



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



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
 **ERIVALDO ANTONIO DA SILVA**
Data: 08/03/2024 15:17:55-0300
Verifique em <https://validar.it.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
 **GUILHERME HENRIQUE BARROS DE SOUZA**
Data: 08/03/2024 15:26:06-0300
Verifique em <https://validar.it.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, Zaua, 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:

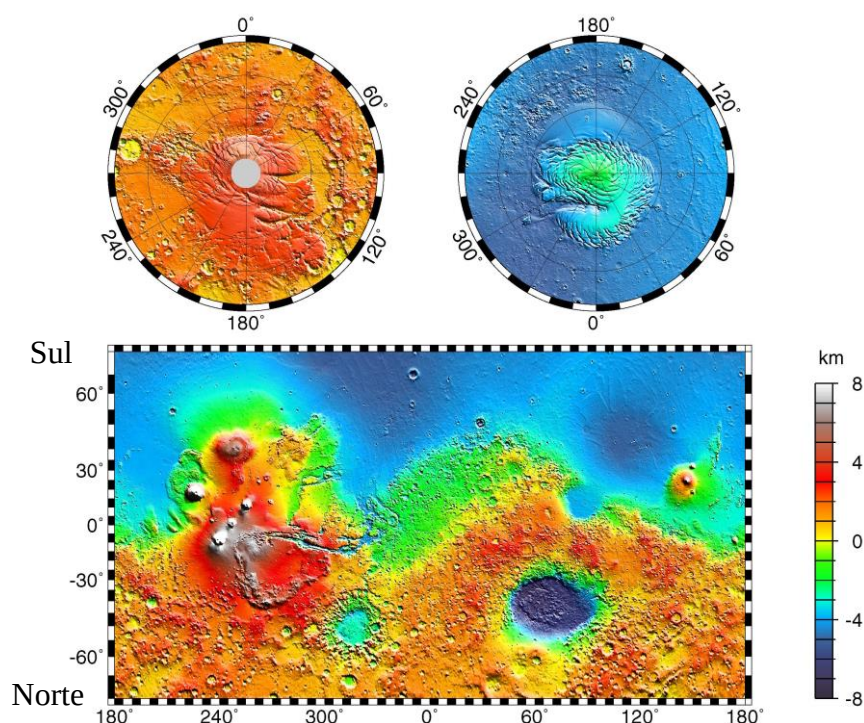
- Desenvolver rotinas híbridas, com operadores lineares e não-lineares de Processamento Digital de Imagens para serem aplicadas nos processos de detecção dos padrões polares de *Swiss Cheese*;
- Estudar a aplicação de uma etapa de Pré-Processamento nas imagens de entrada das áreas teste;
- Estudar a 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.

2 ESTADO DA ARTE

O Estado da Arte é uma pesquisa bibliográfica para encontrar, identificar e analisar as principais publicações relevantes sobre o tema de pesquisa. É crucial para um estudo, pois ajuda a conhecer o material já estudado sobre o assunto e evita esforços duplicados. No contexto desta pesquisa, o Estado da Arte será realizado para identificar as técnicas e as rotinas mais utilizadas com características semelhantes à feição de estudo, bem como para avaliar os estudos já realizados sobre a detecção das feições de interesse 'Swiss Cheese' na calota polar sul marciana.

Nesta temática, o termo Longitude Solar (Ls) será amplamente citado ao longo do documento. Esse conceito é frequentemente empregado na astronomia e planetologia para descrever a posição relativa de um planeta em sua órbita em torno do Sol, sendo especialmente relevante para determinar a estação do ano no planeta vermelho, Marte. Abaixo, na Figura 1, tem-se uma ilustração das coordenadas geográficas de Marte, além de exemplificar a calota polar sul residual e a calota polar norte residual.

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).

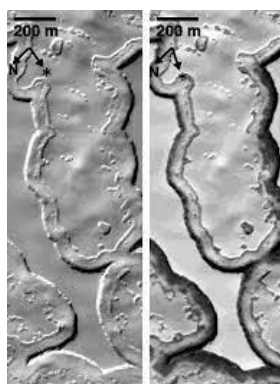


Fonte: Mars Orbiter Laser Altimeter Science Team

Desde que as formações do tipo *Swiss Cheese* foram vistas pela primeira vez, em 1999, nas imagens da *Mars Orbiter Camera* (MOC), alguns pesquisadores têm concentrado esforços na compreensão e na busca de informações sobre sua origem, composição, formação, características e relações com outras estruturas (Byrne; Ingersoll, 2003). Denominado de "*A Sublimation Model for Martian South Polar Ice Features*", o artigo descreve um modelo de sublimação que explica as características das calotas de gelo do polo sul de Marte.

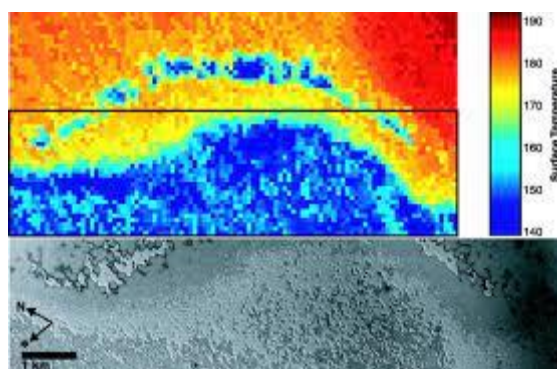
Os autores utilizam dados coletados por satélites (*Mars Global Surveyor* - MGS, *Mars Odyssey* - ODY e *Mars Reconnaissance Orbiter* - MRO) e análises estatísticas para identificar padrões nas mudanças sazonais das características das calotas de gelo. Eles propuseram que a sublimação, ou a transição direta do gelo para o estado gasoso, é o principal processo que causa as mudanças observadas nas características das calotas de gelo, incluindo a formação de fendas e depressões circulares conhecidas como *Swiss Cheese* (Figura 2 e Figura 3).

Figura 2: *Swiss Cheese Features* representado pela mudança no albedo quando a cobertura de gelo sazonal de CO₂ é removida e a capa de CO₂ 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.



Fonte: Byrne; Ingersoll (2003).

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 CO₂, e o material quente (vermelho) corresponde ao terreno ao redor dos temas e constituindo os pisos das depressões.



Fonte: Byrne; Ingersoll (2003).

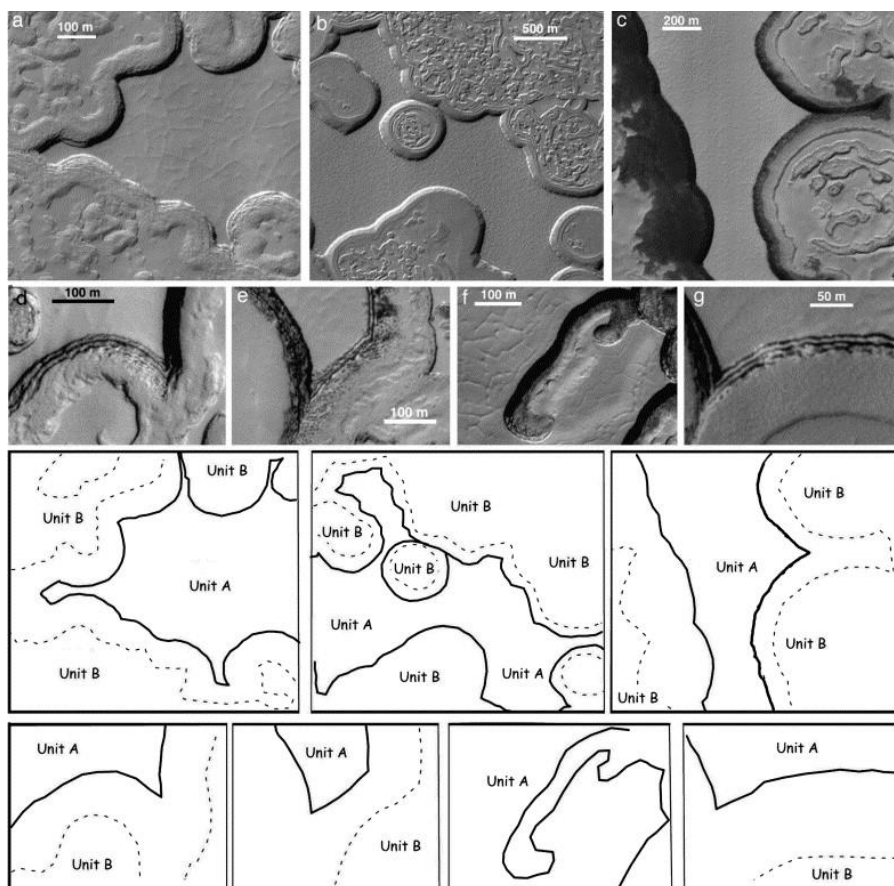
O modelo proposto pelos autores fornece uma explicação para a falta de água líquida na superfície de Marte e pode ter implicações para a busca de vida no planeta. Eles concluem que o modelo de sublimação pode ser aplicado em outros planetas com gelo na superfície, como Europa, uma das luas de Júpiter, onde a sublimação também pode ser um processo importante na formação de características geológicas.

O artigo "*MOC observations of four Mars year variations in the south polar residual cap of Mars*" desenvolvido por James et al. (2007), apresenta uma análise das variações anuais na calota polar sul de Marte ao longo de quatro anos marcianos, com base em dados obtidos pela câmera de contexto da MOC. Os autores analisaram as mudanças na aparência da calota polar sul, incluindo a formação e o desaparecimento de características de superfície, como canais escavados pelo vento, depósitos de poeira e acúmulos de gelo seco.

O RSPC consiste em duas grandes e principais unidades estratificadas depositadas em momentos diferentes, separadas por um período de erosão (Thomas et al., 2005). A unidade deposicional mais antiga (unidade A) é uma série de 4 a 6 camadas, cada uma com cerca de 2 m de espessura, com uma superfície superior geralmente marcada com cavas poligonais. Essa unidade é embalada por uma variedade de depressões com formas que variam de circulares a onduladas e sinuosas. Essas depressões têm tipicamente 200-1000 m de diâmetro. A unidade deposicional mais jovem, de superfície lisa, é a unidade B, em que ocorrem de 1 a 3 camadas, cada uma com cerca de 1 m de espessura. Esses materiais se distinguem da unidade A por suas superfícies mais lisas, espessuras menores e diferentes formas de erosão. A unidade B cobre

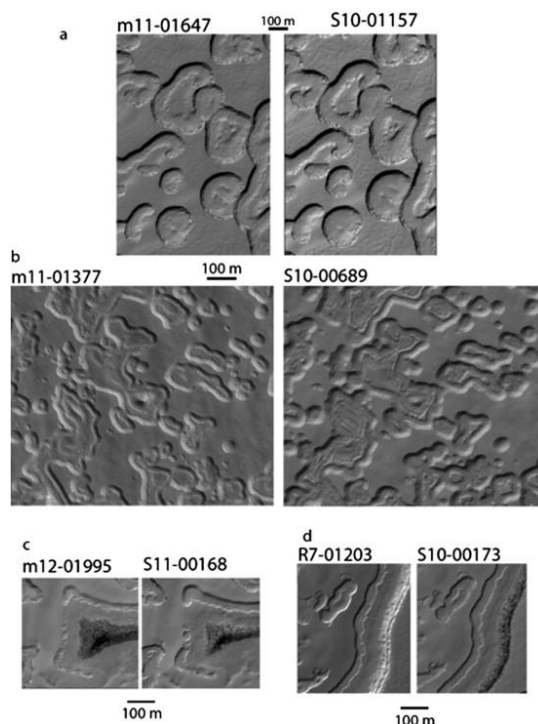
alguns detritos erosivos da unidade A e ocorre dentro de depressões erodidas na unidade A (Figura 4 e Figura 5).

Figura 4: Exemplificação das unidades A e B, segundo Thomas et al., 2005.



Fonte: Thomas et al., 2005.

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°.



Fonte: James et al. (2007)

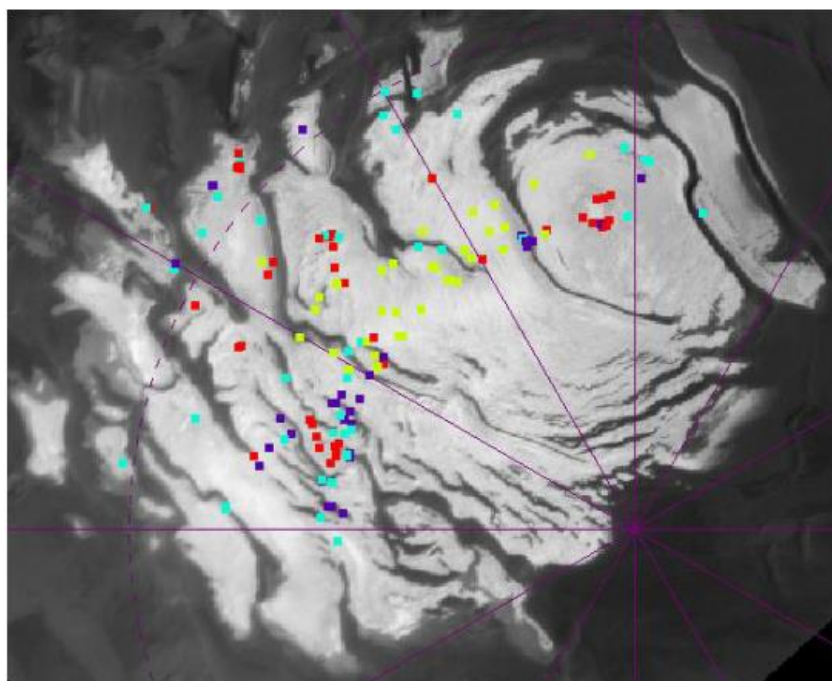
Eles também analisaram as mudanças nas coberturas de gelo e a velocidade com que ocorreram. Os resultados mostraram que as variações anuais na calota polar sul são complexas e variam consideravelmente de ano para ano. No entanto, os autores observaram uma tendência geral de aumento na cobertura de gelo durante os invernos marcianos e redução durante os verões marcianos. Essas observações são importantes para melhor entender as mudanças climáticas em Marte e como elas podem afetar a dinâmica da superfície do planeta.

Betz et al. (2009), em "*Determining the Heights and Distributions of Swiss Cheese Features on Mars South Polar Residual Cap Using Photoclinometry*", descrevem um estudo realizado para determinar a altura e a distribuição das características de queijo suíço na calota polar sul de Marte usando fotoclinometria. Esta é uma técnica usada para computar perfis topográficos a partir de uma distribuição de brilho da imagem, dado um albedo constante. Logo, os autores usaram dados de imagem obtidos pela MRO para criar modelos digitais de elevação

(MDE's) da área de estudo (MDE's limitados apenas a imagens MOC com albedo altamente uniforme) e determinar a altura e a distribuição das características de queijo suíço.

O mapeamento desses resultados (Figura 6) fornece uma distribuição indicativa de um RSPC que é mais espesso em suas regiões externas do que em seu centro. Os autores mostram que os maiores *Swiss Cheese Features*, unidade A (com a unidade envolvente B) e *Curl feature* (regiões com características onduladas) dominam as regiões externas do RSPC, além de mostrar que o terreno muito menor de “impressão digital” ocupa quase exclusivamente as porções internas do RSPC. As alturas para a Unidade A e B são de 8 ± 2.52 m e 1.9 ± 0.33 m, respectivamente.

