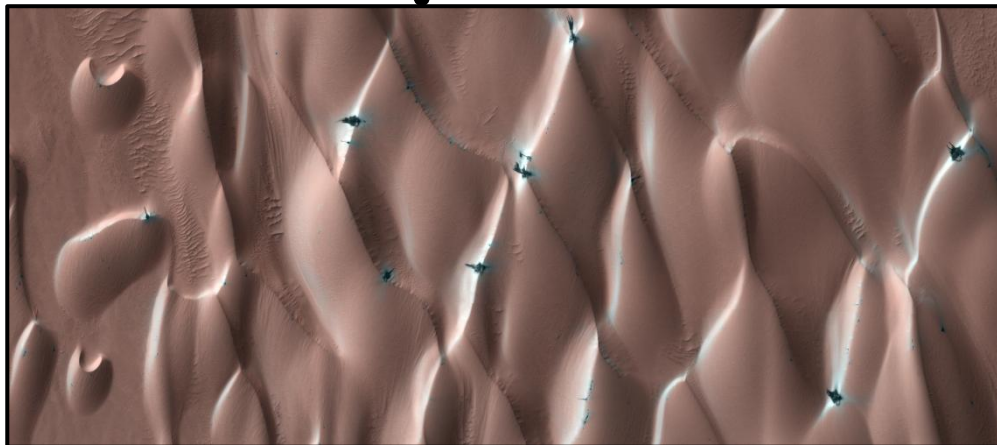
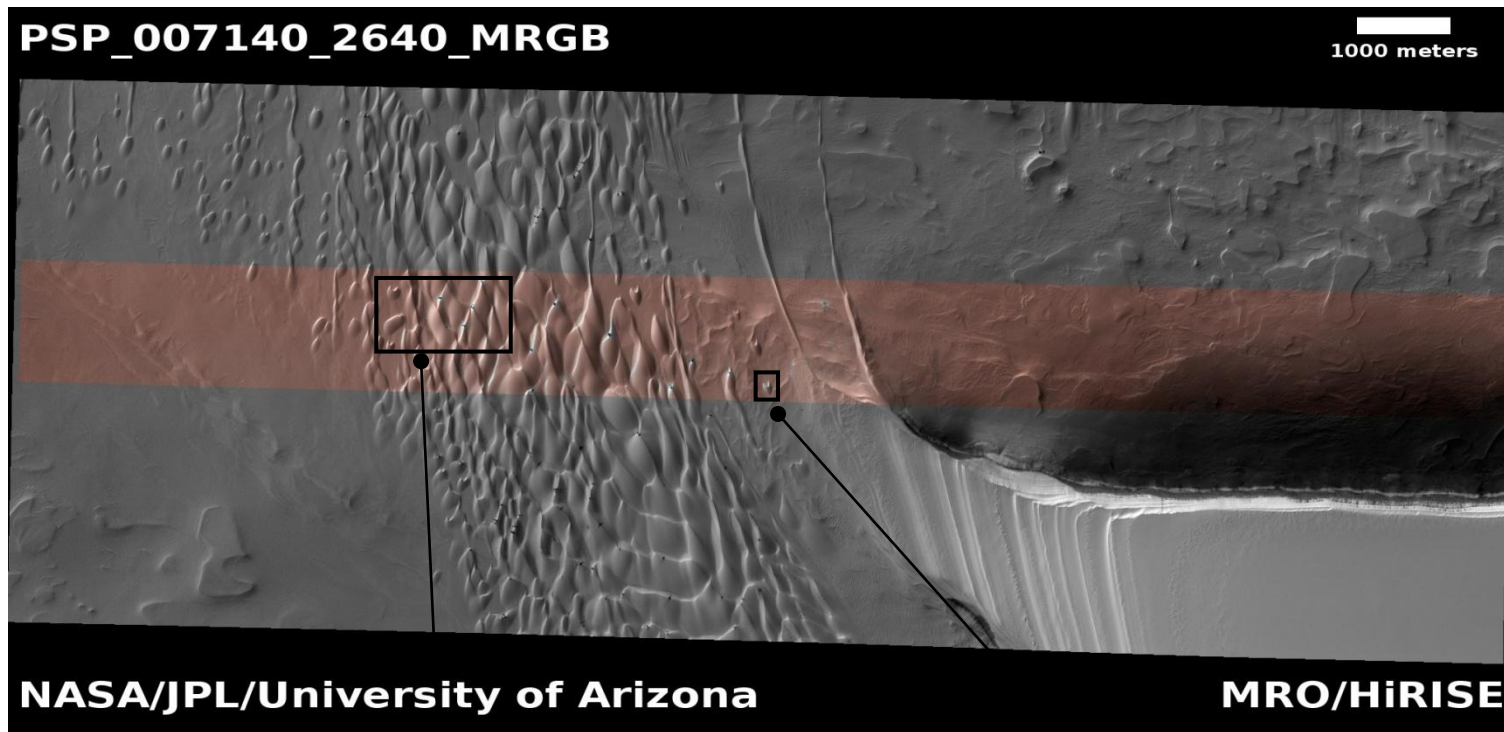


Figura 50 Pólo Norte Marciano. Imagem obtida pelo HiRISE (PSP_007140_2640), (*Crédito*: NASA/JPL/University of Arizona,

Joana Neto-Lima)

Apesar de ser um planeta cuja superfície parece, à primeira vista, monótona e coberta de poeira e areia, com formações geológicas do passado distante imutáveis, como que uma fotografia de um local congelado no tempo, quando olhamos com mais atenção podemos ver que é exactamente o oposto.

