

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**MONOGRAFIA DO TRABALHO FINAL  
TF-24/23**

**ESTILOS ESTRUTURAIS E FEIÇÕES SEDIMENTARES DE *TEMPE TERRA*,  
UM RIFTE EM MARTE**

Aluno:  
João Guimarães Leão Caffagni

Orientador:  
Prof. Dr. André Pires Negrão - IGc USP / GSA

Coorientador:  
Prof. Dr. Cosme Ferreira da Ponte Neto -  
Observatório Nacional

**São Paulo  
2024**

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador André Negrão pela colaboração e dedicação à produção desta monografia, auxiliando nas interpretações geológicas e no processo de conclusão do curso necessários para a realização deste trabalho.

Ao meu coorientador Cosme Ponte Neto pela parceria e empenho na confecção desta monografia, auxiliando nas interpretações geofísicas e na construção de um trabalho acadêmico.

À universidade e ao Instituto de Geociências pela experiência que me foi concedida, intelectual e pessoalmente.

Ao meu irmão Lou pela revisão e sugestões neste trabalho, lendo-o e sugerindo correções textuais e gramaticais, além de sua companhia e apoio em toda minha vida. Ao meu irmão Caio pela companhia e parceria que tivemos não só durante a graduação como nos demais momentos da minha vida.

Aos meus pais, pelo apoio, suporte e incentivo, pelas conversas científicas e humanas que tivemos, pelas viagens que fizemos e o tempo que passamos juntos.

Aos membros do grupo da “Disneylândia”, pela diversão que me proporcionaram durante os últimos anos, em especial ao Guerra, por ter me indicado o curso, ter me apresentado aos demais amigos e ter me auxiliado nas questões uspianas.

Aos membros dos “Tribolitas”, pelas jogatinas e conversas humoradas que tivemos ao longo de minha graduação, em especial ao Igor e ao André.

Às amigas Helô e Mari pela amizade e boas risadas que tivemos ao longo da última década.

Aos meus colegas da geo pela companhia durante o curso e pelas conversas que tivemos nos momentos pós campo, em especial ao Ayrton, à Cissa, ao Rapa e à Rafa, ao Igor e ao Xands.

E à minha companheira Karina, por estar sempre ao meu lado, durante toda a graduação e no período da pandemia. Por me auxiliar neste trabalho, e nas disciplinas da faculdade e também pela parceria e vida que carregamos.

“Temos todas as razões para pensar que, nos próximos anos, Marte e seus mistérios se tornarão cada vez mais familiares para os habitantes do planeta Terra.” - Carl Sagan, 1996

“Já foi dito que astronomia é uma experiência de humildade e criadora de caráter. Não há, talvez, melhor demonstração da tola presunção humana do que esta imagem distante do nosso minúsculo mundo. Para mim, destaca a nossa responsabilidade de sermos mais amáveis uns com os outros, e para preservarmos e protegermos o "pálido ponto azul", o único lar que conhecemos até hoje” - Carl Sagan, 1994.

## RESUMO

Marte, o quarto planeta do Sistema Solar, possui uma geologia com aspectos únicos, abrigando uma diversidade de paisagens e estruturas dispostas por todo o seu globo. Não diferente da Terra, lá encontram-se estruturas tectônicas que cobrem milhares de quilômetros, como por exemplo fossas e riftes com escarpas que podem chegar a milhares de metros de profundidade. Este trabalho visa analisar uma das estruturas mais proeminentes do planeta vermelho, o rifte de *Tempe Terra*, por meio de uma análise dos estilos estruturais presentes, contribuindo para o conhecimento da área através de comparações com análogos da Terra, geologia sedimentar, geomorfologia e geofísica relacionada a região de estudo. Em geral, os riftes marcianos são estruturas que se estendem por milhares de quilômetros e produzem escarpas significativas, muito bem marcadas, devido ao intemperismo incipiente, atuante neste planeta. Justamente por isso, essas feições são acompanhadas de várias falhas bem preservadas, independentemente de onde ocorram. As estruturas contidas no rifte de *Tempe Terra* são variadas, dispendo zonas de acomodação, falhas em dominó, leques aluviais, deslizamentos, vales glaciais, dunas eólicas e diversas outras características, frequentemente afetadas por crateras de impacto que moldam parte da tectônica regional. A fundamentação teórica vale-se de artigos acadêmicos sobre geologia, geofísica e astronomia que discutem diferentes características de Marte, e também sobre a região de *Tempe Terra*, como foco na dinâmica planetária e na tectônica. Neste trabalho é apresentada uma série de interpretações sobre estilos estruturais de riftes, falhas e crateras de impactos, exibindo a evolução tectônica de *Tempe Terra* e demonstrando a extensão do rifteamento em NW - SE, como se deram *trends* de falhas em função do bombardeamento de meteoritos e como ambientes sedimentares se apresentam na região.

Palavras-chave: Estilos estruturais; Feições Sedimentares; Tectônica; Geomorfologia; Marte; Tempe Terra.

## ABSTRACT

*Mars, the fourth planet in the Solar System, has a geology with unique aspects, hosting a diversity of landscapes and structures spread across its globe. Not unlike Earth, there are tectonic structures there that cover thousands of kilometers, such as trenches and rifts with escarpments that can reach thousands of meters in depth. This work aims to analyze one of the most prominent structures of the red planet, the Tempe Terra rift, through an analysis of the structural styles present, contributing to the knowledge of the area through comparisons with Earth's analogs, sedimentary geology, geomorphology, and geophysics related to the study region. In general, Martian rifts are structures that extend for thousands of kilometers and produce significant, well-marked escarpments due to the incipient weathering acting on this planet. Precisely for this reason, these features are accompanied by several well-preserved faults, regardless of where they occur. The structures contained within the Tempe Terra rift are varied, featuring accommodation zones, domino faults, alluvial fans, landslides, glacial valleys, aeolian dunes, and various other characteristics, often affected by impact craters that shape part of the regional tectonics. The theoretical foundation relies on academic articles about geology, geophysics, and astronomy discussing different characteristics of Mars, as well as the Tempe Terra region, focusing on planetary dynamics and tectonics. This work presents a series of interpretations about structural styles of rifts, faults, and impact craters, showing the tectonic evolution of Tempe Terra and demonstrating the extent of rifting in a NW-SE direction, how fault trends occurred due to meteorite bombardment, and how sedimentary environments are present in the region.*

Keywords: Structural styles; Sedimentary Features; Tectonics; Geomorphology; Mars; Tempe Terra.

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO.....</b>                                       | <b>1</b>  |
| <b>2. OBJETIVOS.....</b>  | <b>2</b>  |
| <b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>                            | <b>3</b>  |
| 3.1 Geologia marciana.....                                      | 3         |
| 3.2 Geologia da área de estudo.....                             | 4         |
| <b>4. METODOLOGIA.....</b>                                      | <b>7</b>  |
| 4.1 Bibliografia e bancos de dados.....                         | 7         |
| 4.2 Programas e outros software.....                            | 7         |
| <b>5. RESULTADOS OBTIDOS.....</b>                               | <b>8</b>  |
| <b>6. DISCUSSÃO.....</b>  | <b>20</b> |
| 6.1 Tectônica e estilos estruturais.....                        | 20        |
| 6.2 Tectônica e estilos estruturais de crateras de impacto..... | 25        |
| 6.3 Feições sedimentares de Tempe Terra.....                    | 27        |
| 6.4 Geofísica e rifteamento.....                                | 30        |
| <b>7. CONCLUSÕES.....</b>                                       | <b>31</b> |
| <b>8. REFERÊNCIAS.....</b>                                      | <b>31</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

Marte é marcado por uma geologia dinâmica, e uma geodiversidade complexa. Planícies e terras baixas cobrem boa parte do hemisfério norte, com calotas glaciais proeminentes na região polar, ao passo que um grande planalto ocupa quase todo o hemisfério sul. Rochas ígneas contribuem para boa parte da formação geológica, com derrames basálticos abrangendo milhões de quilômetros, de vulcões que são em vários casos maiores que os terrestres. O planeta vermelho, rico em minerais de ferro, abriga em sua diversidade geomorfológica regiões montanhosas, além de eskers, ravinas, cânions, feições lagunares, drenagens fluviais e diversas feições de impacto (Chapman, 2007).

Com uma tectônica ativa e um núcleo líquido, o desenvolvimento de formações geológicas se faz presente no planeta, o que possibilita feições diversificadas (Stewart *et al.*, 2007). Existem poucos dados sobre a crosta marciana, mas estima-se que, em geral, ela possua, em média, cerca de 50 km de espessura. Dados ainda apontam para a existência de crosta diferenciada. No hemisfério norte, observa-se uma crosta menos espessa que provavelmente foi gerada de forma similar às da crosta oceânica, neste caso, moldada também por impactos de meteoritos (Perron *et al.*, 2007).

Apesar das discussões a respeito do funcionamento das placas tectônicas em Marte, a ideia mais aceita é a da placa única (Breuer e Spohn, 2003), que está exposta a esforços tectônicos que controlam a dinâmica planetária, onde há cadeias vulcânicas com exemplares que podem atingir 27 km de altura e 450 km de diâmetro, além de riftes com 3.000 km de extensão, como o Vale Marineris.

Outro fator muito importante quando se discute a geomorfologia de Marte é o papel da água, um dos temas de maior interesse na pesquisa existente, justamente por instigar investigações sobre a existência de vida atual ou fóssil. Em 2002 o programa de órbita Odyssey da NASA detectou quantidades significativas de gelo na superfície do planeta, e, desde então, ambientes lacustres e glaciares, geleiras, eskers, rios e inclusive hipóteses sobre a formação de oceanos foram bastante divulgadas e abordadas (Grotzinger e Milliken, 2012).

No geral, os estudos da geologia marciana com foco na tectônica são muito recentes, tendo sido impulsionados com as novas expedições, que permitiram uma exploração *in loco* e a transmissão de imagens de satélite de melhor qualidade. Há também uma série de estudos de geofísica planetária que se desenvolveram através de artigos como os do Dr. Mario Acuña, geofísico da NASA, cujas publicações com foco em Marte se iniciam somente em 1998.

Segundo Hauber *et al.*, (2010) as estruturas marcianas são muito bem preservadas, devido ao baixo intemperismo e a falta de interferências biológicas, por isso que falhas, grabens e limites tectônicos são bastante pronunciados.

Autores como Butcher *et al.*, (2020), Gwinner *et al.*, (2010) e Mège *et al.*, (2003), realizaram estudos comparativos entre os riftes de Marte e outras formações geológicas com as estruturas terrestres. Os estudos trataram tanto da geomorfologia quanto da morfometria e geometria dos aspectos observados através de satélites, contando com o suporte do sensoriamento remoto aplicado para geofísica.

Contudo, ainda há diversas regiões com potencial para detalhamentos e estudos de análogos terrestres, a exemplo da região de *Tempe Terra*. Nesse setor há um sistema de riftes extensos que está incluído em um planalto vulcânico ativo sob esforços extensionais (Orlov *et al.*, 2023).

Neste contexto, o presente estudo investiga os estilos estruturais, regimes de esforços, geração e evolução de estruturas, bem como os depósitos sedimentares superficiais do rifte e região de *Tempe Terra*. Adicionalmente, comparações com riftes terrestres são estabelecidas, tendo em vista que são a base dos paradigmas para a interpretação de uma feição fora de nosso planeta.

Compondo o projeto, o *Global CTX mosaic of Mars* (GCMM) é uma das ferramentas mais importantes para essa investigação que foi produzida, um imageamento interativo, disponibilizado pela *California Institute of Technology* (Caltech) de grande qualidade que permite investigar as feições de Marte em alta resolução e com detalhes minuciosos.

## 2. OBJETIVOS

Este projeto contribui com investigações e análises de estilos estruturais, geomorfologia e temas relacionados ao contexto dos riftes de *Tempe Terra*, uma região que ainda carece de estudos tectônicos.

Até o presente momento, alguns trabalhos como os de Orlov *et al.* (2022 e 2023) produziram algumas interpretações estruturais, principalmente com o mapeamento de falhas e a reprodução da arquitetura estrutural regional, a fim de explicar a origem do tectonismo, e do surgimento do rifte em *Tempe Terra*. No entanto, trabalhos que demonstrem estruturas tectônicas como zonas de transferência e de acomodação, bem como um mapeamento detalhado dos principais grabens dispostos no *trend* principal do rifte não foram produzidos, principalmente quando correlacionados com feições sedimentares e a importância das crateras de impacto, tanto para a geologia sedimentar bem como para o tectonismo local.

Para tal, uma série de mosaicos foram produzidos a fim de ilustrar as características geológicas que são importantes para compor o estudo, como aspectos tectônicos do rifte principal, demonstrando a variedade das feições sedimentares existentes e a geomorfologia que compõe *Tempe Terra*.

Conjuntos que incluem a imagem no espectro visível das feições observadas, acompanhados de uma interpretação estrutural e de um perfil topográfico de elevação são

ferramentas importantes neste trabalho, para que discussões sobre os estilos estruturais e o tectonismo marciano possam ser bem embasadas.

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 Geologia marciana

O núcleo de Marte possui muitas semelhanças com o terrestre, porém estudos apontam que o planeta não tem um núcleo interno sólido, e mesmo com o avanço do tempo geológico e a perda de energia, o núcleo marciano irá congelar de fora para dentro, até que não haja mais tectônica ativa (Stewart *et al.*, 2007).

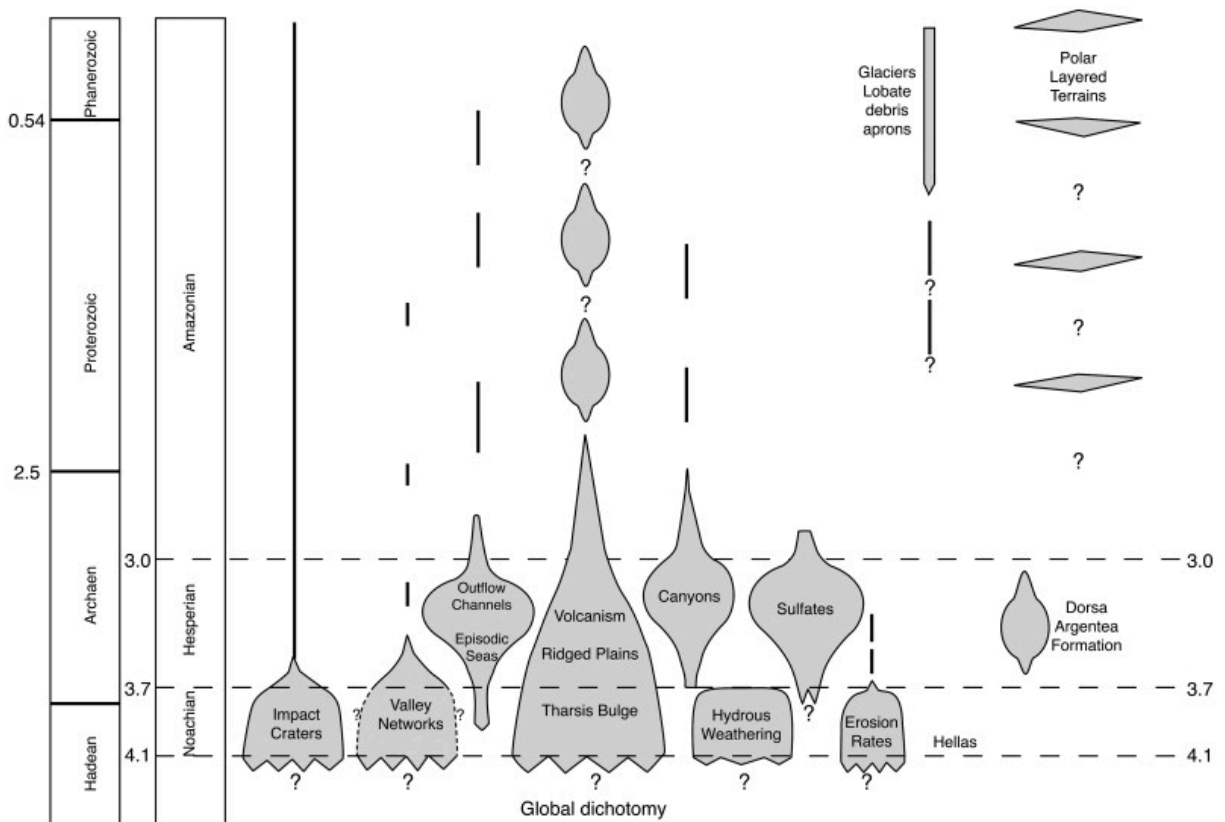
Há também a presença de campo magnético em Marte, embora este não se estende por todo o globo, além de não existir um dínamo atuante no planeta. Estudos levantam que o campo que ocorre lá é proveniente de um magnetismo crustal, conseqüentemente bem mais fraco que o terrestre.

Dados sísmicos recentes demonstram que o manto marciano compartilha alguns aspectos similares ao manto superior da Terra, apresentando uma provável composição mineralógica bastante distinta, no entanto os estudos ainda são insuficientes para determinar a existência de um manto inferior (Stähler *et al.*, 2021).

A crosta marciana também é assunto de muita discussão, afinal, quando observa-se a topografia do planeta, é notável que o hemisfério norte possui elevações muito menores do que o resto do globo, gerando a hipótese de que lá tenha sido um oceano (Perron *et al.*, 2007).

Esta crosta se formou há aproximadamente 4.5 bilhões de anos, o que pode-se ver na [Figura 1](#) (onde é destacado a dicotomia de Marte), e estudos apontam que sua evolução para o estado atual se deu através de diferenciações físico-químicas importantes, apresentando um manto com características mineralógicas distintas (Stewart *et al.*, 2007). Discute-se também diferenças no conteúdo geológico na chamada Dicotomia Marciana, que é a diferença topográfica planetária entre o hemisfério norte e o sul (Nimmo e Tanaka, 2004).

Estudos recentes mostram que Marte tem um vulcanismo ativo, embora erupções vulcânicas não tenham sido registradas em imagens, os dados geofísicos apontam que que plumas mantélicas, estão ativas, demonstrando que o planeta vermelho continua geodinamicamente vivo (Broquet e Andrews-Hanna, 2023).



**Figura 1.** Escala de tempo, com a idade de formações e feições importantes, além da comparação entre a geocronologia da Terra com a de Marte, demonstrando quando os éons marcianos começam em relação aos terráqueos. *Geological activity as a function of time on Mars*. Retirado de Carr e Head (2010).

### 3.2 Geologia da área de estudo

Marte apresenta uma série de complexos sistemas de riftes, segundo Carr e Head (2010), mais da metade das estruturas extensionais possuem alguns bilhões de anos. Boa parte das estruturas tectônicas de Marte tem origem no éon *Noachian* e no *Hesperian*, demonstrando o quão antigas elas são, além de bem preservadas, o que diz bastante sobre a evolução tectônica que ocorreu no planeta. Destaca-se os os rifte *Valles Marineres*, uma das maiores estruturas tectônicas do Sistema Solar (que pode ser observado a sul da [figura 3](#)), além do sistema de riftes *Tempe Terra* (foco deste estudo, [figura 2](#)), além de diversas outras feições (Butcher *et al.* 2020).