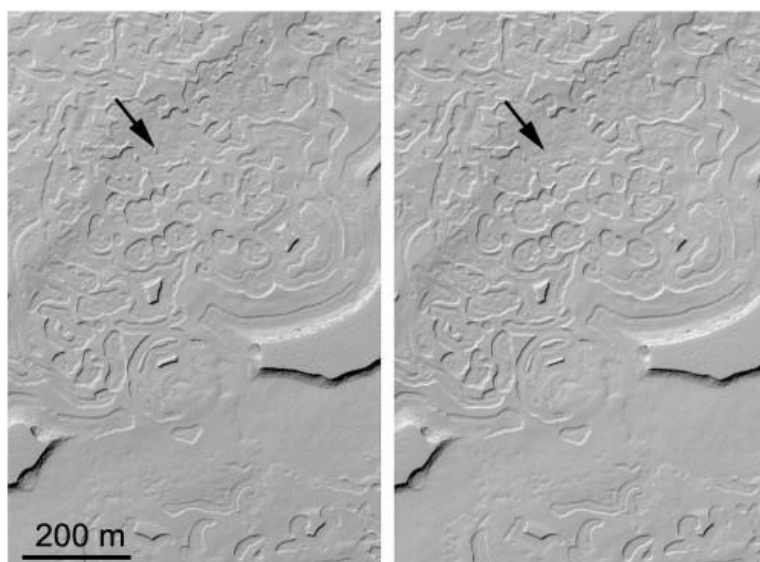
Figura 6: Distribuição espacial na calota polar dos MDE's de *Swiss Cheese Features*. Os quadrados roxos indicam as localizações da unidade A, o vermelho indica *Curl feature*, o amarelo indica a impressão digital e o ciano indica a unidade B.



Fonte: Betz et al. (2009)

Mangold (2011) apresenta um artigo de revisão, intitulado como "*Ice sublimation as a geomorphic process: A planetary perspective. Geomorphology*", no qual explora a sublimação de gelo como um processo geológico em corpos planetários, incluindo a Terra, a Lua e Marte. O autor destaca como a sublimação de gelo pode afetar a superfície planetária e discute as características geomorfológicas associadas a esse processo, como as depressões circulares conhecidas como *Swiss Cheese* e sua evolução (Figura 7).

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.

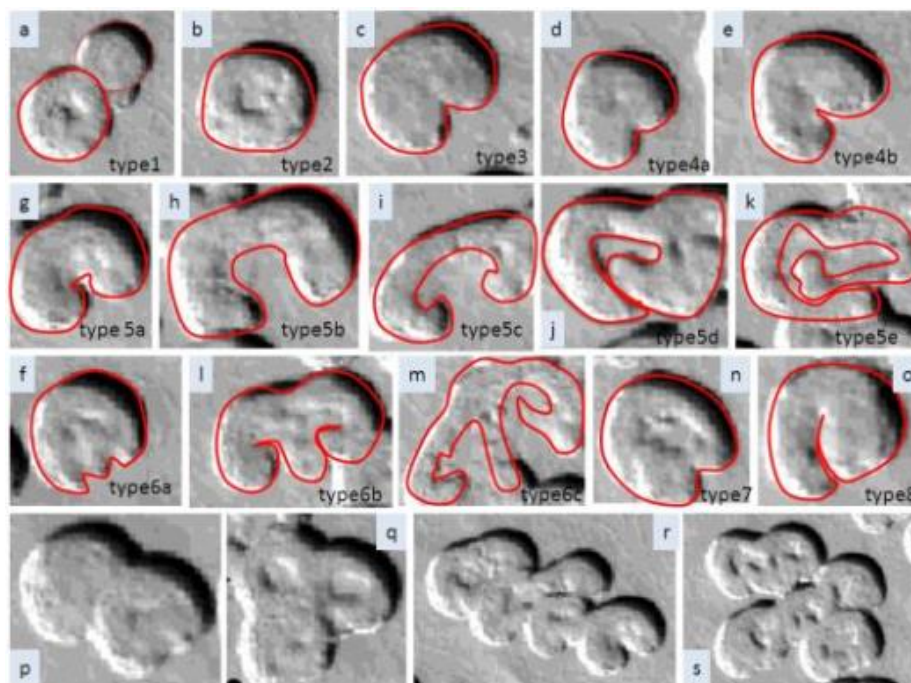


Fonte: Adaptado de NASA/JPL/MSSS por Mangold (2011)

Ele também apresenta exemplos de evidências observadas em imagens de satélite e dados coletados em missões espaciais que indicam a presença de sublimação de gelo em diferentes corpos planetários. Por fim, o autor destaca a importância de entender a sublimação de gelo como um processo geológico em estudos planetários e ressalta a necessidade de mais pesquisas para compreender melhor esse processo e seus efeitos nas superfícies planetárias.

No mais, Aftabi (2016) descreve a análise de imagens de alta resolução do polo sul de Marte, usando dados de duas câmeras da NASA: a *Mars Orbital Camera* (MOC) e a *High Resolution Imaging Science Experiment* (HiRISE). O foco do estudo é a detecção manual e o mapeamento das feições conhecidas como *Swiss Cheese*, que consistem em buracos de forma irregular na superfície do gelo polar marciano. Denominado de "*Kinematics mapping and monitoring of 'Swiss cheese' features in the polar icy regions of Mars over two Martian years based on HiRISE-MOC (NASA) images*", o artigo apresenta os resultados da análise de imagens capturadas ao longo de dois anos marcianos, mostrando a evolução e a movimentação das feições em questão, bem como a identificação manual de novas feições e mudanças na paisagem polar. Realiza-se também a descrição de 8 tipos diferentes de características de queijo suíço (Figura 8).

Figura 8: Diferentes classes (tipos) de feições de *Swiss Cheese Features* (SFC) baseadas em imagens.



Fonte: Aftabi (2016)

Na Figura 8, observam-se as diferentes formas em que a feição SFC podem ser encontradas. Essas irregularidades são caracterizadas por sua forma, que, na Figura 8-a), é denominada de Poços circulares, denominados como Tipo 1 pelo autor. Figura 8-b) Pontos quadrados chamados Tipo 2. Figura 8-c) SFC em forma de maçã chamado Tipo 3. Figura 8-d) SFC em formato de coração com frente pontiaguda denominado Tipo 4a. Figura 8-e) SFC em forma de coração com frente curva chamada Tipo 4b. Figura 8-g) SFC em forma de amêndoa indiana chamado Tipo 5a. Figura 8-h) Recursos SFC em forma de amêndoa indiana abertos chamados de Tipo 5b. i) Amêndoa indiana muito aberta com forma de ondulação no nariz chamada Tipo 5c. Figura 8-j) Amêndoa indiana desdobrada comprimida chamada Tipo 5d. Figura 8-k) Forma de amêndoa indiana dobrada comprimida de SFC chamada Tipo 5e. f) Forma de cogumelo jovem SFC chamado Tipo 6a. Figura 8-l) Forma de cogumelo maduro SFC chamado Tipo 6b. Figura 8-m) SFC de cogumelo altamente maduro chamado Tipo 6c com ondulação nas saliências no mapa. n) forma de maçã comprimida compactada SFC chamada de Tipo 7. Figura 8-o) forma de amêndoa circular comprimida dobrada antiga chamada de Tipo 8 pelo autor. p,q,r,s) Aglomerados SFC formaram aglomerados duplos, triplos ou em forma de flor.

O estudo contribui para a compreensão dos processos geológicos em Marte e tem implicações para futuras missões de exploração do planeta vermelho. Em síntese, o artigo teve como objetivo realizar o mapeamento e o monitoramento das feições de queijo suíço nas regiões polares geladas de Marte, por um período de dois anos marcianos, utilizando técnicas de mapeamento cinemático para acompanhar as mudanças na posição e na forma das características ao longo do tempo.

Recentemente, encontrou-se um estudo com maior proximidade com a temática a ser elaborada nesta dissertação. Esse estudo, elaborado por Innanen (2021), teve como objetivo a investigação da formação das nuvens de afélio e a sublimação do dióxido de carbono, caracterizando a formação dos *Swiss Cheese*. Intitulado "*Aphelion Cloud Formation and Swiss Cheese Sublimation: Martian Atmospheric Water Vapour Processes*", discute os processos envolvidos na formação de nuvens marcianas durante o período de afélio (quando Marte está mais distante do sol). O autor usou dados do instrumento *Mars Climate Sounder* (MCS) a bordo da nave MRO para estudar a distribuição vertical de água na atmosfera marciana durante esse período. Observou-se também o fenômeno conhecido como sublimação de queijo suíço, processo pelo qual o gelo em camadas subterrâneas, na região polar sul de Marte, sublima e forma buracos na superfície. Os resultados desse estudo ajudam a melhorar a compreensão sobre os processos atmosféricos em Marte e têm implicações para a busca de vida passada ou presente no planeta vermelho.

De forma geral, o estudo mapeou poços de queijo suíço para a observação de vapor d'água, excepcionalmente, durante o verão do sul do ano de Marte. Os pesquisadores propõem que a presença de água nessas crateras pode ser explicada por um fenômeno conhecido como "efeito estufa local". A metodologia adotada foi o desenho manual de polígonos no *ArcMap*, visando mapear os poços de queijo suíço dentro dos locais identificados.

Oriundo da dissertação de mestrado mencionada nos parágrafos anteriores, Innanen et al. (2022) publicaram o artigo "*Possible Atmospheric Water Vapor Contribution from Martian Swiss Cheese Terrain*", explorando a hipótese de que a paisagem de "queijo suíço" em Marte pode contribuir para o aumento de vapor de água na atmosfera do planeta. Os autores analisaram dados do instrumento MCS a bordo da nave MRO para estudar a distribuição vertical de água na atmosfera marciana. Os resultados mostraram que a região de queijo suíço em Marte está associada a uma maior concentração de vapor de água na atmosfera, em comparação às áreas circundantes. Além disso, a análise sugere que a sublimação do gelo presente nas camadas subsuperficiais da paisagem de "queijo suíço" pode ser uma fonte de vapor de água para a

atmosfera. Esses resultados têm implicações para a compreensão dos ciclos de água na atmosfera de Marte e podem ajudar a orientar futuras missões espaciais em busca de vida no planeta vermelho.

Corroborando a pesquisa acima, Innanen et al. (2021), em “*Mapping Swiss Cheese Terrain at the Martian South Pole to understand its possible atmospheric interactions*”, publicado na conferência “*52nd Lunar and Planetary Science Conference 2021*”, têm como objetivo examinar o potencial de liberação de vapor d’água se o terreno do queijo suíço em evolução temporal removesse o gelo de CO₂ suficiente na superfície do RSPC para descobrir o gelo de H₂O. Os autores utilizaram-se do *Murray Lab Mosaic*, que utiliza imagens *Context Camera* (CTX) a bordo da MRO. Foram identificadas unidades de queijo suíço dentro da Unidade A1, nas quais apenas áreas com menos de 10 km² foram mapeadas em sua totalidade. Para áreas menores que 10 km², cerca de 25% foram mapeados e áreas menores de 0.5 km² foram excluídas. Utilizou-se uma ferramenta de polígono no *ArcMap*. Destaca-se que os trabalhos de Innanen (2021) e Innanen et al. (2021; 2022) foram motivados por observações, em 1969, de uma quantidade considerável de vapor d’água sobre o RSPC durante o verão polar sul.

É importante ressaltar que a detecção automática de *Swiss Cheese* é um tema pouco explorado na literatura, enfatizando a relevância desta pesquisa. A complexidade intrínseca dessa característica demanda uma análise abrangente, não apenas focada em sua forma ou material ejetado, mas também considerando descritores de irregularidade no contorno, identificação de partes quebradas ou ausentes, bem como as principais dificuldades relacionadas às bordas erodidas, à falta de uniformidade, às diversas condições de iluminação nas imagens, à qualidade e à resolução espacial das imagens, à proximidade entre as características de queijo suíço, e suas variações significativas de tamanho. Ao incorporar técnicas de Morfologia Matemática (MM) e Processamento Digital de Imagens (PDI), esta pesquisa não apenas preenche uma lacuna na literatura, mas também oferece contribuições práticas para aprimorar a detecção e análise de feições planetárias complexas.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção serão abordados alguns dos principais temas, apresentando a cartografia de Marte para facilitar o entendimento, além de discutir o Sensoriamento Remoto aplicado ao planeta e os sensores específicos a serem utilizados, Morfologia Matemática, Processamento Digital de Imagens e Análise de Qualidade. Observa-se uma distinção entre Morfologia Matemática e Processamento Digital de Imagens. Embora pudesse haver a opção de agrupá-los em um único tópico, optou-se por separá-los em seções distintas. Essa escolha foi feita para enfatizar que, nesta pesquisa, destaca-se a combinação das técnicas de Morfologia Matemática com as de Processamento Digital de Imagens. O intuito é a hibridização dessas técnicas, em vez de uma abordagem generalizada. Reconhecendo a relação entre elas, neste trabalho, buscou-se a individualização das etapas para proporcionar uma compreensão mais clara e específica do processo.

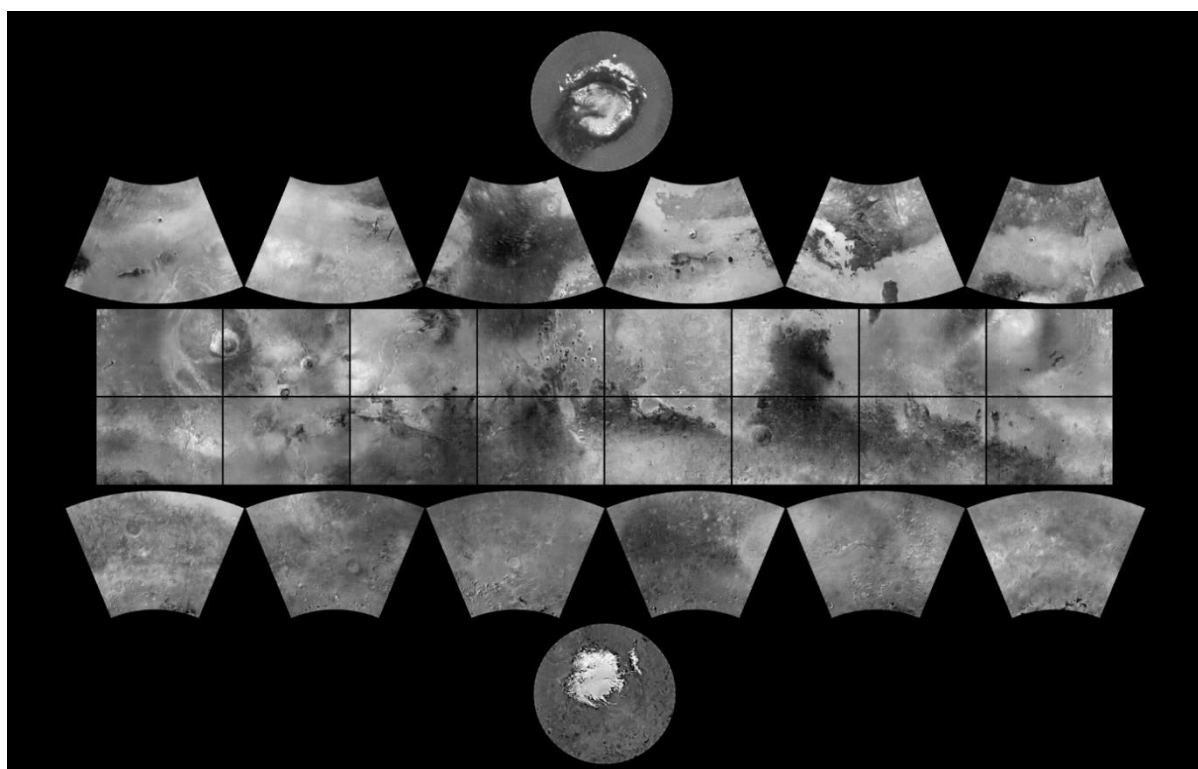
3.1 Cartografia de Marte

O *U.S. Geological Survey* (USGS) é um dos principais órgãos responsáveis pela elaboração de mapas de Marte, utilizando as informações coletadas pelas missões espaciais para criar mapas detalhados que representam a superfície do planeta. Esses mapas são usados para estudos científicos e para planejamento de futuras missões de exploração do planeta. Várias missões espaciais foram responsáveis por coletar informações para a elaboração desses mapas, incluindo as sondas Viking 1 e 2, *Mars Global Surveyor*, *Mars Odyssey*, *Mars Express*, *Mars Reconnaissance Orbiter*, entre outras (Gomes, 2022). As informações coletadas por essas missões incluem imagens de alta resolução, dados topográficos e de gravidade, além de informações sobre a composição química da superfície do planeta. Gomes (2022) apresenta uma síntese cronológica de seis décadas de exploração científica sobre o Planeta Vermelho e suas principais missões exploratórias.