Marte é um planeta dinâmico que está em constante mudança, sendo modelado por processos que também encontramos na Terra. As paisagens do nosso planeta vizinho, são fascinantes e intrincadas, que ainda não pudemos desvendar todos os seus segredos, sobretudo a questão da água e do seu papel em alguns dos processos analisados neste trabalho de dissertação.

Havia muitos mais locais de interesse que poderia ter escolhido para ilustrar a forma como se modela a superfície de Marte, mas os que escolhemos são capazes de transmitir que o planeta tem uma dinâmica superficial activa, com especificidades decorrentes dos materiais e da energia dos factores que condicionam a sua mobilidade. A ausência de vegetação, a atmosfera menos densa que a terrestre, a ausência de precipitação, a temperatura média mais baixa, o tipo de fluídos em circulação e respectivo estado físico, entre outros, são factores que diferenciam a dinâmica de Marte da dinâmica terrestre. Ainda assim, foi possível encontrar ambientes terrestres cujos processos e morfologia se assemelham muito aos que ocorrem em Marte.

A **Figura 50**, obtida pelo instrumento HiRISE do Pólo Norte Marciano em plena Primavera. Enquanto na encosta à direita da imagem ocorrem dezenas de avalanches, devido à subliminação do gelo de dióxido de carbono, no lado esquerdo podemos observar um complexo campo de dunas: barcanóides, barchan e transversais. Podemos inclusivamente na imagem de pormenor de uma das barchan, uma *gully* linear (existem *gullies* noutras cristas de dunas deste campo dunar).

Esta imagem permite ilustrar o que se pretende demonstrar com este trabalho, que Marte é um planeta dinâmico, em constante evolução e do qual ainda temos uma compreensão muito limitada.

Referências

Livros e Publicações

Matthew Brzezinski, “*Red Moon Rising*”, 2007, Bloomsbury

Deborah Cadbury, “*Space Race – The Untold Story of Two Rivals and Their Struggle for the Moon*”, 2005, Fourth Estate

V. G. Perminov, “*The Difficult Road to Mars – A Brief History of Mars Exploration in the Soviet Union*”, Monographs in Aerospace History, number 15, July 1999 [NP-1999-06-251-HQ], NASA History Division Office of Policy and Plans and Office of Space Science

W. T. Huntress, Jr., V. I. Moroz and I. L. Shevarev, “Lunar and Planetary Robotic Exploration Missions in the 20th Century”, 2003, Space Science Reviews 107: 541-649

Jack J. Lissauer and Imke de Pater, “*Fundamental Planetary Science – Physics, Chemistry and Habitability*”, 2013, Cambridge University Press

Henrik Hargitai (Editor), “*Planetary Cartography and GIS – Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*”, 2019, Springer

Asif A. Siddiqi, “*Beyond Earth – A Chronicle of Deep Space Exploration, 1958-2016*”, 2018, NASA History Program Office

Asif A. Siddiqi, “*Challenge to Apollo: The Soviet Union and The Space Race*”, 2000, The NASA History Series – NASA SP [2000-4408]

Athena Coustenis and Thérèse Encrenaz, “*Life Beyond Earth – The Search for Habitable Worlds in the Universe*”, 2013, Cambridge University Press

David Scott and Alexei Leonov, “*Two Sides of the Moon – Our Story of the Cold War Space Race*”, 2004, Simon & Schuster

Brian Harvey, “*Russian Planetary Exploration – History, Development, Legacy and Prospects*”, 2007, Springer – Praxis Publishing

Robert Zubrin, “*Entering Space: Create a Space-Faring Civilization*”, 2000, Tarcher/Putnam

Robert Zubrin, “*Mars Direct, Space Exploration, the Red Planet, and the Human Future*”, 2016, Polaris Books

Arthur C. Clarke, “*Interplanetary Flight – An Introduction to Astronautics*”, 1953, Harper & Brothers Publishers

Konstantin E. Tsiolkovsky, “*The Call of the Cosmos*”, 1960, Foreign Languages Publishing House – Moscow, Tradução para o inglês editada por V. Dutt

Robert H. Goddard, “*Liquid-Propellant Rocket Development*”, 1936, Smithsonian Miscellaneous Collections, Volume 95, Number 3 – Smithsonian Institution

Alexandre Ananoff, “*Les Mémoires d’un Astronaute – L’Astronautique Française*”, 1978, Librairie Scientifique et Technique – Albert Blanchard

Robert Esnault-Pelterie, “*L’Astronautique*”, 1930, Imprimerie A. Lahure

Kenneth R. Lang, “*The Cambridge Guide to the Solar System – Second Edition*”, 2011, Cambridge University Press