*Tempe Terra* está localizado no hemisfério norte de Marte, a nordeste da região conhecida como Tharsis Rise. Centrado nas coordenadas 39.7°N e 289°E (43°N e -73°E) este sistema de riftes se estende por mais de 1300 km, em uma direção NE-SW. As estruturas presentes se espalham por aproximadamente dois milhões de km<sup>2</sup>, compondo uma diversidade geomorfológica considerável (Orlov *et al.*, 2022).

A complexidade estrutural dos riftes marcianos permite uma abordagem comparativa, tanto entre exemplos do próprio planeta quanto com exemplos que existam na Terra. Inserido no contexto geológico geral da região de Tharsis, *Tempe Terra* serve também como modelo investigativo para a análise das deformações, muitas vezes de caráter vulcânico,

que moldam boa parte tanto da morfologia e topografia, quanto do caráter estrutural dessa porção do hemisfério norte marciano (Orlov *et al.*, 2022).

Boa parte da deformação que se apresenta no hemisfério norte de Marte foi resultado de um grande evento global, onde falhas normais, extensionais e de caráter radial contribuíram das estruturas presentes nos planaltos vulcânicos de Marte (Tanaka *et al.*, 1991).

Imagens anteriores identificaram uma série de grabens na superfície do planeta. Mais recentemente, Hauber *et al.*, (2010) mostraram, a partir do imageamento de satélites, que esses grabens de alta complexidade estrutural podem ser amplamente analisados. Além disso, as regiões que abrigam tais estruturas apresentam aspectos geológicos notáveis: dimensões extensas, alta diversidade de feições sedimentares, ambientes deposicionais variados, entre outros. O planalto de Tharsis, onde se localiza o sistema de riftes *Tempe Terra*, é, inclusive, a maior província tectônico-magmática conhecida de todo o sistema solar (Hauber *et al.* 2010).

Nesse sentido, um aspecto fundamental do entendimento da gênese das deformações existentes no planalto estudado são discutidas através dos modelos que consideram o vulcanismo como um dos fatores principais para diversas características existentes, onde inclusive boa parte do material que compõe o planalto é de origem vulcânica (Gasselt *et. al.* 2011).

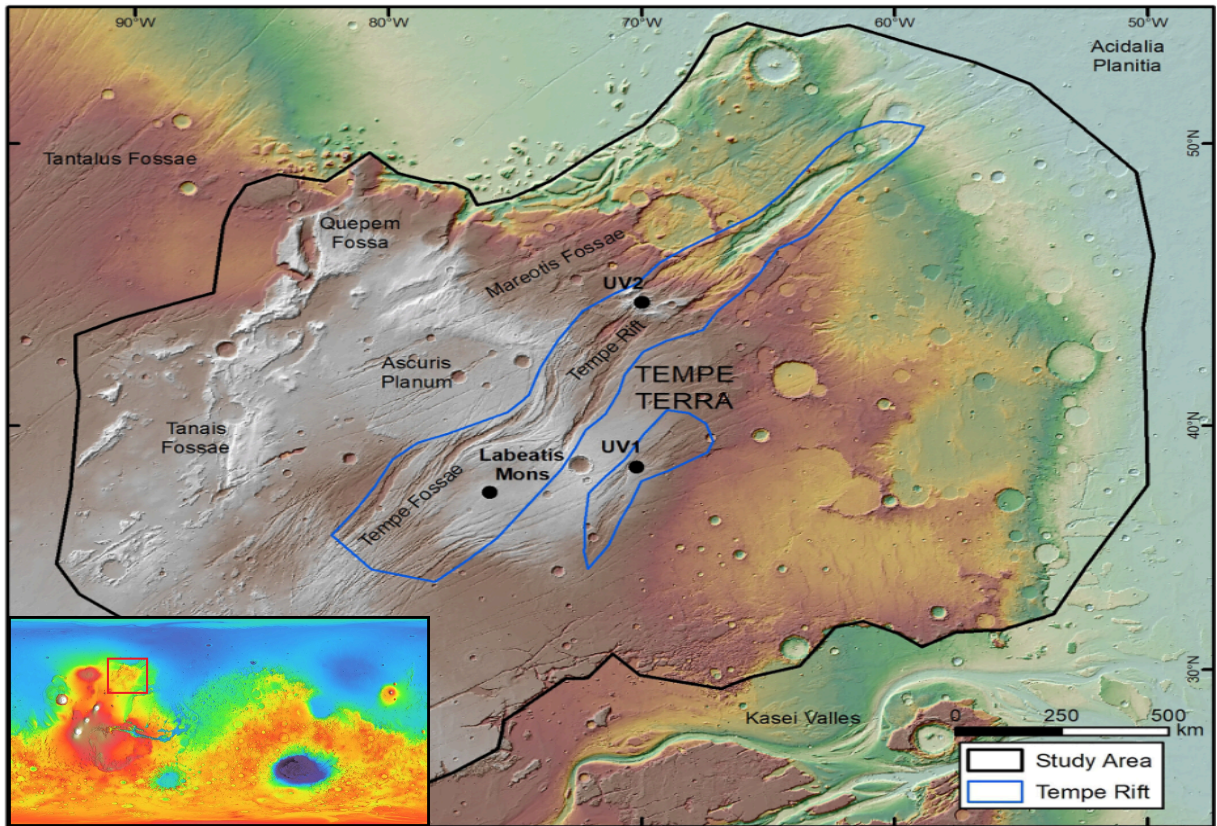
Os dois trabalhos realizados por Orlov *et al.* (2022, 2023) contam com grandeza de detalhes a história tectônica da região de *Tempe Terra*, descrevendo as falhas existentes. O autor ainda relaciona as estruturas extensionais entre si, trazendo discussões a respeito da origem dessas feições. Os trabalhos também se relacionam com o vulcanismo de Marte, focando principalmente nas relações que as falhas possuem com o desenvolvimento geológico situado.

Segundo Orlov *et al.* (2022, 2023), o desenvolvimento de *Tempe Terra* foi dividido em três estágios, cada um com suas características tectônicas próprias. O primeiro estágio teria tido início no éon *Noachian*, o segundo e terceiro estágios estariam no início e fim do éon *Hesperian*, respectivamente.

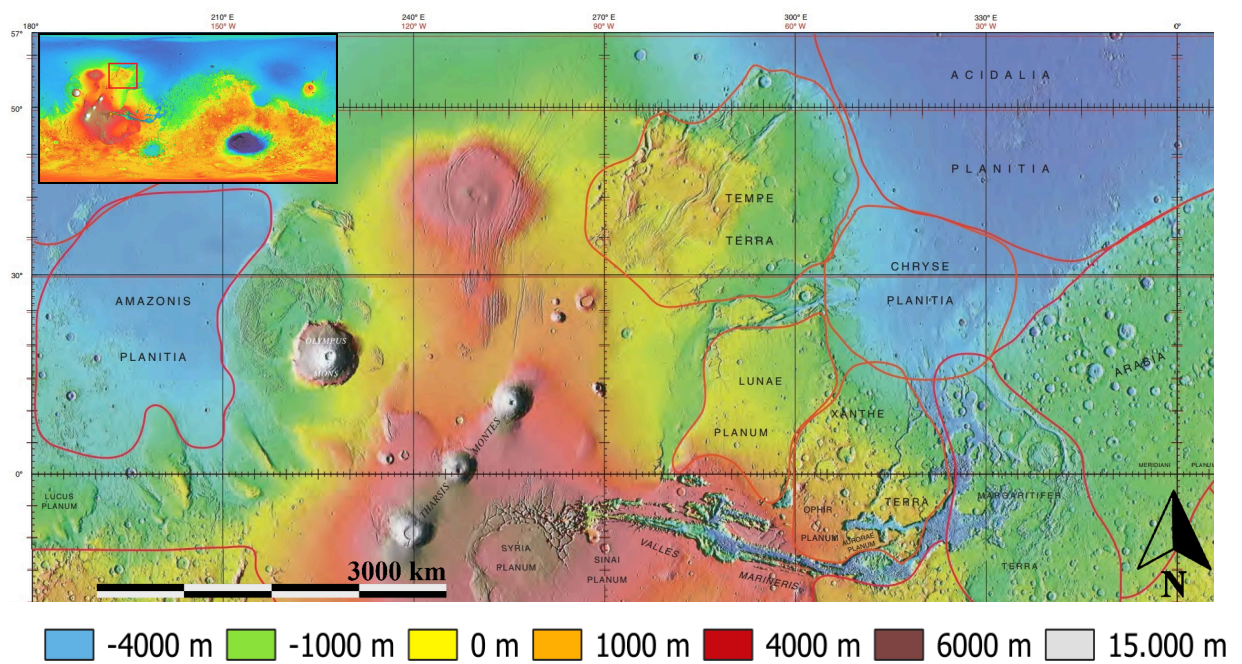
O primeiro estágio foi marcado por uma série de intrusões magmáticas provenientes dos Montes Tharsis (as três montanhas vulcânicas a sudoeste de *Tempe Terra*) que gerou um *underplating* magmático. O segundo estágio é marcado pelo aumento da atividade ígnea proveniente dos vulcões, e um novo acúmulo de material ígneo na crosta que há na região. O terceiro estágio é resultado de enxames de diques que geraram fraturas posteriores e mais superficiais.

Assim sendo, um dos focos deste trabalho é contribuir com alguns aspectos ainda não analisados, demonstrando com detalhe as estruturas tectônicas, relações do rift com a geologia sedimentar presente e as relações com as feições de impacto, produzindo perfis

topográficos e demonstrando a morfologia associada ao rifteamento que existe em *Tempe Terra*.



**Figura 2.** A região de *Tempe Terra*, com aproximadamente dois milhões de km<sup>2</sup>, localizada a nordeste da região de Tharsis. A figura mostra a extensão do rifte principal e do rifte secundário, ambos destacados e em azul, além de toda a área relacionada aos esforços tectônicos. Retirado de Orlov *et al.* (2022) e modificado de Genova *et al.* (2016).



**Figura 3.** Porção do equador e do hemisfério norte marciano com foco na região de Tharsis e, com *Tempe Terra* a nordeste. É possível analisar o alinhamento dos Montes de Tharsis, formações vulcânicas, com a *Tempe*

## 4. METODOLOGIA

### 4.1 Bibliografia e bancos de dados

Para produzir, interpretar e discutir os estilos estruturais presentes em *Tempe Terra*, este trabalho vale-se da comparação com modelos análogos propostos na literatura.

A principal fonte deste trabalho são artigos e estudos científicos de publicações especializadas. O principal recurso utilizado é o '*Global CTX mosaic of Mars*', um banco de imagens produzido pelo *The Bruce Murray Laboratory for Planetary Visualization (The Murray Lab)*, um laboratório da *Caltech*, o Instituto de Tecnologia da Califórnia. Esta ferramenta conta com quase seis trilhões de pixels, produzidos através do imageamento da *Mars Reconnaissance Orbiter (MRO)*, uma sonda de reconhecimento que orbita o planeta, constituindo uma das melhores ferramentas de observação de Marte. Além disso, a *Caltech* também oferece gratuitamente os arquivos em GIS para download.

A *Context Camera (CTX)* é o principal instrumento a bordo da MRO para a produção das imagens do *Murray Lab*, um equipamento que gera fotografias em preto e branco, em faixa ampla de luz visível de 500 a 800 nanômetros de comprimento de onda, com tamanho de imagem de 5064 pixels de largura por um comprimento variável para que possa adquirir imagens com comprimentos de faixa maior que 160 quilômetros (Modificado de Bolles, 2006).

A *HiRISE* é a câmera do principal experimento da MRO, onde as imagens que constituem o mapeamento topográfico de Marte são fotografadas. A imagem é proveniente de 14 detectores eletrônicos, cada um coberto por um filtro em uma das três bandas de comprimento de onda: 400 a 600 nanômetros (azul-verde), 550 a 850 nanômetros (vermelho) ou 800 a 1000 nanômetros (infravermelho próximo) (Modificado de Bolles, 2006).

Os dados geofísicos são obtidos através do *Mars Global Surveyor (MGS)*, que contribui com medições do campo magnético de todo o globo de Marte (Connerney *et al.*, 2001).

Fontes de dados obtidas através do *Mars Reconnaissance Orbiter (MRO)* também proporcionam aspectos fundamentais para uma observação detalhada dos riftes marcianos, onde estudos e mapeamentos gravimétricos e do campo gravitacional do planeta são medidos e apresentados publicamente (Konopliv *et al.*, 2016).

### 4.2 Programas e outros software

Os programas espaciais que foram utilizados para fornecer dados para o projeto são os satélites, *Mars Global Surveyor (MGS)* e *Mars Reconnaissance Orbiter (MRO)*, a base de dados do arquivo digital *Planetary Data System (PDS)*, além dos *rovers* *Curiosity* e

Perseverance e da base de operações sísmica SEIS. As bases de dados da câmera *High Resolution Imaging Science Experiment* (HiRISE) e o *Planetary Data System* (PDS) foram utilizadas no projeto, a primeira sendo atrelada a um programa da Universidade do Arizona em conjunto com a NASA, com foco em imageamento planetário de alta resolução, e a segunda, um arquivo da NASA em colaboração com outras agências espaciais, composto por uma série de dados planetários obtidos desde o início da exploração espacial e mapeamentos topográficos desenvolvidos.

Com isso, através do *software* QGIS, as imagens extraídas foram computadas e trabalhadas, unindo os mosaicos da região de estudo e possibilitando a extração de argumentos como escala, localização geográfica no globo marciano, e a confecção de *layouts* para montar as imagens.

Outros programas como o Google Earth, através da ferramenta de ‘escolher planeta’, também fazem-se úteis, possibilitando uma navegação precisa feita através de imagens realizadas por satélite, medições de distância além da análise e marcação de locais de interesse.

## 5. RESULTADOS OBTIDOS

A análise de estilos estruturais e preenchimento sedimentar dos riftes marcianos são importantes na contribuição ao entendimento da evolução tectônica deste planeta. Foi elaborado um conjunto de mapas, diagramas e textos a partir da interpretação de aspectos morfoestruturais, morfossedimentares e geofísicos da região de *Tempe Terra*, com foco no rifte principal, o Tempe Fossae. Todas as imagens foram extraídas do GCM, onde as figuras em preto e branco são especificamente da câmera CTX, e as coloridas, da câmera HiRISE. As imagens foram integradas e analisadas no QGIS e posteriormente no Inkscape e no ArtRage, onde os mosaicos e perfis foram produzidos.

A partir da visualização interativa das feições de Marte, feita através do site do *The Murray Lab*<sup>1</sup>, análogo do Google Earth, foram utilizadas ferramentas disponíveis para analisar a topografia de *Tempe Terra*, onde perfis topográficos com escala foram elaborados, que estão disponibilizados nas imagens a seguir.

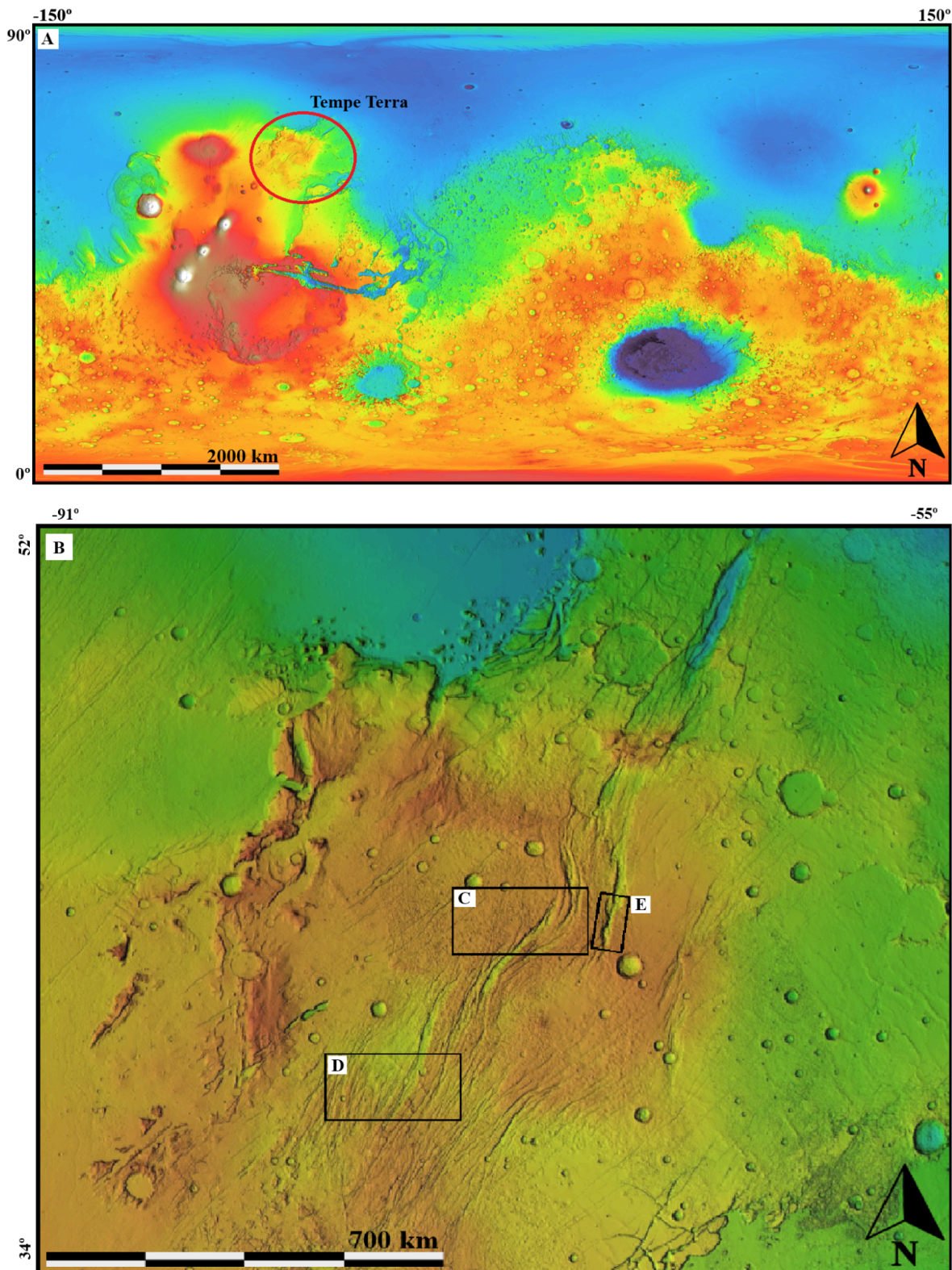
As figuras produzidas e os dados analisados no QGIS para este trabalho somam mais de 100 *gigabytes* de material. A base de imagens disponibilizadas pela Caltech somam mais de 100 *terabytes*.

