

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 08/03/2025.



UNESP – UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE PRESIDENTE PRUDENTE
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS CARTOGRÁFICAS



EDUARDO SOARES NASCIMENTO

DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA DETECÇÃO DE
PADRÕES POLARES *SWISS CHEESE* EM MARTE UTILIZANDO IMAGENS
DE SENSORIAMENTO REMOTO DE ALTA RESOLUÇÃO ESPACIAL

PRESIDENTE PRUDENTE
2024

EDUARDO SOARES NASCIMENTO

DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA DETECÇÃO DE
PADRÕES POLARES *SWISS CHEESE* EM MARTE UTILIZANDO IMAGENS
DE SENSORIAMENTO REMOTO DE ALTA RESOLUÇÃO ESPACIAL

Dissertação de mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Ciências
Cartográficas da Universidade Estadual
Paulista FCT/Unesp– Campus de Presidente
Prudente, como requisito final para a obtenção
do título de Mestre em Ciências Cartográficas.

Orientador: Prof. Tit. Erivaldo Antonio da Silva
Coorientador: Prof. Dr. Pedro Miguel Berardo
Duarte Pina

N244d Nascimento, Eduardo Soares

Desenvolvimento de metodologia para detecção de padrões polares “Swiss Cheese” em Marte utilizando imagens de sensoriamento remoto de alta resolução espacial / Eduardo Soares Nascimento. -- Presidente Prudente, 2024

99 p. : il., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente

Orientador: Erivaldo Antonio da Silva

Coorientador: Pedro Miguel Berardo Duarte Pina

1. Swiss Cheese. 2. Marte. 3. Processamento Digital de Imagens. 4. Morfologia Matemática. 5. Shape from Shading. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

Impacto Esperado

Esta pesquisa desenvolve uma metodologia para detectar padrões polares em Marte, auxiliando a comunidade científica no entendimento da superfície do planeta. Os resultados poderão ser úteis para cientistas que estudam Marte, contribuindo para pesquisas sobre o planeta, seu clima e morfologia.

Expected impact

This research develops a methodology to detect polar patterns on Mars, aiding the scientific community in understanding the planet's surface. The results may be useful for scientists studying Mars, contributing to research on the planet, its climate, and morphology.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Presidente Prudente

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA DETECÇÃO DE
PADRÕES POLARES SWISS CHEESE EM MARTE UTILIZANDO IMAGENS
DE SENSORIAMENTO REMOTO DE ALTA RESOLUÇÃO ESPACIAL

AUTOR: EDUARDO SOARES NASCIMENTO

ORIENTADOR: ERIVALDO ANTONIO DA SILVA

COORIENTADOR: PEDRO MIGUEL BERARDO DUARTE PINA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Cartográficas,
área: Aquisição, Análise e Representação de Informações Espaciais pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
gov.br ERIVALDO ANTONIO DA SILVA
Data: 08/03/2024 15:17:55-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. ERIVALDO ANTONIO DA SILVA (Participação Virtual)
Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente - FCT/Unesp

Profª. Dra. SAMARA CALÇADO DE AZEVEDO (Participação Virtual)
UNIFEI / Universidade Federal de Itajubá

Documento assinado digitalmente
gov.br GUILHERME HENRIQUE BARROS DE SOUZA
Data: 08/03/2024 15:26:06-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. GUILHERME HENRIQUE BARROS DE SOUZA (Participação Presencial)
Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente - FCT/Unesp

Presidente Prudente, 08 de março de 2024

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 (Processo 88887.817769/2023-00).

Gostaria de agradecer a Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” UNESP (FCT/Unesp) – Campus de Presidente Prudente - SP e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas (PPGCC) por todo suporte e infraestrutura e desenvolvimento dessa pesquisa

Agradeço ao meu orientador, Professor Tit. Erivaldo Antonio da Silva e o meu coorientador Professor Dr. Pedro Miguel Berardo Duarte Pina, pela orientação e suporte durante o desenvolvimento desse trabalho.

Agradeço a Deus e à minha família pelo apoio incondicional, aos amigos e amigas que o PPGCC me forneceu. Aos meus pais, Francisco e Nair, por todos os valores transmitidos que fizeram ser a pessoa que me tornei. Ao meu irmão, Allan, pelo companheirismo. A minha cunhada Domy Nike, que junto com meu irmão nos deu um lindo presente, meu sobrinho Matteo, que resplandece a pureza e alegria.

Agradeço a família que a vida me deu, Vagneeri Novais Puccinelli (*in memoriam*), Miguel, Isa, Carlos, o pequeno Arthur, Mukah e Mariana, que me ensinou que a família não vem só do sangue.

Agradeço aos amigos que a Unesp me trouxe: Rafah, Victor, Zé, Jade, Tate, Ivete, Gabriel B, Bruna, Lucas B, Humbert, Thaina, Jeferson, Sharon, Beatriz M, Jediael, Koike, Thiago, Soneca, Serjão, Murillo, Emely, Ana Z, Daniel A, Nathalia P, João Pedro G, Alec Brian, Igor Fernandes e Pão, nas quais tive e tenho o prazer de conviver e sei que posso contar.

Agradeço a minha amiga Dessy, por nossas conversas, pela confiança, pela hospitalidade que tenho certeza de que levarei para sempre em minha vida. Também aos amigos que o intercâmbio me trouxe, Gabriel F, Luiz Gustavo, Gréta, Stephy, Linda, Ricardo, Álvaro, Lukas, Jaime, Augusto, Kacper e Sathya.

Agradeço aos amigos que o PPGCC me deu, Vini, Ferrari, Gabs, Rosim, Ana Lúcia C, Guil, Zupa, Matheus, Loram, Maurycio, Gustavo C, Julia P, Nathalia Rose, Daniel P, Thamires G, Vivi, Tayná, Cris, Subtil, Gabi Z, Rebeca, Weverton, Renato, Edico, Allan, Carol, Ana Paula M, Fernando e Zilda, além de todos os outros que fizeram parte desse convívio. E agregados também, Lucas Prado e Veh Calamante. Tenho a certeza de que alguns desses amigos levo comigo para sempre em minha jornada.

Em especial, agradeço aos grandes amigos da minha vida: Vini, Ferrari, Gabs, Lucas B, Gabriel B, Humbert, Rafah, Victor, Zé e Luiz Paulo, por tudo.

Agradeço imensamente à minha namorada Juliana por todo o apoio, paciência e carinho que tem demonstrado desde 2019. Tenho plena consciência de que muitos momentos teriam sido muito mais difíceis sem a presença dela ao meu lado. Também expresso minha gratidão à família da Juliana - Sergio, Serlete, Letícia, Carlos e Dona Pina - pelo acolhimento, paciência

e confiança que sempre depositaram em mim. Suas demonstrações de apoio foram fundamentais em diversos momentos.