John Chambers e Jacqueline Mitton, “*From Dust to Life – The Origin and Evolution of Our Solar System*”, 2014, Princeton University Press

Ralph Pudritz, Paul Higgs e Jonathon Stone, “*Planetary Systems and the Origins of Life*”, 2007, Cambridge University Press

Nadine Barlow, “*An Introduction to its Interior, Surface and Atmosphere*”, 2008, Cambridge University Press

Sreepat Jain, “*Fundamental of Physical Geology*”, 2014, Springer Geology

Reed Wicander, James S. Monroe, “*Essentials of Geology – Third Edition*”, 2002, Brooks & Cole

Kenneth L. Tanaka, Philip R. Christensen, “*The Atlas of Mars – Mapping its Geography and Geology*”, 2019, Cambridge

William Boultong, “*Giordano Bruno – His Life, Thought and Martyrdom*”, 1914, Kegan Paul, Trench, Trübner & Co. Ltd, London

Artigos Científicos

Madlener, D. et al., *The Circumstellar Disk of HH30 Searching for Signs of Disk Evolution with Multi-Wavelength Modeling* (2012), *Astronomy and Astrophysics* 543, A81

Shu, Frank H. et al, *Star Formation in Molecular Clouds: Observation and Theory* (1987), *Ann. Rev. Astronomy and Astrophysics* 25: 23-81

Mix, Lucas J. (Editor-In-Chief), *The Astrobiology Primer: An Outline of General Knowledge – Version 1* (2006), *Astrobiology*, Volume 6, Number 5

Hayward, R. K., Fenton, L. K., Titus, T. N., *Mars Global Digital Dune Database (MGD²): Global Dune Distribution and Wind Pattern Observations* (2014), *Icarus* 230, 38-46

- Bourke, Mary C., *Barchan Dune Asymmetry: Observations from Mars and Earth* (2010), *Icarus* 205, 183-197
- Achilles, C. N. et al., *Mineralogy of an Active Eolian Sediment from the Namib Dune, Gale Crater, Mars* (2017), *Journal of Geophysical Research: Planets* 122, 2344-2361
- Bachman, S. R., *Mineral Analysis of Martian Dunes: Constraining Possible Sediment Source* (2012), Third International Planetary Dunes Workshop, Abstract 7032
- Kok, Jasper F., *The Physics of Wind-Blown Sand and Dust* (2012), *Rep. Prog. Phys.* 75, 106901 (72pp)
- Read, P. L., Lewis, S. R., Mulholland, D. P., *The Physics of Martian Weather and Climate: a Review* (2015), *Rep. Prog. Phys.* 78, 125901 (54pp)
- Greeley, Ronald et al., *Rate of Wind Abrasion on Mars* (1982), *Journal of Geophysical Research* 87, n°B12, 10009-10024
- Reiss, D., Spiga, A., Erkeling, G., *The Horizontal Motion of Dust Devils on Mars derived from CRISM and CTX/Hirise Observations* (2014), *Icarus* 227, 8-20
- Wang, Huiqun, Richardson, Mark I., *The Origin, Evolution, and Trajectory of Large Dust Storms on Mars During Years 24-30 (1999-2011)* (2013), *Icarus*, Article in Press
- Silvestro, S. et al., *Ripple Migration and Dune Activity on Mars: Evidence for Dynamic Wind Processes* (2010), *Geophysical Research Letters* 37, 120203
- Bridges, N. T. et al., *Earth-like Sand Fluxes on Mars* (2012), *Nature* 485, Research Letter, 339-342
- Chojnacki, Matthew et al., *Boundary Condition Controls on the High-sand-flux Regions of Mars* (2019), *Geology* 47, 427-430
- Schulze-Makuch, Dirk et al., *Exploration of Hydrothermal Targets on Mars* (2007), *Icarus* 189, 308-324
- Carr, M. H., Head III, J. W., *Geologic History of Mars* (2010), *Earth and Planetary Science Letters* 294, 185-203
- Delamere, W. A. et al., *Color Imaging of Mars by the High Resolution Imaging Science Experiment (HiRISE)* (2010), *Icarus* 205, 38-52
- Viviano-Beck, C. E. et al., *Revised CRISM Spectral Parameters and Summary Products Base don the Currently Detected Mineral Diversity on Mars* (2014), *Journal of Geophysical Research: Planets* 119, 1403-1431
- Chuang, F. C., *HiRISE observations of Slope Streaks on Mars* (2007), *Geophysical Research Letters* 34, L20204