A partir das porções destacadas na [figura 4](#), foram feitas interpretações em desenhos esquemáticos que demonstram as falhas e crateras principais da porção central do rifte de *Tempe Terra*, bem como os grabens destacados em cinza, para que possa-se

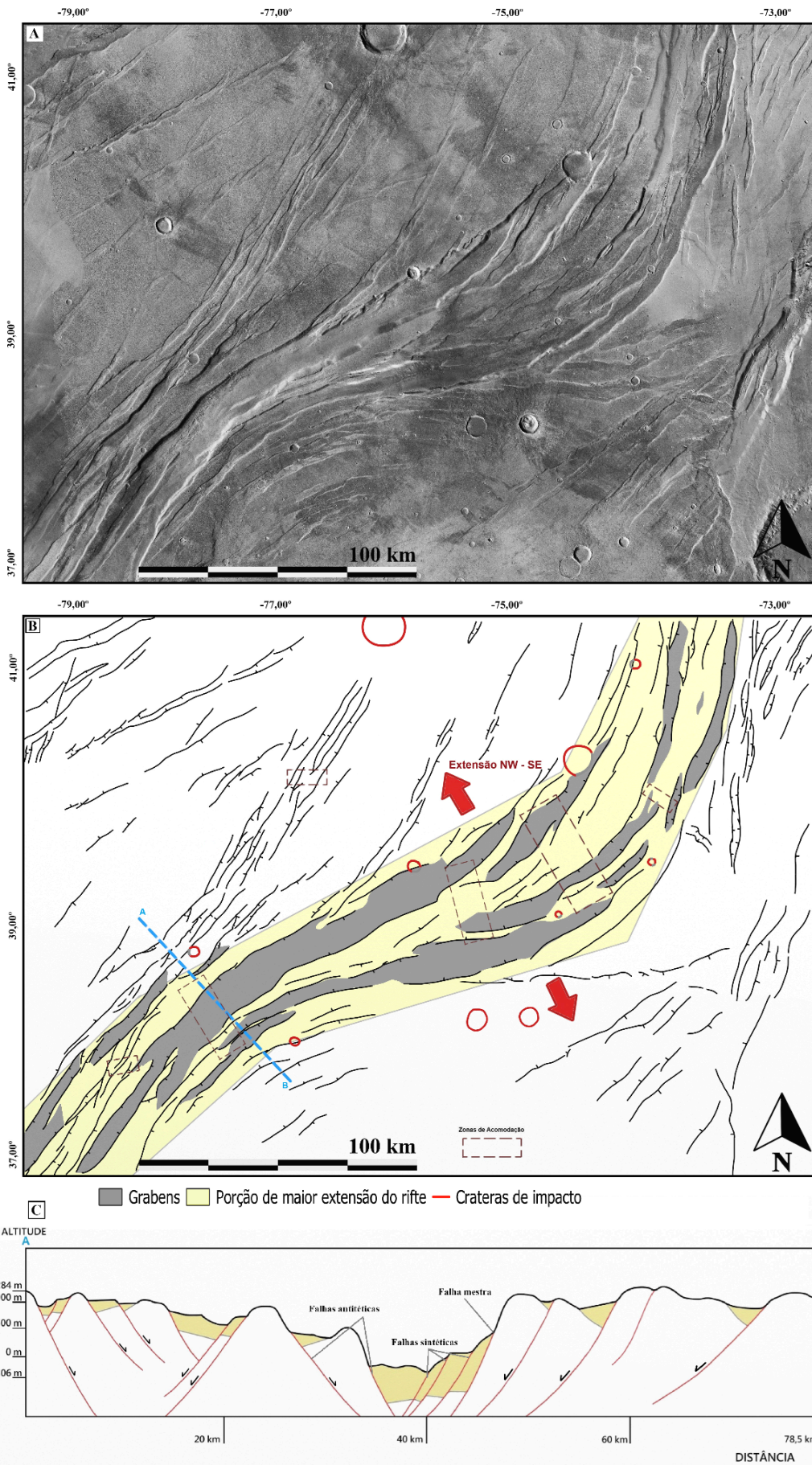
---

<sup>1</sup> O ‘*The Murray Lab*’ pode ser acessado pelo link: [The Murray Lab - Global CTX Mosaic of Mars \(powered by Esri\) \(caltech.edu\)](http://TheMurrayLab.github.io/)

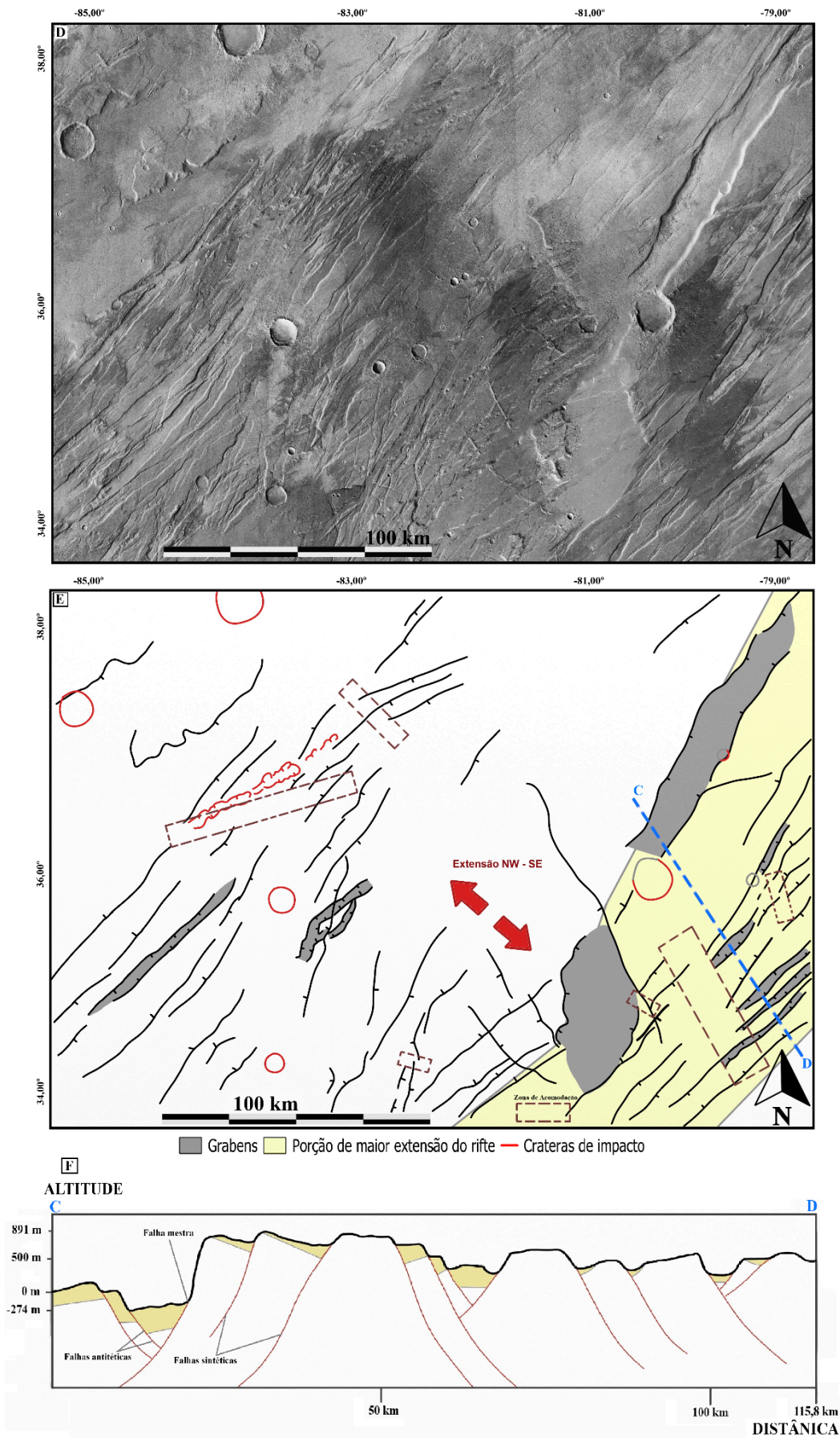
delimitar os estilos estruturais. A região central do rifte foi escolhida para análise e interpretação por demonstrar uma grande variedade de estilos estruturais, além de possuir falhas produzidas através de bombardeamento de meteoritos.



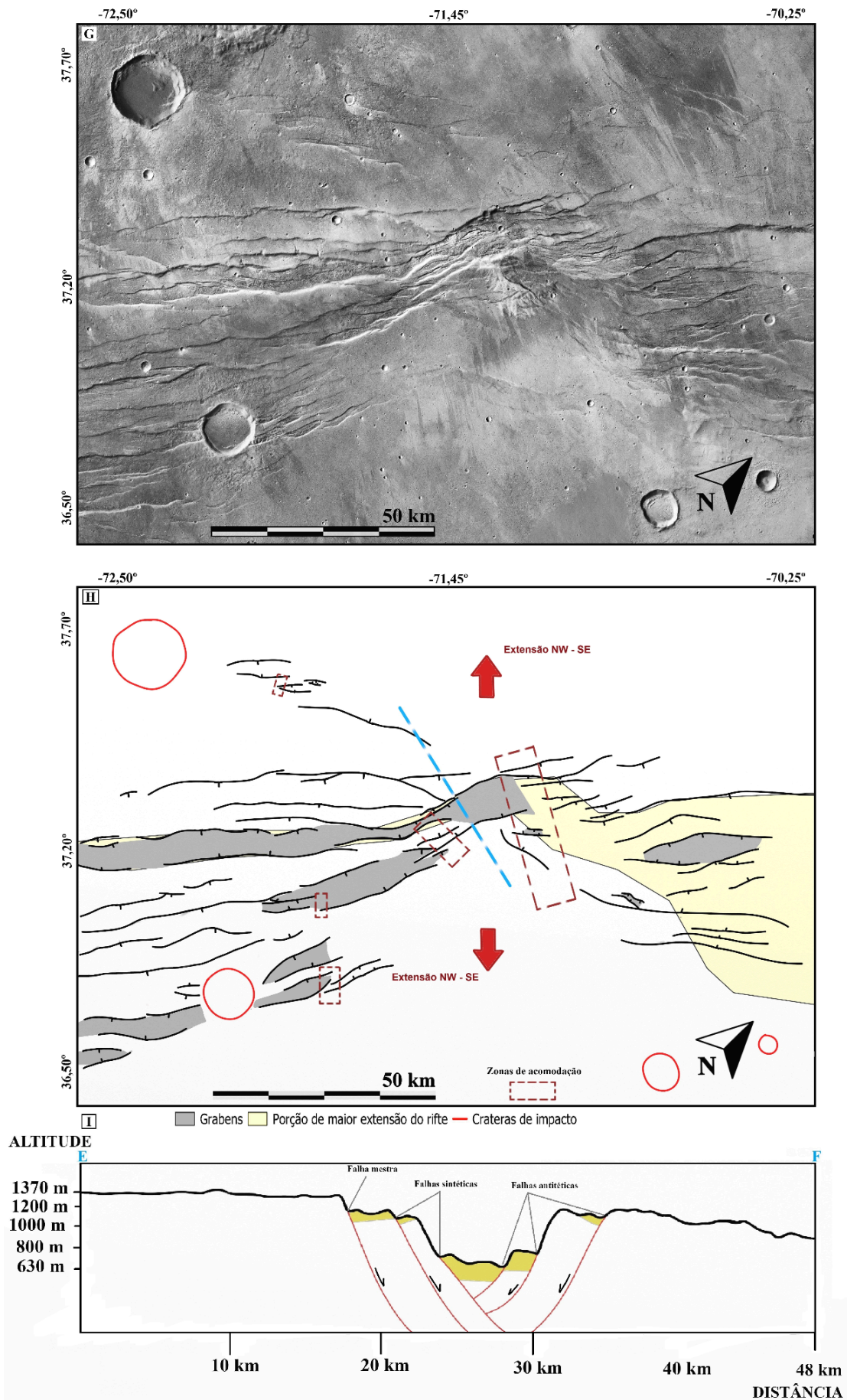
**Figura 4.** Localização das estruturas de maior tamanho apresentadas nas figuras a seguir. **A)** Globo de Marte com foco na região de *Tempe Terra*. **B)** Localização das estruturas em *Tempe Terra*. **C)** Porção centro nordeste do rifte principal. **D)** Porção centro sudoeste do rifte principal. **E)** Rifte secundário do sistema de riftes de *Tempe Terra*. Modificado de Genova *et al.* (2016).



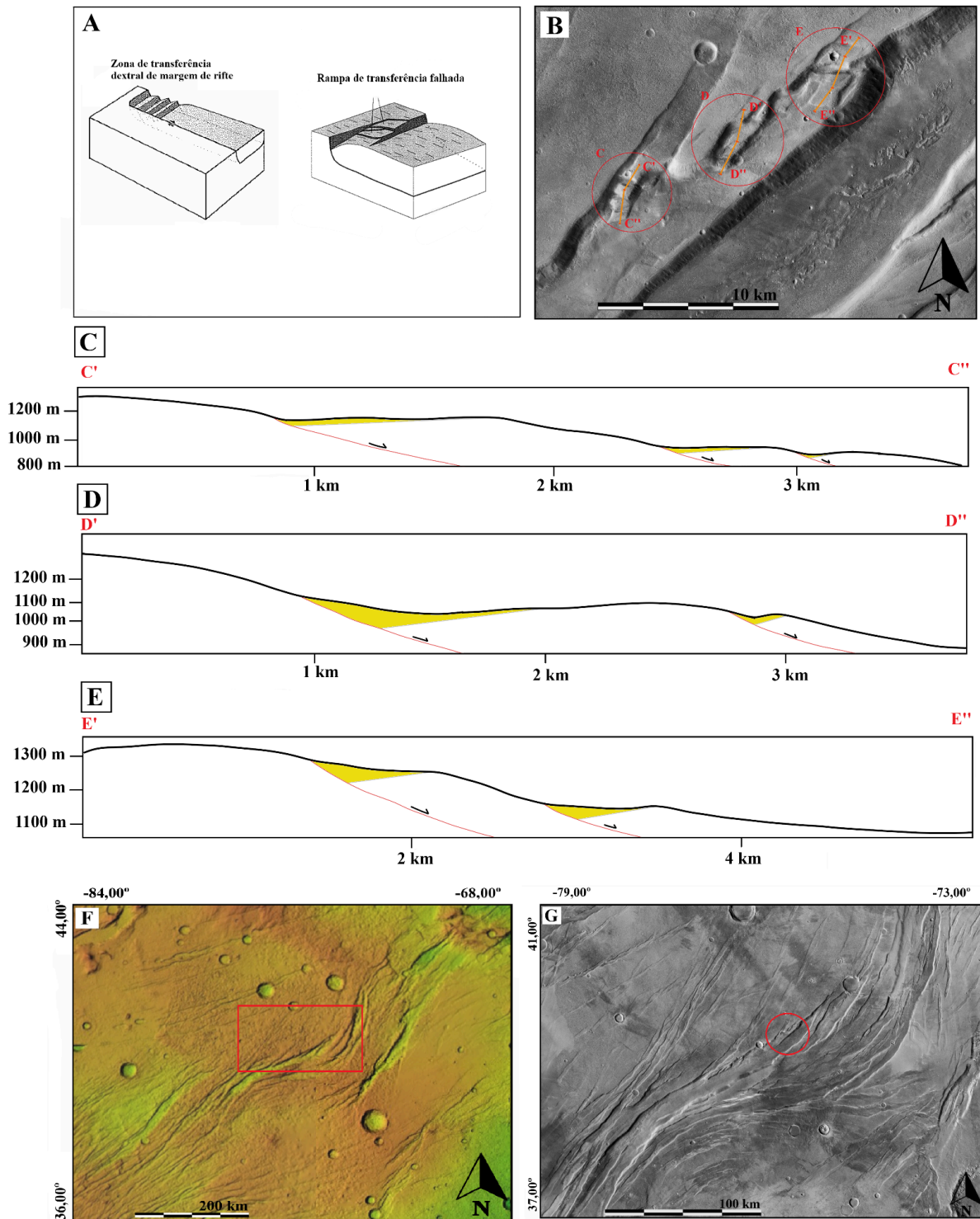
**Figura 5.** Porção centro nordeste do rifte principal de *Tempe Terra*. **A)** Imagem no espectro visível do rifte em preto e branco. **B)** Desenho esquemático da interpretação dos estilos estruturais da região. **C)** Perfil esquemático da seção A - B.



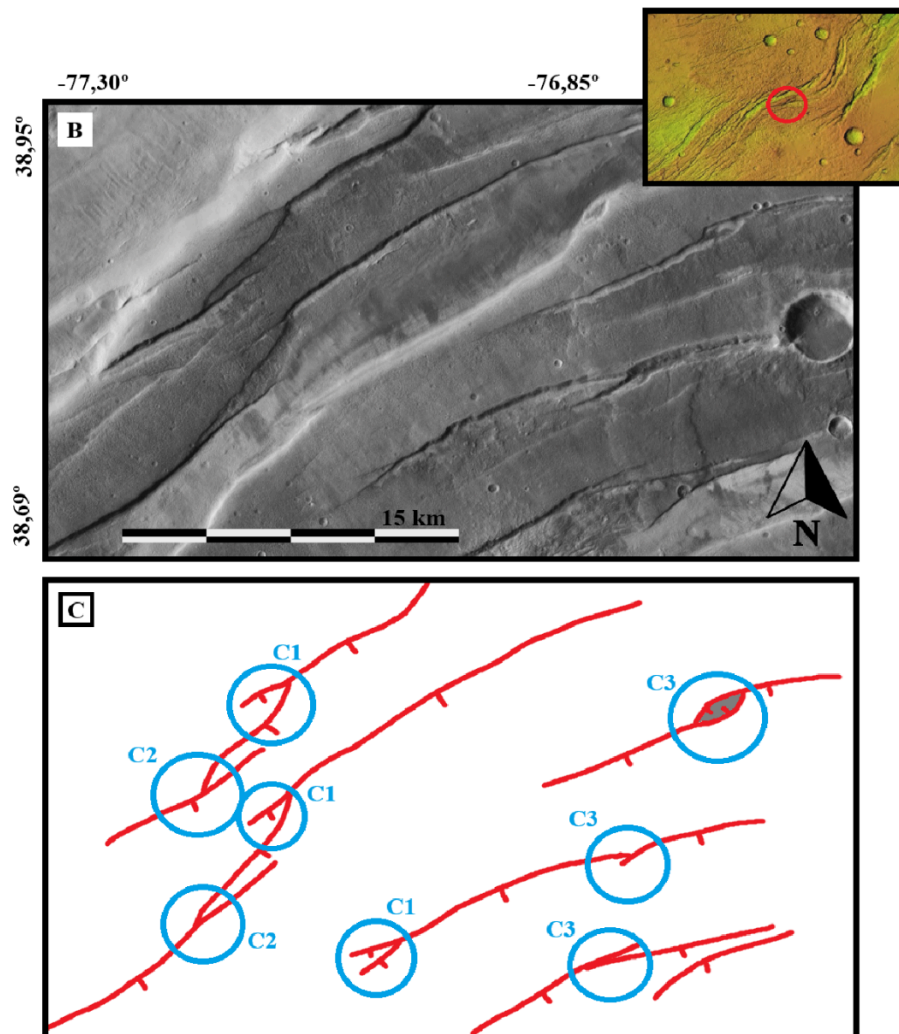
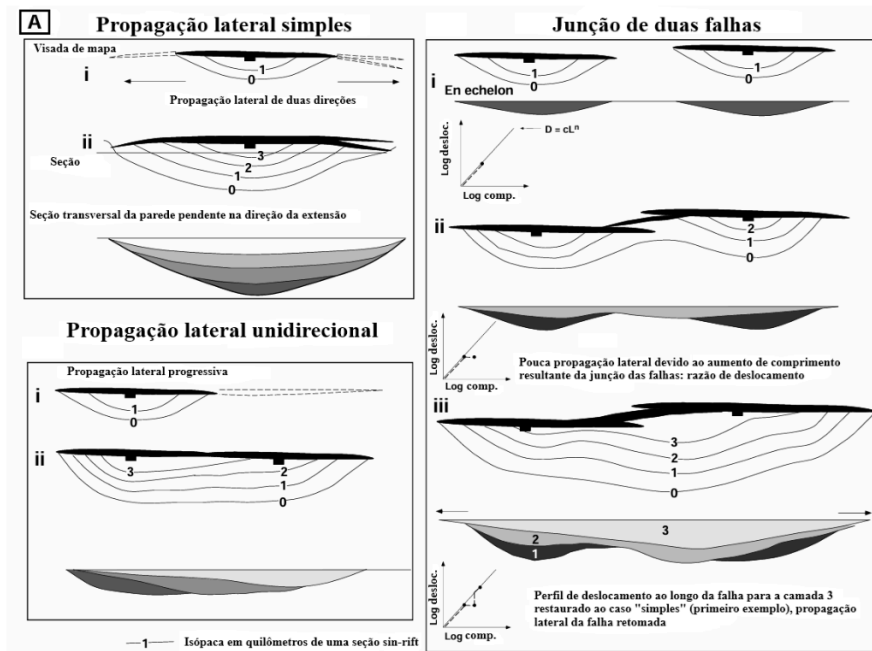
**Figura 6.** Porção centro sudoeste do rifte principal de *Tempe Terra*. **D)** Imagem no espectro visível do rifte em preto e branco. **E)** Desenho esquemático da interpretação dos estilos estruturais da região. **F)** Perfil esquemático da seção C - D.