*“A coisa mais importante da vida não é o triunfo,
mas a luta”.*

(Pierre de Coubertin)

*"A única forma de chegar ao impossível é
acreditar que é possível"*

(Lewis Carroll)

“Os avanços são frutos da luta. E não tem volta”

(Djamila Ribeiro)

RESUMO

Esta dissertação apresenta uma metodologia automática para a detecção e extração de características de padrões polares conhecidos como *Swiss Cheese* presentes na calota polar sul de Marte. Essas feições, caracterizadas por uma rede complexa de pequenas crateras formadas pela sublimação de CO_2 , assemelham-se ao queijo suíço. A metodologia proposta consiste em várias etapas, começando pelo pré-processamento das imagens para discriminar as características de interesse. A detecção foi realizada por meio da hibridização de operadores lineares e não lineares de Processamento Digital de Imagens e Morfologia Matemática. Inicialmente, o teste foi conduzido com duas imagens de MOC e HiRISE, sendo posteriormente expandido para um total de 22 imagens. A análise dos resultados foi conduzida tanto visualmente quanto estatisticamente, utilizando métricas como Completeza, Correção, Qualidade e F1-Score. Os resultados demonstraram alta precisão na detecção das feições de interesse, com métricas estatísticas consistentemente acima de 70%. Entretanto, é importante ressaltar que alguns desafios foram encontrados durante o processo de detecção. Em algumas imagens, a proximidade entre as feições apresentou dificuldades, levando à generalização de algumas características e à detecção de falsos positivos. Além disso, em determinadas ocasiões, a borda das imagens foi erroneamente identificada como uma feição de interesse, resultando em falsos positivos adicionais. Essas observações ressaltam a necessidade contínua de refinamento da metodologia devido à complexidade do alvo. Além disso, empregou-se a técnica *Shape From Shading* para extrair informações de área e volume das crateras selecionadas em dois períodos (2007 e 2010), revelando aumentos significativos em sua extensão e profundidade. Este estudo não apenas contribui para a compreensão das características superficiais de Marte, mas também propõe uma nova abordagem para a detecção e análise de feições geológicas complexas em outros corpos planetários. Sugestões para pesquisas futuras incluem a expansão do conjunto de dados, o desenvolvimento de técnicas de filtragem aprimoradas e a integração de métodos de aprendizado de máquina, que têm o potencial de melhorar significativamente a eficácia e a aplicabilidade da técnica estudada.

Palavras-Chave: *Swiss Cheese*; Marte; Processamento Digital de Imagens; Morfologia Matemática; *Shape from Shading*.

ABSTRACT

This dissertation presents an automatic methodology for the detection and extraction of features from polar patterns known as Swiss Cheese, present in the southern polar cap of Mars. These features, characterized by a complex network of small craters formed by the sublimation of CO_2 , resemble Swiss cheese. The proposed methodology consists of several stages, starting with preprocessing of the images to discriminate the features of interest. Detection was performed through the hybridization of linear and nonlinear operators of Digital Image Processing and Mathematical Morphology. Initially, testing was conducted with two MOC and HiRISE images, later expanded to a total of 22 images. The analysis of the results was conducted both visually and statistically, using metrics such as Completeness, Correctness, Quality, and F1-Score. The results demonstrated high precision in detecting the features of interest, with statistical metrics consistently above 70%. However, it is important to note that some challenges were encountered during the detection process. In some images, the proximity between features posed difficulties, leading to the generalization of some characteristics and the detection of false positives. Additionally, in certain instances, the image border was erroneously identified as a feature of interest, resulting in additional false positives. These observations highlight the continuous need for refinement of the methodology due to the complexity of the target. Furthermore, the Shape from Shading technique was employed to extract area and volume information from selected craters at two time periods (2007 and 2010), revealing significant increases in their extent and depth. This study not only contributes to the understanding of the surface characteristics of Mars but also proposes a new approach to the detection and analysis of complex geological features on other planetary bodies. Suggestions for future research include expanding the dataset, developing enhanced filtering techniques, and integrating machine learning methods, which have the potential to significantly improve the effectiveness and applicability of the studied technique.

Keywords: Swiss Cheese; Mars; Digital Image Processing; Mathematical Morphology; Shape from Shading.

Lista de Figuras

Figura 1: Topografia de Marte, representada por suas duas calotas polares (sul à esquerda e norte à direita), acompanhada de uma representação abrangente de todo o seu território (abaixo).....	25
Figura 2: <i>Swiss Cheese Features</i> representado pela mudança no albedo quando a cobertura de gelo sazonal de CO ₂ é removida e a capa de CO ₂ é exposta. A área mostrada é a 86°S, 11°E, com subquadros de (esquerda) M09/04708 e (direita) M13/02177 em valores Ls de 246° e 327°, respectivamente.	26
Figura 3: Exemplo dessas depressões circulares observadas pelo THEMIS (I00826006) na borda da calota polar, perto de 84°S, 283°E, em Ls de 330°. (Acima) Temperaturas (em graus kelvin) derivadas das medições de radiância THEMIS em uma área de 10 km por 5 km. A área em caixa (abaixo) corresponde ao subquadro da imagem M03/04994. O material frio (azul) corresponde aos topos das mesas de CO ₂ , e o material quente (vermelho) corresponde ao terreno ao redor dos temas e constituindo os pisos das depressões.....	27
Figura 4: Exemplificação das unidades A e B, segundo Thomas et al., 2005.....	28
Figura 5: Mudanças na capa residual do polo sul. (a) Três anos de mudanças na unidade A. 86,9° S, 5,5° W. Imagem M11 em LS = 273°; Imagem S10 em LS = 292°. (b) Três anos de mudanças em Marte na unidade B. 86,3° S, 84,4° W. Imagem M11 em LS = 273°; Imagem S10 em LS = 290°. (c) Alterações de três anos no remanescente de detritos da unidade A. 86,8° S, 344,1° W. Imagem M12 em LS = 304°; Imagem S11 em LS = 297°. (d) Último ano de mudança, unidades B e A (lado direito). 86,9° S, 343,8° W. R7 imagem em LS = 223°; Imagem S10 em LS = 283°.....	29
Figura 6: Distribuição espacial na calota polar dos MDE's de <i>Swiss Cheese Features</i> . Os quadrados roxos indicam as localizações da unidade A, o vermelho indica <i>Curl feature</i> , o amarelo indica a impressão digital e o ciano indica a unidade B.	30
Figura 7: Evolução dos terrenos de queijo suíço em 1 ano marciano. A imagem da esquerda foi tirada 1 ano de Marte antes da direita. Ambas as imagens são iluminadas a partir do canto superior direito. A seta mostra um pequeno monte na imagem da esquerda que desapareceu no ano seguinte à direita.	31
Figura 8: Diferentes classes (tipos) de feições de <i>Swiss Cheese Features</i> (SFC) baseadas em imagens.....	32
Figura 9: Mapeamento Sistemático, realizado pela USGS.....	36
Figura 10: Elemento estruturante - (a) cruz, (b) quadrado, (c) hexagonal.	39
Figura 11: Dilatação δ de um conjunto X por um elemento estruturante B.....	39
Figura 12: Erosão ε de um conjunto X por um elemento estruturante B.	40
Figura 13: Abertura γ de um conjunto X, por um elemento estruturante B.....	41
Figura 14: Fechamento ϕ de um conjunto X, por um elemento estruturante B.....	41
Figura 15: Geometria envolvendo a técnica <i>Shape From Shading</i> para reconstrução tridimensional de uma cratera.....	48
Figura 16: Fluxograma representando a metodologia geral adotada nesta pesquisa, em que cada estilo de cores/formato representa uma etapa distinta e seu respectivo tipo de ação.	50
Figura 17: Imagem Teste (coluna: 2016 e linha: 1920, em pixels). MGS MOC Release No. MOC2-216, obtida durante a primavera austral em 3 de novembro de 1999, localizada perto de 87,0°S, 5,9°W, a 1,5 m por pixel (Banda Pancromática).	52