- Carter, J. et al., *Hydrous Minerals on Mars as Seen by the CRISM and OMEGA Imaging Spectrometers: Updated Global View* (2013), Journal of Geophysical Research: Planets 118, 831-858
- Kamps, O. M. et al., *Defining Surface Types of Mars Using Global CRISM Summary Product Maps* (2020), Journal of Geophysical Research: Planets 125
- Ehlmann, B. L. et al., *Identification of Hydrated Silicate Minerals on Mars Using MRO-CRISM: Geologic Context near Nili Fossae and Implications for Aqueous Alteration* (2009), Journal of Geophysical Research 114, E00D08
- McEwen, A. S. et al., *Mars: Abundant Recurring Slope Lineae (RSL) Following the Planet-Encircling Dust Event (PEDE) of 2018* (2021), Journal of Geophysical Research: Planets 126
- Murchie, S. et al., *Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars (CRISM) on Mars Reconnaissance Orbiter (MRO)* (2007), Journal of Geophysical Research 112, E05S03
- Dundas, C. M. et al., *New and Recent Gully Activity on Mars as Seen by HiRISE* (2010), Geophysical Research Letters
- Bridges, N. T. et al., *Windy Mars: A Dynamic Planet as Seen by the HiRISE Camera* (2007), Geophysical Research Letters 34, L23205
- Pelkey, S. M. et al., *CRISM Multispectral Summary Products: Parameterizing Mineral Diversity on Mars from Reflectance* (2007), Journal of Geophysical Research 112, E08S14
- Zimbelman, J. R., *Transverse Aeolian Ridges on Mars: First Results From HiRISE Images* (2010), Geomorphology 121, 22-29
- McEwen, A. S. et al., *Mars Reconnaissance Orbiter's High Resolution Imaging Science Experiment (HiRISE)* (2007), Journal of Geophysical Research 112, E05S02
- Ojha, L. et al., *HiRISE Observations of Recurring Slope Lineae (RSL) During Southern Summer on Mars* (2014), Icarus 231, 365-376
- Baker, V. R., *Water and the Evolutionary Geological History of Mars* (2006), Boll. Soc. Geol. It. 125
- E. Smith, D. et al., *The Global Topography of Mars and Implications for Surface Evolution* (1999), Science 284, 1495-1503
- Goudge, T. A. et al., (2015), -Mars, Journal of Geophysical Research Planets 120, 775-808

Recursos Online

Cronologia Missões Ciências Planetárias → <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/chronology.html>

Relação de Lançamentos Espaciais → <https://www.spacelaunchreport.com/logyear.html>

Sonetos de Giordano Bruno →

http://www.faculty.umb.edu/gary_zabel/Courses/Parallel%20Universes/Texts/On%20the%20Infinite%20Universe%20and%20Worlds.htm

Anexos

Revisão Cronológica e Histórica

Ano	Data	NSSDCA/ COSPAR ID	Designação	Massa	Veículo de Lançamento	País	Missão	Instrumentos	Estado	Notas
1957	04/10	1957-001B	Sputnik 1	83,6Kg		USSR	Orbitador Terrestre		Completada	Primeiro Satélite Artificial
	03/11	1957-002A	Sputnik 2	508,3Kg		USSR	Orbitador Terrestre		Completada	
	06/12	VAGT3	Vanguard TV3	1,5Kg		USA	Orbitador Terrestre		Lançamento Falhado	
1958	01/02	1958-001A	Explorer 1	13,97Kg		USA	Orbitador Terrestre		Completada	
	17/03	1958-002B	Vanguard 1	1,46Kg		USA	Orbitador Terrestre		Completada	
	17/08	ABLE1	Pioneer 0	38,1Kg		USA	Orbitador Lunar		Lançamento Falhado	
	23/09		Luna E-1 N°1	158Kg		USSR	Impactador Lunar		Lançamento Falhado	Luna 1958A
	11/10	1958-007A	Pioneer 1	34,2Kg		USA	Orbitador Lunar		Lançamento Falhado	
	12/10		Luna 1958B			USSR	Impactador Lunar		Lançamento Falhado	
	08/11	PION2	Pioneer 2	39,2Kg		USA	Orbitador Lunar		Lançamento Falhado	
	04/12		Luna 1958C			USSR	Impactador Lunar		Lançamento Falhado	
	06/12	1958-008A	Pioneer 3	5,87Kg		USA	Flyby Lunar		Lançamento Falhado	
1959	02/01	1959-012A	Luna 1	361Kg		USSR	Flyby Lunar		Completada	
	03/03	1959-013A	Pioneer 4	6,1Kg		USA	Flyby Lunar		Completada	
	16/06		Luna 1959A	390Kg		USSR	Impactador Lunar		Lançamento Falhado	
	12/09		Luna 2			USSR	Impactador Lunar		Completada	
	04/10		Luna 3			USSR	Flyby Lunar		Completada	