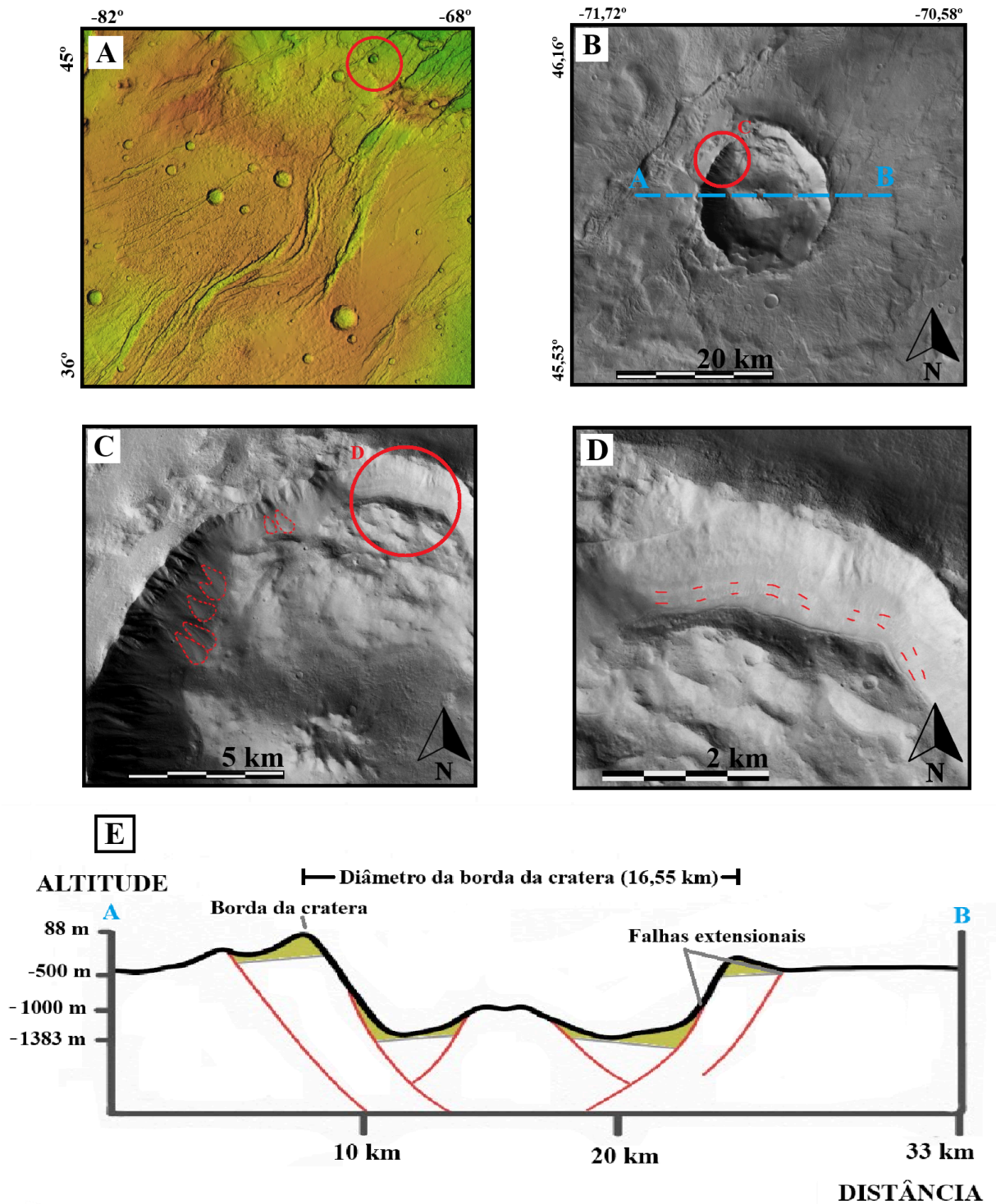
**Figura 7.** Rifte secundário de *Tempe Terra*. **G)** Imagem no espectro visível do rifte em preto e branco. **H)** Desenho esquemático da interpretação dos estilos estruturais da região. **I)** Perfil esquemático da seção E - F.



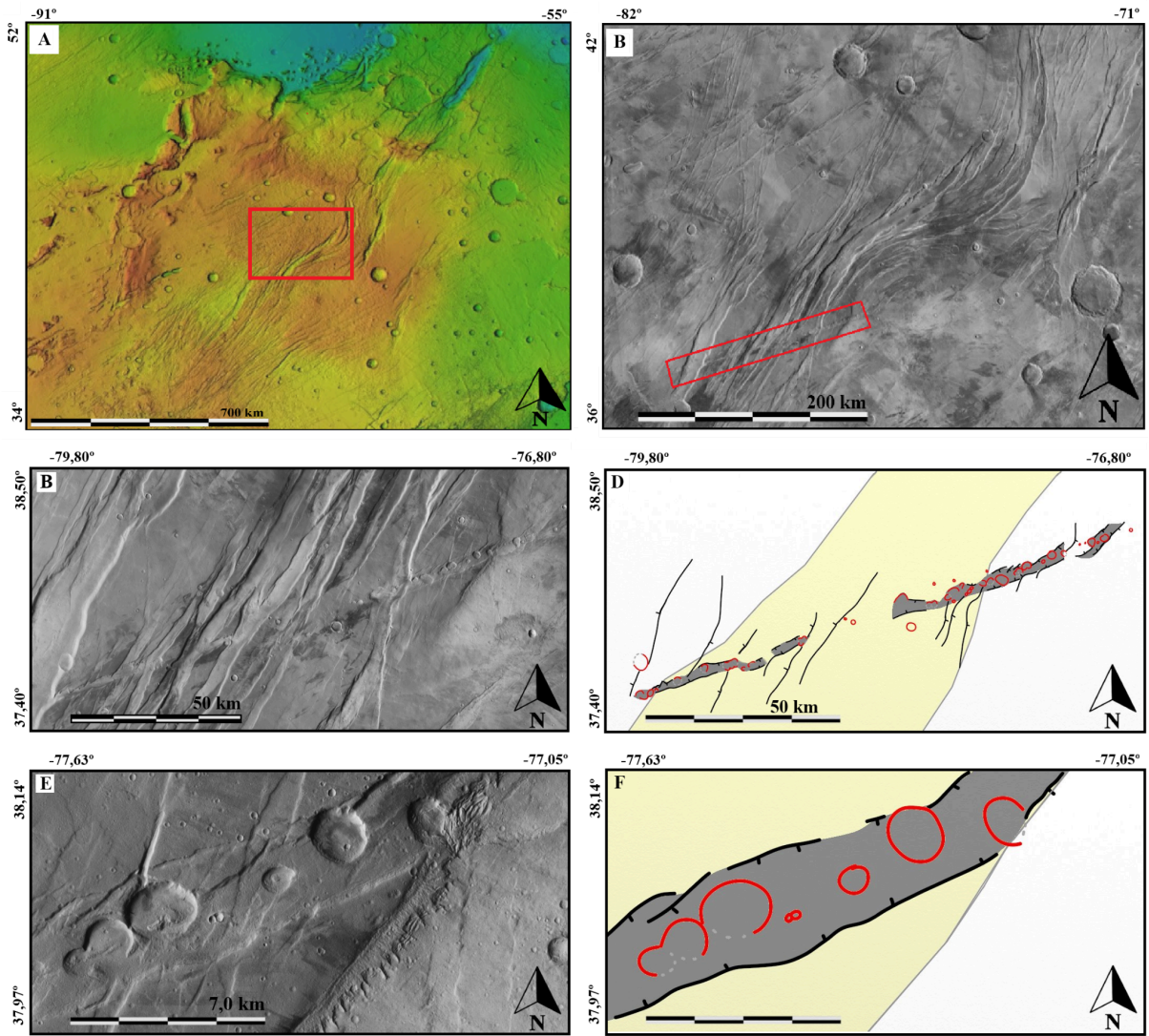
**Figura 8.** Feições estruturais localizadas na porção centro NE do rifte principal de *Tempe Terra*. **A)** Figuras ilustrativas de estruturas relacionadas a zonas de acomodação. Modificado de Faulds (1998). **B)** Figura com as estruturas destacadas por um círculo vermelho. Pode-se observar três rampas de transferências falhadas como margens de rifte. **C)** Perfil topográfico da rampa C. **D)** Perfil topográfico da rampa D. **E)** Perfil topográfico da rampa E. **F)** Mapa regional de *Tempe Terra* com destaque para a localização da porção centro NE do rifte principal. **G)** Porção centro NE do rifte principal com destaque para as feições demonstradas acima.



**Figura 9.** Estilos de falhas em razão da propagação sofrida. **A)** Modelo conceitual desenvolvido por Morley (1999) com três tipos de evolução de falhas. **B)** Imagem em espectro visível da porção central do rifte de *Tempe Terra* com foco em diferentes estilos de falha. **C)** Desenho esquemático onde os três tipos de evolução de falhas propostas por Morley (1999) aparecem: C1: Propagação lateral simples; C2: Junção de duas falhas; C3: Propagação lateral unidirecional das falhas. Modificado de Morley (1999).

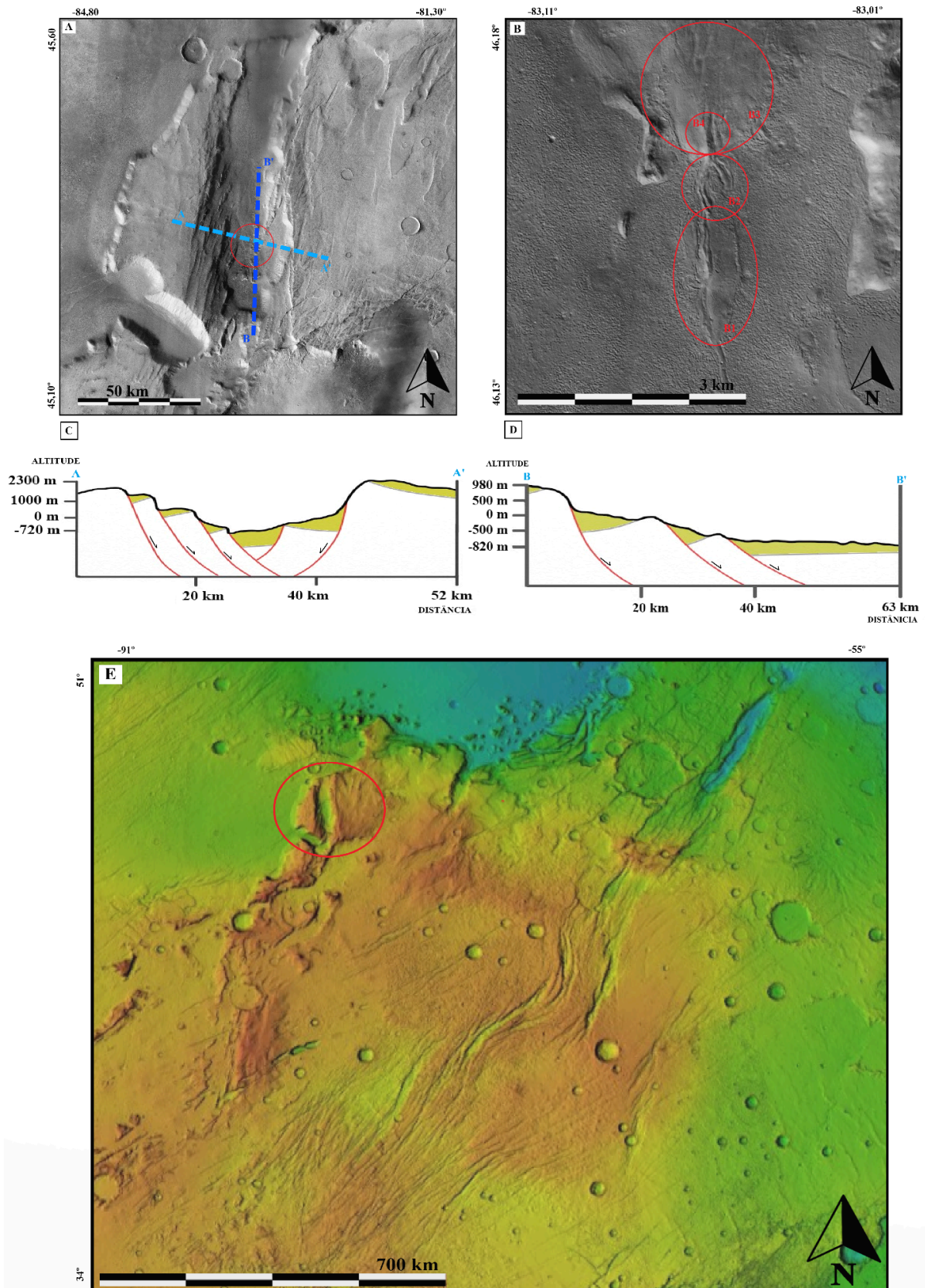


**Figura 10.** Cratera de impacto com pico central. **A)** Localização da cratera, destacada em vermelho, no norte da região de *Tempe Terra*. **B)** Panorama geral da cratera, com destaque para a região da imagem C e delimitação do perfil A - B. **C)** Imagem ampliada da cratera, demonstrando cones de dejeção (destacados em linha pontilhada) e destaque para região da imagem D, observa-se o pico central da cratera ao sul da imagem. **D)** Camadas deposicionais da região reveladas na escarpa produzida pelo impacto do meteorito. **E)** Perfil esquemático da seção A - B.

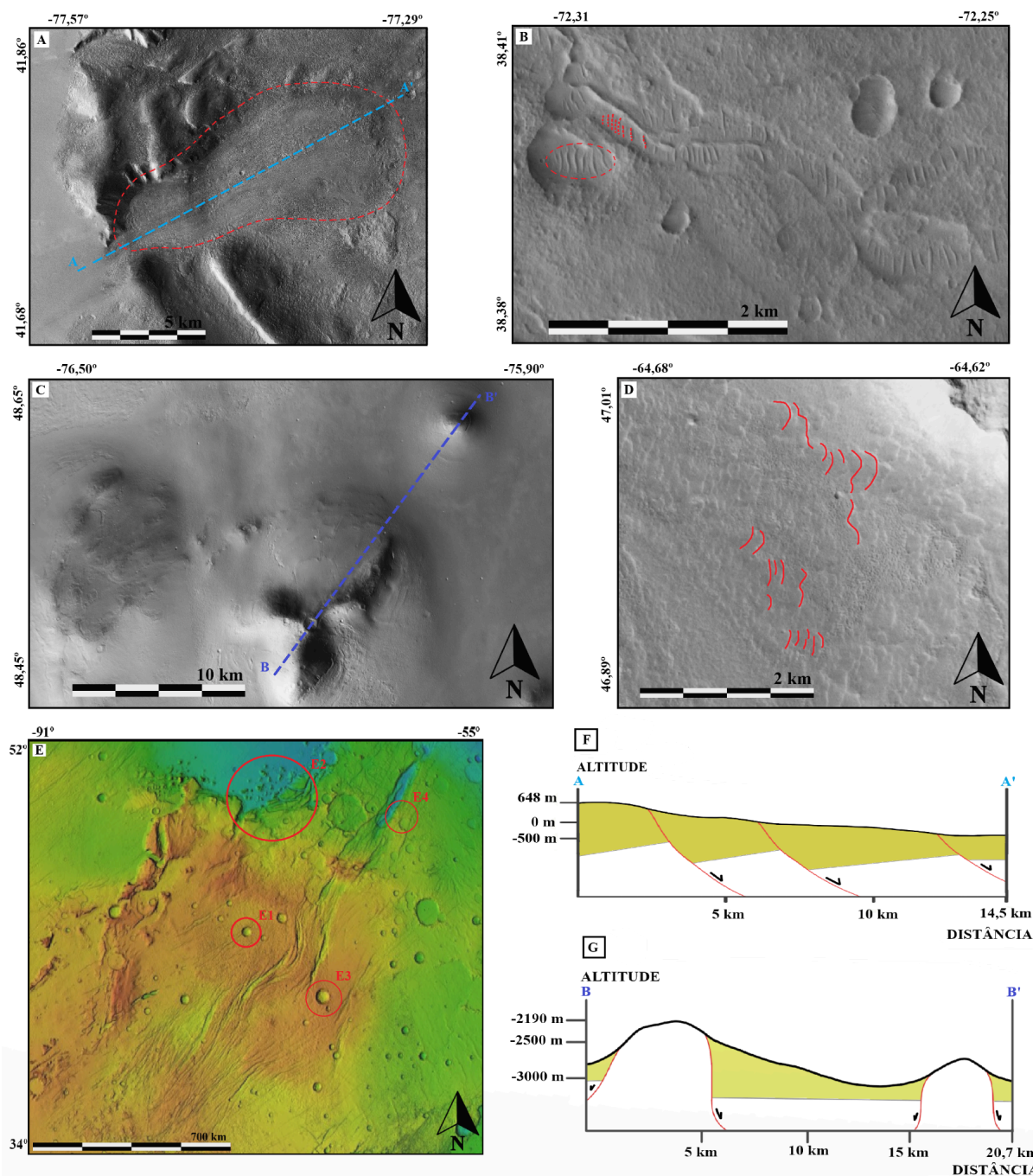


Grabens
  Porção de maior extensão do rifte
  Crateras de impacto

**Figura 11.** Sistema de crateras em bombardeio gerando *trend* de falhas. **A)** Localização da imagem **B).** Visão geral da porção central do rifte de *Tempe Terra* com destaque para a região demonstrada nas imagens acima. **C)** Imagem do sistema de crateras em bombardeio. **D)** Desenho esquemático da relação das crateras com as falhas geradas pelo bombardeio, produzindo grabens. **E)** Imagem ampliada da relação das crateras com as falhas produzidas. **F)** Desenho esquemático da relação das crateras ampliadas com as falhas geradas.