Figura 18: Imagem Teste (coluna: 2048 e linha: 1569, em pixels). ESP_014141_0930, adquirida em 02 de agosto de 2009, localizada perto de 86,393°S, 353,425°W, com resolução espacial de 30 cm (Banda do Vermelho).	53
Figura 19: Diferenças de iluminação no alvo de interesse. a) Diferença de iluminação para a imagem MOC. b) Diferença de iluminação para a imagem HiRISE	54
Figura 20: Fluxograma representando os passos do desenvolvimento da rotina para detectar os padrões polares <i>Swiss Cheese</i> , onde cada estilo de cores/formato representa uma etapa distinta e seu respectivo tipo de ação.	56
Figura 21: Imagem de Referência MOC	58
Figura 22: Resultado da aplicação de uma função de contraste na imagem MOC. Em a) imagem original; b) Pós aplicação do contraste.	59
Figura 23: Resultado da aplicação de uma função de contraste na imagem HiRISE. Em a) imagem original; b) Pós aplicação do contraste.	60
Figura 24: Resultado de detecção das bordas da imagem MOC, utilizando o método de <i>Canny</i>	61
Figura 25: Resultado de detecção das bordas da imagem HiRISE, utilizando o método de <i>Canny</i>	61
Figura 26: Resultado de detecção das bordas da imagem MOC, utilizando o método de <i>Canny</i> com a delimitação de retângulos envolventes simulando um zoom e realçando as áreas discutidas, bem como suas características específicas: a) imagem original; b) ruídos presentes no interior da feição <i>Swiss Cheese Features</i> e segmentação das bordas externas do objeto; e c) Terreno entre as feições livres de ruídos.	62
Figura 27: Resultado de detecção das bordas da imagem HiRISE, utilizando o método de <i>Canny</i> com a delimitação de retângulos envolventes simulando um zoom e realçando as áreas discutidas, bem como suas características específicas: a) imagem original; b) Poucos ruídos presentes no interior da feição <i>Swiss Cheese Features</i> e segmentação das bordas externas do objeto; e c) Terreno entre as feições com alguns ruídos.	63
Figura 28: Resultado do uso das funções <i>cv2.findContours</i> e <i>cv2.dilate</i> na imagem MOC pós detecção das bordas usando o detector <i>Canny</i> , visando ao preenchimento dos <i>Swiss Cheese Features</i>	63
Figura 29: Resultado do uso das funções <i>cv2.findContours</i> e <i>cv2.dilate</i> na imagem HiRISE pós detecção das bordas usando o detector <i>Canny</i> , visando ao preenchimento dos <i>Swiss Cheese Features</i>	64
Figura 30: Resultado do uso das funções <i>cv2.findContours</i> e <i>cv2.dilate</i> na imagem MOC pós detecção das bordas usando o detector <i>Canny</i> , visando ao preenchimento dos <i>Swiss Cheese Features</i> , com a delimitação de retângulos envolventes simulando um zoom e realçar as áreas discutidas, bem como suas características específicas. As áreas modificadas estão em verde fluorescente: a) Imagem preenchida; b) Exemplificação dos ruídos presentes no interior da feição <i>Swiss Cheese Features</i> , porém com menor segmentação das bordas externas do objeto; e c) Exemplificação de um terreno de <i>Swiss Cheese Features</i> com ênfase no verde fluorescente, que caracteriza onde foi preenchido.	65
Figura 31: Resultado do uso das funções <i>cv2.findContours</i> e <i>cv2.dilate</i> na imagem HiRISE pós detecção das bordas usando o detector <i>Canny</i> , visando ao preenchimento dos <i>Swiss Cheese Features</i> , com a delimitação de retângulos envolventes simulando um zoom e realçando as áreas discutidas, bem como suas características específicas. As áreas modificadas estão em verde fluorescente: a) Imagem preenchida; b) Exemplificação de um terreno de <i>Swiss Cheese</i>	

<i>Features</i> com ênfase no verde fluorescente, que caracteriza onde foi preenchido; e c) Exemplificação dos ruídos presentes no interior da feição <i>Swiss Cheese Features</i> , porém com menor segmentação das bordas externas do objeto.	65
Figura 32: Resultado da detecção de bordas por <i>Canny</i> e o uso das funções <i>cv2.GaussianBlur</i> e <i>cv2.erode</i> na imagem MOC pós preenchimento dos <i>Swiss Cheese Features</i> : a) bordas detectadas por <i>Canny</i> com <i>wide-range</i> ; b) bordas detectadas por <i>Canny</i> com <i>mid-range</i> ; e c) bordas detectadas por <i>Canny</i> com <i>tight-range</i>	66
Figura 33: Resultado da detecção de bordas por <i>Canny</i> e o uso das funções <i>cv2.GaussianBlur</i> e <i>cv2.erode</i> na imagem HiRISE pós preenchimento dos <i>Swiss Cheese Features</i> : a) bordas detectadas por <i>Canny</i> com <i>wide-range</i> ; b) bordas detectadas por <i>Canny</i> com <i>mid-range</i> ; e c) bordas detectadas por <i>Canny</i> com <i>tight-range</i>	66
Figura 34: Resultado da detecção de bordas por <i>Canny</i> e o uso das funções <i>cv2.GaussianBlur</i> e <i>cv2.erode</i> na imagem MOC pós preenchimento dos <i>Swiss Cheese Features</i> , com a delimitação de retângulos envolventes simulando um <i>zoom</i> para realçar as áreas discutidas, bem como suas características específicas: a) Bordas detectadas por <i>Canny</i> com <i>wide-range</i> ; b) Exemplificação da feição com alguns ruídos poligonais; e c) Exemplificação da feição com alguns ruídos em forma de polígonos pequenos.	67
Figura 35: Resultado da detecção de bordas por <i>Canny</i> e o uso das funções <i>cv2.GaussianBlur</i> e <i>cv2.erode</i> na imagem HiRISE pós preenchimento dos <i>Swiss Cheese Features</i> , com a delimitação de retângulos envolventes simulando um <i>zoom</i> para realçar as áreas discutidas, bem como suas características específicas: a) Bordas detectadas por <i>Canny</i> com <i>wide-range</i> ; b) Exemplificação da feição com alguns ruídos poligonais; e c) Exemplificação da feição com alguns ruídos em forma de polígonos pequenos.	67
Figura 36: Resultado da aproximação e fechamento dos polígonos referentes às características 'Swiss Cheese', os quais foram detectados parcialmente na imagem MOC. Essa transformação foi realizada empregando a função <i>cv2.approxPolyDP</i> e um valor de <i>Epsilon</i> (ϵ).	68
Figura 37: Resultado da aproximação e fechamento dos polígonos referentes às características 'Swiss Cheese', os quais foram detectados parcialmente na imagem HiRISE. Essa transformação foi realizada empregando a função <i>cv2.approxPolyDP</i> e um valor de <i>Epsilon</i> (ϵ).	69
Figura 38: Resultado da aproximação e fechamento dos polígonos referentes às características 'Swiss Cheese', os quais foram detectados parcialmente na imagem MOC. Essa transformação foi realizada empregando a função <i>cv2.approxPolyDP</i> e um valor de <i>Epsilon</i> (ϵ), com a delimitação de retângulos envolventes simulando um <i>zoom</i> para realçar as áreas discutidas, bem como suas características específicas: a) Imagem MOC com aproximação e fechamento dos polígonos referentes às características <i>Swiss Cheese</i> ; b) Exemplificação de uma feição preenchida e aproximada; e c) Exemplificação de duas feições preenchidas e aproximadas. .	70
Figura 39: Resultado da aproximação e fechamento dos polígonos referentes às características 'Swiss Cheese', os quais foram detectados parcialmente na imagem HiRISE. Essa transformação foi realizada empregando a função <i>cv2.approxPolyDP</i> e um valor de <i>Epsilon</i> (ϵ), com a delimitação de retângulos envolventes simulando um <i>zoom</i> para realçar as áreas discutidas, bem como suas características específicas: a) Imagem HiRISE com aproximação e fechamento dos polígonos referentes às características <i>Swiss Cheese</i> ; b) Exemplificação de uma feição preenchida e aproximada; e c) Exemplificação de um conjunto de feições aproximadas e preenchidas e, em verde, os ruídos representados por pequenos polígonos.	70
Figura 40: Resultado da detecção de bordas por <i>Canny</i> após o processo de aproximação e preenchimento de polígonos de <i>Swiss Cheese Features</i> na imagem MOC: a) bordas detectadas	