Em 1971, a sonda Mariner 9 tornou-se o primeiro satélite artificial de Marte, quando entrou em órbita marciana, com funcionamento por um período de 2 anos. A partir das imagens disponibilizadas por essa sonda, a USGS realizou um mapeamento sistemático de Marte, em que o planeta foi subdividido em 30 retângulos, representados em uma escala de 1:5.000.000. A escolha dessa escala foi embasada na resolução espacial das imagens da sonda Mariner 9, utilizadas como referência para o mapeamento. O objetivo do planejamento cartográfico foi garantir que os retângulos utilizados tivessem uma escala suficientemente grande para tornar

visíveis no mapa todas as feições geologicamente identificáveis presentes nas imagens. Para isso, assumiu-se que seria necessária uma resolução mínima de 5 a 8 elementos para a classificação geológica de uma feição, e que essa feição deveria ter uma dimensão mínima de 1 milímetro no mapa. Portanto, a escala de 1:5.000.000 foi selecionada para representar a superfície marciana com precisão (Batson et al. 1979).

Figura 9: Mapeamento Sistemático, realizado pela USGS



Fonte: Batson et al. (1979)

Na Figura 9, foi utilizada a Projeção de Mercator para representar a região equatorial, a Projeção Cônica Conforme de Lambert para as latitudes médias e a Projeção Polar Estereográfica para os polos. Com essas projeções, é possível visualizar com maior precisão o mapeamento mencionado anteriormente.

3.2 Sensoriamento Remoto de Marte

Como mencionado em Gomes (2022), há cerca de 6 décadas de exploração e algumas missões, como *Mars Global Surveyor* (MGS) e *Mars Reconnaissance Orbiter* (MRO),

destacam-se devido à alta resolução espacial de suas câmeras (*Mars Orbiters Camara* -MOC e *High Resolution Imagins Science Experiment* – HiRISE, respectivamente).

3.2.1 *Mars Global Surgeyour*

A missão MGS operou no período de 1996 a 2006 e possuía uma série de cinco instrumentos científicos que desempenhavam funções específicas para a coleta de dados e informações sobre Marte. O primeiro deles era a MOC, uma câmera capaz de tirar fotos em alta resolução da superfície do planeta. O segundo instrumento era o *Mars Orbiter Laser Altimeter* (MOLA), que utilizava um altímetro a laser para medir a altitude de diferentes pontos em Marte. O terceiro instrumento era o *Thermal Emission Spectrometer* (TES), um espectrômetro de emissões térmicas que detectava a presença de certos minerais na superfície do planeta.

Além disso, a sonda contava com o MAG/ER, um conjunto de instrumentos que incluía um magnetômetro e um reflectômetro eletrônico, para medir o campo magnético e as propriedades elétricas de Marte. O *Ultrastable Oscillator* (USO/RS) era um oscilador ultra estável utilizado para medições do efeito Doppler. Por fim, a *Mars Relay* (MR) consistia em uma antena utilizada para retransmitir dados.

A MOC era um conjunto de três instrumentos que trabalhavam simultaneamente. Um deles era uma câmera de abertura angular pequena, responsável pela coleta de imagens pancromáticas de alta resolução, geralmente de 1,5 a 12 m por pixel, na faixa espectral de $\sim 0,5$ a $0,9 \mu\text{m}$. As outras duas câmeras eram de grande-angular, coletando dados nas faixas espectrais do azul ($\sim 0,4 - 0,5 \mu\text{m}$) e vermelho ($\sim 0,6 - 0,7 \mu\text{m}$), com resolução espacial variando de 240 metros a 7,5 quilômetros para mapeamento global diário (MISSIONS/NASA/MSSS/MOC, 2000).

3.2.2 *Mars Reconnaissance Orbiter*

No satélite MRO (2006 até os dias atuais), há seis instrumentos científicos, cada um com sua própria finalidade e funcionalidade. Esses instrumentos incluem o High Resolution Imaging Science Experiment (HiRISE), o Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars (CRISM), a Context Camera (CTX), o Mars Color Imager (MCI), o Mars Climate Sounder (MCS) e o Shallow Subsurface Radar (SSR).

Para este trabalho será considerada a câmera HiRISE, que foi projetada para possibilitar

a identificação de características na superfície de Marte, com uma resolução espacial impressionante, de 30 cm (podendo ir até 25 cm). Com 70 cm de diâmetro e 1,4 m de comprimento, essa câmera é capaz de gerar imagens em três faixas do espectro eletromagnético, incluindo azul/verde ($\sim 0,4 - 0,6 \mu\text{m}$), vermelho ($\sim 0,55 - 0,85 \mu\text{m}$) e infravermelho próximo ($\sim 0,8 - 1 \mu\text{m}$) (MISSIONS/NASA/MGS/MRO, 2005).

3.3 Morfologia Matemática

De acordo com Serra (1982), a Morfologia Matemática (MM) é uma teoria aplicada a imagens digitais construídas com base na teoria dos reticulados e da topologia. É fundamentada no processamento morfológico estruturado nos operadores invariantes de deslocamento, com base nas operações de Minkowski.

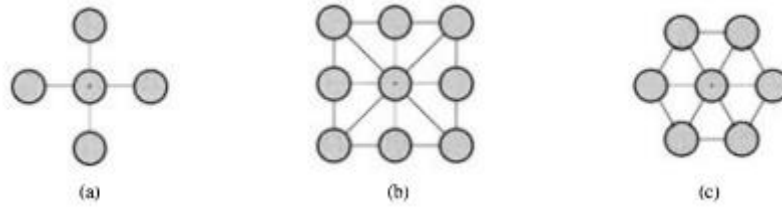
A MM foi desenvolvida, inicialmente, para imagens binárias e depois foi estendida, com sucesso, para imagens em tons de cinza e a cores. O processamento pode ser classificado em quatro classes de transformações elementares: Dilatações, erosões, anti-dilatações e anti-erosões. A partir dessas classes, é possível gerar métodos de extração de informações sobre imagens digitais utilizando a Morfologia Matemática.

Nesse contexto, a Morfologia Matemática servirá como fundamento metodológico neste trabalho, centrando-se principalmente em transformações elementares. O objetivo é adequar e implementar uma metodologia específica para o objeto de estudo em questão.

3.3.1 Elemento Estruturante

Elemento estruturante é um termo utilizado em processamento de imagens e visão computacional para se referir a uma matriz de números que é usada para operações de filtragem em uma imagem. A teoria se baseia no uso de elementos estruturantes, que são conjuntos definidos e conhecidos em termos de forma e tamanho, utilizados para comparar com o conjunto desconhecido presente na imagem. A Figura 10 (a, b e c) apresenta alguns exemplos de elementos estruturantes de tamanho 3×3 , com origem no centro do elemento (Soille, 2003).

Figura 10: Elemento estruturante - (a) cruz, (b) quadrado, (c) hexagonal.



Fonte: Soille (2003)

O elemento estruturante empregado neste estudo foi o retangular, uma vez que corresponde à configuração padrão da biblioteca *OpenCV* (*cv2.MORPH_RECT*).

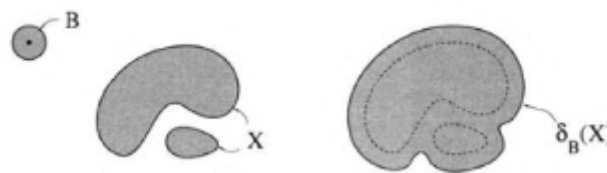
3.3.2 Dilatação

O processo de dilatação aumenta as partículas, preenche pequenos buracos e conecta grãos próximos. A dilatação de um conjunto X pelo elemento estruturante B é denotada por $\delta_B(X)$ e é definida como a posição dos pontos x tal que B toca X quando sua origem coincide com x (Soille, 2003), visível na equação 1.

$$\delta_B(X) = \{x | B_x \cap X \neq \emptyset\} \quad (1)$$

A definição acima pode ser estendida diretamente para imagens em tons de cinza, disponível na Figura 11.

Figura 11: Dilatação δ de um conjunto X por um elemento estruturante B .



Fonte: Soille (2003)

3.3.3 Erosão

O processo de erosão apresenta: a diminuição de partículas; a eliminação de grãos inferiores ao tamanho do elemento estruturante; o aumento de buracos; e permite a separação de grãos próximos. De acordo com Soille (2003), a erosão binária de um conjunto X por um

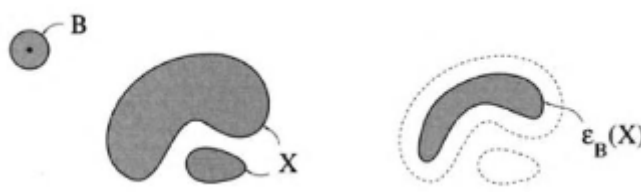
elemento estruturante B é denotada por $\varepsilon_B(X)$ e é definida como a posição dos pontos, x , tal que B está incluído em X quando sua origem está localizada em x (Equação 2):

$$\varepsilon_B(X) = \{x | B_x \subseteq X\} \quad (2)$$

Sabendo que B é o elemento estruturante, B desliza na imagem X , e cada pixel é comparado com sua vizinhança.

A definição acima, pode ser estendida diretamente para imagens em tons de cinza, disponível na Figura 12.

Figura 12: Erosão ε de um conjunto X por um elemento estruturante B .



Fonte: Soille (2003)

3.3.4 Abertura

Partindo do pressuposto de que a função erosão e a dilatação são duais, a aplicação da abertura tem por objetivo melhorar o contorno de uma figura.

Matematicamente (Equação 3), temos que a abertura γ de uma imagem f pelo elemento estruturante (e) é:

$$\gamma^e(f) = \delta^e(\varepsilon^e(f)) \quad (3)$$

Os efeitos da abertura são: separa partículas, elimina partículas com tamanho inferior a B , e após o processamento, o resultado se aproxima da imagem verdadeira. A definição acima pode ser estendida diretamente para imagens em tons de cinza, como na Figura 13.

Figura 13: Abertura γ de um conjunto X, por um elemento estruturante B.



Fonte: Soille (2003)

3.3.5 Fechamento

O fechamento, assim como a abertura, tende a suavizar os contornos, mas o que o difere da abertura é que o fechamento une partes. Tem característica de eliminar pequenos buracos e preencher fendas em um contorno. Ou seja, é a erosão, após uma dilatação. Temos que o fechamento φ de uma imagem f pelo elemento estruturante (e) (Equação 4):

$$\varphi^e(f) = \varepsilon^e(\delta^e(f)) \quad (4)$$

A definição acima pode ser estendida diretamente para imagens em tons de cinza, como na Figura 14.

Figura 14: Fechamento φ de um conjunto X, por um elemento estruturante B.



Fonte: Soille (2003)

3.4 Processamento Digital de Imagens

O Processamento Digital de Imagens (PDI) envolve processos expressos normalmente sob forma algorítmica, exceto as etapas de aquisição e exibição, nas quais a maioria das funções pode ser implementada via *software* (Marques Filho; Neto, 1999). Consiste

na manipulação de imagens pelo computador, de modo que a entrada e a saída do processo sejam imagens.

Neste contexto de pesquisa, PDI será empregado para realizar manipulações na imagem, bem como para extrair informações por meio de funções claramente definidas em bibliotecas *Python* e *Matlab*.

3.4.1 Pré-Processamento

É sabido que a imagem de entrada pode apresentar diversas imperfeições, tais como: presença de ruídos em seus níveis digitais, brilho inadequado (contraste). Logo, é necessário um pré-tratamento da imagem, buscando aprimorar sua qualidade para evidenciar o objeto de interesse (Gomes, 2001; Marques Filho; Neto, 1999).

3.4.2 Detecção de Bordas

Segundo Marques Filho; Neto (1999), borda é uma fronteira entre duas regiões cujos níveis de cinza predominantes são razoavelmente diferentes. É a transição entre áreas com características radiométricas diferentes. As bordas constituem informação de alta frequência, que normalmente definem o contorno dos objetos encontrados na imagem. São regiões de fronteiras entre o objeto e o fundo e entre contornos de objetos que se sobrepõe ou se tocam. As bordas dos objetos podem ser detectadas e pode se tornar possível a mensuração de suas propriedades básicas, como área, perímetro e forma. Consequentemente, a detecção de bordas é uma ferramenta indispensável para a análise de imagens (Miranda; Camargo Neto, 2007).

3.4.2.1 Canny

O detector de bordas *Canny* é a primeira derivada de uma Gaussiana e se aproxima do operador que otimiza o produto da relação sinal-ruído e localização. O algoritmo de detecção de bordas *Canny*, apresentado em Canny (1986), é dividido em 4 passos:

- i. Suavizar a imagem com um filtro Gaussiano;
- ii. Calcular a magnitude e a orientação do gradiente usando aproximações de diferenças finitas para as derivadas parciais;

- iii. Aplicar a supressão de não-máximos na magnitude do gradiente, ou seja, obter bordas com espessura de um pixel; e
- iv. Utilizar o algoritmo de duplo limiar para detectar e vincular bordas. Isso significa que ele utiliza um limiar inferior e outro superior para considerar o que é borda ou fundo. As informações de primeira ordem que forem filtradas só serão consideradas caso o pixel em questão esteja conectado a um pixel acima do limiar mais alto; caso contrário, ele é desprezado.

Essa sequência é amplamente empregada na visão computacional para identificar transições nítidas de intensidade e delimitar os limites dos objetos em uma imagem. Esse detector classifica um pixel como uma borda quando a magnitude do gradiente no pixel é maior do que a magnitude dos gradientes dos pixels em ambos os lados na direção da mudança de intensidade máxima (Ding; Goshtasby, 2001).

Este detector de bordas foi escolhido devido a sua flexibilidade, que independe da origem da imagem utilizada, da qual permite obter informações de contorno com alta qualidade e detalhes aprimorados (Vale; Dal Poz, 2004). Como mencionado no passo iv, o algoritmo utiliza um duplo limiar, referindo-se a um valor limite que determina quais transições de intensidade na imagem serão consideradas como borda e como fundo. Assim, são definidas três configurações pré-estabelecidas denominadas ampla-faixa (wide-range), faixa média (mid-range) e faixa estreita (tight-range). Cada uma dessas configurações implica critérios distintos para identificar o que será considerado uma borda, sendo a ampla-faixa mais permissiva, a faixa média com um limite intermediário e a faixa estreita mais restritiva. A variação dos limiares é importante, pois possibilita adaptar a sensibilidade da detecção de bordas às características específicas da feição de interesse na imagem, permitindo ajustes para maior sensibilidade ou seletividade, conforme necessário.

3.5 Análise de Qualidade

As métricas de controle de qualidade são fundamentalmente importantes para a avaliação quantitativa dos resultados. Para essa avaliação será utilizado o *software Cartomorph*, desenvolvido por Cardim (2015), no qual está inserido um conjunto de métricas que avaliam os resultados a partir de uma imagem de referência. As métricas utilizadas nesse trabalho serão as convencionais: *Completeza*, *Correção*, *Qualidade* e *F1-Score*. *Completeza* pode ser

interpretada como *Recall*, enquanto *Correção* como *Precision* (Fetai et al., 2022). Essa interpretação é importante, pois ela facilita a decomposição dos valores nos termos TP (Verdadeiro Positivo), TN (Verdadeiro Negativo), FP (Falso Positivo) e FN (Falso Negativo), fundamentais para o entendimento e avaliação da performance da metodologia, que serão descritos abaixo.