	26/11		Pioneer P-3			USA	Orbitador Lunar		Lançamento Falhado	
1960	15/04		Luna 1960A			USSR	Flyby Lunar		Lançamento Falhado	
	18/04		Luna 1960B			USSR	Flyby Lunar		Lançamento Falhado	
	25/09		Pioneer P-30			USA	Orbitador Lunar		Lançamento Falhado	
	10/10	MARSNK1	Marsnik 1	650Kg		USSR	Flyby Marciano		Lançamento Falhado	Mars 1960A – Primeira missão com destino a Marte
	14/10	MARSNK2	Marsnik 2	640Kg		USSR	Flyby Marciano		Lançamento Falhado	Mars 1960B
	15/12		Pioneer P-31			USA	Orbitador Lunar		Lançamento Falhado	
	1961	04/02	1961-002A	Sputnik 7	645Kg		USSR	Impactador Venusiano		Lançamento Falhado
12/02			Venera 1	643,5Kg		USSR	Flyby Venusiano		Loss Of Signal	
23/08		1961-021A	Ranger 1	306,2Kg		USA	Voo Experimental Lunar		Lançamento Falhado	
18/11		1961-032A	Ranger 2	304Kg		USA	Voo Experimental Lunar		Lançamento Falhado	
1962	26/01	1962-001A	Ranger 3	329,8Kg		USA	Impactador Lunar			
	23/04	1962-012A	Ranger 4	331,1Kg		USA	Impactador Lunar			Dados científicos não obtidos
	22/07	MARIN1	Mariner 1	202,8Kg		USA	Flyby Venusiano		Lançamento Falhado	
	25/08		Sputnik 19			USSR	Flyby Venusiano		Lançamento Falhado	
	27/08	1962-041A	Mariner 2	202,8Kg		USA	Flyby Venusiano			
	01/09	1962-043A	Sputnik 20	6500Kg		USSR	Flyby Venusiano		Lançamento Falhado	
	12/09	1962-045A	Sputnik 21	6500Kg		USSR	Flyby Venusiano		Lançamento Falhado	
	18/10	1962-055A	Ranger 5	342,5Kg		USA	Impactador Lunar		Spacecraft Failure	
	24/10	1962-057A	Sputnik 22	6500Kg		USSR	Flyby Marciano		Lançamento Falhado	
	01/11	1962-061A	Mars 1	893,5Kg		USSR	Flyby Marciano		Loss Of Signal	
1963	04/11	1962-062A	Sputnik 24	890Kg		USSR	Aterrar em Marte		Lançamento Falhado	
	04/01		Sputnik 25			USSR	Aterrar na Lua			
	02/02		Luna 1963B			USSR	Aterrar na Lua		Lançamento Falhado	
	02/04		Luna 4			USSR	Aterrar na Lua			
	11/11		Cosmos 21			USSR	Voo Experimental Venera			
1964	30/01		Ranger 6			USA	Impactador Lunar			

	19/02		Venera 1964B			USSR	Flyby Venusiano		Lançamento Falhado	
	01/03		Venera 1964A			USSR	Flyby Venusiano		Lançamento Falhado	
	21/03		Luna 1964A			USSR	Aterrar na Lua		Lançamento Falhado	
	27/03		Cosmos 27			USSR	Flyby Venusiano			
	02/04		Zond 1			USSR	Flyby Venusiano		Loss Of Signal	
	20/04		Luna 1964B			USSR	Aterrar na Lua		Lançamento Falhado	
	04/06		Zond 1964A			USSR	Aterrar na Lua		Lançamento Falhado	
	28/07		Ranger 7			USA	Impactador Lunar			
	05/11		Mariner 3			USA	Flyby Marciano			
	28/11		Mariner 4			USA	Flyby Marciano			
	30/11		Zond 2			USSR	Flyby Marciano		Loss Of Signal	
1965	17/02		Ranger 8			USA	Impactador Lunar			
	12/03		Cosmos 60			USSR	Aterrar na Lua			
	21/03		Ranger 9			USA	Impactador Lunar			
	10/04		Lunar 1965A			USSR	Aterrar na Lua		Lançamento Falhado	
	09/05		Luna 5			USSR	Impactador Lunar		Aterragem Controlada Falhada	
	08/06		Luna 6			USSR	Aterrar na Lua			
	18/07		Zond 3			USSR	Flyby Lunar		Completada	
	04/10		Luna 7			USSR	Impactador Lunar		Aterragem Controlada Falhada	
	12/11		Venera 2			USSR	Flyby Venusiano		Loss Of Signal	
	16/11		Venera 3			USSR	Aterrar em Venus		Loss Of Signal	
	23/11		Cosmos 96			USSR	Aterrar em Venus			
	23/11		Venera 1965A			USSR	Flyby Venusiano		Lançamento Falhado	
	03/12		Luna 8			USSR	Impactador Lunar		Aterragem Controlada Falhada	
1966	31/01		Luna 9			USSR	Aterrar na Lua			
	01/03		Cosmos 111			USSR	Orbitador Lunar			
	31/03		Luna 10			USSR	Orbitador Lunar			