por <i>Canny</i> com <i>wide-range</i> ; b) bordas detectadas por <i>Canny</i> com <i>mid-range</i> ; e c) bordas detectadas por <i>Canny</i> com <i>tight-range</i>	71
Figura 41: Resultado da detecção de bordas por <i>Canny</i> após o processo de aproximação e preenchimento de polígonos de <i>Swiss Cheese Features</i> na imagem HiRISE: a) bordas detectadas por <i>Canny</i> com <i>wide-range</i> ; b) bordas detectadas por <i>Canny</i> com <i>mid-range</i> ; e c) bordas detectadas por <i>Canny</i> com <i>tight-range</i>	71
Figura 42: Resultado da detecção de bordas por <i>Canny</i> após o processo de aproximação e preenchimento de polígonos de <i>Swiss Cheese Features</i> na imagem MOC, com a delimitação de retângulos envolventes simulando um <i>zoom</i> para realçar as áreas discutidas, bem como suas características específicas: a) Bordas detectadas por <i>Canny</i> com <i>wide-range</i> ; b) Exemplificação da feição com alguns ruídos residuais; e c) Exemplificação de duas feições com alguns ruídos em forma de polígonos pequenos.	72
Figura 43: Resultado da detecção de bordas por <i>Canny</i> após o processo de aproximação e preenchimento de polígonos de <i>Swiss Cheese Features</i> na imagem HiRISE, com a delimitação de retângulos envolventes simulando um <i>zoom</i> para realçar as áreas discutidas, bem como suas características específicas: a) bordas detectadas por <i>Canny</i> com <i>wide-range</i> ; b) Exemplificação da feição com alguns ruídos residuais; e c) Exemplificação das feições com alguns ruídos em forma de polígonos pequenos.	73
Figura 44: Resultado da sobreposição do resultado da rotina desenvolvida (em azul) sobre a imagem original MOC.....	74
Figura 45: Resultado da sobreposição do resultado da rotina desenvolvida (em azul) sobre a imagem original HiRISE.	74
Figura 46: Resultado da sobreposição do resultado da rotina desenvolvida (em azul) sobre a imagem original MOC, com a delimitação de retângulos envolventes simulando um <i>zoom</i> para realçar as áreas discutidas, bem como suas características específicas: a) Sobreposição do resultado na imagem original MOC; b) Exemplificação da feição com alguns ruídos residuais; e c) Exemplificação de duas feições com alguns ruídos em forma de polígonos pequenos. ...	75
Figura 47: Sobreposição do resultado da rotina desenvolvida (em azul) à imagem original HiRISE, com a delimitação de retângulos envolventes simulando um <i>zoom</i> para realçar as áreas discutidas, bem como suas características específicas: a) Sobreposição do resultado na imagem original HiRISE; b) Exemplificação da feição com alguns ruídos residuais; e c) Exemplificação de feições com alguns ruídos em forma de polígonos pequenos externos a feição, destacados em verde.	75
Figura 48: Sobreposição do resultado da rotina desenvolvida (em azul) à imagem original MOC com a diminuição do <i>buffer</i> , pós aplicação da operação morfológica <i>cv2.erode</i> . Delimitaram-se retângulos envolventes simulando um <i>zoom</i> para realçar as áreas discutidas, bem como suas características específicas: a) Sobreposição do resultado na imagem original MOC; b) Exemplificação de uma feição individual sem a presença de ruídos poligonais no seu interior e diminuição do <i>buffer</i> ; e c) Exemplificação de duas feições sem a presença de ruídos poligonais no seu interior e diminuição <i>buffer</i>	76
Figura 49: Sobreposição do resultado da rotina desenvolvida (em azul) à imagem original HiRISE com a diminuição do <i>buffer</i> , pós aplicação da operação morfológica <i>cv2.erode</i> . Delimitaram-se retângulos envolventes simulando um <i>zoom</i> para realçar as áreas discutidas, bem como suas características específicas: a) Sobreposição do resultado na imagem original HiRISE; b) Exemplificação da feição com a diminuição do <i>buffer</i> e com diminuição do tamanho	

dos polígonos residuais na área externa a feição; e c) Exemplificação das feições com a diminuição do tamanho dos polígonos residuais externos e <i>buffer</i>	77
Figura 50: Sobreposição do resultado da rotina desenvolvida (em azul) à imagem original MOC, pós aplicação da operação filtragem por área. a) Imagem MOC antes da aplicação de filtragem por área. b) Imagem MOC pós aplicação da filtragem por área.....	78
Figura 51: Sobreposição do resultado da rotina desenvolvida (em azul) à imagem original HiRISE, pós aplicação da operação filtragem por área. a) Imagem HiRISE antes da aplicação de filtragem por área. b) Imagem HiRISE pós aplicação da filtragem por área.....	78
Figura 52: Imagem representando a comparação exata entre a imagem de detecções MOC e sua referência. Em azul os verdadeiros negativos (TN), em verde os falsos positivos (FP), em vermelho os falsos negativos (FN) e em branco os verdadeiros positivos (TP).....	82
Figura 53: Imagem representando a comparação exata entre a imagem de detecções HiRISE e sua referência. Em azul os verdadeiros negativos (TN), em verde os falsos positivos (FP), em vermelho os falsos negativos (FN) e em branco os verdadeiros positivos (TP).....	82
Figura 54: Imagem 6 MOC. a) Imagem MOC original. b) Sobreposição do resultado da rotina desenvolvida (em azul) à imagem original MOC.....	85
Figura 55: Avaliação do desempenho do método com desvio padrão	86
Figura 56: Esquema da aplicação do método " <i>Shape from Shading</i> " com o objetivo de extrair informações de área e volume da imagem HiRISE de 2007. Em a), a imagem original é apresentada; em b), a imagem após a aplicação da detecção Swiss Cheese. Em c), o corte selecionado para extração de informações. Em d), a máscara de sombra para a sequência de cálculo. Em e), a representação da normal da superfície e, em f), a imagem de iluminação. Em g), a representação tridimensional baseada no método " <i>Shape from Shading</i> ".....	87
Figura 57: Esquema da aplicação do método " <i>Shape from Shading</i> " com o objetivo de extrair informações de área e volume da imagem HiRISE de 2010. Em a), a imagem original é apresentada; em b), a imagem após a aplicação da detecção Swiss Cheese. Em c), o corte selecionado para extração de informações. Em d), a máscara de sombra para a sequência de cálculo. Em e), a representação da normal da superfície e, em f), a imagem de iluminação. Em g), a representação tridimensional baseada no método " <i>Shape from Shading</i> ".....	88
Figura 58: Identificação das crateras na imagem: Em a), as crateras 1, 2 e 3 são discernidas na imagem HiRISE de 2007. Em b), as crateras 1, 2 e 3 são identificadas na imagem HiRISE de 2010.	88