O termo TP descreve a capacidade da abordagem de detecção de identificar com precisão as áreas com características de *Swiss Cheese features*. O TN, quando a metodologia detecta as áreas que não têm tais características, destacando o que não faz parte do alvo de interesse. O FP ocorre quando o sistema erroneamente detecta características que não são *Swiss Cheese features*, gerando detecções incorretas. Finalmente, o FN acontece quando a abordagem não consegue detectar a feição de interesse.

3.5.1 Completeza

Essa métrica representa a porcentagem de pixels da imagem de referência, extraídos corretamente pelos métodos de extração (Equação 5). O valor pode variar no intervalo [0:1], sendo 1, tido como excelente (Wiedemann, 2003).

$$\begin{aligned} \text{completeza} &= \frac{\text{comprimento de referencia correspondente}}{\text{comprimento de referencia}} \approx (5) \\ &\approx \frac{|TP|}{|TP| + |FN|} \end{aligned}$$

3.5.2 Correção

Essa métrica representa a porcentagem de pixels, da imagem extraída, que coincidem com a imagem de referência (Equação 6). O valor pode variar no intervalo [0:1], sendo 1, tido como excelente (Wiedemann, 2003).

$$\begin{aligned} \text{correção} &= \frac{\text{Comprimento da extração correspondente}}{\text{comprimento da extração}} (6) \\ &\approx \end{aligned}$$

$$\approx \frac{|TP|}{|TP| + |FP|}$$

3.5.3 Qualidade

A métrica qualidade é obtida a partir dos resultados da *completeza* e *correção* (Equação 7); logo, não incorpora mais informações. No entanto, pode ser útil se for necessário realizar a análise com apenas um valor. Assim como as outras métricas citadas aqui, seu valor pode variar no intervalo [0:1], sendo 1, tido como excelente (Wiedemann, 2003).

$$\begin{aligned} \text{qualidade} &= \frac{\text{completeza} \times \text{correção}}{\text{completeza} - (\text{completeza} \times \text{correção}) + \text{correção}} \approx \\ &\approx \frac{|TP|}{|TP| + |FP| + |FN|} \end{aligned} \quad (7)$$

3.5.4 F1-Score

A métrica *F1 Score* (Equação 8) é definida como a média harmônica de *Precision* e *Recall* (Mongus; Žalik; 2015). Essa métrica é amplamente utilizada na comunidade científica, sendo essas, uma das razões da utilização nesse trabalho, para propor a comparação e a reprodutividade com outros métodos.

$$\begin{aligned} F1 \text{ Score} &= \frac{2 \times \text{completeza} \times \text{correção}}{\text{completeza} + \text{correção}} \approx \\ &\approx \frac{2 \times \text{Precision} \times \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \end{aligned} \quad (8)$$

3.6 Extração de Informações

Várias metodologias de extração de informações são empregadas para reconstrução tridimensional de objetos visando a extração de informações, incluindo segmentação de imagens (Gonzalez; Woods, 2008), análise da estrutura geométrica usando técnicas de morfologia matemática (MM), processamento avançado de imagens digitais (PDI) e visão computacional (Zhang et al., 1999). Na visão computacional, há uma série de técnicas

disponíveis para a reconstrução geométrica, incluindo a forma a partir do contorno (do inglês: shape from contour), forma a partir da textura (do inglês: shape from texture), forma a partir do movimento (do inglês: shape from motion), forma a partir do estéreo (do inglês: shape from stereo) e forma a partir do sombreado (do inglês: shape from shading) (Aloimonos; Shulman, 1989). O objetivo subjacente é obter uma descrição tridimensional da cena a partir de uma ou mais imagens bidimensionais. O "Shape-from-shading" dedica-se a recuperar a forma a partir das variações graduais de sombreado presentes na imagem (Durou; Piau, 2000).

O problema "*Shape from Shading*" envolve o cálculo da forma tridimensional de uma superfície com base em seu sombreado (Prados; Faugeras, 2006). Formulado por Horn (1970), o problema da forma a partir do sombreado é conhecido como um problema mal-posto, e vários artigos mostraram que a solução não é única (Oliensis, 1991a, 1991b); (Belhumeur et al., 1999); (Brooks, 1983); (Durou; Piau, 2000); (Prados et al., 2002); e (Prados; Faugeras, 2003). Consequentemente, foram encontradas dificuldades nos estudos, conforme demonstrado pelas ambiguidades côncavas/convexas (Prados; Faugeras, 2006). Em Belhumeur et al. (1999), foi demonstrado que, quando a direção da iluminação e a refletância Lambertiana (albedo) da superfície são desconhecidas, a mesma imagem pode ser obtida para uma família contínua de superfícies. Portanto, para essa abordagem, a direção da iluminação será conhecida por meio da incidência do ângulo solar, supondo que o modelo de refletância Lambertiana seja baseado na normal da superfície na direção da luz (Ahmad et al., 2011).

O processo envolve a determinação da normal à superfície e a utilização de informações de iluminação. A normal da superfície $N(x, y)$ é calculada usando os vetores tangentes $(1, 0, \frac{\partial f}{\partial x})$ e $(0, 1, \frac{\partial f}{\partial y})$. A normal não normalizada $N_0(x, y)$ é definida da seguinte forma:

$N_0(x, y) = (\frac{\partial f}{\partial x}(x, y), \frac{\partial f}{\partial y}(x, y), 1)$, e a normal normalizada $N(x, y)$ é calculada como:

$$N(x, y) = \frac{N_0(x, y)}{\|N_0(x, y)\|}.$$

A imagem sombreada obtida por uma luz infinita proveniente de uma determinada direção d é calculada usando um modelo de refletância Lambertiana. A luminância $L(x, y)$ é determinada pelo produto escalar entre a normal da superfície $N(x, y)$ e a direção da luz d .

O modelo de refletância Lambertiana se baseia na normal da superfície alinhada com a direção da luz para calcular a luminosidade (Ahmad et al., 2011); (Distante; Distante, 2020) e (Oren; Nayar, 1994). Portanto, na abordagem apresentada, a direção da luz é determinada com base no ângulo de incidência solar (θ_i). Essa suposição garante que o modelo esteja alinhado

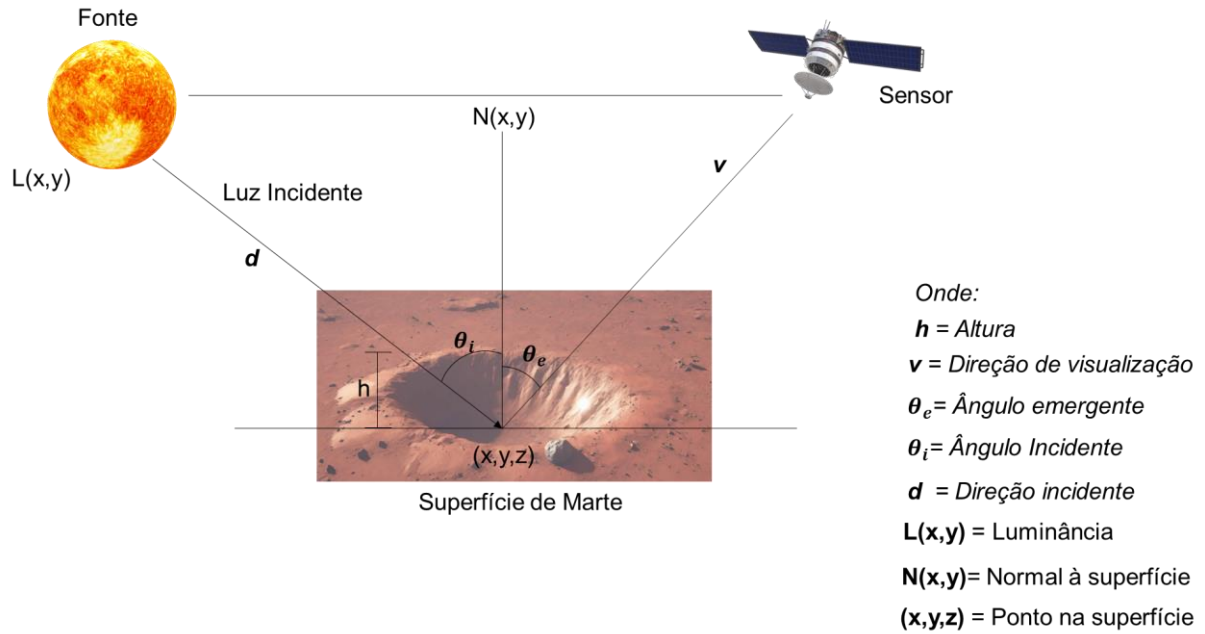
com as condições de iluminação natural, permitindo uma reconstrução mais precisa da superfície. É importante observar que o cálculo da normalidade da superfície envolve o uso de vetores tangentes e a aplicação de diferenças finitas para estimar derivadas parciais.

A normal da superfície $N(x, y)$ em cada ponto $(x, y, f(x, y))$ é calculada usando os vetores tangentes $(1, 0, \frac{\partial f}{\partial x})$ e $(0, 1, \frac{\partial f}{\partial y})$. Esses vetores tangentes representam a taxa de mudança da superfície para os eixos de coordenadas. Ao combinar esses vetores tangentes no vetor normal não normalizado $N_0(x, y) = (\frac{\partial f}{\partial x}(x, y), \frac{\partial f}{\partial y}(x, y), 1)$ e normalizá-lo, o algoritmo determina a direção perpendicular à superfície em cada ponto, o que é crucial para os cálculos de iluminação subsequentes. O modelo de refletância Lambertiana descreve como a luz interage com uma superfície. Ele pressupõe que a intensidade da luz refletida é diretamente proporcional ao cosseno do ângulo entre a normal da superfície e a direção da luz incidente. Matematicamente, a luminância $L(x, y)$ é calculada usando o produto de pontos entre a normal da superfície $N(x, y)$ e a direção da luz d :

$$L(x, y) = \max(N(x, y) \cdot d, 0) \quad (9)$$

A função de parte positiva $\max(\cdot, 0)$ garante que somente as contribuições positivas para a luminância sejam consideradas. Esse modelo é amplamente usado na visão computacional para estimar as propriedades da superfície a partir de imagens (Bao et al., 2023); (Barron; Malik, 2015). Abaixo, tem-se uma representação das etapas destacadas mencionadas na Figura 15.

Figura 15: Geometria envolvendo a técnica *Shape From Shading* para reconstrução tridimensional de uma cratera



A máscara é empregada para isolar as regiões de cratera na superfície normal. Os cálculos de área são realizados adicionando pixels dentro de cada cratera identificada, como segue abaixo.

$$A_i = \sum \text{pixel_dentro_máscara} * (\text{tamanho_pixel})^2 \quad (10)$$

Utilizando a grade de *voxels* da superfície tridimensional gerada pela técnica *Shape from Shading*, os volumes da cratera são calculados. A fórmula abaixo considera a contribuição de cada *voxel* para determinar o volume total da cratera.

$$V_i = \sum \text{Voxel_dentro_máscara} * (\text{tamanho_pixel})^3 \quad (11)$$

Essa etapa representa um experimento adicional, destacando a aplicabilidade desse tipo de pesquisa. A extração dessas informações será direcionada à escolha de um local específico, onde serão analisadas imagens em períodos distintos. Destaco que essa abordagem visa identificar as mudanças de volume e área ao longo do tempo, especialmente relacionadas à sublimação do gelo.

4 MATERIAIS E MÉTODO

4.1 Materiais

Os materiais utilizados foram:

- *IDE Jupyter Notebook*;
- *IDE PyCharm Community Edition*
- *Software Cartomorph*;
- *Software Matlab*;
- Imagens MOC e HiRISE.

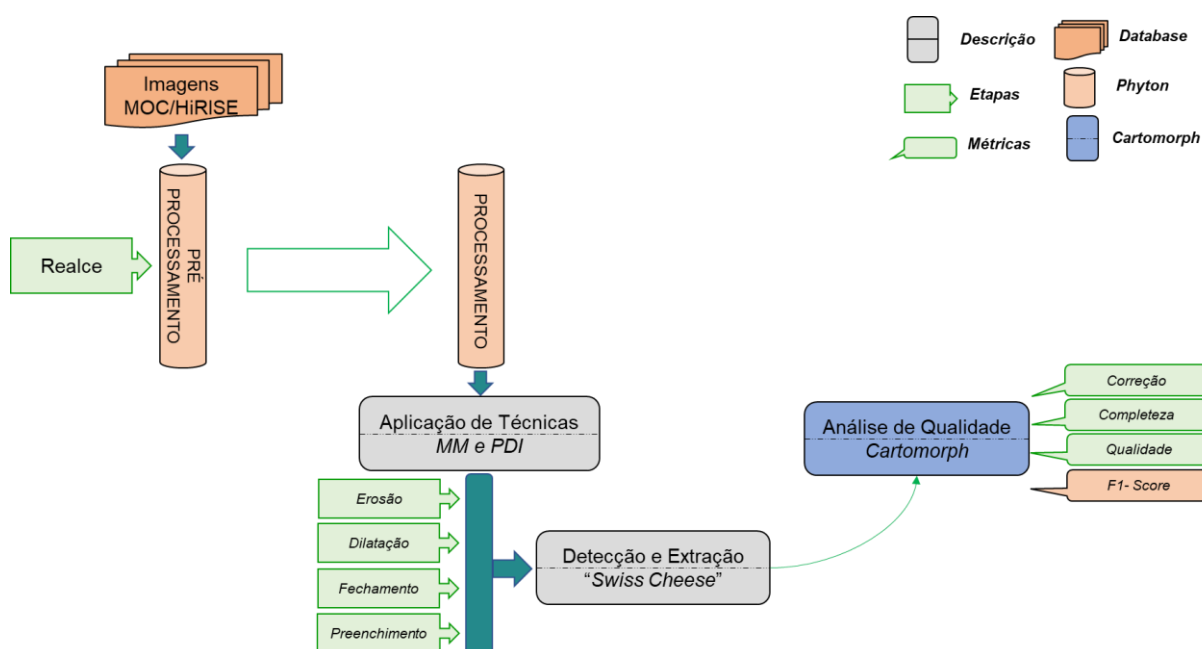
4.2 Método

A metodologia consistiu em selecionar as características de interesse em imagens digitais de alta resolução espacial, provenientes do banco de imagens disponibilizado pela NASA, obtidas pelas câmeras *MOC* e *HiRISE*. Foram utilizadas cenas recortadas da calota polar sul de Marte que continham a característica de interesse denominada *Swiss Cheese*. As características das imagens serão apresentadas na próxima seção. Os processos de detecção do objeto de estudo foram realizados utilizando a linguagem *Python*, em um ambiente de desenvolvimento integrado (*IDE Jupyter Notebook* e *PyCharm Community Edition*), a fim de garantir a reprodutibilidade dos resultados. As bibliotecas utilizadas foram *opencv*, *numpy* e *matplotlib*. Em resumo, a biblioteca OpenCV desempenha um papel crucial, oferecendo não apenas funcionalidades avançadas de processamento de imagens, como também funções fundamentais para operações básicas, incluindo a capacidade de ler e salvar imagens; a biblioteca *numpy*, fundamental nas funções de aproximação e fechamento de polígonos, tendo como principal característica a manipulação de *arrays* multidimensionais (matrizes); e *matplotlib*, que teve por finalidade a criação de visualizações gráficas de alta qualidade.

A abordagem adotada consistiu em desenvolver rotinas respaldadas em operadores morfológicos, integrados a técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI) não morfológicas. As etapas foram definidas levando-se em consideração a complexidade do alvo de interesse, sendo necessária a aplicação de uma etapa de realce, que denominamos como etapa de pré-processamento, a fim de destacar o objeto de interesse. Conduziu-se um estudo sobre a

metodologia de detecção da característica de interesse, adaptando estudos prévios realizados em alvos urbanos na superfície terrestre para alvos planetários na superfície de Marte. A imagem de entrada passou por uma sequência de etapas em uma rotina que teve como objetivo a detecção dos padrões polares. Para avaliar os resultados, foram utilizadas métricas estatísticas, tais como *correção*, *completeza* e *qualidade*, já implementadas no *software Cartomorph* e *F1-Score* implementada na linguagem *python*. A metodologia descrita pode ser visualizada na Figura 16.