	30/04		Luna 1966A			USSR	Orbitador Lunar		Lançamento Falhado	
	30/05		Surveyor 1			USA	Orbitador Lunar			
	01/07		Explorer 33			USA	Orbitador Lunar			
	10/08		Lunar Orbiter 1			USA	Orbitador Lunar			
	24/08		Luna 11			USSR	Orbitador Lunar			
	20/09		Surveyor 2			USA	Orbitador Lunar			
	22/10		Luna 12			USSR	Orbitador Lunar			
	06/11		Lunar Orbiter 2			USA	Orbitador Lunar			
	21/12		Luna 13			USSR	Aterrar na Lua			
1967	04/02		Lunar Orbiter 3			USA	Orbitador Lunar			
	17/04		Surveyor 3			USA	Aterrar na Lua			
	08/05		Lunar Orbiter 4			USA	Orbitador Lunar			
	12/06		Venera 4			USSR	Sonda Venusiana			
	14/06		Mariner 5			USA	Flyby Venusiano			
	17/06		Cosmos 167			USSR	Sonda Venusiana			
	14/07		Surveyor 4			USA	Aterrar na Lua			
	19/07		Explorer 35 (IMP-E)			USA	Orbitador Lunar			
	01/08		Lunar Orbiter 5			USA	Orbitador Lunar			
	08/09		Surveyor 5			USA	Aterrar na Lua			
	28/09		Zond 1967A			USSR	Voo Experimental Lunar		Lançamento Falhado	
	07/11		Surveyor 6			USA	Aterrar na Lua			
	22/11		Zond 1967B			USSR	Voo Experimental Lunar		Lançamento Falhado	
1968	07/01		Surveyor 7			USA	Lunar Lander			
	07/02		Luna 1968A			USA	Orbitador Lunar		Lançamento Falhado	
	02/03		Zond 4			USSR	Voo Experimental			
	07/04		Luna 14			USSR	Orbitador Lunar			
	23/04		Zond 1968A			USSR	Voo Experimental Lunar		Lançamento Falhado	
	15/09		Zond 5			USSR	Lunar Flyby and Return to Earth			
	10/11		Zond 6			USSR	Lunar Flyby and Return to			

						Earth			
	21/12	Apollo 8		Saturn V	USA	Orbitador Lunar Tripulado		Completada	Primeira missão tripulada a orbitar outro corpo celeste
1969	05/01	Venera 5			USSR	Sonda Venusiana			
	10/01	Venera 6			USSR	Sonda Venusiana			
	20/01	Zond 1969A			USSR	Lunar Flyby and Return		Lançamento Falhado	
	19/02	Luna 1969A			USSR	Lunar Rover		Lançamento Falhado	
	21/02	Zond L1S-1			USSR	Orbitador Lunar		Lançamento Falhado	
	25/02	Mariner 6			USA	Flyby Marciano			
	27/03	Mariner 7			USA	Flyby Marciano			
	27/03	Mars 1969A			USSR	Orbitador Marciano		Lançamento Falhado	
	02/04	Mars 1969B			USSR	Orbitador Marciano		Lançamento Falhado	
	15/04	Luna 1969B			USSR	Recolha de Amostras Lunares		Lançamento Falhado	
	18/05	Apollo 10		Saturn V	USA	Orbitador Lunar Tripulado		Completada	
	14/06	Luna 1969C			USSR	Recolha de Amostras Lunares		Lançamento Falhado	
	03/07	Zond L1S-2			USSR	Orbitador Lunar		Lançamento Falhado	
	13/07	Luna 15			USSR	Orbitador Lunar			Attempted Lunar Lander
	16/07	Apollo 11		Saturn V	USA	Aterrar uma Nave Tripulada na Lua		Completada	Primeiro Humano na Lua
	07/08	Zond 7			USSR	Lunar Flyby and Return to Earth			
	23/09	Cosmos 300			USSR	Recolha de Amostras Lunares			
	22/10	Cosmos 305			USSR	Recolha de Amostras lunares			
	14/11	Apollo 12			USA	Aterrar uma Nave Tripulada na Lua		Completada	

1970	06/02		Luna 1970A			USSR	Recolha de Amostras Lunares		Lançamento Falhado	
	19/02		Luna 1970B			USSR	Orbitador Lunar		Lançamento Falhado	
	11/04		Apollo 13		Saturn V	USA	Aterrar uma Nave Tripulada na Lua		Aterragem Abortada	
	17/08		Venera 7	1180Kg		USSR	Aterrar em Venus			First Successful Planetary Lander (15/12/1970) Transmission from surface for 23 minutes before shutdown
	22/08		Cosmos 359			USSR	Sonda Venusiana			
	12/09		Luna 16			USSR	Recolha de Amostras Lunares			
	20/10		Zond 8			USSR	Lunar Flyby and Return to Earth			
	10/11		Lunokhod 1			USSR	Lunar Rover			Luna 17
1971	31/01		Apollo 14		Saturn V	USA	Aterrar uma Nave Tripulada na Lua			
	09/05		Mariner 8			USA	Flyby Marciano		Lançamento Falhado	
	10/05		Cosmos 419			USSR	Mars Orbiter and Lander			
	19/05		Mars 2			USSR	Mars Orbiter and Lander		Lander Malfunction	
	28/05		Mars 3			USSR	Mars Orbiter and Lander			
	30/05		Mariner 9			USA	Orbitador Marciano			
	26/07		Apollo 15		Saturn V	USA	Aterrar uma Nave Tripulada na Lua			
	02/09		Luna 18			USSR	Recolha de Amostras Lunares			
	28/09		Luna 19			USSR	Orbitador Lunar			
1972	14/02		Luna 20			USSR	Recolha de Amostras			