Lista de Tabelas

Tabela 1: Tabela apresentando a performance estatística da extração das feições do tipo <i>Swiss Cheese</i> para a imagem MOC.	80
Tabela 2: Tabela apresentando a performance estatística da extração das feições do tipo <i>Swiss Cheese</i> para a imagem HiRISE	80
Tabela 3: Avaliação do desempenho da extração de recursos do <i>Swiss Cheese</i> nas imagens MOC/HiRISE	83
Tabela 4: Avaliação do desempenho da metodologia: Médias e desvios-padrão.	85
Tabela 5: Informações sobre a área e o volume extraídos das três crateras nas duas imagens HiRISE, juntamente a suas respectivas diferenças.	89
Tabela 6: Localização das imagens utilizadas nessa Dissertação.....	97
Tabela 7: Limiares utilizados para processamento, fechamento de polígono e de filtragem por área.....	99

LISTA DE ABREVIATURAS SIGLAS

RSPC - *The residual South polar cap of Mars*

NASA - *National Aeronautics and Space Administration*

MGS - *Mars Global Surveyor*

MOC - *Mars Orbiter Camera*

JPL - *Jet Propulsion Laboratory*

LS - *Longitude Solar*

ODY - *Mars Odyssey*

MRO - *Mars Reconnaissance Orbiter*

MDE - *Modelos Digitais de Elevação*

HiRISE - *High Resolution Imaging Science Experiment*

SFC - *Swiss Cheese Features*

MCS - *Mars Climate Sounder*

CO₂ - *Dióxido de Carbono*

H₂O - *Água*

CTX - *Context Camera*

MM - *Morfologia Matemática*

PDI - *Processamento Digital de Imagens*

USGS - *United States Geological Survey*

MOLA - *Mars Orbiter Laser Altimeter*

TES - *Thermal Emission Spectrometer*

USO/RS - *Ultrastable Oscillator*

MR - *Mars Relay*

MSSS - *Malin Space Science Systems*

CRISM - *Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars*

MCI - *Mars Color Imager*

SSR - *Shallow Subsurface Radar*

EE - *Elemento Estruturante*

TP - *Verdadeiro Positivo*

TN - *Verdadeiro Negativo*

FP - *Falso Positivo*

FN - *Falso Negativo*

N - *Normal à Superfície*

N₀ - Normal não Normalizada à Superfície

D - direção da luz

L - Luminância

OpenCV - Open Source Computer Vision

Sumário

1 INTRODUÇÃO	21
1.1 Considerações iniciais	21
1.2 Justificativa.....	23
1.3 Objetivos.....	24
2 ESTADO DA ARTE	25
3 REFERENCIAL TEÓRICO.....	35
3.1 Cartografia de Marte.....	35
3.2 Sensoriamento Remoto de Marte	36
3.2.1 <i>Mars Global Surgeyour</i>	37
3.2.2 <i>Mars Reconnaissance Orbiter</i>	37
3.3 Morfologia Matemática	38
3.3.1 Elemento Estruturante	38
3.3.2 Dilatação.....	39
3.3.3 Erosão	39
3.3.4 Abertura.....	40
3.3.5 Fechamento	41
3.4 Processamento Digital de Imagens.....	41
3.4.1 Pré-Processamento	42
3.4.2 Detecção de Bordas.....	42
3.4.2.1 <i>Canny</i>	42
3.5 Análise de Qualidade.....	43
3.5.1 <i>Completeza</i>	44
3.5.2 <i>Correção</i>	44
3.5.3 <i>Qualidade</i>	45
3.5.4 <i>F1-Score</i>	45
3.6 Extração de Informações	45
4 MATERIAIS E MÉTODO.....	49
4.1 Materiais	49
4.2 Método.....	49
4.2.1 Banco de Imagens	51
4.2.2 Características Geométricas principais dos padrões polares Swiss Cheese.....	53
4.2.3 Rotina de Detecção.....	55
4.2.4 Avaliação da Metodologia	57
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	59

5.1 Aplicação da função γ de contraste (Pré-Processamento)	59
5.2 Aplicação de Técnicas de PDI e MM	60
5.3 Análise dos Resultados	79
5.3.1 Análise Visual	79
5.3.2 Análise Estatística	80
5.4 Extração de Informações	86
6 CONCLUSÕES	90
REFERÊNCIAS	92
Apêndice A: Localização das imagens no banco de dados	97
Apêndice B: Limiares de Pré-Processamento, fechamento de polígono e filtragem por área ..	99

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

Marte, o quarto planeta do sistema solar em relação ao Sol, destaca-se por suas características singulares. Com um diâmetro médio de aproximadamente 6.794 km, o que equivale a cerca da metade do diâmetro terrestre, e uma massa correspondente a apenas um décimo da massa da Terra, Marte possui uma gravidade aproximadamente 38% da gravidade terrestre. Sua órbita elíptica o leva a variar sua distância em relação ao Sol, oscilando entre 206,7 milhões de km e 249,2 milhões de km (Gomes, 2022).

O planeta Marte é constituído por duas calotas permanentes em seus polos. Durante o inverno de um polo, ele permanece em escuridão contínua, resfriando a superfície em blocos de gelo. Quando os polos são expostos à luz solar, em outras estações, o gelo sublima. Vale ressaltar que sua atmosfera é composta principalmente por CO₂, cerca de 95% (Stavinschi et al. (s.d)).

A calota polar sul residual de Marte, do inglês *The residual South polar cap of Mars* (RSPC), difere de sua calota polar norte residual, tanto em sua composição, quanto na sua morfologia. No RSPC, as geadas de CO₂ são estabilizadas por seu alto albedo durante a primavera e o verão do sul, quando, apesar da insolação relativamente grande, absorve menos luz solar. A morfologia do RSPC no verão apresenta uma variedade de depressões quase circulares (James et al., 2007).

Informalmente denominadas de características de queijo suíço, do inglês *Swiss Cheese features*, são depressões quase circulares presentes na calota polar sul marciana, com bases planas e vertentes laterais íngremes (Byrne; Ingersoll, 2003). Essas cavidades irregulares e circulares são exclusivas para esse local em Marte e são interpretadas como tendo se formado por erosão (Thomas et al., 2000).

A presença do *Swiss Cheese* em Marte, de acordo com Bibring et al. (2004), na região da capa residual sul, ocorre devido à sublimação do gelo de dióxido de carbono (CO₂) presente na calota polar sul. Ele se encontra em uma camada fina de gelo de CO₂ sobreposta a uma camada mais espessa de gelo de água (H₂O).

É válido citar que essas feições foram visualizadas pela primeira vez no ano de 1999, a partir de uma sonda espacial, desenvolvida e operada pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e pela *Jet Propulsion Laboratory*, denominada *Mars Global Surveyor*

(MGS), utilizando uma câmera de alta resolução para fotografar a superfície do planeta, chamada de *Mars Orbiter Camera* (MOC) (Betz et al., 2009).

Existem alguns estudos (James et al., 2007; Betz et al., 2009; Mangold, 2011; Aftabi, 2016; Innanen, 2021; e Innanen et al., 2022) considerando o *Swiss Cheese features*; entretanto, tratando-se da detecção por Morfologia Matemática, visando ao seu mapeamento a partir de métodos automatizados e/ou semiautomatizados de Processamento Digital de Imagens, é ainda algo novo, a ser implementado.