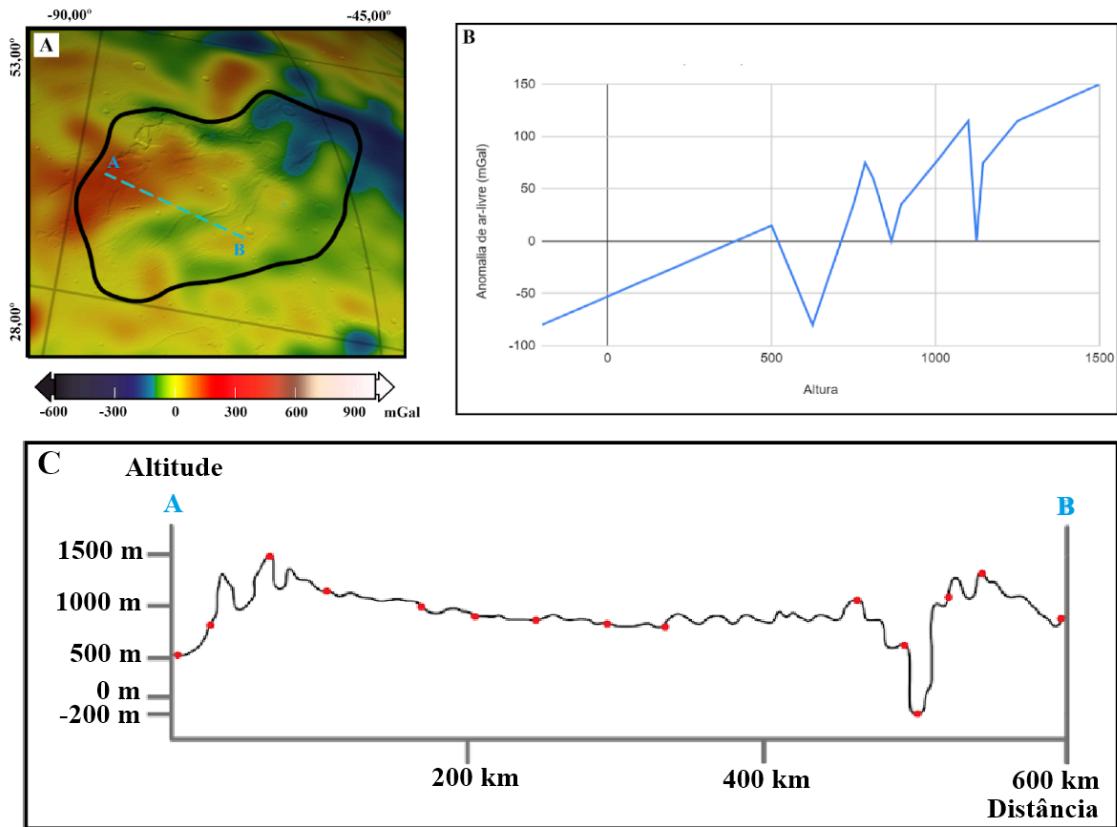


**Figura 12.** Esker localizado a NW de *Tempe Terra*. **A)** Imagem do esker no espectro visível, com os perfis A - A' e B - B' traçados. Destaca-se a região ampliada na imagem B. **B)** Imagem ampliada das estruturas morfológicas glaciais. B1: Cume largo e arredondado com uma depressão ao longo do flanco oeste; Encostas inferiores largas; Proeminência central com topo afiado e múltiplos cumes (Butcher *et al.*, 2020). B2: Elevação estreita formada pelo depósito de sedimentos (Butcher *et al.*, 2020). B3: Proeminência central aguda (Butcher *et al.*, 2020). B4: Proeminência central espatulada (Butcher *et al.*, 2020). **C)** Seção A - A'. **D)** Seção B - B'. **E)** Imagem do rifte principal de *Tempe Terra*, destaca-se o esker demonstrado nas imagens acima.

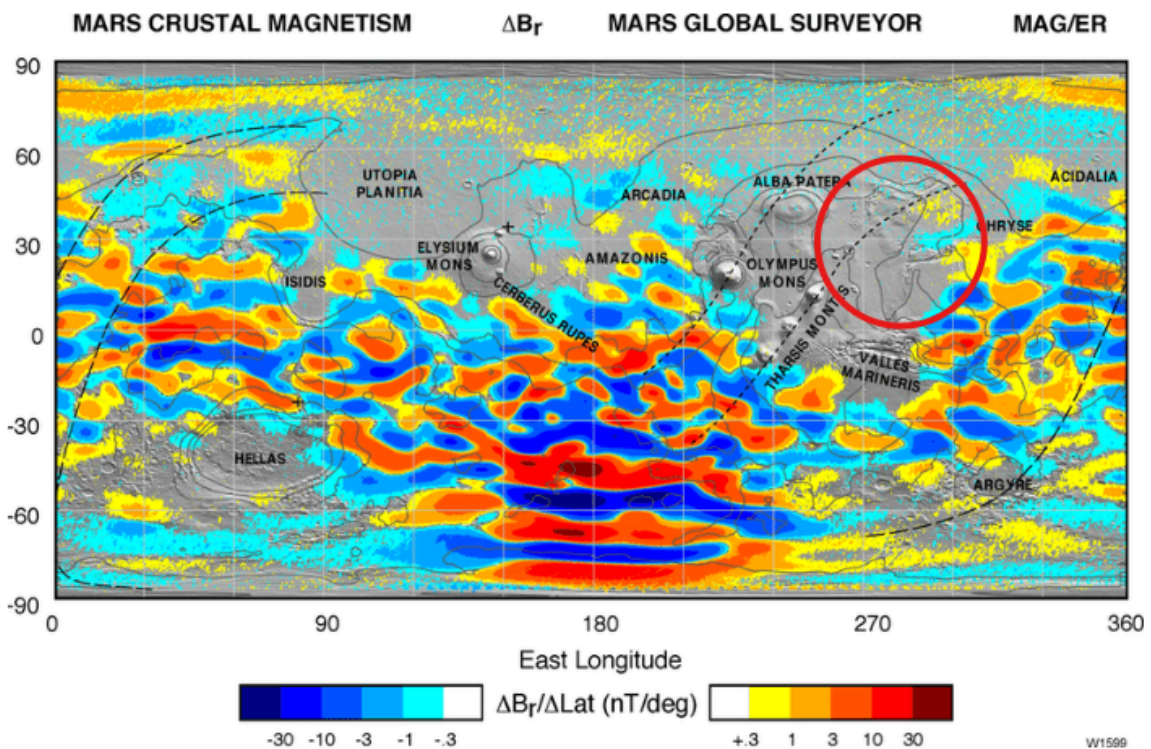


**Figura 13.** Mosaico de feições morfosedimentares variadas encontradas na região de *Tempe Terra*. **A)** Depósito de tálus na encosta fabricada por uma cratera de impacto. **B)** Dunas transversais localizadas em vales no fundo de crateras de impacto. Comumente as crateras possuem dunas alinhadas ortogonalmente à direção do vento, nos vales internos das crateras. Algumas das dunas estão delimitadas em vermelho. **C)** Topografias residuais ao norte da região de estudo. Pode-se observar no canto superior direito da imagem uma morfologia de relevo residual, além da feição central, onde ambas as estruturas estão deslocadas do planalto de *Tempe Terra*. **D)** Campo de dunas barcánoides ou parabólicas no interior de crateras. Algumas das dunas estão delimitadas em vermelho.

Como observa-se na [figura 10 'C'](#), os cones de dejeção costumam ser feições diminutas, quase sempre relacionados às escarpas de riftes ou crateras. Devido a baixas taxas de erosão não possuem expressividade. Além disso, como vê-se na [figura 13 'A'](#), depósitos de tálus comumente estão relacionados a escarpas de crateras, enquanto dunas (imagens B e D) estão dispostas ou no interior de crateras, ou próximas ao vale do rifte.



**Figura 14.** Análise de gravimetria de ar-livre da região de *Tempe Terra* através de um perfil NW - SE que passa pelo rifte principal. **A)** Imagem da gravimetria de ar-livre da região. Modificado de Genova *et al.* (2016) - domínio público, NASA. **B)** Gráfico da anomalia de ar-livre em função da altitude. **C)** Perfil topográfico de elevação com pontos em vermelho dos locais onde as análises de gravimetria de ar-livre foram retiradas.



**Figura 15.** Mapa do campo magnético crustal em Marte, com imagens obtidas da Mars Global Surveyor. Pode-se observar que a região destacada no círculo vermelho, *Tempe Terra*, não possui assinaturas relevantes, demonstrando que a região não possui anomalia magnética significativa. Modificado de Connerney *et al.* (2015).

## 6. DISCUSSÃO

### 6.1 Tectônica e estilos estruturais

Tanto a porção centro sudoeste quanto a porção centro nordeste do rifte principal de *Tempe Terra* e o rifte secundário (figuras [5](#), [6](#) e [7](#)) apresentam diversos grabens delimitados por conjuntos de falhas que, em geral, estão no mesmo eixo de direção do rifte. Na porção de maior distensão tectônica (demarcada em amarelo claro (figuras [5](#), [6](#) e [7](#))) pode-se observar que as falhas mergulham em direção ortogonal ao eixo principal do *trend* tectônico, onde o rifte tem uma direção que varia em WNW - ESE até NNW - SSE, com a maioria da disposição em uma direção NW - SE.

Nos três casos apresentados, pode-se observar que as falhas se conectam através de pronunciadas zonas de acomodação, por vezes se estendendo por dezenas de quilômetros, quase sempre associadas a rampas de revezamento. Os perfis topográficos demarcados nas estruturas demonstram que blocos em sistemas de falhas em dominó aparecem por toda a região.

Vê-se que o mergulho de falhas é ortogonal, ou semi-ortogonal, sugerindo que a extensão tectônica se dá em NW - SE. Através da comparação com modelos e análogos terrestres pode-se verificar a extensão do rifte. McClay *et al.* (2002) conduziu experimentos em caixa de areia que produziram falhas ortogonais ou oblíquas à direção de extensão.

O rifte de *Tempe Terra* compartilha algumas similaridades importantes com os modelos analógicos de caixa de areia produzidos por McClay *et al.* (2002). Na [figura 16](#), tanto a orientação do eixo do rifte, quanto a disposição das falhas que limitam os principais grabens seguem orientações relativamente parecidas.

Observando as figuras [5](#), [6](#) e [7](#) e comparando-as ao modelo analógico disposto na [figura 16](#), pode-se inferir a zona de maior extensão do rifte (em sombreamento amarelo), sendo a porção onde a maioria das falhas se localizam.

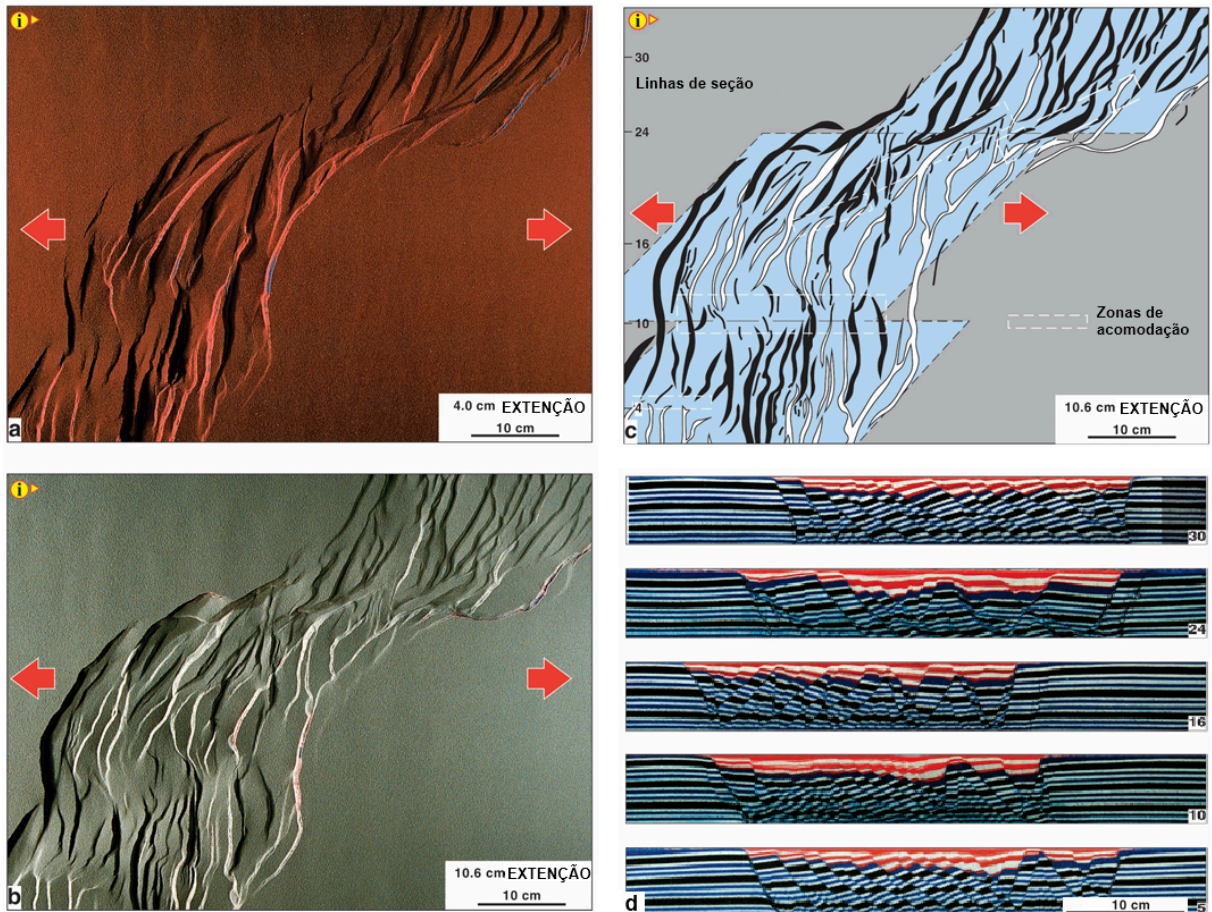
Somado a isso, também pode-se fazer uma comparação direta das zonas de acomodação possuem e a dinâmica tectônica, onde tem-se uma mudança de orientação das falhas. Tanto em Marte quanto no modelo de caixa de areia, observa-se a presença de zonas de acomodação.

Segundo Michael e Kenneth (2000) as deposições de rochas sedimentares em Marte podem chegar a até 4 km de espessura. Zent (1998) discute a espessura do regolito no planeta vermelho, onde, em algumas regiões, a camada de deposição pode chegar a até 200 m de espessura.

No entanto, as coberturas e preenchimentos sedimentares apresentadas nos perfis topográficos produzidos foram estimadas, ainda que existam algumas estimativas acerca da camada de regolito em Marte, como demonstrado por Zent (1998). Não há estudos precisos sobre a profundidade de deposição na região analisada, portanto, baseando-se em

exemplos terrestres, onde nos grabens mais profundos em vales de riftes há uma camada de preenchimento mais espessa, os perfis produzidos seguindo esta lógica.

Observando os perfis das figuras 5, 6 e 7, nota-se que as falhas produzidas pelo processo de rifteamento criaram um vale central. Comparando com os modelos propostos na literatura, vê-se uma correlação entre o que foi obtido neste trabalho com aquilo que foi demonstrado através de modelos analógicos experimentais.

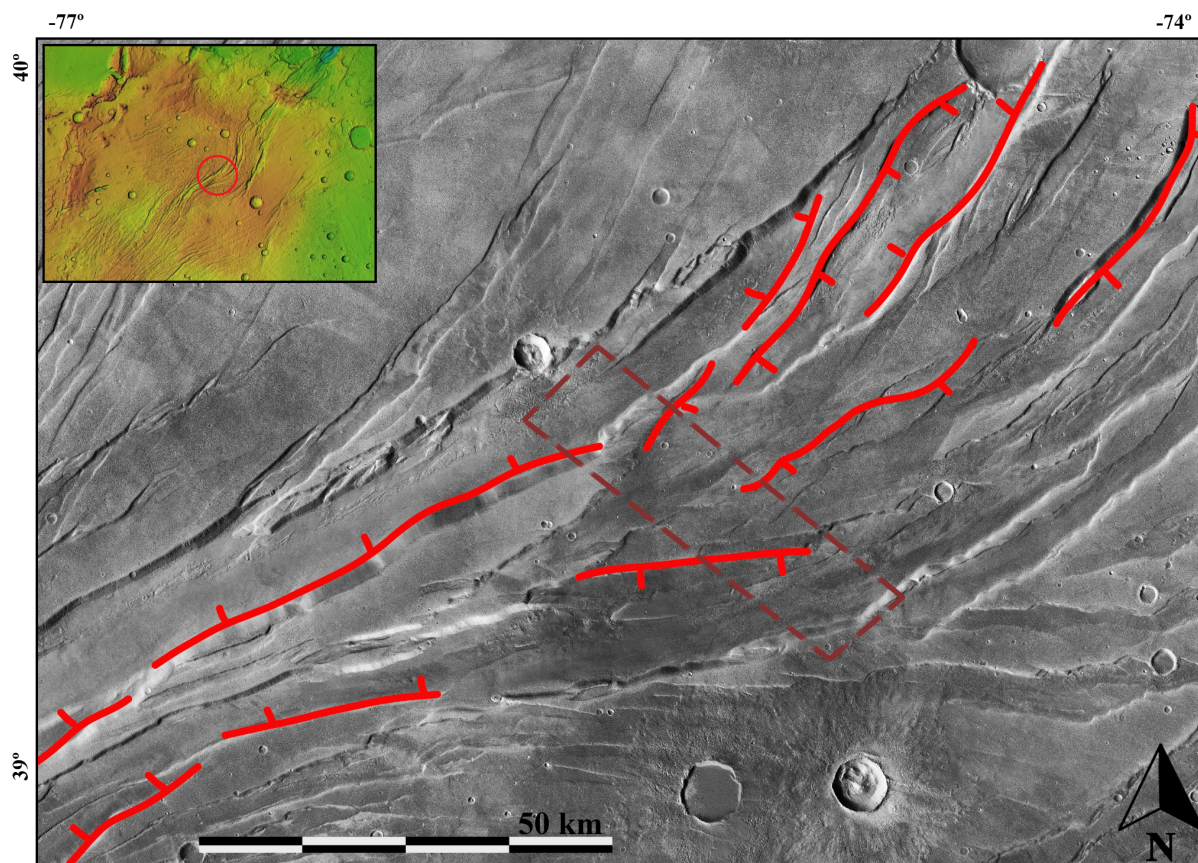


**Figura 16.** Modelo produzido em caixa de areia de um rifte em disposição oblíqua (com eixo de direção a 45°). **a)** Vista superior após uma extensão de 4 cm. **b)** Vista superior após uma extensão de 10.6 cm. **c)** Diagrama interpretativo de falhas que se conectam através de zonas de acomodação. **d)** Seções estruturais ao longo do modelo. Retirado e modificado de McClay *et al.* (2002).