						Lunares			
	03/03	Pioneer 10			USA	Flyby Joviano			Primeira Missão a Júpiter
	27/03	Venera 8			USSR	Sonda Venusiana			
	31/03	Cosmos 482			USSR	Sonda Venusiana			
	16/04	Apollo 16		Saturn V	USA	Aterrar uma Nave Tripulada na Lua			
	23/11	Soyuz L3			USSR	Orbitador Lunar		Lançamento Falhado	
	07/12	Apollo 17		Saturn V	USA	Aterrar uma Nave Tripulada na Lua		Completada	Last Lunar Landing – First Geologist on the Moon (Harrison Schmitt)
1973	08/01	Lunokhod 2			USSR	Lunar Lander			Luna 21
	05/04	Pioneer 11			USA	Jupiter and Saturn Flyby			Primeira Missão a Saturno
	14/05	Skylab			USA	Orbitador Terrestre Tripulado			Primeira Estação Espacial Tripulada Americana
	10/06	Explorer 49 (RAE-B)			USA	Lunar Orbiter and Radio Astronomy			
	21/07	Mars 4			USSR	Flyby Marciano		Attempted Orbiter	
	25/07	Mars 5			USSR	Orbitador Marciano			
	05/08	Mars 6			USSR	Aterrar em Marte		Lançamento Falhado	
	09/08	Mars 7			USSR	Flyby Marciano		Attempted Mars Lander	
	04/11	Mariner 10			USA	Venus and Mercury Flybys			
1974	02/06	Luna 22			USSR	Orbitador Lunar			
	28/10	Luna 23				Recolha de Amostras Lunares			
1975	08/06	Venera 9			USSR	Venus Orbiter and Lander			
	14/06	Venera 10			USSR	Venus Orbiter and Lander			
	20/08	Viking 1			USA	Mars Orbiter and Lander			

	09/09		Viking 2			USA	Mars Orbiter and Lander			
	16/10		Luna 1975A			USSR	Recolha de Amostras Lunares			
1976	09/08		Luna 24			USSR	Recolha de Amostras Lunares			
1977	20/08		Voyager 2			USA	Jupiter, Saturn, Uranus and Neptune Flyby			
	05/09		Voyager 1			USA	Jupiter and Saturn Flybys			
1978	20/05		Pioneer Venus 1			USA	Orbitador Venusiano			
	08/08		Pioneer Venus 2			USA	Sondas Venusianas			
	12/08		ISEE-3/ICE			USA	Comet Giacobini-Zinner and Halley Flybys			
	09/09		Venera 11			USSR	Venus Orbiter and Lander			
	14/09		Venera 12			USSR	Venus Orbiter and Lander			
1979										
1980										
1981	30/10		Venera 13			USSR	Venus Orbiter and Lander			
	04/11		Venera 14			USSR	Venus Orbiter and Lander			
1982										
1983	02/06		Venera 15			USSR	Orbitador Venusiano			
	07/06		Venera 16			USSR	Orbitador Venusiano			
1984	15/12		Vega 1			USSR	Venus Lander and Balloon, Comet Halley Flyby			
	21/12		Vega 2			USSR	Venus Lander and Balloon, Comet Halley Flyby			
1985	07/01		Sakigake			Japão	Flyby do Cometa Halley			Primeira Missão Planetária Japonesa
	02/07		Giotto			Europa	Flyby do Cometa Halley			Primeira Missão Planetária Europeia
	18/08		Suisei (Planet-A)			Japan	Flyby do Cometa Halley			

1986										
1987										
1988	07/07		Phobos 1			USSR	Mars Orbiter and Phobos Landers			Attempted Orbiter
	12/07		Phobos 2			USSR	Mars Orbiter and Phobos Landers			Attempted Phobos Landers
1989	04/05		Magellan			USA	Orbitador Venusiano			
	18/10		Galileo			USA	Jupiter and Probe			
1990	24/01		Hiten			Japan	Lunar Flyby and Orbiter			
	25/04	1990-037B	Hubble	11110Kg	Space Shuttle Discovery	USA, Europe	Telescópio Espacial		Activa	Missão STS-31
1991										
1992	25/09		Mars Observer			USA	Orbitador Marciano		Loss Of Signal	
1993										
1994	25/01		Clementine			USA	Lunar Orbiter and Asteroid Flyby		Tentativa de Flyby de um asteroide	
1995										
1996	17/02		NEAR			USA	Orbitador do Asteroide Eros			
	07/11		Mars Global Surveyor			USA	Orbitador Marciano			
	04/12		Mars 96			Russia	Mars Orbiter and Landers			
	04/12		Mars Pathfinder			USA	Mars Lander and Rover			
1997	15/10		Cassini - Huygens			USA, Europe	Saturn Orbiter and Titan Probe		Completa	Primeira sonda a aterrar em Titã
	24/12		AsiaSat 3/HGS-1			USA	Flyby Lunar			
1998	07/01		Lunar Prospector			USA	Orbitador Lunar			
	03/07		Nozomi (Planet-B)			Japan	Orbitador Marciano			
	24/10		Deep Space 1 (DS1)			USA	Asteroid and Comet Flyby			
	11/12		Mars Climate Orbiter			USA	Orbitador Marciano			