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.



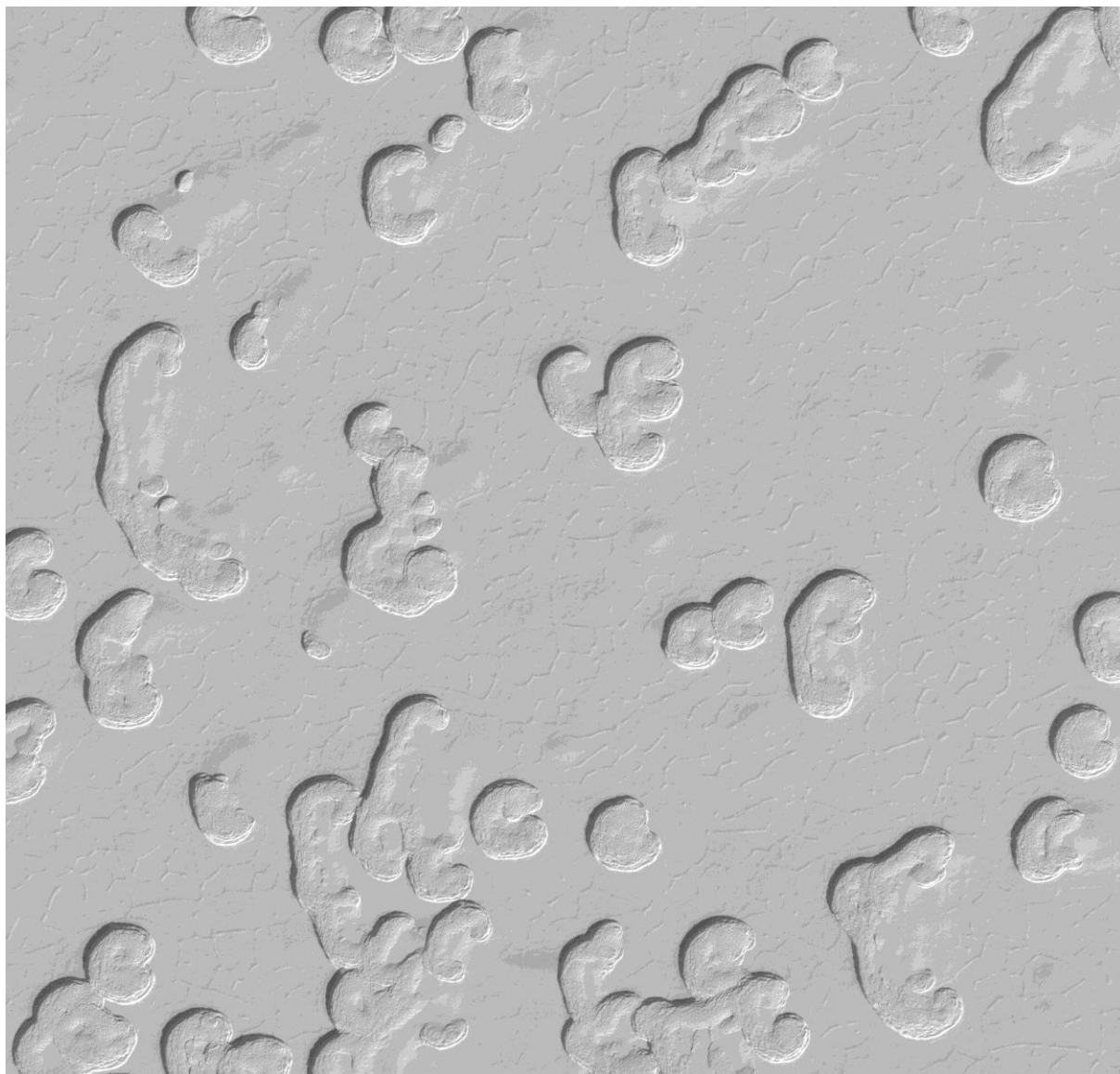
Em síntese, as etapas incluem a seleção das características de interesse em imagens digitais de alta resolução espacial, a partir do banco de imagens disponibilizado pela NASA, e a utilização de cenas recortadas da calota polar sul de Marte que contenham a característica de interesse denominada *Swiss Cheese*. Após a análise de qualidade, será conduzido um experimento de extração de informações, envolvendo a reconstrução tridimensional com a técnica de "shape from shading". Esse experimento tem como objetivo inferir a área e o volume de um período específico, utilizando duas imagens da mesma cena capturadas em momentos distintos.

4.2.1 Banco de Imagens

A escolha das imagens foi orientada pela disponibilidade de dados nos bancos de dados do *Malin Space Science System* para MOC e do *Lunar & Planetary Laboratory* para HiRISE. A seleção das imagens levou em consideração as condições de aquisição, incluindo tamanho do pixel e a presença dos padrões polares *Swiss Cheese* nas imagens. Para validar a metodologia desenvolvida neste estudo, foram selecionadas inicialmente uma imagem MOC e outra HiRISE, destinadas exclusivamente a testar a rotina proposta.

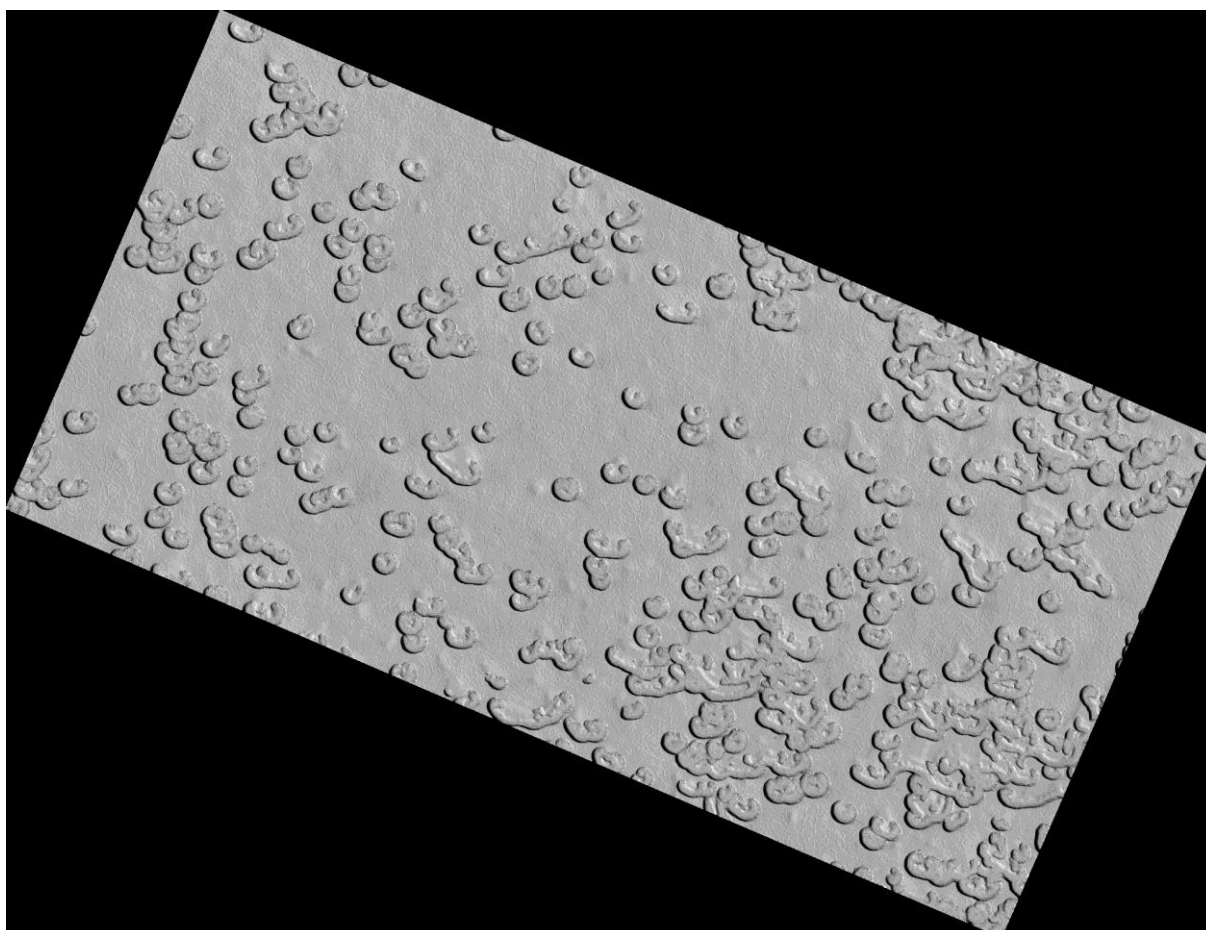
A primeira imagem teste (Figura 17), iluminada pela luz solar vinda do canto superior esquerdo, foi obtida durante a primavera austral em 3 de novembro de 1999, localizada perto de 87,0°S, 5,9°W, banda pancromática com resolução espacial de 1,5 m (disponível em: https://www.msoss.com/mars_images/moc/nature_polar/np_2a/). A escolha por imagens MOC pancromáticas foi feita para aproveitar a alta resolução espacial da câmera de abertura angular pequena. A segunda imagem teste, HiRISE (Figura 18), iluminada do centro inferior para a parte superior da cena, foi adquirida no dia 02 de agosto de 2009 às 18:18 (hora local de Marte), com localização perto de 86,393°S, 353,425°W, com a banda do vermelho com resolução espacial de 30 cm (disponível em: https://www.uahirise.org/ESP_014141_0930). A decisão de escolher esse intervalo espectral específico na banda do vermelho foi baseada na observação de que o objeto de interesse se destaca de maneira mais significativa nesse canal em comparação com os outros canais.

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).



Fonte: NASA/JPL/Malin Space Science Systems

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).



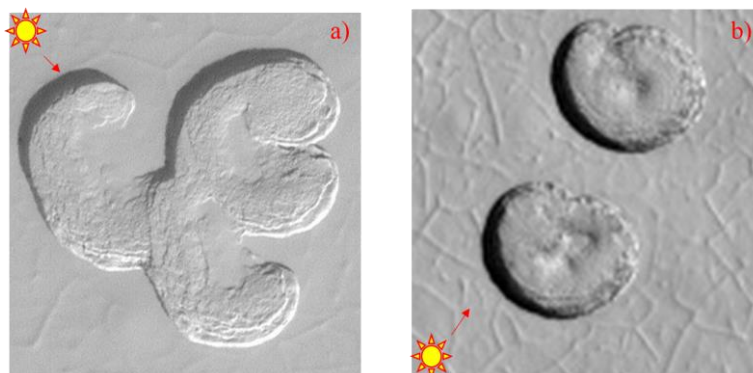
Fonte: NASA/JPL-Caltech/UArizona

Além das duas imagens de teste apresentadas nesta seção para validar a metodologia, serão utilizadas mais 20 imagens, totalizando 22 no conjunto, como detalhado no Apêndice A.

4.2.2 Características Geométricas principais dos padrões polares Swiss Cheese

O método de detecção proposto foi desenvolvido com base nas características principais dos padrões polares *Swiss Cheese*. Considerando que, visivelmente, são depressões parcialmente circulares, com algumas diferenças de iluminação, nas quais parte da feição está com um trecho claro (iluminado) e parte está escura (sombra), como segue a Figura 19.

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

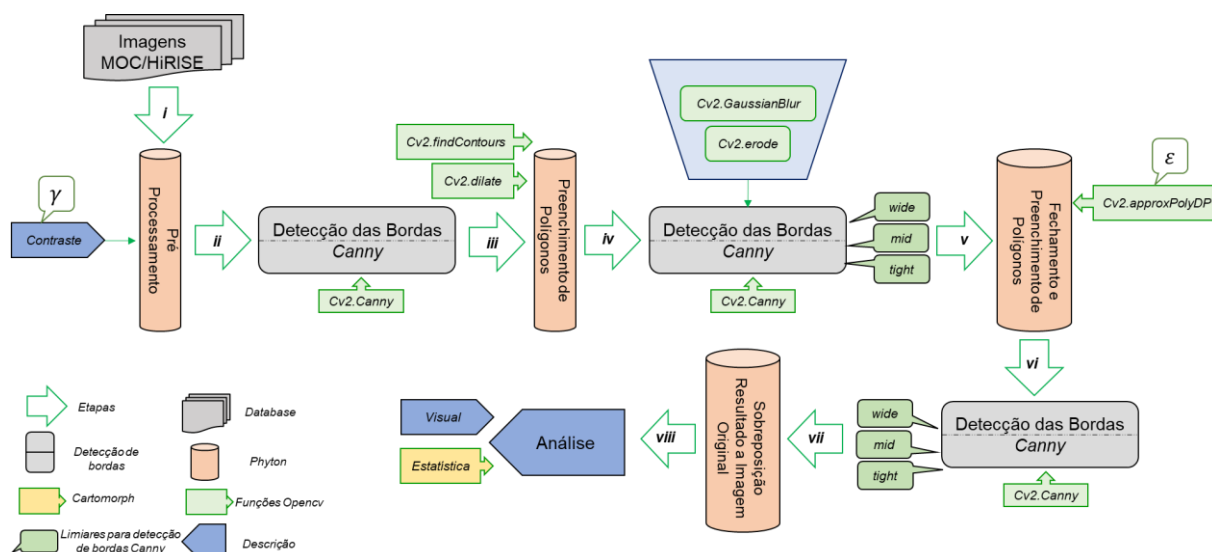


Além das diferenças de iluminação, destacam-se as diferentes formas de *Swiss Cheese Features* (como foi apresentado na Figura 8 deste documento por Aftabi (2016)). Matematicamente, podemos inferir que essas estruturas possuem formatos poligonais variados, com algumas apresentando dimensões maiores do que outras, e possuindo arestas mais proeminentes, enquanto outras exibem pontos de conexão entre si. Essa variação de altura entre a superfície que as delimita e as cavidades contribui para a distinção visual. Dentre cada uma dessas características individuais, percebemos uma superfície plana que funciona como uma "mesa", e nela são visíveis padrões lineares distintos, os quais são frequentemente denominados como "*fingerprint*" ou "impressão digital".

4.2.3 Rotina de Detecção

Em linhas gerais, a rotina desenvolvida para detectar os *Swiss Cheese Features* em imagens orbitais é apresentado na Figura 20. O conjunto de funções disponíveis na biblioteca *OpenCV* (*Open Source Computer Vision*) oferece ferramentas poderosas para o processamento de imagens e visão computacional em Python (disponível em: <https://docs.opencv.org/>). Aqui está uma breve descrição das principais funções utilizadas nesta pesquisa. A função *cv2.findContours* é utilizada para identificar contornos em uma imagem binária (preto e branco). Seus parâmetros incluem a imagem de entrada e opções para especificar o modo de contorno e o método de aproximação, enquanto o retorno consiste em uma lista de contornos, onde cada contorno é representado por uma lista de pontos. Já a função *cv2.dilate* realiza a operação de dilatação em uma imagem, sendo aplicada com base em um kernel, uma matriz que define a estrutura do elemento usado para a dilatação. O resultado é a imagem dilatada. Para suavização de imagens, a função *cv2.GaussianBlur* é empregada, aplicando um filtro de desfoque gaussiano. Seus parâmetros incluem a imagem de entrada, o tamanho do elemento estruturante e o desvio padrão que define a dispersão dos valores da gaussiana. A operação de erosão em uma imagem é realizada pela função *cv2.erode*, utilizando um elemento estruturante para especificar a estrutura do elemento de erosão. O retorno é a imagem erodida. Por fim, a função *cv2.approxPolyDP* é empregada para aproximar polígonos de contorno, reduzindo a quantidade de vértices. Seus parâmetros incluem o contorno original, a tolerância de precisão para a aproximação e um indicador de fechamento do polígono. Essas funções são amplamente utilizadas em tarefas como detecção de contornos, operações morfológicas, suavização de imagens e simplificação de polígonos, desempenhando papéis essenciais em diversas aplicações de processamento digital de imagens.