Nos três perfis produzidos, é possível observar uma série de falhas que geram blocos em dominó, compatíveis com análogos terráqueos. Os grabens que aparecem tanto nos desenhos esquemáticos, quanto nos perfis topográficos apontam para a porção que sofreu maior subsidência, o vale central do rifte (Orlov *et al.*, 2023).

Faulds e Varga (1998) propuseram modelos de estilos estruturais que se relacionam com a dinâmica de riftes. Como pode-se observar na figura 8, o rifte de *Tempe Terra* apresenta rampas de transferência falhadas em zonas de liberação. Nas margens NW do rifte aparecem zonas de transferência dextrais (figura 8), ao passo que as margens SE apresentam algumas estruturas sinistras.

Como pode-se observar na [figura 17](#), a cinemática em cada margem do rifte é oposta, onde se vê estruturas dextrais na margem NW (destacadas na [figura 18](#)), observa-se, do lado oposto, estruturas sinistras na margem SE. O perfil topográfico B - B' da [figura 18](#) mostra a escarpa SE do rifte. Através da análise do perfil A - A' é possível interpretar a presença de uma rampa de transferência falhada, assim como na [figura 8](#). Seguindo exemplos expressos na literatura, como McClay *et al.* (2002) e Faulds e Varga (1998), pode-se inferir o aprofundamento das falhas, levando em conta a diferença topográfica produzida pelos depósitos sedimentares.



**Figura 17.** Porção centro NE do rifte principal de *Tempe Terra*. A zona de acomodação está tracejada cor-de-vinho.

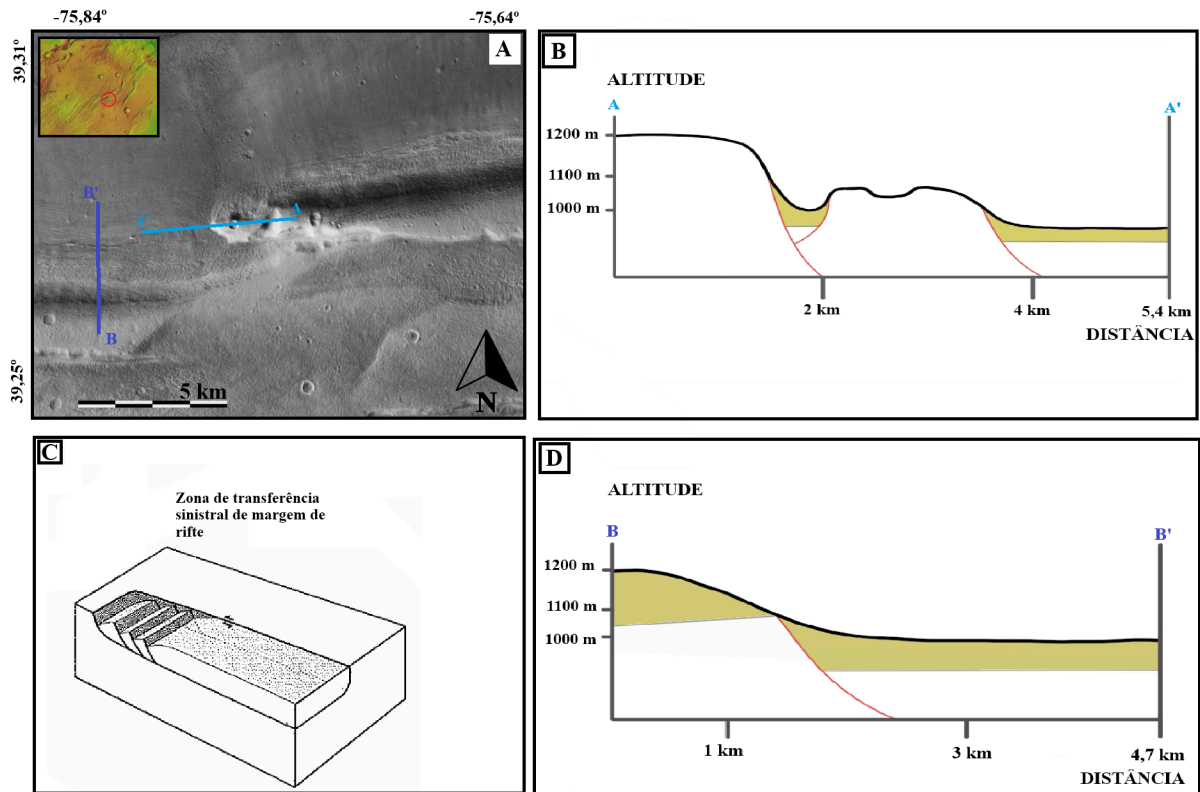
Através da análise das zonas de acomodação dispostas no rifte, e valendo-se dos desenhos esquemáticos propostos por Faulds e Varga (1998), vê-se que muitas das zonas de acomodação são antitéticas sinclinais oblíquas e transversais ou sintéticas oblíquas, conforme demonstrado na [figura 19](#).

Devido às proporções do rifte principal de *Tempe Terra*, é evidente que haja variação destas estruturas ao longo da área estudada, entretanto, as zonas de acomodação oblíquas são as mais comuns, sejam elas sintéticas ou antitéticas.

Morley (1999) propõe que existam três padrões de evolução das falhas. O primeiro diz respeito a um deslocamento simples, onde o centro da falha sofre maior deslocamento, que diminui conforme se direciona para as extremidades da falha; o segundo é tido como deslocamento variável, onde há a ligação de falhas em diferentes padrões; o terceiro é

quando há uma propagação assimétrica e uma porção da falha se movimenta ao passo que a outra mantém-se parada.

Como observa-se na [figura 9](#), o rifte de *Tempe Terra* apresenta a evolução de falhas de acordo com o modelo de Morley (1999), no qual as diversas falhas (ao longo de toda a região de *Tempe Terra*) possuem evidente evolução de seus estilos, proporcionando a observação de: propagação lateral unidirecional; junção de duas falhas; divisão de uma mesma falha, no caso de propagação lateral simples.



**Figura 18.** Zona de transferência sinistral de margem de rifte na margem SE da porção centro NE do rifte principal de *Tempe Terra*. **A)** Imagem no espectro visível da feição como uma rampa de transferência falhada. **B)** Perfil topográfico A - A'. **C)** Modelo de zona de transferência, modificado de Faulds e Varga (1998). **D)** Perfil topográfico B - B'.

É possível fazer uma analogia entre o rifte principal de *Tempe Terra* com alguns análogos terrestres. É demonstrado por McClay *et al.* (2002) um sistema de riftes no Parque Nacional de *Canyonlands*, em Utah, nos EUA. Este sistema compartilha diversas características semelhantes com o rifte aqui exibido.

Tanto *Tempe Terra* quanto *Canyonlands* possuem o mesmo eixo de direção de rifte (NE - SW) e mesma direção extensional (NW - SE). Além disso, observa-se que em ambos os casos, os grabens se conectam por zonas de acomodação, limitados por falhas que trocam a direção do mergulho em zonas de transferência.

Através da análise da [figura 20](#) observa-se que devido aos intensos processos intempéricos da Terra (quando comparado a Marte), as terminações dos grabens e as falhas produzidas pelos processos tectônicos são mais segmentadas, demonstrando como a

ausência de uma atmosfera densa, vegetação e água líquida, produzem terminações bem definidas, como é no caso de Marte.

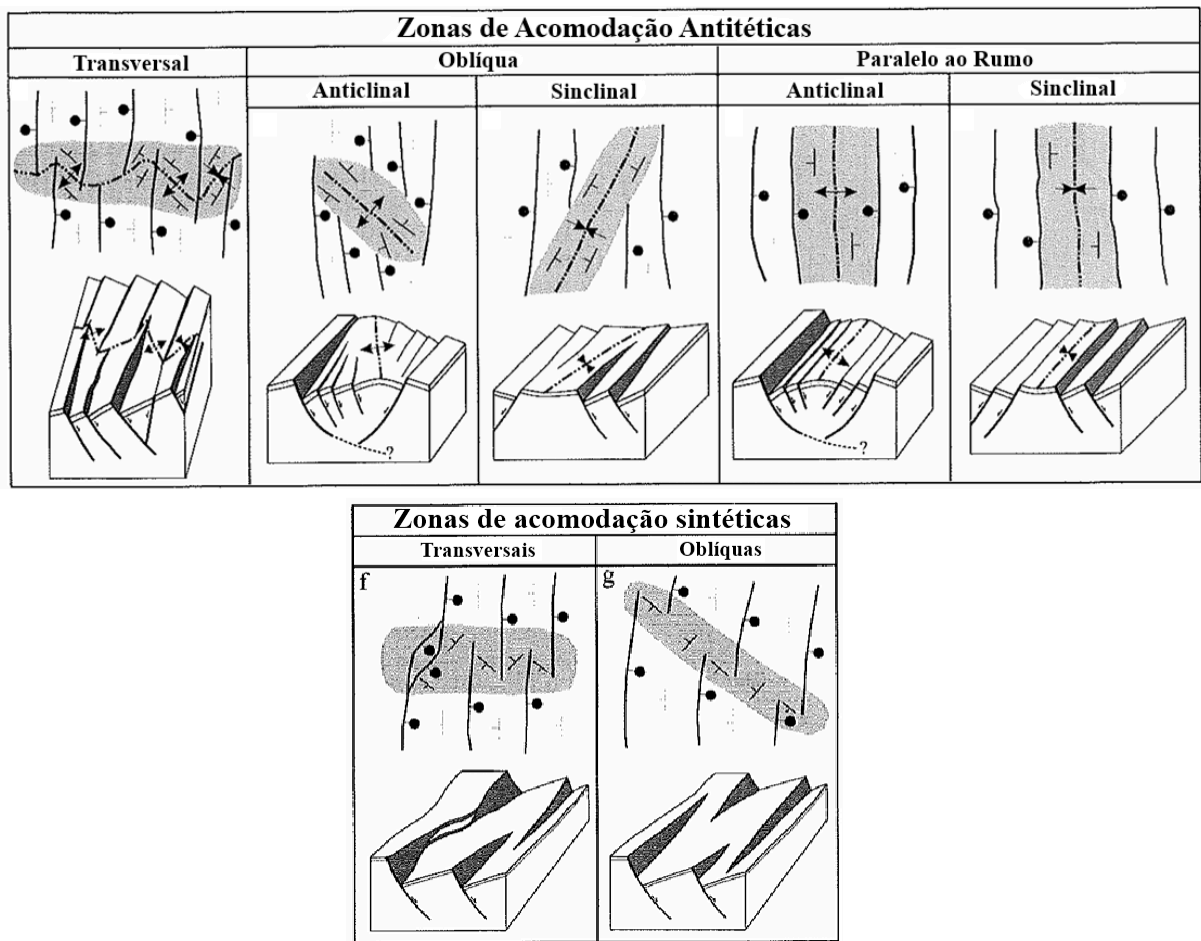


Figura 19. Classificação proposta para zonas de acomodação. Modificado de Faults e Varga (1998).

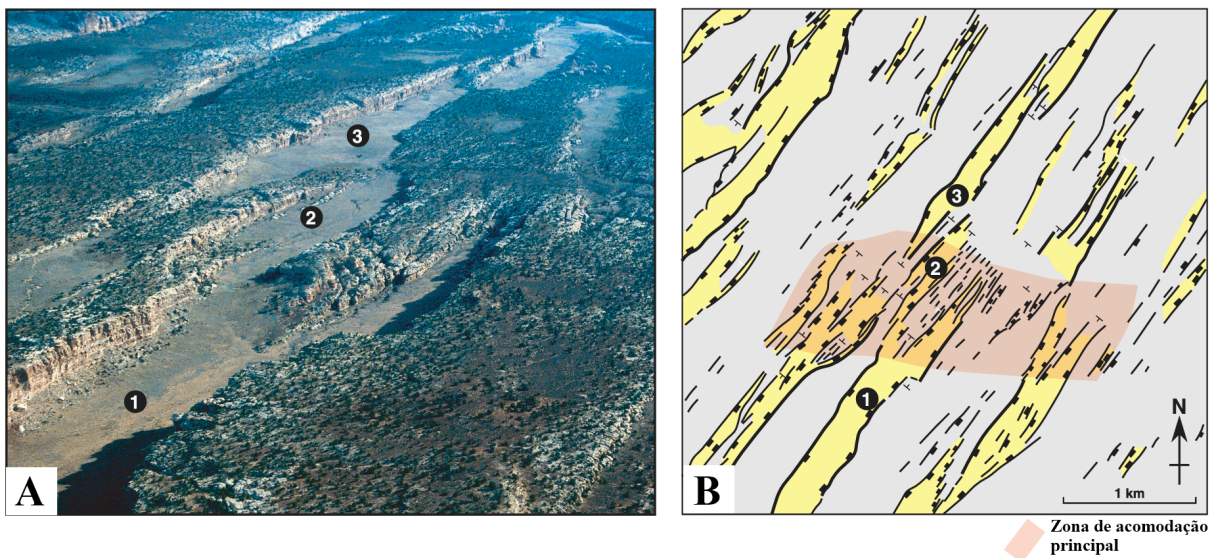
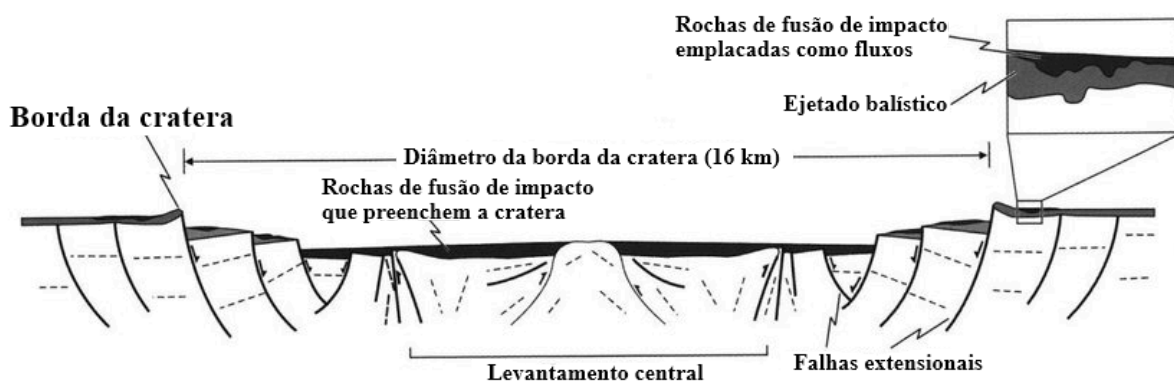


Figura 20. Grabens oblíquos do Parque Nacional de *Canyonlands*, em Utah, EUA. **A)** Imagem aérea dos grabens. **B)** Desenho esquemático do sistema de falhas e grabens que se conectam por zonas de acomodação. Modificado de McClay *et al.* (2002).

## 6.2 Tectônica e estilos estruturais de crateras de impacto

A atmosfera rarefeita de Marte e, em especial,, a proximidade do planeta com o cinturão de asteroides tornam a entrada de meteoritos no planeta mais provável e frequente, como discutido por Warren *et al.* (2019). Pode-se ver que todas as imagens de Marte disponibilizadas estão repletas de crateras. Além disso, a falta de água líquida na superfície e a inexistência de vida (principalmente em forma de vegetação) fazem do planeta vermelho um local com um intemperismo incipiente. Devido a esse fator, Marte sofre uma série de bombardeamentos por meteoritos.



**Figura 21.** Modelo estrutural do impacto de uma cratera de impacto com pico central. Modificado de Osinski *et al.* (2013).

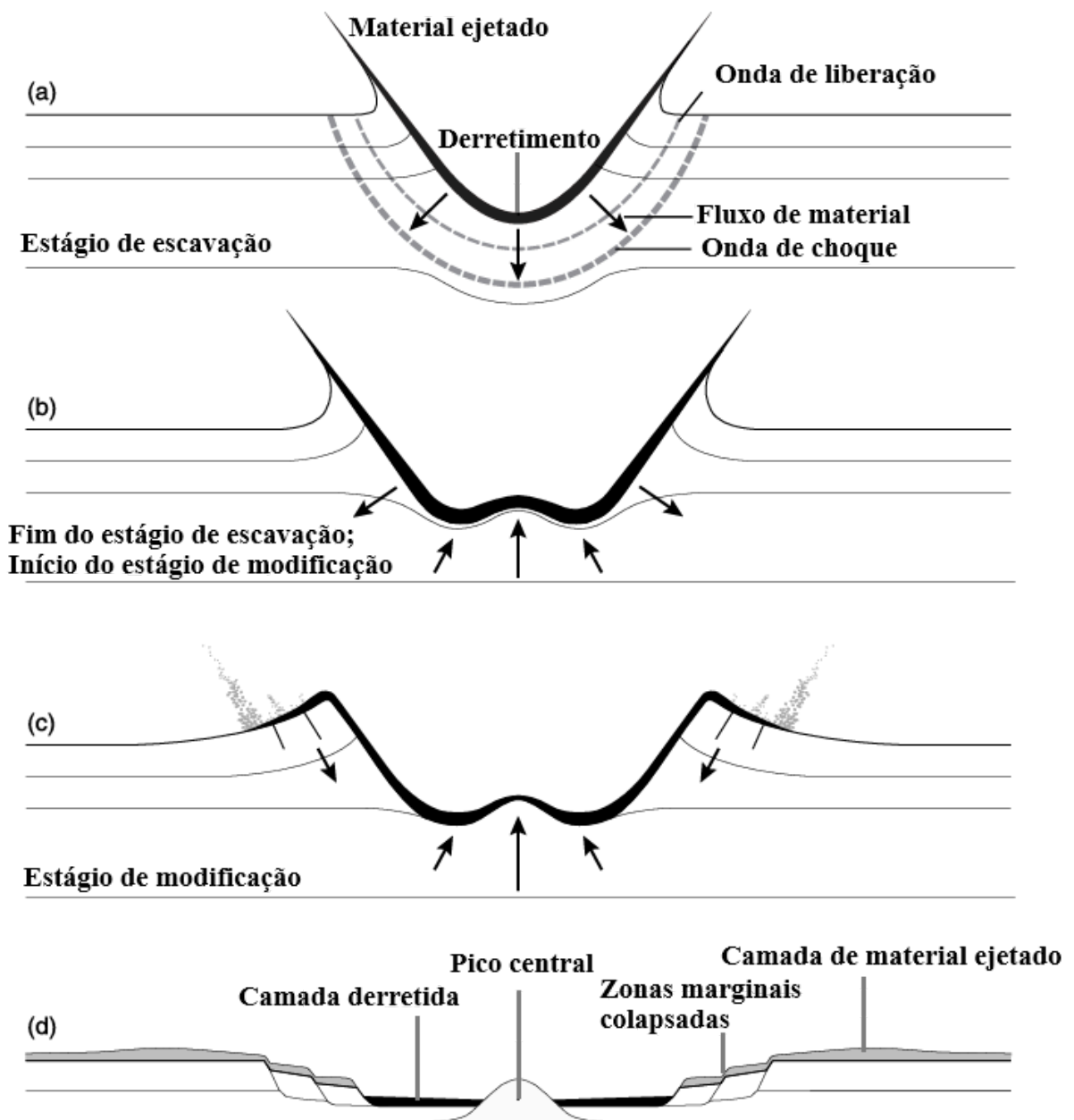
Como observa-se nas [figuras 10](#) e [21](#), um meteorito pode gerar falhas na região atingida, ou seja, um impacto de meteorito é capaz de modificar a tectônica local. Há dois grandes estilos de crateras, aquelas com uma depressão côncava e aquelas com pico central. Impactos de alta energia (quando comparados aos impactos que geram crateras de fundo côncavo) são capazes de gerar crateras com pico central (French 1998).