1999	03/01		Mars Polar Lander			USA	Mars Lander		Mission Failure	Lander Crashed
2000										
2001	07/04		2001 Mars Odyssey			USA	Orbitador Marciano			
	08/08		Genesis			USA	Solar Wind Sample Return			
2002	03/07		Contour			USA	Flyby of Three Comet Nucleii			
2003	09/05		Hayabusa (MUSES-C)			Japão	Asteroid Orbiter and Sample Return		Completada	Primeira nave a aterrar num asteroide; Primeira nave a recolher amostras de um asteroide
	02/06		Mars Express			Europa	Mars Orbiter and Lander		Activa	
	10/06		Spirit (MER-A)			USA	Mars Rover		Completada	Mars Exploration Rover
	08/07		Opportunity (MER-B)			USA	Mars Rover		Completada	Mars Exploration Rover
	00/09		SMART 1			Europa	Orbitador Lunar			
2004	02/03		Rosetta - Philae			Europa	Comet Orbiter and Lander		Completada	Primeira nave especial a aterrar num cometa
	03/08		Messenger			USA	Orbitador de Mercúrio			
2005	12/01		Deep Impact			USA	Comet Rendez-vous and Impact			
	12/08		Mars Reconnaissance Orbiter			USA	Orbitador Marciano		Activa	
	09/11		Venus Express			Europa	Orbitador Venusiano		Completada	
2006	19/01		New Horizons			USA	Flyby de Plutão, Caronte e Cinturão de Kuiper		Activa	Primeira Missão a Plutão e ao Cinturão de Kuiper
2007	04/08		Phoenix			USA	Small Mars Scout Lander			

	14/09		Kaguya (SELENE)			Japão	Orbitador Lunar			
	27/09		Dawn			USA	Asteroid Ceres and Vesta Orbiter			
	24/10		Chang'e 1			China	Orbitador Lunar			Primeira Missão Planetária Chinesa
2008	22/10		Chandrayaan-1			India	Orbitador Lunar			Primeira Missão Planetária Indiana
2009	07/03		Kepler			USA	Extrasolar Terrestrial Planet Detection Mission		Activa	
	18/06		Lunar Reconnaissance Orbiter			USA	Orbitador Lunar		Activa	
	18/06		LCROSS			USA	Impactador Lunar			
2010	20/05		Akatsuki (Planet-C)			Japão	Orbitador Venusiano			
	01/10		Chang'e 2			China	Orbitador Lunar			
2011	05/08		Juno			USA	Orbitador Joviano		Activa	Primeiro Orbitador Joviano
	10/09		GRAIL			USA	Orbitador Lunar			
	08/11		Phobos-Grunt			Russia	Phobos Lander		Attempted Lander	
	08/11		Yinghuo-1			China	Orbitador Lunar			
	26/11		Mars Science Laboratory			USA	Mars Rover			Curiosity Rover
2012										
2013	06/09		LADEE			USA	Orbitador Lunar			
	05/11		Mangalyaan			India	Orbitador Marciano			
	18/11		MAVEN			USA	Mars Scout Mission Orbiter			
	01/12		Chang'e 3			China	Lunar Lander and Rover			
2014	23/10		Chang'e 5			China	Lunar Flyby and Return – Test Vehicle			
	03/12		Hayabusa 2			Japan	Asteroid Flyby Mission		Activa	

	03/12		PROCYON			Japan	Asteroid Flyby Mission			
2015										
2016	14/03		EXOMARS 2016			Europe	Mars Orbiter and Lander		Lander Crashed	
2017										
2018	05/05		Insight			Europe	Mars Lander		Activa	
	20/05		Queqiao			China	Lunar Relay Satellite			
	12/08		Parker Solar Probe			USA	Solar Probe – Venus Flybys		Activa	
	19/10		BepiColombo			Europa, Japão	Orbitador de Mercúrio		Activa	
	07/12		Chang'e 4			China	Lunar Farside Lander and Rover			
2019	22/02		BereSheet			Israel	Lunar Lander		Lander Crashed	Primeira Missão Lunar Financiada por Privados (Space IL e IAI)
	22/07		Chandrayaan 2			India	Moon Orbiter, Lander and Rover		Activa	Lander Crashed
2020	TBD		Chang'e 5			China	Lunar Sample Return Mission		Activa	
			ExoMars			Europa, Rússia	Mars Rover and Russian Surface Platform		Activa	
	19/07		Al- Aman (Hope)			Emirados Estados Unidos	Orbitador Marciano		Activa	First UAE and Arab nation Mission to Mars
	23/07		Tianwen 1			China	Mars Orbiter, Lander and Rover		Activa	First Chinese Interplanetary Mission
	30/07		Perseverance and Ingenuity			USA	Mars Rover and Helicopter		Activa	First Rotor-Powered Flight on the Surface of Another Planet, MOXIE Experiment

2021	?/07		Double Asteroid Redirection Test (DART)			USA	Asteroid Impactor			
	16/10		Lucy			USA	Trojan Asteroid Flybys			
2022	?/06		JUpiter Icy moons Explorer (JUICE)			Europe	Ganymede, Callisto, Europa Multiple Flyby Mission			
...										