Figura 20: Fluxograma representando os passos do desenvolvimento da rotina para detectar os padrões polares *Swiss Cheese*, onde cada estilo de cores/formato representa uma etapa distinta e seu respectivo tipo de ação.



Primeiramente, aplicou-se um contraste para realçar detalhes cruciais na imagem, empregando um valor de ganho (γ) na imagem de entrada para evidenciar o objeto de interesse. Essa etapa foi denominada como pré-processamento para o aumento de contraste da imagem de entrada (i); Posteriormente, realizou-se a extração das bordas, utilizando o detector de bordas *Canny* (ii); utilizando-se as bordas detectadas, foram encontrados os contornos obtidos pela função `cv2.findContours` e, para cada contorno obtido, foi realizado um preenchimento a partir de uma função de preenchimento de polígonos e o uso da função `cv2.dilate`, utilizada como função para conectar pixels próximos, originando polígonos que representam a feição de interesse. Essa etapa foi denominada como preenchimento de polígonos a partir das bordas (iii); Em seguida, aplicou-se a suavização da imagem, utilizando a função `cv2.GaussianBlur` e, para remover alguns objetos indesejados, considerando um tamanho de *kernel* específico, aplicou-se a função `cv2.erode`, seguida de uma nova detecção de bordas, utilizando-se o operador de detecção de bordas *Canny*. Todavia, para essa detecção de bordas, foram testados diferentes limiares no detector de bordas, originando *wide-range*, *mid-range* e *tight-range*. O melhor resultado do delineamento das características de *Swiss Cheese Features* foi preservado. Essa etapa foi chamada de detecção das bordas, considerando um limiar ideal (iv). A partir desses novos contornos (sabendo-se que alguns foram parcialmente detectados, devido a característica não linear da feição de interesse), realizou-se um novo preenchimento; entretanto, previamente, foi realizado o fechamento desses polígonos a partir da aproximação do contorno que representa

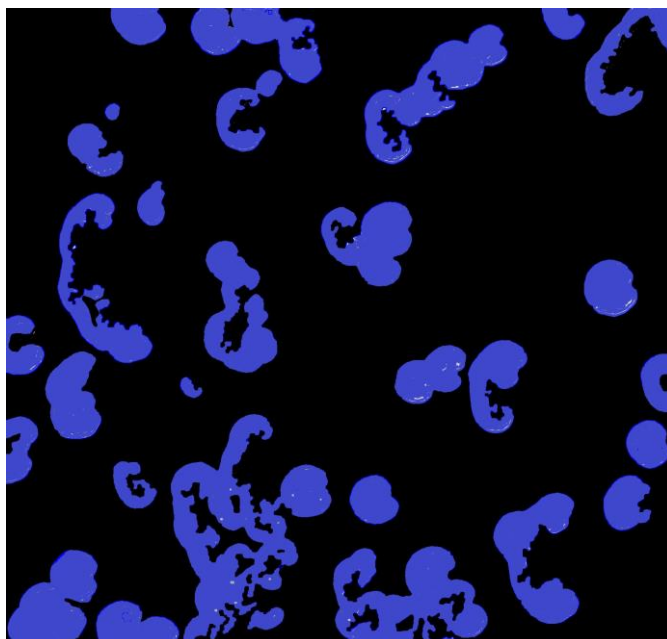
cada polígono. A função utilizada foi `cv2.approxPolyDP`, que parte do princípio da aproximação de pontos dos contornos que forma um polígono e um *Epsilon* (ϵ). Destaca-se que o valor de ϵ controla o nível de aproximação, em que, quanto menor o valor, mais próximo o contorno aproximado estará do contorno original. Essa etapa foi denominada como Fechamento e Preenchimento dos Polígonos (v); Em seguida, aplicou-se o detector de bordas *Canny* novamente, considerando apenas o resultado que melhor apresenta o delineamento dos resultados (*wide-range*, *mid-range* ou *tight-range*) (vi); a imagem selecionada no passo anterior foi sobreposta à imagem original, finalizando a rotina desenvolvida (vii). E, por fim, o resultado foi submetido às análises visual e quantitativa (viii).

4.2.4 Avaliação da Metodologia

A avaliação da metodologia será feita por meio das métricas descritas na seção 3.5, onde: *completeza*, *correção*, e *qualidade* foram as métricas que tiveram o papel de representar a porcentagem de pixels da imagem de referência, extraídos corretamente pelo método de extração; porcentagem de pixels da imagem extraída que coincidem com a imagem de referência; e o desempenho do método, respectivamente. Já a utilização da métrica *F1-Score* teve como objetivo a facilitação da comparação dos resultados obtidos com trabalhos futuros.

Nessas avaliações, faz-se necessário empregar uma imagem de referência denominada "*Ground Truth*", que foi elaborada de modo manual e minucioso. Nesse processo, procedeu-se à identificação e à extração dos alvos, de forma a preservar integralmente suas características intrínsecas e complexa geometria. É relevante enfatizar a aderência estrita ao delineamento original, assegurando, assim, a máxima fidelidade na condução das análises estatísticas. Abaixo, na Figura 21, tem-se o exemplo de uma imagem sintética de referência.

Figura 21: Imagem de Referência MOC



Espera-se que as métricas propostas nesta pesquisa possam apresentar resultados próximos a 100%. Dada a ausência de valores globais, a expectativa é que, ao realizar a análise, as características sejam identificadas com alta confiabilidade. Comparativamente à imagem de referência, almeja-se a minimização de falsas detecções e a maximização de detecções verdadeiras, com o menor nível possível de ruídos, tanto dentro, quanto fora da feição de interesse.

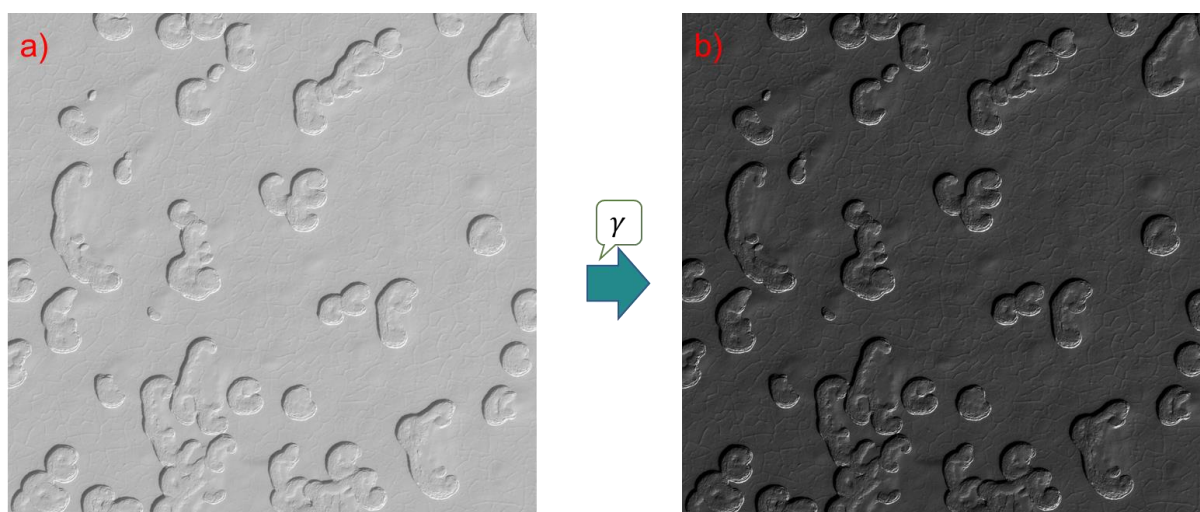
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

De acordo com o fluxograma apresentado na Figura 16, os resultados serão demonstrados na seguinte ordem: de Pré-processamento, que consistiu na aplicação da função γ de contraste; de Processamento, que compreendeu a aplicação de técnicas de PDI e MM; e de Análise de Qualidade, que avalia a metodologia utilizando métricas estatísticas.

5.1 Aplicação da função γ de contraste (Pré-Processamento)

Na etapa *i* do fluxograma apresentado na Figura 20, a primeira etapa da metodologia consistiu na aplicação de uma função γ de contraste, com o intuito de diferenciar o objeto de interesse do resto da cena, enfatizando as diferenças de intensidade dos pixels. Na Figura 22, tem-se a aplicação dessa função sobre o conjunto de dados teste.

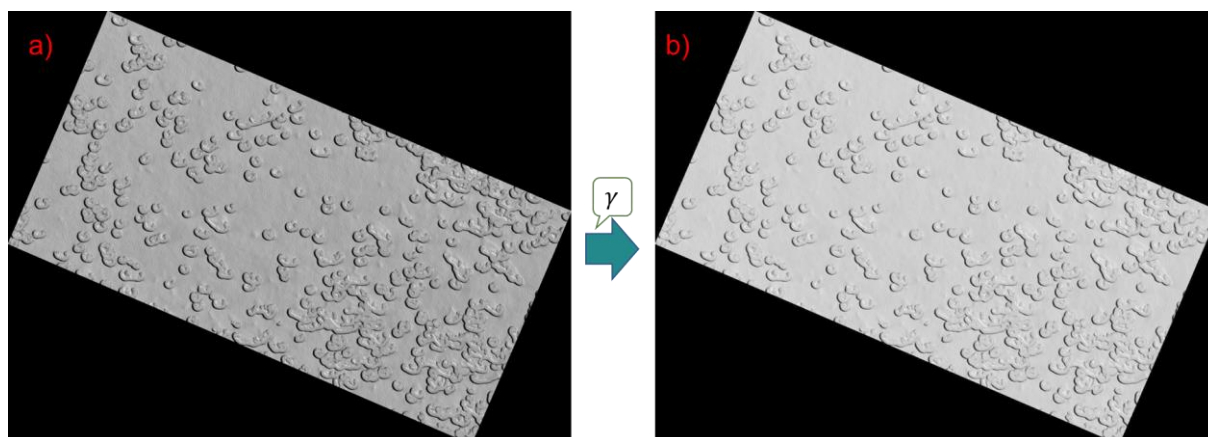
Figura 22: Resultado da aplicação de uma função de contraste na imagem MOC. Em a) imagem original; b) Pós aplicação do contraste.



Na Figura 22-b, é possível notar uma intensificação das tonalidades mais escuras após a aplicação do processo de ajuste de contraste. Esse fenômeno é consequência da meticulosa escolha dos limiares, os quais foram selecionados com o objetivo preciso de acentuar as discrepâncias na intensidade dos pixels da imagem. Destaca-se que o valor do parâmetro γ adotado foi 0,5, desempenhando um papel crucial ao determinar a magnitude da operação de realce empregada.

Seguindo a mesma ideia, aplicou-se a função γ de contraste para a imagem HiRISE. O resultado da aplicação pode ser visto na Figura 23.

Figura 23: Resultado da aplicação de uma função de contraste na imagem HiRISE. Em a) imagem original; b) Pós aplicação do contraste.



É perceptível que a implementação da função γ de contraste, com o intuito de realçar a imagem, resultou em um aumento de seu brilho (Figura 23-b), diferenciando-se do estado anterior da imagem (Figura 23-a). O cerne desse procedimento reside na ênfase dada à discrepância de intensidades entre os pixels contidos na imagem, visando simplificar a subsequente etapa de detecção. Essa ênfase é essencial para orientar a seleção dos pixels durante o processo de extração, com base nas suas variações de intensidade. O valor do parâmetro γ adotado foi 0,5. Observa-se que o mesmo parâmetro foi adotado, tanto na Figura 22-b quanto na Figura 23-b, isso pode ser explicado pela diferença de iluminação no momento da captura da cena ou pelo sensor utilizado, fatores que não apenas afetam o brilho da imagem, mas também podem ser influenciados por elementos externos a ela.

5.2 Aplicação de Técnicas de PDI e MM

Seguindo as etapas destacadas na Figura 20, representadas pelo fluxograma, a etapa *ii* consistiu na detecção das bordas por meio do método de *Canny*. Essa etapa, inicialmente, teve como objetivo principal compreender o grau de delineamento que a feição poderia alcançar por meio de um simples procedimento de realce anterior, conforme explanado na seção 5.1. Os resultados podem ser vistos na Figura 24 e Figura 25.

Figura 24: Resultado de detecção das bordas da imagem MOC, utilizando o método de *Canny*.

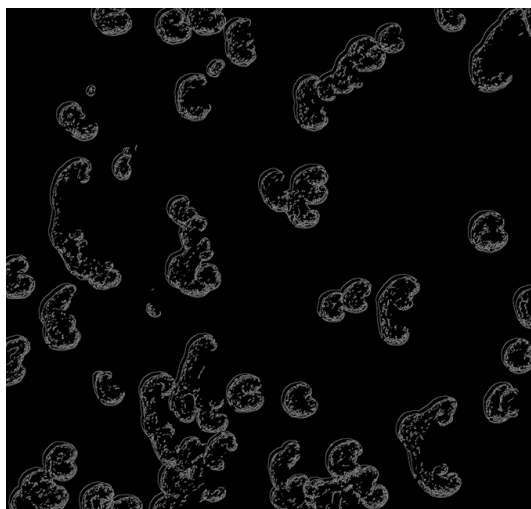
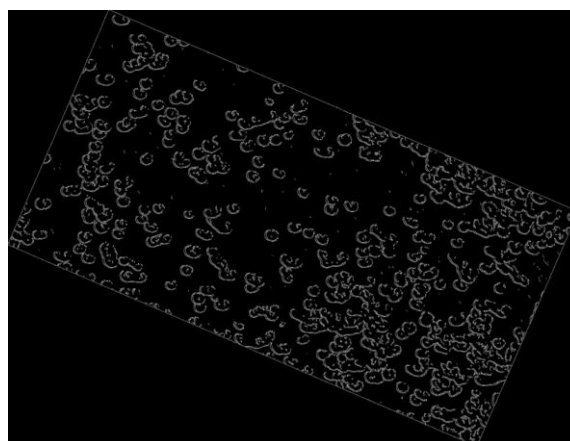


Figura 25: Resultado de detecção das bordas da imagem HiRISE, utilizando o método de *Canny*.



Algumas discussões podem ser realizadas a partir dos resultados apresentados na Figura 24 e na Figura 25. Primeiramente, observa-se que na Figura 24, o espaço entre as feições de interesse não foi detectado. Isso, na verdade, é algo positivo para o resultado, já que esse espaço vazio poderia causar problemas no processo de detecção, dada a complexidade da forma das partes de interesse. Todavia, notaram-se alguns ruídos no interior da feição dos *Swiss Cheese Features*, devido à variação abrupta da intensidade dos pixels no interior da feição. Alguns

aspectos relevantes também foram percebidos, como a segmentação das bordas, nas quais os polígonos não se comportaram como polígonos fechados, o que era teoricamente antecipado.

A análise se estende também para a Figura 25, com algumas diferenças a serem destacadas: O terreno plano entre as feições obteve algum ruído, o que é negativo para o resultado. Isso pode ser analisado devido à resolução espacial da imagem HiRISE ser maior que a MOC, que conseqüentemente realça as variações de intensidade entre os pixels, o que já era esperado. As discussões acima podem ser facilmente amparadas na Figura 26 e na Figura 27.

Figura 26: Resultado de detecção das bordas da imagem MOC, utilizando o método de Canny 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 *Swiss Cheese Features* e segmentação das bordas externas do objeto; e c) Terreno entre as feições livres de ruídos.