Além disso, a comunidade científica tem concentrado esforços na tentativa de desenvolver rotinas que realizem a detecção automática e/ou semiautomática de feições em superfícies planetárias, como é o caso dos Rastros de *Dust Devils* (Statella et al., 2014; 2015), *Impact Craters* (Bandeira et al., 2007; Pedrosa et al., 2014; 2017), dunas de areia (Bandeira et al., 2011), vales (Molloy; Stepinski, 2007), *gullies* (Li et al., 2015) e *Slope Streaks* (Carvalho, 2016). Dentre essas feições apresentadas, os *Swiss Cheese features* destacam-se, pois, a partir de sua detecção, especialistas poderão utilizar os resultados obtidos e tais informações poderão auxiliar na compreensão de mecanismos climáticos, modificações morfológicas, comportamento do CO₂, evolução geológica, potencialidades exobiológicas, entre outros.

Também, segundo Wagstaff et al. (2012), a NASA possui um vasto banco de dados de imagens de alta resolução do planeta Marte, visando apoiar o desenvolvimento de metodologias semiautomáticas e/ou automáticas que detectem estes fenômenos na superfície marciana.

Esta pesquisa busca gerar contribuições significativas para a comunidade científica, fornecendo informações de alta qualidade sobre as características dos *Swiss Cheese*. Por meio da detecção dessa feição, profissionais e pesquisadores poderão realizar estudos mais avançados. Acredita-se que áreas como Ciências Planetárias e Geologia poderão se beneficiar dessa metodologia, utilizando os produtos gerados para realizar identificações, análises, inferências, descobertas e outros estudos.

A pesquisa visa desenvolver uma metodologia automática que possa detectar o *Swiss Cheese* em imagens planetárias obtidas por Sensoriamento Remoto, utilizando técnicas de Processamento Digital de Imagens e Morfologia Matemática. Além do mais, esta dissertação dá-se em continuidade à metodologia desenvolvida na Iniciação Científica, que obteve apoio de bolsas de iniciação científica dos tipos: PIBIC-CNPq (2019); PIBIC-Ações Afirmativas (2019-2020); FAPESP (Número do Processo: 2020/07357-5); e BEPE-FAPESP (Número do Processo: 2021/12584-3).

Ademais, esta pesquisa está incluída no grupo de Morfologia Matemática da Faculdade de Ciências e Tecnologia-UNESP, coordenado pelo Prof. Tit. Erivaldo Antonio da Silva, em parceria com o Prof. Dr. Pedro Miguel Berardo Duarte Pina, professor associado da Faculdade de Ciências e Tecnologia- Universidade de Coimbra, de Portugal.

1.2 Justificativa

Primeiramente, deve-se ressaltar que os *Swiss Cheese* são o resultado da sublimação de CO₂ proveniente da superfície de Marte. Como resultado, formam-se depressões quase circulares com a aparência de ‘queijo suíço’, daí a denominação. Essa feição é conhecida apenas na superfície de Marte, mais precisamente na calota polar sul marciana. Essa particularidade torna extremamente importantes seu estudo e seu mapeamento.

Thomas et al. (2000) comentam que os processos polares podem ser indicadores sensíveis do clima e as características geológicas associadas às calotas polares podem, portanto, indicar sua evolução no decorrer do tempo. E, ainda segundo James et al. (1979), essa morfologia distinta ocorre apenas dentro do limite residual da calota polar sul marciana.

Jakosky; Phillips (2001) afirmam que as descobertas feitas na última década tiveram um enorme impacto na compreensão da história da água marciana, voláteis e clima. Além de afirmarem, também, que se deve continuar a explorar a morfologia da superfície marciana, a fim de descobrir evidências de processos relacionados ao clima.

Além disso, segundo a Agência Espacial Brasileira (2009), a exploração é importante no aspecto científico porque se procura entender o que aconteceu em outros planetas, no universo e na Terra. Como ela foi gerada, o que ocorreu, dentre outras questões. Então, a exploração espacial traz informações sobre o ser humano e o planeta.

A detecção de *Swiss Cheese* também assume importância crucial na exploração da superfície de Marte, visto que o homem tem se preparado para uma futura missão espacial tripulada para aquele planeta. Dessa forma, o máximo conhecimento que os especialistas obtiverem sobre a superfície os auxiliará na tomada de decisões, no planejamento e na análise de custos, dentre outros aspectos. Esse feito representará um passo significativo na exploração espacial.

Também, de acordo com Wagstaff et al. (2012), a NASA possui um banco de dados considerável de imagens do planeta Marte. Além do mais, o interesse nos dados de

Sensoriamento Remoto, utilizando a Morfologia Matemática e o Processamento Digital de Imagens, tem sido cada vez maior, devido às grandes possibilidades de aplicação, como é o caso dos estudos sobre: Rastros de *Dust Devils* (Statella et al., 2014; 2015); *Impact Craters* (Bandeira et al., 2007; Pedrosa et al., 2014; 2017); dunas de areia (Bandeira et al., 2011); vales (Molloy; Stepinski, 2007); *gullies* (Li et al., 2015); e *Slope Streaks* (Carvalho, 2016). Desse modo, a pesquisa justifica-se, também, pela originalidade do tema e pela necessidade de buscar métodos de mapeamento e detecção de fenômenos particulares da superfície de Marte, mais precisamente dos *Swiss Cheese*.

1.3 Objetivos

O objetivo principal desta dissertação é o desenvolvimento de metodologia para a detecção automática de padrões polares *Swiss Cheese* na superfície de Marte, presentes em imagens digitais de alta resolução espacial. Os objetivos específicos são:

- Desenvolver rotinas híbridas, com operadores lineares e não-lineares de Processamento Digital de Imagens para serem aplicadas nos processos de detecção dos padrões polares de *Swiss Cheese*;
- Estudar a aplicação de uma etapa de Pré-Processamento nas imagens de entrada das áreas teste;
- Estudar a determinação de parâmetros para automatização do método;
- Avaliar estatisticamente a performance do método;
- Inferir características, como área e o volume, dos padrões polares *Swiss Cheese*, de um período especificado.

6 CONCLUSÕES

A metodologia aplicada provou ser um sucesso na consecução de seus objetivos. Os resultados obtidos por meio dessa metodologia são de fato notáveis, com desempenho geral do método excedendo a marca de 75%, ressaltando a qualidade em um conjunto diversificado de imagens MOC/HiRISE. Embora alguns desafios tenham sido encontrados, especialmente em casos de detalhes intrincados e recursos agrupados de perto, a metodologia demonstrou sua eficiência e confiabilidade na extração de recursos do *Swiss Cheese*.

Os resultados deste estudo têm implicações mais amplas para a pesquisa e a exploração da ciência planetária. A detecção automática de padrões de queijo suíço abre caminhos para investigações mais avançadas sobre os processos geológicos em Marte. Além disso, o sucesso dessa metodologia ressalta o potencial de abordagens semelhantes no estudo de outras características exclusivas das superfícies planetárias. A detecção e a análise precisas dessas características complexas são fundamentais para ajudar a decifrar as mudanças climáticas e a evolução geológica.

A integração da metodologia de detecção *Swiss Cheese* e da técnica *Shape from Shading* permitiu uma investigação das mudanças de área e volume em crateras selecionadas no período de 2007 a 2010. A aplicação dessa técnica permitiu a extração de informações tridimensionais, revelando aumentos substanciais na área e no volume das crateras selecionadas durante o período observado. O crescimento observado pode ser atribuído à natureza erosiva das características do queijo suíço, impulsionada pela sublimação do dióxido de carbono.