Devido a uma série de fatores, as crateras resultantes de impactos de alta energia resultam em um pico central. A alta pressão e temperatura de impactos altamente energéticos proporcionam um comportamento elástico, análogo a um fluido, o que permite a formação de uma espécie de gota. Somado a isso, há um rebote elástico do material comprimido que tende à expansão após o impacto. E então, têm-se o colapso das bordas da cratera, que junto com a energia do impacto, geram as falhas direcionadas ao epicentro da colisão, levantando-o (French, 1998).

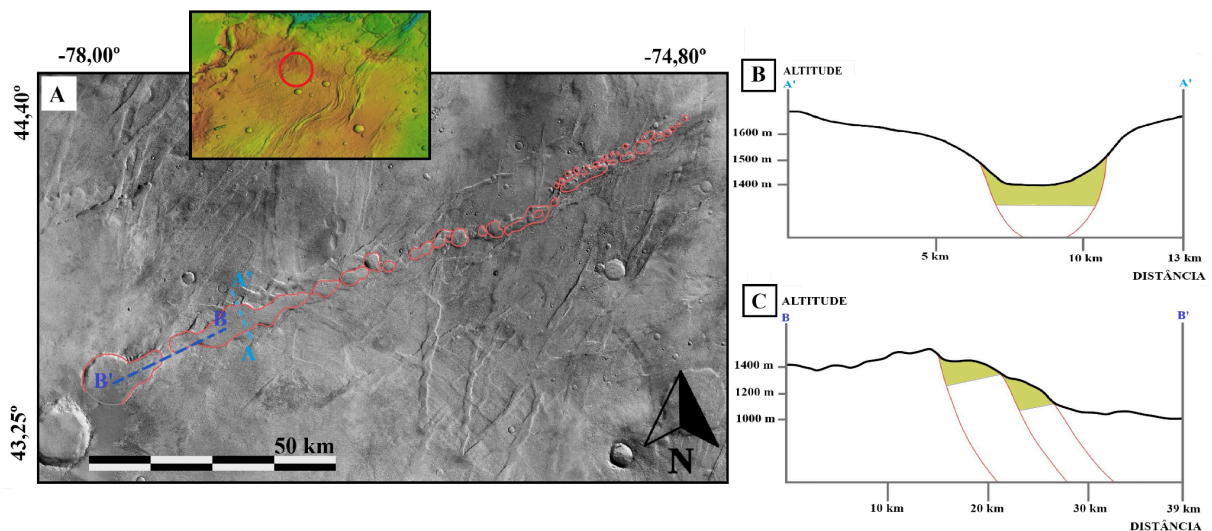
Em toda a região de *Tempe Terra* (e em Marte como um todo) observa-se grabens formados por sucessões de impactos de meteoritos, como vê-se na [figura 11](#), o que foi denominado neste trabalho de 'sistemas de crateras em bombardeio que geram *trends* de falhas'. Na figura é possível visualizar que as falhas destacadas são oblíquas àquelas que produzem as escarpas do rifte. Além disso, o graben formado também é oblíquo ao eixo do rifte principal de *Tempe Terra*.

Em vista disso, e baseando-se na literatura citada ([figura 22](#)), pode-se definir um sistema de falhas que é gerado através do bombardeamento de meteoritos, como observa-se na [figura 23](#), alterando a tectônica da região e produzindo estilos estruturais próprios.

É provável que estas falhas surjam de impactos sucessivos advindos de um mesmo meteoro, o que por vezes resultam em 'crateras arrastadas', todavia, ainda faltam estudos para se definir isto.



**Figura 22.** Modelo de evolução de impacto de alta energia de um meteorito. **a)** Primeiro momento do impacto e início da escavação do local pelo meteorito. **b)** Segundo momento do impacto, início da modificação do terreno. **c)** Estágio de modificação e formação do pico central. **d)** Estágio final do impacto, com a formação de falhas extensionais. Modificado de French (1998).



**Figura 23.** Sistema de crateras em bombardeio gerando *trend* de falhas. **A)** Imagem no espectro visível do sistema de crateras. Observa-se a disposição de crateras menores na direita em cima da imagem, e que aumentam conforme avança-se a esquerda embaixo da imagem. Ao mesmo tempo, o tamanho das crateras aumenta e suas formas se tornam menos esféricas e mais elipsoidais. **B)** Perfil topográfico A - A'. Observa-se um vale formado pelas crateras, compatível com os modelos conceituais apresentados por French (1998) e Osinski *et al.* (2013). **C)** Perfil topográfico B - B'. Observa-se uma diminuição da topografia geral.

### 6.3 Feições sedimentares de *Tempe Terra*

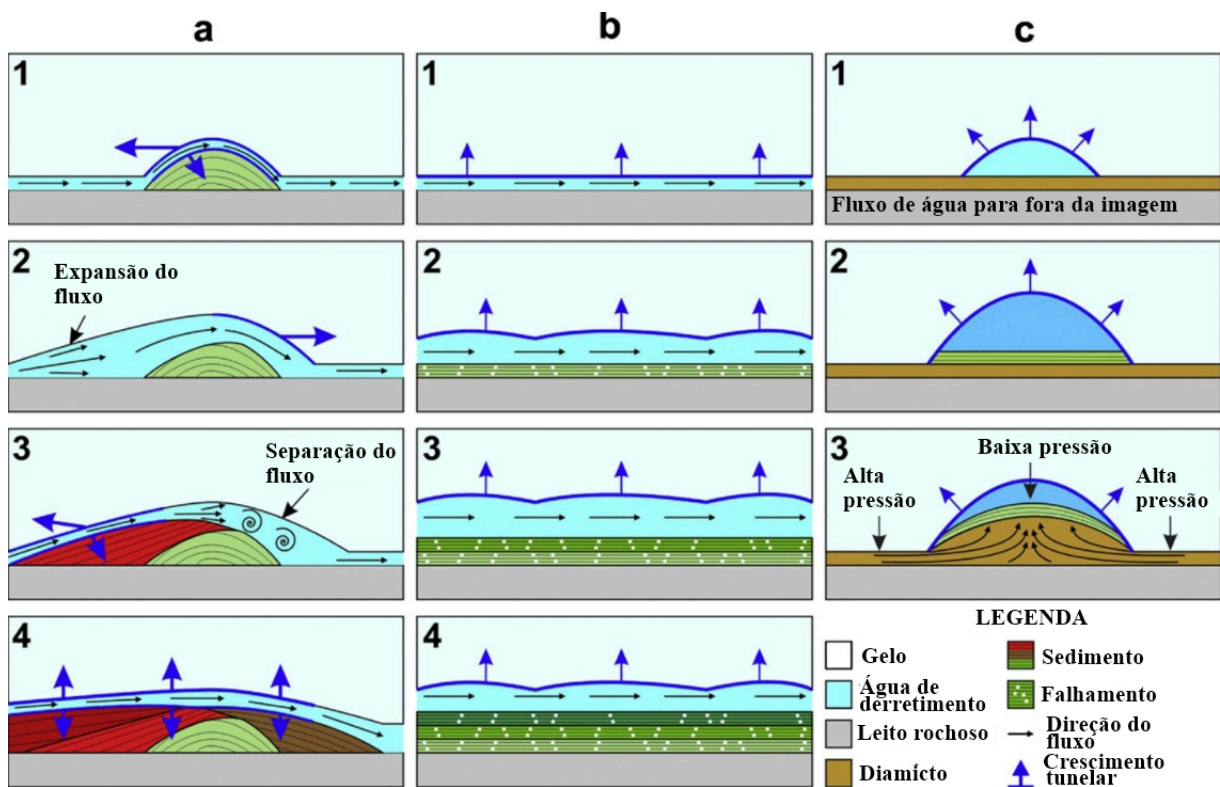
Butcher *et al.* (2020) demonstram a presença de um esker a NW de *Tempe Terra*, o que foi chamado no estudo de 'esker ligado a glacial'. Como observa-se na [figura 12](#), há algumas das estruturas principais relacionadas à dinâmica de transporte de sedimentos, onde Butcher *et al.* (2020) apresentam feições em Marte compatíveis com as de um esker Terra, cujo fluxo de descarga de sedimentos desce a topografia conforme é demonstrada na seção B - B' da [figura 12](#) (Butcher *et al.*, 2017).

Observando o item 'B' da [figura 12](#), é possível analisar, em termos de morfometria, um cume, seguido por uma série de proeminências de sedimentos que culminam em uma feição espatular, com sedimentos espalhados, conferindo a ideia de fluxo, cujas feições possuem a geometria condizente com a de um esker glacial terrestre ([figura 24](#)) (Butcher *et al.*, 2020).

Como Marte é um planeta cuja atmosfera é rarefeita, e não há evidências de água líquida (atualmente) em quantidades suficientemente importantes para a dinâmica geológica, tampouco vida, depósitos sedimentares no planeta se formam com certa dificuldade (quando comparamos com os parâmetros terrestres). No entanto, o intenso bombardeamento de meteoritos desempenha um papel fundamental na formação de feições sedimentares.

A remobilização de material e a topografia e morfologia advindas de um cenário de sucessivos impactos meteóricos possibilitam a formação de alguns tipos de depósitos que não seriam possíveis (ao menos em quantidades significativas).

No mosaico de imagens da [figura 13](#), há algumas das feições sedimentares presentes em *Tempe Terra*. Analisando o item 'A' e 'F' desta figura, observa-se a formação de um depósito de tálus proveniente do desabamento da borda da cratera, onde a deposição dos sedimentos cobriu a escarpa produzida pelo impacto.



**Figura 24.** Desenho esquemático demonstrando a evolução de um esker terrestre sob diferentes regimes de fornecimento de sedimentos e fluxo. Modificado de Butcher et al. (2020).

Ainda na [figura 13](#), vê-se nos itens 'B' e 'D' dunas formadas no interior de crateras de impacto, onde a remobilização de material permite um acúmulo de sedimentos que por sua vez possibilita a formação de estruturas eólicas. Em muitas das crateras dispostas em Marte, em razão das forças eólicas, há a formação de canais dentro dos quais essas dunas se acumulam, ou ainda, como é o caso do item 'D', em crateras próximas a vales de riftes, mais sujeitas à passagem de vento, também é possível observar a formação de dunas.

As feições apresentadas no item 'B' da mesma figura são dunas que podem ser descritas como dunas transversais dispostas ortogonalmente na direção do vento. As feições apresentadas no item 'D' podem ser descritas como dunas em cadeias barcanóides ou como dunas parabólicas, a depender da direção do vento, como pode-se ver na [figura 25](#).

No item 'E' da [figura 13](#), observa-se que ao norte da região de *Tempe Terra* há o término do planalto e o início da porção de crosta menos espessa (a parte em coloração azul no mapa topográfico).

Analisando os itens 'B' e 'G' observa-se que há porções de morfologias residuais, semelhantes às apresentadas na [figura 26](#), onde formações de topografia mais elevadas permanecem destacadas do planalto, similares a morros testemunhos.

Fazendo uma analogia entre os modelos conceituais propostos por Huggett e Shuttleworth (2011) ([figura 26](#)) é possível comparar as estruturas afastadas do planalto de *Tempe Terra* como formas geomorfológicas residuais, podendo ter uma gênese associada a

fatores erosivos ou advindos de uma resposta isostática causada pela subsidência do terreno e pela separação de estruturas do planalto elevado, relacionando-se com a hipótese de um antigo oceano próximo ao polo norte de Marte (Huggett e Shuttleworth, 2011 e Perron *et al.*, 2007).

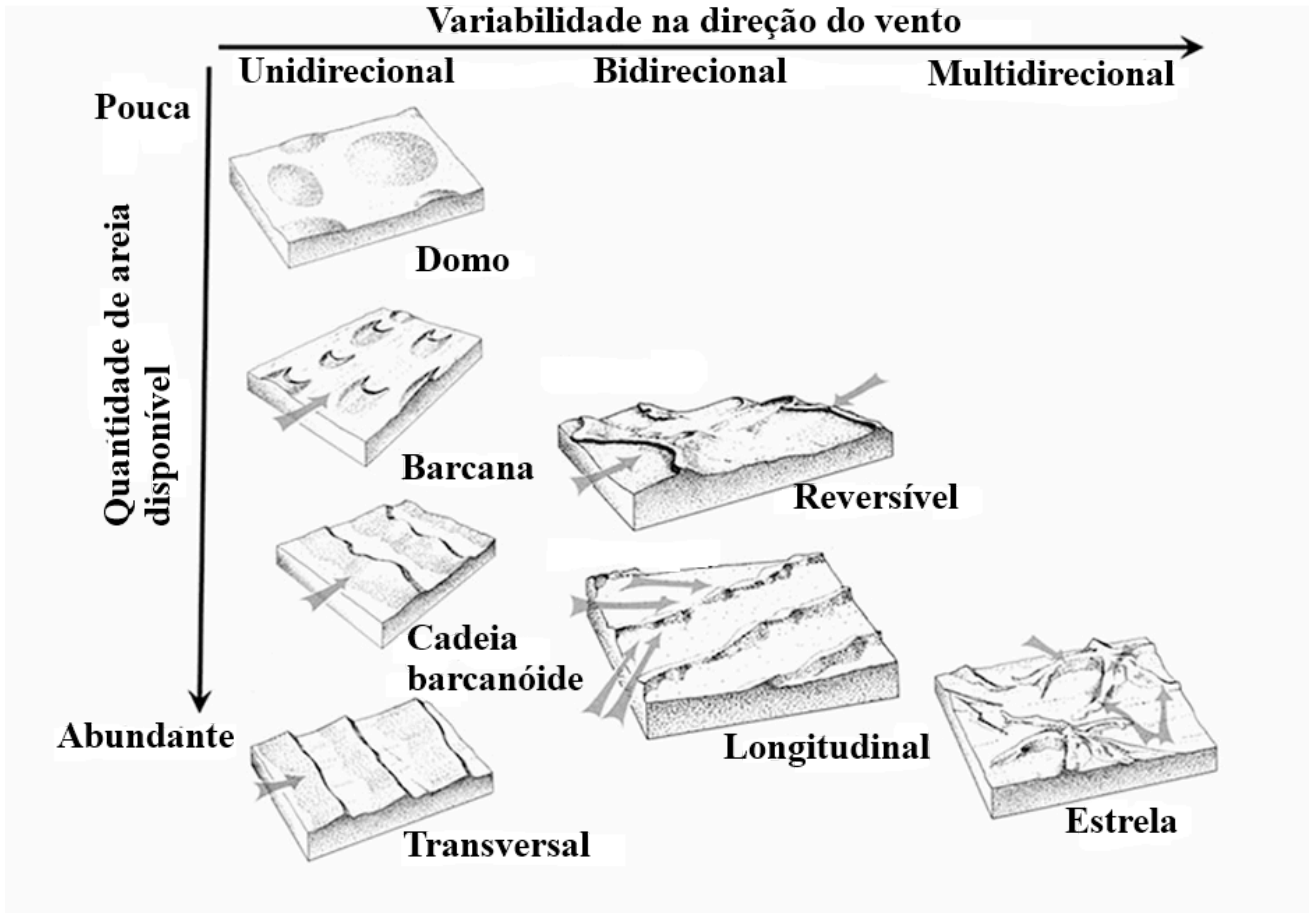


Figura 25. Modelos conceituais de tipos de dunas. Modificado de Lorenz e Zimbelman (2014).