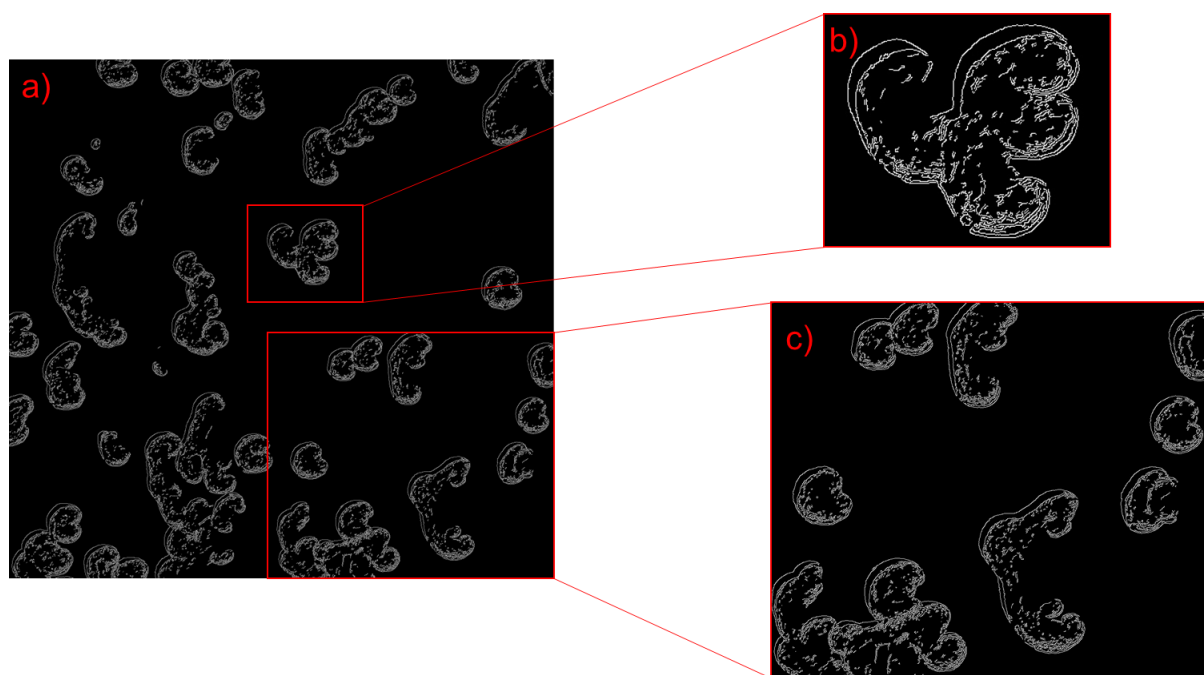
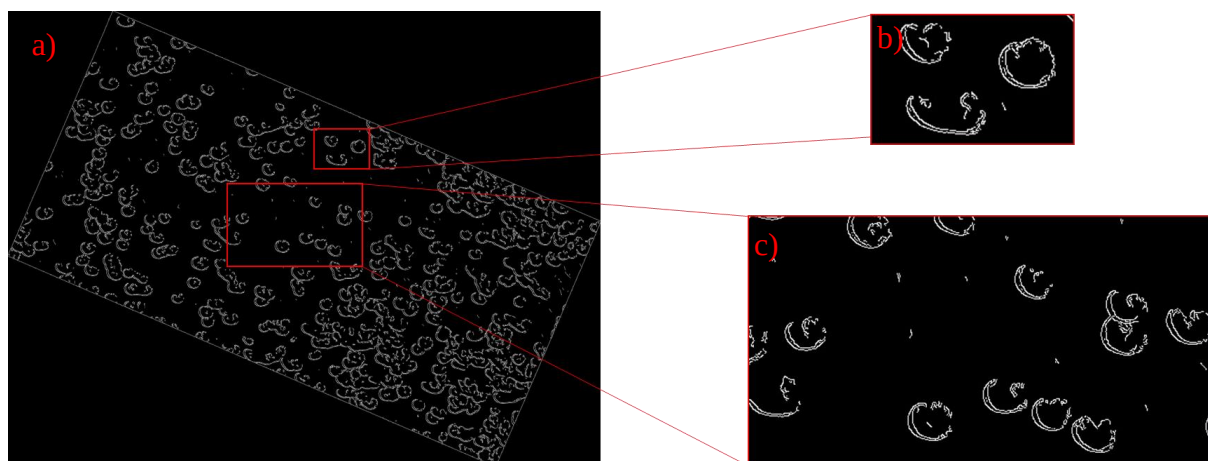


Figura 27: Resultado de detecção das bordas da imagem HiRISE, utilizando o método de *Canny* com a delimitação de retângulos envolventes simulando um *zoom* e realçando as áreas discutidas, bem como suas características específicas: a) imagem original; b) Poucos ruídos presentes no interior da feição *Swiss Cheese Features* e segmentação das bordas externas do objeto; e c) Terreno entre as feições com alguns ruídos.



A etapa *iii*, como segue a Figura 20, teve como finalidade o preenchimento das feições poligonais, com o uso das funções `cv2.findContours` e `cv2.dilate`. O propósito aqui era resolver o desafio da segmentação das bordas que delimitam a feição, ao mesmo tempo que os ruídos presentes no interior da feição fossem conectados pelo preenchimento. Os resultados dessa etapa podem ser vistos na Figura 28 e na Figura 29.

Figura 28: Resultado do uso das funções `cv2.findContours` e `cv2.dilate` na imagem MOC pós detecção das bordas usando o detector *Canny*, visando ao preenchimento dos *Swiss Cheese Features*.

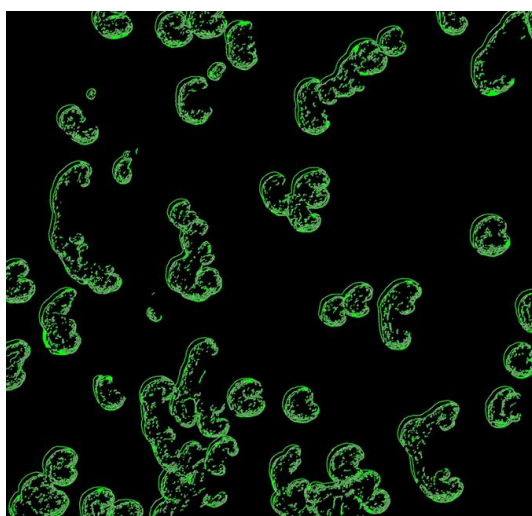
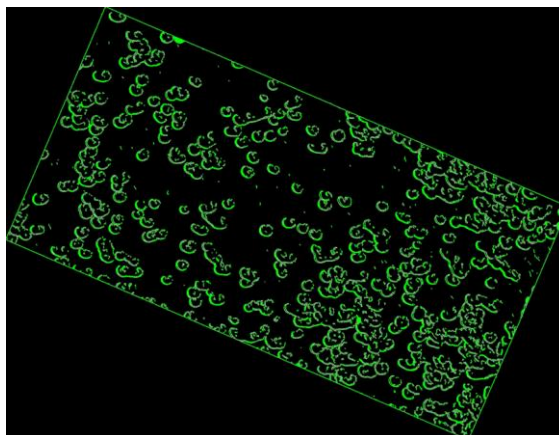


Figura 29: Resultado do uso das funções `cv2.findContours` e `cv2.dilate` na imagem HiRISE pós detecção das bordas usando o detector Canny, visando ao preenchimento dos Swiss Cheese Features.



Na Figura 28, pode-se afirmar que houve o preenchimento em poucas regiões, além da reconstrução e do preenchimento de algumas bordas que estavam segmentadas, oriundas da detecção por *Canny*. Embora permaneçam ruídos no interior da feição na imagem MOC, é notório um avanço positivo, considerando a complexidade da própria feição. Essa complexidade é marcada pela sua geometria diversificada e formas irregulares. Essa mesma análise pode ser estendida para a Figura 29, em que algumas partes segmentadas das bordas foram reconstruídas e preenchidas. As Figuras 30 e 31 corroboram essa discussão.

Figura 30: Resultado do uso das funções `cv2.findContours` e `cv2.dilate` na imagem MOC pós detecção das bordas usando o detector *Canny*, visando ao preenchimento dos *Swiss Cheese Features*, 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 *Swiss Cheese Features*, porém com menor segmentação das bordas externas do objeto; e c) Exemplificação de um terreno de *Swiss Cheese Features* com ênfase no verde fluorescente, que caracteriza onde foi preenchido.

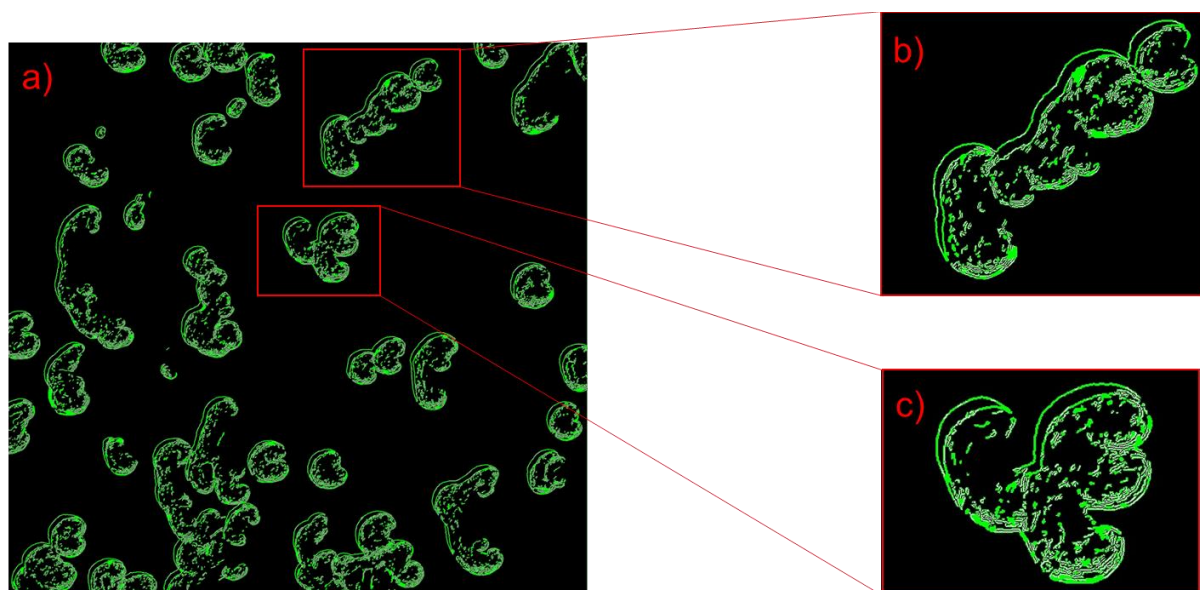
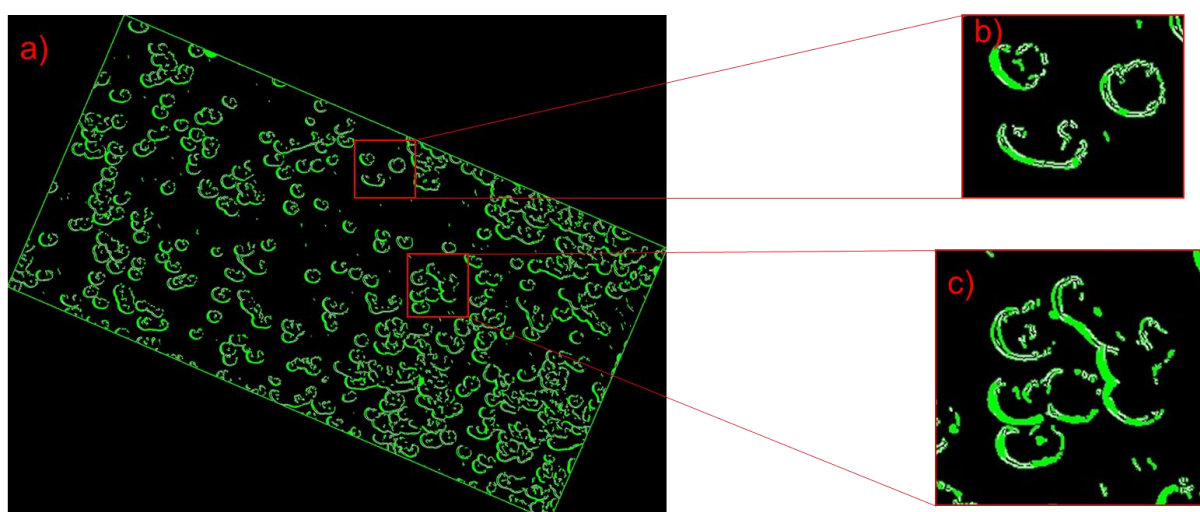


Figura 31: Resultado do uso das funções `cv2.findContours` e `cv2.dilate` na imagem HiRISE pós detecção das bordas usando o detector *Canny*, visando ao preenchimento dos *Swiss Cheese Features*, com a delimitação de retângulos envolventes simulando um *zoom* e realçando as áreas discutidas, bem como suas características específicas. As áreas modificadas estão em verde fluorescente: a) Imagem preenchida; b) Exemplificação de um terreno de *Swiss Cheese Features* com ênfase no verde fluorescente, que caracteriza onde foi preenchido; e c) Exemplificação dos ruídos presentes no interior da feição *Swiss Cheese Features*, porém com menor segmentação das bordas externas do objeto.



A etapa *iv*, como segue a Figura 20, teve como ojetivo a remoção de alguns ruídos, internamente ou externamente. Para isso, aplicou-se um filtro gaussiano, marcado pela função `cv2.GaussianBlur` e uma erosão, a partir da função `cv2.erode`. Em seguida, foi feita a detecção de bordas *Canny* novamente, porém foram testados diferentes *limiares* no detector de bordas, originando *wide-range*, *mid-range* e *tight-range*. E o melhor resultado, em termos de delineamento da feição, foi preservado. Os resultados dessa etapa podem ser vistos nas Figuras 32 e 33.

Figura 32: Resultado da detecção de bordas por *Canny* e o uso das funções `cv2.GaussianBlur` e `cv2.erode` na imagem MOC pós preenchimento dos *Swiss Cheese Features*: a) bordas detectadas por *Canny* com *wide-range*; b) bordas detectadas por *Canny* com *mid-range*; e c) bordas detectadas por *Canny* com *tight-range*.

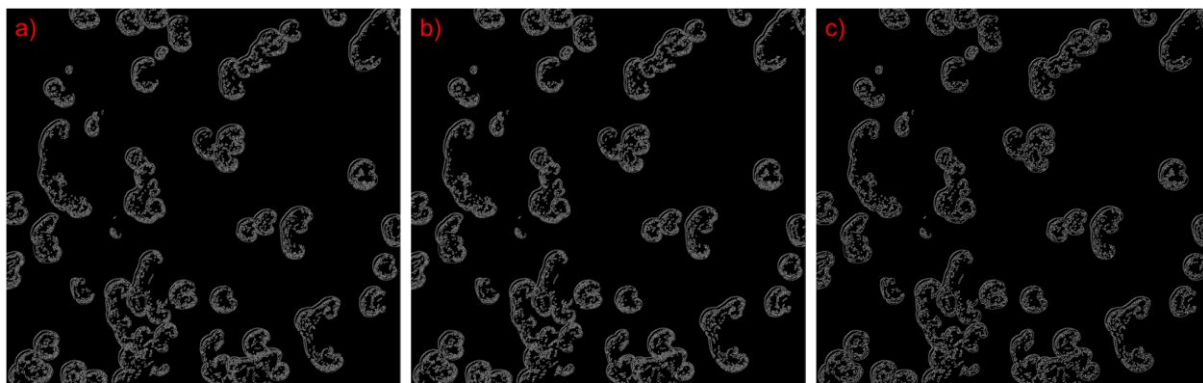
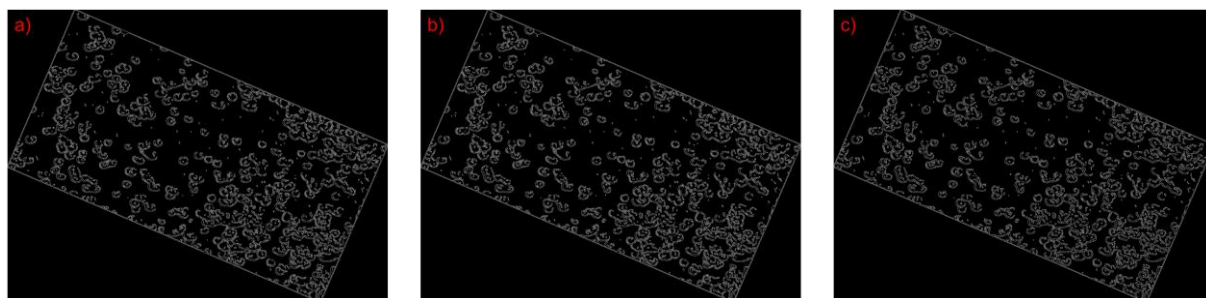


Figura 33: Resultado da detecção de bordas por *Canny* e o uso das funções `cv2.GaussianBlur` e `cv2.erode` na imagem HiRISE pós preenchimento dos *Swiss Cheese Features*: a) bordas detectadas por *Canny* com *wide-range*; b) bordas detectadas por *Canny* com *mid-range*; e c) bordas detectadas por *Canny* com *tight-range*.