Ao abordar os objetivos da pesquisa e aproveitar técnicas avançadas de processamento de imagens digitais, morfologia matemática e reconstrução tridimensional, esta pesquisa não apenas apresenta uma nova abordagem para o estudo das feições polares marcianas, mas também fornece base para outras investigações em ciências planetárias e geologia. A eficácia da metodologia, apoiada por métricas estatísticas, abre caminho para futuras aplicações em estudos semelhantes, oferecendo uma ferramenta poderosa para a identificação, análise e compreensão de características complexas da superfície em corpos planetários.

Com base nos estudos realizados, surgem sugestões promissoras para direcionar futuros trabalhos. É recomendada a expansão do conjunto de dados, visando aumentar sua robustez por meio da aquisição de um volume maior de imagens. Além disso, propõe-se o desenvolvimento de etapas parciais de filtragem, com o propósito de eliminar bordas

erroneamente detectadas e, assim, aprimorar os resultados obtidos. Uma investigação relevante seria a comparação do método proposto com possíveis abordagens de aprendizado de máquina e/ou aprendizado profundo. Por fim, sugere-se a integração do módulo desenvolvido a uma interface, facilitando sua aplicação e tornando-o acessível à comunidade científica. Essas direções promissoras têm o potencial de aperfeiçoar significativamente a eficácia e a aplicabilidade da técnica estudada.

REFERÊNCIAS

- AFTABI, P. Kinematics Mapping and Monitoring of “Swiss Cheese” Features in the Polar Icy Regions Over Two Martian Years Base on HIRISE-MOC (NASA) Images”. In: LPI Editorial Board (Org.); Annual Planetary Geologic Mappers Meeting. **Anais**, LPI Contributions. v. 1920, p.7002, 2016.
- AHMAD, T.; WILSON, R. C.; SMITH, W. A. P.; HAINES, T. S. F. Combining Probabilistic Shape-from-Shading and Statistical Facial Shape Models. In: G. Maino; G. L. Foresti (Orgs.); Image Analysis and Processing -- ICIAP 2011. **Anais**. p.680–690, 2011. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- ALOIMONOS, J. (YIANNIS); SHULMAN, D. Learning early-vision computations. **J. Opt. Soc. Am. A**, v. 6, n. 6, p. 908–919, 1989. Optica Publishing Group. Disponível em: <<https://opg.optica.org/josaa/abstract.cfm?URI=josaa-6-6-908>>.
- BANDEIRA, L.; MARQUES, J. S.; SARAIVA, J.; PINA, P. Automated Detection of Martian Dune Fields. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 8, n. 4, p. 626–630, 2011. IEEE. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5692810/>>.
- BANDEIRA, L. P. C.; SARAIVA, J.; PINA, P. Development of a methodology for automated crater detection on planetary images. **Lecture Notes in Computer Science**, v. 4477, p. 193–200, 2007. Berlin: Springer-Verlag, 1973-.
- BAO, W.; KOMATSU, R.; ASAMA, H.; YAMASHITA, A. Applying Albedo Estimation and Implicit Neural Representations to Well-Posed Shape from Shading. **IEEE Access**, v. 11, p. 40038–40048, 2023. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/10106241/>>.
- BARRON, J. T.; MALIK, J. Shape, Illumination, and Reflectance from Shading. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 37, n. 8, p. 1670–1687, 2015. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6975182/>>.
- BATSON, R. M.; BRIDGES, P. M.; INGE, J. L. **Atlas of Mars: the 1: 5,000,000 map series**. Scientific and Technical Information Branch, National Aeronautics and Space..., 1979.
- BELHUMEUR, P. N.; KRIEGMAN, D. J.; YUILLE, A. L. The Bas-Relief Ambiguity. **International Journal of Computer Vision**, v. 35, n. 1, p. 33–44, 1999. Disponível em: <<https://doi.org/10.1023/A:1008154927611>>.
- BETZ, E. O.; TITUS, T. N.; CUSHING, G. E. Determining the Heights and Distributions of Swiss Cheese Features on Mars South Polar Residual Cap Using Photoclinometry. 40th Annual Lunar and Planetary Science Conference. **Anais**, Lunar and Planetary Science Conference. p.1363, 2009.
- BIBRING, J.-P.; LANGEVIN, Y.; POULET, F.; et al. Perennial water ice identified in the south polar cap of Mars. **Nature**, v. 428, n. 6983, p. 627–630, 2004. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/nature02461>>.

BRASILEIRA, A. E. ESTUDO DE MARTE PODE AJUDAR PRESERVAR VIDA NA TERRA. Disponível em: <<https://www.gov.br/aeb/pt-br/assuntos/noticias/estudo-de-marte-pode-ajudar-preservar-vida-na-terra>>. Acesso em: 29/6/2023.

BROOKS, M. J. TWO RESULTS CONCERNING AMBIGUITY IN SHAPE FROM SHADING. **Association for the Advancement of Artificial Intelligence**, 1983.

BYRNE, S.; INGERSOLL, A. P. A Sublimation Model for Martian South Polar Ice Features. **Science**, v. 299, n. 5609, p. 1051–1053, 2003. American Association for the Advancement of Science. Disponível em: <<https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.1080148>>. Acesso em: 14/5/2022.

CANNY, J. A Computational Approach to Edge Detection. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. PAMI-8, n. 6, p. 679–698, 1986.

CARDIM, G. P. **Desenvolvimento do sistema computacional CARTOMORPH para processamento de imagens de sensoriamento remoto**, 2015. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/124063>>.

CARVALHO, F. P. S. **Deteção automática e análise temporal de slope streaks na superfície de Marte**, 2016. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/137807>>.

DING, L.; GOSHTASBY, A. On the Canny edge detector. **Pattern Recognition**, v. 34, n. 3, p. 721–725, 2001. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031320300000236>>.

DISTANTE, A.; DISTANTE, C. Shape from Shading. **Handbook of Image Processing and Computer Vision: Volume 3: From Pattern to Object**. p.413–478, 2020. Cham: Springer International Publishing. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-42378-0_5>.

DUROU, J.-D.; PIAU, D. Ambiguous Shape from Shading with Critical Points. **Journal of Mathematical Imaging and Vision**, v. 12, n. 2, p. 99–108, 2000. Disponível em: <<https://doi.org/10.1023/A:1008361021281>>.

FETAI, B.; GRIGILLO, D.; LISEC, A. Revising Cadastral Data on Land Boundaries Using Deep Learning in Image-Based Mapping. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 11, n. 5, 2022. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2220-9964/11/5/298>>.

GOMES, O. DA F. M. **Processamento e análise de imagens aplicados à caracterização automática de materiais** Rio de Janeiro: Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Metalúrgica), 2001. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.academia.edu/download/61542319/OGomes_Mestrado20191217-58900-Side8x.pdf>.

GOMES, T. C. Exogeodiversidade e divulgação científica para o ensino de Geografia: feições eólicas de Marte. **Digital Repository - UFRGS**, 2022. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/250718>>.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Digital Image Processing**. Prentice Hall, 2008.

HORN, B. K. P. Shape from shading: A method for obtaining the shape of a smooth opaque object from one view. 1970.

INNANEN, A. C. Aphelion Cloud Formation and Swiss Cheese Sublimation: Martian Atmospheric Water Vapour Processes. **Directory - Master of Science**, 2021.