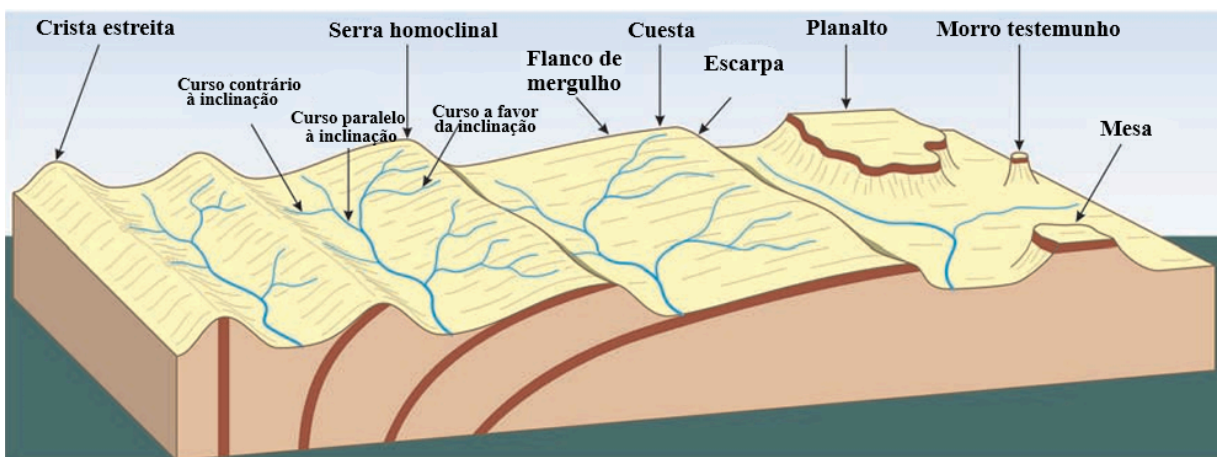
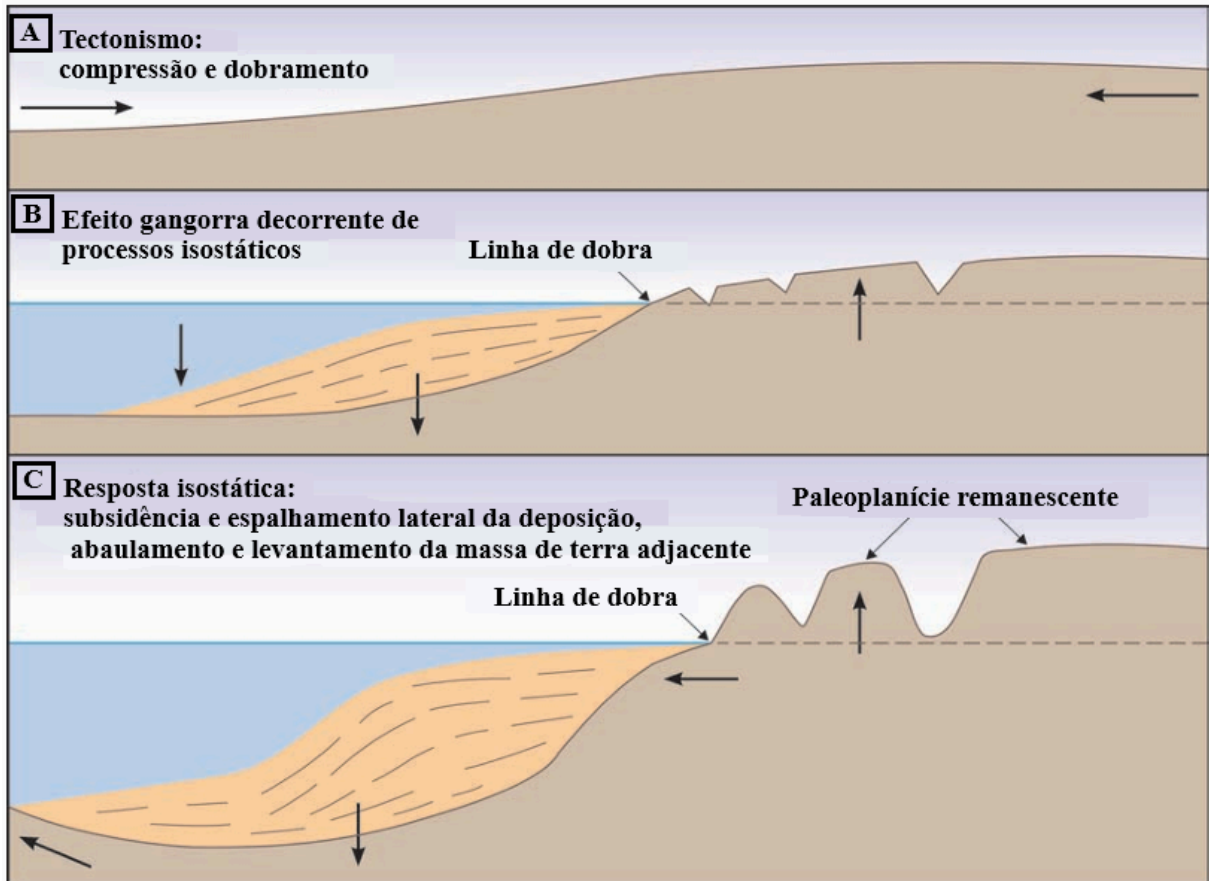


Figura 26. Modelo conceitual de feições geomorfológicas. A banda escura demonstra uma mesma formação passando tanto pelo planalto quanto pelo morro testemunho e a mesa. Modificado de Huggett e Shuttleworth (2011).



**Figura 27.** Evolução da resposta isostática e soerguimento de massas adjacentes ao planalto. Modificado de Huggett e Shuttleworth 2011.

#### 6.4 Geofísica e rifteamento

A região de *Tempe Terra* não exibe sinais consideráveis de gravimetria e magnetometria, o que nos permite deduzir, conforme observa-se na [figura 14](#), que os valores de anomalia de ar-livre aumentam conforme a altitude, e não variam necessariamente de acordo com aumentos abruptos de densidade do terreno que poderiam gerar anomalias expressivas.

Segundo Ghomsi *et al.* (2022), dados de anomalia gravimétrica em ar-livre e rifteamento estão relacionados através do afinamento crustal que ocorre em um rifte, onde a mudança de densidade de uma localidade pode gerar assinaturas anômalas na força gravitacional.

Através da análise da [figura 15](#) pode-se perceber que a região não tem sinal relevante de magnetometria crustal. Isso pode ser um indicativo de que as rochas que compõem a região são relativamente homogêneas, e as intrusões vulcânicas que participaram do processo de subsidência isostática sejam ácidas (Zou *et al.*, 2013).

## 7. CONCLUSÕES

O rifte principal de *Tempe Terra* se assemelha a análogos terrestres em diversos pontos, onde zonas de acomodação e zonas de transferência participam da interligação de falhas e grabens. Além disso, é possível analisar, quando comparado com modelos analógicos testados em laboratório, que o rifte de *Tempe Terra* sofre uma extensão no sentido NW - SE.

É possível observar nas regiões de maior extensão tectônica uma quantidade significativa de falhas, onde há estruturas como rampas de revezamento falhadas e zonas de acomodação sintéticas e antitéticas geralmente oblíquas e transversais.

Diferentemente dos riftes terrestres, os riftes em Marte possuem uma origem essencialmente isostática, o que se dá devido ao modelo de placa única, como descrito por Orlov *et al.* (2023).

O solo de *Tempe Terra* é moldado por impactos de meteoritos, onde estes apresentam influência na tectônica local, gerando *trends* de falhas advindas de intensos bombardeamentos. É possível definir, a partir das escarpas das crateras, falhas que se estendem regionalmente no sentido de sequências de impactos.

As crateras de Marte abrigam feições sedimentares variadas. A remobilização do material devido ao impacto permite que campos de dunas, depósitos de tálus, cones de dejeção de feições relacionadas ao deslizamento de borda de cratera se formem. Além disso, formas de relevo residual e um esker também podem ser observados na região de *Tempe Terra*, demonstrando a variedade de feições geomorfológicas presentes nesta porção do hemisfério norte marciano.

Os sistemas deposicionais em Marte, associados a processos de rifteamento, são comumente encontrados no interior dos grabens, onde observam-se cones de dejeção e feições eólicas como dunas. Apesar da presença dessas feições, a atmosfera rarefeita e a ausência de água líquida limitam significativamente os processos erosivos e, conseqüentemente, a formação de sistemas deposicionais mais frequentes e complexos.

## 8. REFERÊNCIAS

Acuna, M. H., Connerney, J. E., Ness, N. F., Lin, R. P., Mitchell, D., Carlson, C. W., McFadden, J., Anderson, K. A., Reme, H., Mazelle, C., Vignes, D., Wasilewski, P., & Cloutier, P., 1999, Global Distribution of Crustal Magnetization Discovered by the Mars Global Surveyor MAG/ER Experiment. *Science*, v. 284, iss. 5415, p. 790–793.

Andrew J. Dombard, Mindi L. Searls, and Roger J. Phillips, 2004, An alternative explanation for the “Buried Channels” on Mars: The gravity signal from a sharp boundary on partially compensated, long-wavelength topography. *Geophysical Research Letters*, v. 31, iss. L05701, doi:10.1029/2003GL019162, p. 1–4.

- Arkani-Hamed, J., e Boutin, D., 2012, Is the primordial crust of Mars magnetized? *Icarus*, v. 221, iss. 1, p. 192–207.
- Breuer, D., e Spohn, T., 2003, Early plate tectonics versus single-plate tectonics on Mars: Evidence from magnetic field history and crust evolution. *Journal of Geophysical Research: Planets*, v. 108, no. E7, 5072, doi:10.1029/2002JE001999, p. 1–13.
- Bolles, D., 2006, (last update on june 2024). Mars Reconnaissance Orbiter Science Instruments: NASA.  
<https://science.nasa.gov/mission/mars-reconnaissance-orbiter/science-instruments/>
- Broquet, A., & Andrews-Hanna, J. C., 2023, Geophysical evidence for an active mantle plume underneath Elysium Planitia on Mars. *Nature Astronomy*, v. 7, doi:10.1038/s41550-022-01836-3, p. 160–169.
- Butcher, F.E.G., Balme, M.R., Conway, S.J., Gallagher, C., Arnold, N.S., Storrar, R.D., Lewis, S.R., e Hagermann, A., 2020, Morphometry of a glacier-linked esker in NW Tempe Terra, Mars, and implications for sediment-discharge dynamics of subglacial drainage. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 542 doi:10.1016/j.epsl.2020.116325, p. 116325.
- Butcher, F. E. G., Balme, M. R., Gallagher, C., Arnold, N. S., Conway, S. J., Hagermann, A., & Lewis, S. R., 2017, Recent basal melting of a mid-latitude glacier on Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*, v. 122, doi:10.1002/2017JE005434, p. 2445–2468.
- Carr, M.H., e Head, J.W., III, 2010, Geologic history of Mars. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 294, iss. 3–4 doi:10.1016/j.epsl.2009.06.042, p. 185–203.
- Chapman, M., 2007, *The Geology of Mars: Evidence from Earth-Based Analogs*. 1-2 Trinity St, Cambridge CB2 1SZ, Reino Unido, Cambridge University Press.
- Chuang, F.C., e Crown, D.A., 2005, Surface characteristics and degradational history of debris aprons in the Tempe Terra/Mareotis fossae region of Mars. *Icarus*, v. 179, iss 1, doi:10.1016/j.icarus.2005.05.014, p. 24–42.
- Connerney, J.E.P., Acuña, M.H., Wasilewski, P.J., Kletetschka, G., Ness, N.F., Rème, H., Lin, R.P., e Mitchell, D.L., 2001, The Global Magnetic Field of Mars and Implications for Crustal Evolution. *Geophysical Research Letters*, v. 28, iss. 21, p. 4015–4018.
- Connerney, J. E. P., Espley, J., Lawton, P., Murphy, S., Odom, J., Oliverson, R., & Sheppard, D., 2015, The MAVEN magnetic field investigation, *Space Science Reviews*, v. 195(1–4), doi:10.1007/s11214-015-0169-4, p. 257–291.
- Durán, C., A. Khan, S.C., Charalambous, C., D. Kim, M.D., Samuel, H., e Giardini, D., 2022, Observation of a Core-Diffracted P-Wave From a Farside Impact With Implications for the Lower-Mantle Structure of Mars. *Geophysical Research Letters*, v. 49, iss. 21, p. 1–9.
- Faulds, J. E., & Varga, R. J., 1998, The role of accommodation zones and transfer zones in the regional segmentation of extended terranes. In *Accommodation zones and transfer zones; the regional segmentation of the Basin and Range Province*, Geological Society of America, p. 1–45.
- French, Bevan M., 1998, *Traces of Catastrophe: A Handbook of Shock-Metamorphic Effects in Terrestrial Meteorite Impact Structures*. Lunar and Planetary Institute, Houston, Texas. LPI Contribution No. 954.
- Genova, A., Mazarico, E. M., Wright, E., Gallagher, D., 2016, GMM-3 Mars Gravity Map, NASA's Scientific Visualization Studio, <https://svs.gsfc.nasa.gov/4436>

- Ghoms, F. E. K., Tenzer, R., Njinju, E., & Steffen, R., 2022, The crustal configuration of the West and Central African Rift System from gravity and seismic data analysis. *Geophysical Journal International*, v. 230(2), doi:10.1093/gji/ggac089, p. 995–1012.
- Golombek, M.P., e Phillips, R.J., 2010, Mars tectonics, *em* Watters, T.R. e Schultz, R.A. orgs., Planetary tectonics, The Edinburgh Building, Cambridge, Cambridge University Press, p. 183–233.
- Golombek, M.P., Tanaka, K.L., e Franklin, B.J., 1996, Extension across Tempe Terra, Mars, from measurements of fault scarp widths and deformed craters. *Journal of Geophysical Research: Planets*, v. 101, iss. E11, p. 26119–26130.
- Grotzinger, J.P., e Milliken, R.E., 2012, The Sedimentary Rock Record of Mars: Distribution, Origins, and Global Stratigraphy, *em* Sedimentary Geology of Mars, John P. Grotzinger; Ralph E. Milliken.
- Gwinner, K., Scholten, F., Preusker, F., Elgner, S., Roatsch, T., Spiegel, M., Schmidt, R., Oberst, J., Jaumann, R., & Heipke, C., 2010, Topography of Mars from global mapping by HRSC high-resolution digital terrain models and orthoimages: Characteristics and performance. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 294(3–4), p. 506–519.
- Hauber, E., Grott, M., e Kronberg, P., 2010, Martian rifts: Structural geology and geophysics. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 294, iss. 3–4, p. 393–410.
- Huggett, R., & Shuttleworth, E., 2011, Volcanoes, impact craters, folds, and faults, In *Fundamentals of Geomorphology*, Routledge, p. 108–134
- Kliore, A.J., Fjeldbo, G., Seidel, B.L., Sykes, M.J., e Woiceshyn, P.M., 1973, S band radio occultation measurements of the atmosphere and topography of Mars with Mariner 9: Extended mission coverage of polar and intermediate latitudes. *Journal of Geophysical Research*, v. 49, iss. 21, p. 4331–4351.
- Konopliv, A.S., Park, R.S., e Folkner, W.M., 2016, An improved JPL Mars gravity field and orientation from Mars orbiter and lander tracking data. *Icarus*, v. 221, iss. 1, p. 253–260.
- Lorenz, R.D., Zimbelman, J.R., 2014, Basic Types of Dunes. In: *Dune Worlds*. Springer Praxis Books. Springer, Berlin, Heidelberg, doi:10.1007/978-3-540-89725-5\_6, p. 75-92.
- McClay, K. R.; Dooley, T.; Whitehouse, P.; Mills, M., 2002, 4-D evolution of rift systems: Insights from scaled physical models. *AAPG Bulletin*, v. 86, no. 6 (June 2002), pp. 935–959.
- Mège, D., Cook, A.C., Garel, E., Lagabrielle, Y., e Cormier, M.-H., 2003, Volcanic rifting at Martian grabens. *Journal of Geophysical Research: Planets*, v. 108, iss. E5 doi:10.1029/2002JE001852, p. 1–33.
- Michael C. Malin, Kenneth S. Edgett, 2000, Sedimentary Rocks of Early Mars: *Science*, v. 290, doi:10.1126/science.290.5498.1927, p. 1927-1937.
- Miyamoto, H., Komatsu, G., McEwen, A., Chojnacki, M., Usui, T., e Yamagishi, A., 2014, Candidate landing sites in Valles Marineris: Ancient and Modern habitability, [https://marsnext.jpl.nasa.gov/workshops/2014\\_05/20\\_VallesMarineris\\_Miyamoto.pdf](https://marsnext.jpl.nasa.gov/workshops/2014_05/20_VallesMarineris_Miyamoto.pdf).
- Morley C. K., 1999, Patterns of Displacement Along Large Normal Faults: Implications for Basin Evolution and Fault Propagation, Based on Examples from East Africa. *AAPG Bulletin* 1999; v. 83 (4), p. 613–634.

- Nimmo, F., e Tanaka, K., 2004, Early Crustal Evolution of Mars. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, v. 33, p. 133–161.
- Orlov, C.J., Bramham, E.K., Byrne, P.K., e S. Piazzolo, M.T., 2023, Magmatic Origins of Extensional Structures in Tempe Terra, Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*, v. 128, iss. 8, doi:10.1029/2023JE007949, p. 1–28.
- Orlov, C.J., Bramham, E.K., Thomas, M., Byrne, P.K., Piazzolo, S., e Mortimer, E., 2022, Structural Architecture and Deformation History of Tempe Terra, Mars *Journal of Geophysical Research: Planets*, v. 127, iss. 11, p. 1–24.
- Osinski, G. R., Grieve, R. A. F., & Tornabene, L. L., 2012, Excavation and Impact Ejecta Emplacement. In *Impact Cratering*, John Wiley & Sons, Ltd, p. 43–59.
- Perron, J. T., Mitrovica, J. X., Manga, M., Matsuyama, I., & Richards, M. A., 2007, Evidence for an ancient martian ocean in the topography of deformed shorelines. *Nature* v. 447, doi:10.1038/nature05873, p. 840–843.
- Pike, R. J., 1980, Formation of complex impact craters: Evidence from Mars and other planets. *Icarus*, v. 43, doi:10.1016/0019-1035(80)90083-4, p. 1–19.
- Scott, D.H., e Dohm, J.M., 1990, Faults and ridges - Historical development in Tempe Terra and ULYSSES Patera regions of Mars, *em* IN. Lunar and Planetary Science Conference, 20th, Houston, TX, Mar. 13-17, 1989, Proceedings (A90-33456 14-91). Houston, TX, Lunar and Planetary Institute org., p. 503–513.
- Secosky, J., 2013, Martian Geology, <https://www.youtube.com/watch?v=RYG-HLr33CM>.
- Silva, V. C., Blitzkow, D., Almeida Filho, F. G. V. de, Matos, A. C. O. C. de, & Bjorkstrom, I. M. 2020, Atualização da Estrutura Gravimétrica do Estado de São Paulo: Vínculo ao Sistema Gravimétrico de Referência, *Anuário Instituto de Geociências - UFRJ*, v. 43, 3, p. 215–216.
- Stähler *et al.*, S., 2021, Seismic detection of the martian core. *Science*, v. 373, iss. 6553, p. 443–448.
- Stewart, A. J., Schmidt, M. W., Van Westrenen, W., e Liebske, C., 2007. Mars: A New Core-Crystallization Regime. *Science*, v. 316, iss. 5829, p. 1323–1325.
- Tanaka, K.L., Golombek, M.P., e Bruce Banerdt, W., 1991, Reconciliation of stress and structural histories of the Tharsis region of Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*, v. 96, iss. E1, p. 15617–15633.
- The Murray lab - caltech. (n.d.). Caltech.edu. from <https://murray-lab.caltech.edu/>
- Warren, A. O., Kite, E. S., Williams, J.-P., & Horgan, B., 2019, Through the thick and thin: New constraints on mars paleopressure history 3.8 – 4 Ga from small exhumed craters. *Journal of Geophysical Research: Planets*, v. 124(11), <https://doi.org/10.1029/2019je006178>, p. 2793–2818
- Zent, A. P., 1998, On the thickness of the oxidized layer of the Martian regolith. *Journal of Geophysical Research: Planets*, v. 103(E13), doi:10.1029/98JE01895, p. 31491–31498.
- Zou, C., Zhang, G., Zhu, R., Yuan, X., Zhao, X., Hou, L., Wen, B., & Wu, X, 2013, Prediction and evaluation technology for volcanic rock. In *Volcanic Reservoirs in Petroleum Exploration*, Elsevier, p. 151–183.