INNANEN, A. C.; LANDIS, M. E.; HAYNE, P. O.; MOORES, J. E. Mapping Swiss Cheese Terrain at the Martian South Pole to Understand its Possible Atmospheric Interactions. 52nd Lunar and Planetary Science Conference. **Anais**, Lunar and Planetary Science Conference. p.2074, 2021.

INNANEN, A. C.; LANDIS, M. E.; HAYNE, P. O.; MOORES, J. E. Possible Atmospheric Water Vapor Contribution from Martian Swiss Cheese Terrain. **The Planetary Science Journal**, v. 3, n. 10, p. 242, 2022. IOP Publishing.

JAKOSKY, B. M.; PHILLIPS, R. J. Mars' volatile and climate history. **nature**, v. 412, n. 6843, p. 237–244, 2001. Nature Publishing Group UK London.

JAMES, P. B.; BRIGGS, G.; BARNES, J.; SPRUCK, A. Seasonal recession of Mars' south polar cap as seen by Viking. **Journal of Geophysical Research**, v. 84, n. B6, p. 2889, 1979.

JAMES, P. B.; THOMAS, P. C.; WOLFF, M. J.; BONEV, B. P. MOC observations of four Mars year variations in the south polar residual cap of Mars. **Icarus**, v. 192, n. 2, p. 318–326, 2007. Elsevier.

LI, W.; DI, K.; YUE, Z.; LIU, Y.; SUN, S. Automated Detection of Martian Gullies from HiRISE Imagery. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 81, n. 12, p. 913–920, 2015. Elsevier. Disponível em:
<<http://openurl.ingenta.com/content/xref?genre=article&issn=0099-1112&volume=81&issue=12&spage=913>>.

MANGOLD, N. Ice sublimation as a geomorphic process: A planetary perspective. **Geomorphology**, v. 126, n. 1, p. 1–17, 2011. Disponível em:
<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X10005209>>.

MARQUES FILHO, O.; NETO, H. V. **Processamento digital de imagens**. Brasport, 1999.

MIRANDA, J. I.; CAMARAGO NETO, J. Detecção de bordas com o modelo de difusão anisotrópica. **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO**, 2007. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO**, 13., 2007, Florianópolis~....

MISSIONS/NASA/MGS/MRO. NASA – Missions – Mars Global Surveyor and Mars Reconnaissance Orbiter. Disponível em: <<http://mars.jpl.nasa.gov/missions/>>.

MISSIONS/NASA/MSSS/MOC. NASA - Malin Space Science Systems - Mars Global Surveyor – Mars Orbiter Camera. Disponível em:
<https://mars.nasa.gov/mgs/msss/camera/images/nature_polar/np_2c/>. Acesso em: 10/4/2022.

- MOLLOY, I.; STEPINSKI, T. F. Automatic mapping of valley networks on Mars. **Computers & Geosciences**, v. 33, n. 6, p. 728–738, 2007. Elsevier. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0098300406002159>>.
- MONGUS, D.; ŽALIK, B. An efficient approach to 3D single tree-crown delineation in LiDAR data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 108, p. 219–233, 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271615001951>>.
- OLIENSIS, J. Shape from shading as a partially well-constrained problem. **CVGIP: Image Understanding**, v. 54, n. 2, p. 163–183, 1991a. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/104996609190061S>>.
- OLIENSIS, J. Uniqueness in shape from shading. **International Journal of Computer Vision**, v. 6, n. 2, p. 75–104, 1991b. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/BF00128151>>.
- OREN, M.; NAYAR, S. K. Generalization of Lambert’s Reflectance Model. Proceedings of the 21st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. **Anais, SIGGRAPH ’94**. p.239–246, 1994. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery. Disponível em: <<https://doi.org/10.1145/192161.192213>>.
- PEDROSA, M. M.; DE AZEVEDO, S. C.; DA SILVA, E. A.; DIAS, M. A. Improved automatic impact crater detection on Mars based on morphological image processing and template matching. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, v. 8, n. 2, p. 1306–1319, 2017. Taylor & Francis. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/19475705.2017.1327463>>.
- PEDROSA, M. M.; PINA, P.; MACHADO, M.; BANDEIRA, L.; SILVA, E. A. Automated crater detection in Rachmaninoff basin. European Planetary Science Conference. **Anais**. v. 9, 2014. Disponível em: <<https://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC2014/EPSC2014-546.pdf>>.
- PRADOS, E.; FAUGERAS, O. Shape from Shading. In: N. Paragios; Y. Chen; Olivier Faugeras (Orgs.); **Handbook of Mathematical Models in Computer Vision**. p.375–388, 2006. Boston, MA: Springer US. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/0-387-28831-7_23>.
- PRADOS, E.; FAUGERAS, O.; ROUY, E. Shape from Shading and Viscosity Solutions. In: A. Heyden; G. Sparr; M. Nielsen; P. Johansen (Orgs.); Computer Vision --- ECCV 2002. **Anais**. p.790–804, 2002. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- PRADOS; FAUGERAS. “Perspective shape from shading” and viscosity solutions. Proceedings Ninth IEEE International Conference on Computer Vision. **Anais**. p.826–831 vol.2, 2003.
- SERRA, J. Image analysis and mathematical morphology. **JSTOR**, 1982. Academic press.
- SOILLE, P. **Morphological image analysis: principles and applications**. Springer, 2003.
- STATELLA, T.; PINA, P.; DA SILVA, E. A. Automated determination of the orientation of dust devil tracks in mars orbiter images. **Advances in Space Research**, v. 53, n. 12, p. 1822–

1833, 2014. Elsevier. Disponível em:

<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0273117713002676>>.

STATELLA, T.; PINA, P.; SILVA, E. A. DA. Extensive computation of albedo contrast between martian dust devil tracks and their neighboring regions. **Icarus**, v. 250, p. 43–52, 2015. Elsevier. Disponível em:

<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0019103514006514>>.

STAVINSCHI, M.; GARCÍA, B.; SOSA, A. Publicações da NASE Sistema Solar e Exoplanetas. . Acesso em: 28/6/2023.

THOMAS, P. C.; MALIN, M. C.; EDGETT, K. S.; et al. North–south geological differences between the residual polar caps on Mars. **Nature**, v. 404, n. 6774, p. 161–164, 2000. Nature Publishing Group UK London. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/35004528>>.

THOMAS, P. C.; MALIN, M. C.; JAMES, P. B.; et al. South polar residual cap of Mars: Features, stratigraphy, and changes. **Icarus**, v. 174, n. 2, p. 535–559, 2005. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103504003203>>.

VALE, G. DO; POZ, A. D. Processo de detecção de bordas de Canny. **Boletim de Ciências Geodésicas**, p. 67–78, 2004. Disponível em: <<http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs-2.2.4/index.php/bcg/article/viewArticle/1421>>.

WAGSTAFF, K. L.; PANETTA, J.; ANSAR, A.; et al. Dynamic Landmarking for Surface Feature Identification and Change Detection. **ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology**, v. 3, n. 3, p. 1–22, 2012. ACM New York, NY, USA. Disponível em: <<https://dl.acm.org/doi/10.1145/2168752.2168763>>.

WIEDEMANN, C. External Evaluation of Road Networks. **ISPRS Archives**, v. XXXIV, p. 93–98, 2003.

ZHANG, R.; TSAI, P.-S.; CRYER, J. E.; SHAH, M. Shape-from-shading: a survey. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 21, n. 8, p. 690–706, 1999.