Em primeiro lugar, vale destacar que, independentemente do *limiar* empregado, os resultados são notavelmente semelhantes entre si. Portanto, não é necessário selecionar aquele que demonstrou um desempenho superior no que diz respeito ao delineamento. Em relação à aplicação das funções para redução de ruídos, houve uma ligeira melhora, o que é positivo, dada

a complexidade da feição. Essa avaliação é válida tanto para a Figura 32, quanto para a Figura 33. As Figuras 34 e 35 validam o comentário em relação à redução dos ruídos.

Figura 34: Resultado da detecção de bordas por *Canny* e o uso das funções *cv2.GaussianBlur* e *cv2.erode* na imagem MOC pós preenchimento dos *Swiss Cheese Features*, com a delimitação de retângulos envolventes simulando um *zoom* para realçar as áreas discutidas, bem como suas características específicas: a) Bordas detectadas por *Canny* com *wide-range*; b) Exemplificação da feição com alguns ruídos poligonais; e c) Exemplificação da feição com alguns ruídos em forma de polígonos pequenos.

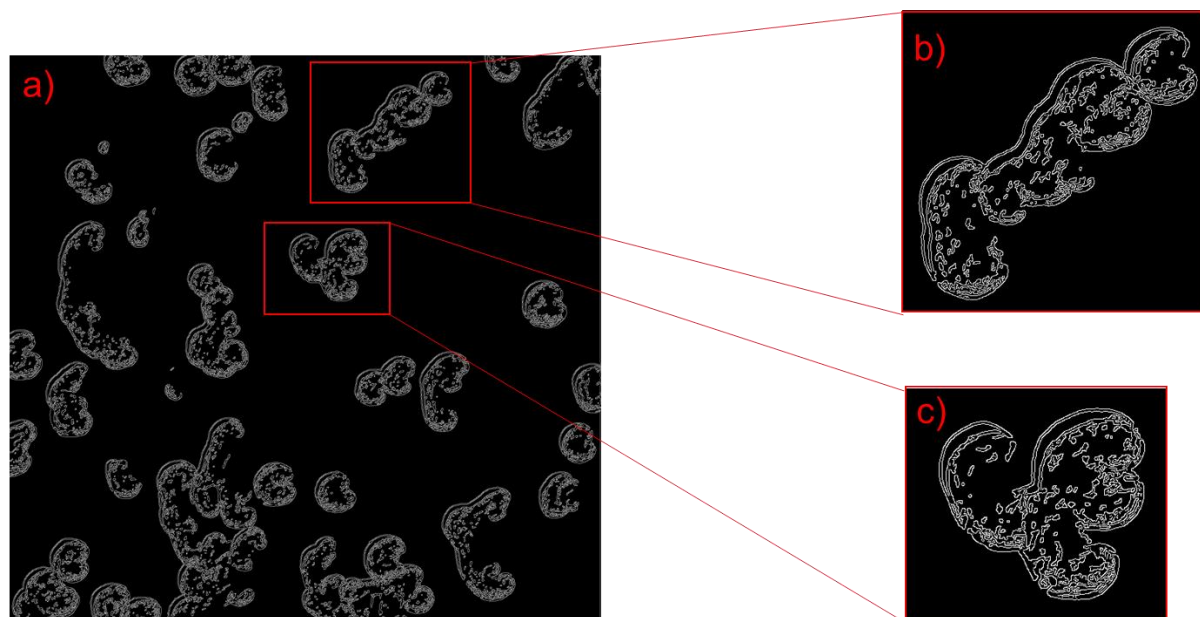
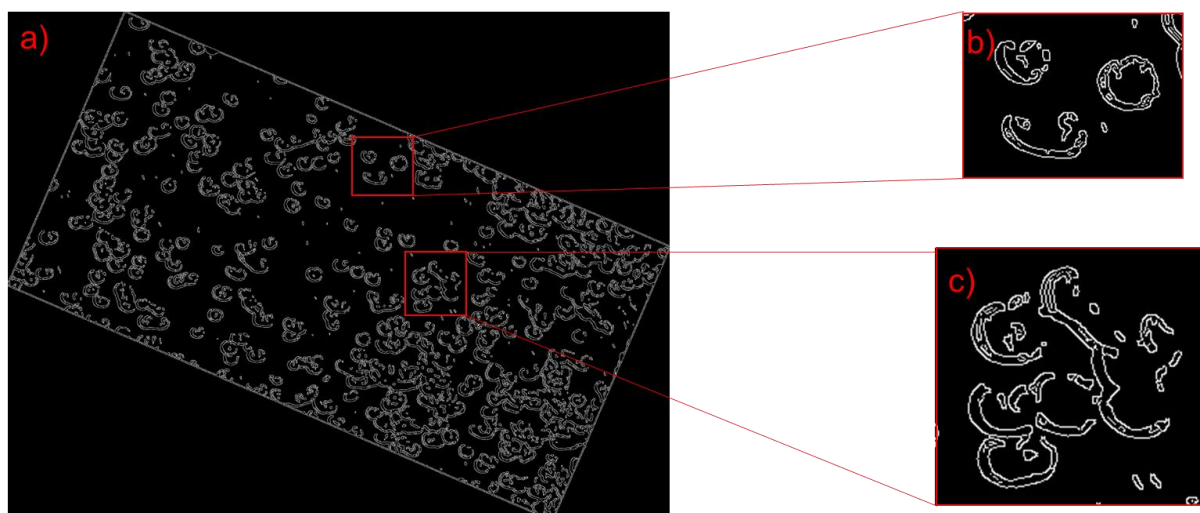


Figura 35: Resultado da detecção de bordas por *Canny* e o uso das funções *cv2.GaussianBlur* e *cv2.erode* na imagem HiRISE pós preenchimento dos *Swiss Cheese Features*, com a delimitação de retângulos envolventes simulando um *zoom* para realçar as áreas discutidas, bem como suas características específicas: a) Bordas detectadas por *Canny* com *wide-range*; b) Exemplificação da feição com alguns ruídos poligonais; e c) Exemplificação da feição com alguns ruídos em forma de polígonos pequenos.



Nas Figuras 34 e 35, é perceptível que os ruídos, que previamente se assemelhavam a riscos aleatórios dentro da feição, agora assumem uma forma poligonal, na maioria dos casos, fechando-se em polígonos completos. Isto é benéfico, uma vez que esses pequenos polígonos contribuem para o fechamento e preenchimento das feições irregulares de interesse, entretanto podem gerar falsos positivos.

A Etapa v, conforme o fluxograma ilustrado na Figura 20, foi definida com base nos novos contornos obtidos na Etapa iv. Considerando que certas características, exemplificadas pelos polígonos irregulares, foram identificadas de forma parcial, como pode ser visualizado na Figura 35-b, foi executado um processo adicional de fechamento desses polígonos. No entanto, dessa vez, optou-se por realizar uma tentativa de aproximação do polígono parcialmente detectado. Isso foi feito utilizando a função `cv2.approxPolyDP`, juntamente a um valor de *Epsilon* (ϵ). A abordagem consistiu em ajustar o contorno parcialmente detectado utilizando um valor de ϵ , que controla o grau de aproximação. Quanto menor o valor escolhido, mais próximo o contorno se manterá em relação ao original. De maneira empírica, definiu-se um valor de $\epsilon = 0,02$. Os resultados dessa etapa podem ser vistos nas Figuras 36 e 37.

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 `cv2.approxPolyDP` e um valor de *Epsilon* (ϵ).

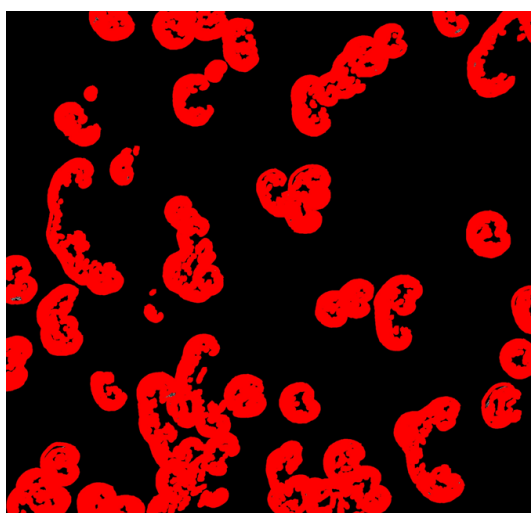
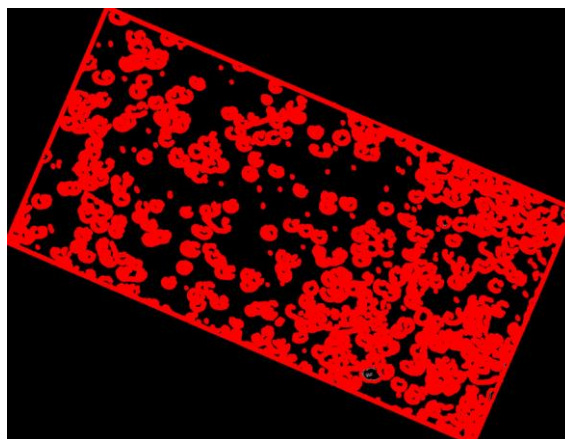


Figura 37: Resultado da aproximação e fechamento dos polígonos referentes às características 'Swiss Cheese', os quais foram detectados parcialmente na imagem HiRISE. Essa transformação foi realizada empregando a função *cv2.approxPolyDP* e um valor de *Epsilon* (ϵ).



É evidente nos resultados exibidos nas Figuras 36 e 37 o bem-sucedido processo de aproximação dos polígonos. Os ruídos previamente existentes no interior das feições foram adequadamente preenchidos, tornando-se parte integrante das feições de interesse. Entretanto, um aspecto desfavorável emerge da Figura 37, onde os ruídos previamente presentes entre as feições de interesse agora assumem a forma de pequenos polígonos irregulares (Figura 39-c). Os resultados apresentados nas Figuras 38 e 39 respaldam essa discussão.

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 *cv2.approxPolyDP* e um valor de *Epsilon* (ϵ), com a delimitação de retângulos envolventes simulando um zoom para realçar as áreas discutidas, bem como suas características específicas: a) Imagem MOC com aproximação e fechamento dos polígonos referentes às características *Swiss Cheese*; b) Exemplificação de uma feição preenchida e aproximada; e c) Exemplificação de duas feições preenchidas e aproximadas.

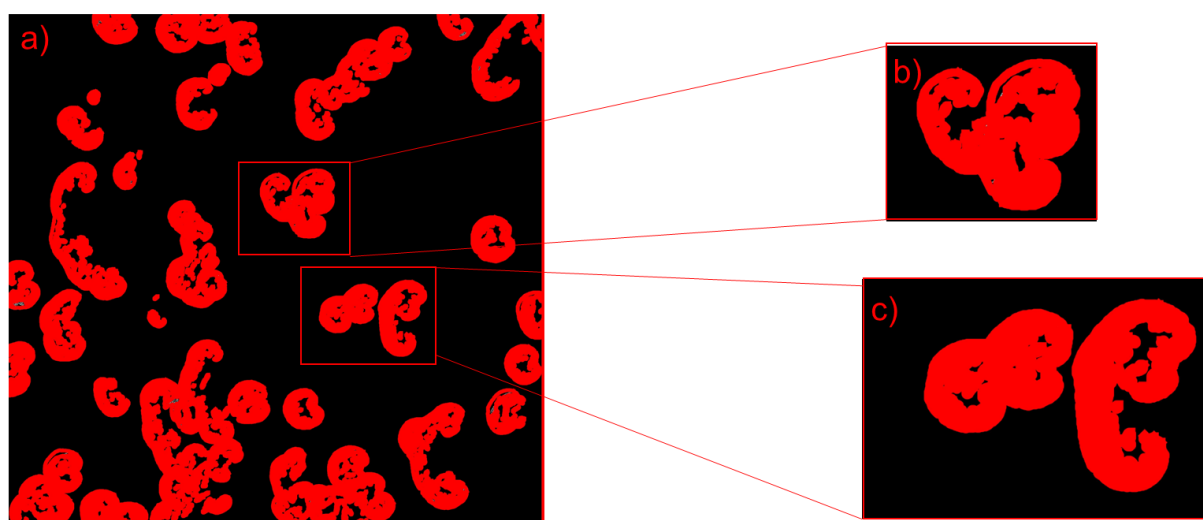
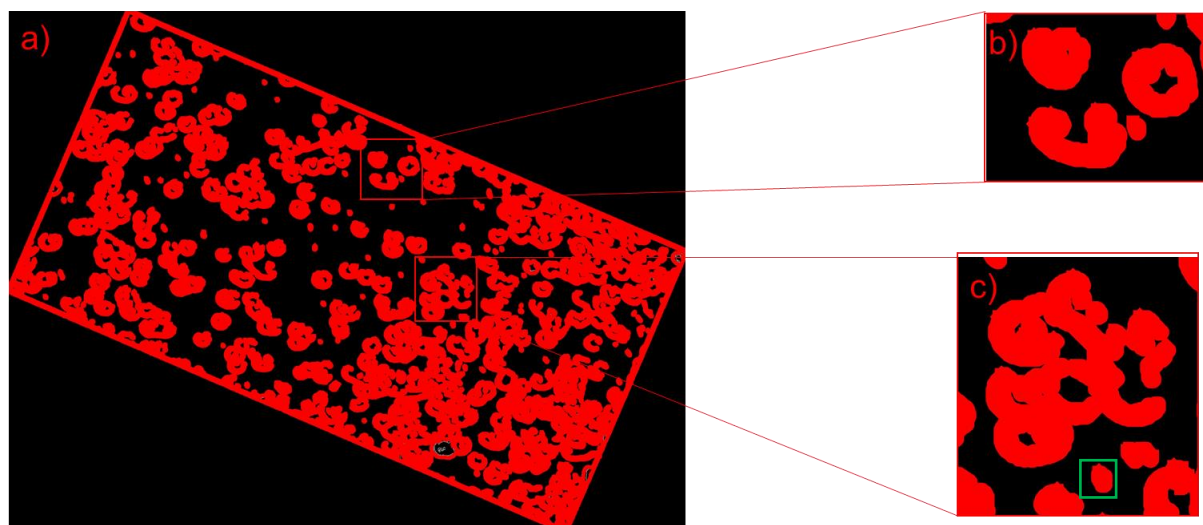


Figura 39: Resultado da aproximação e fechamento dos polígonos referentes às características 'Swiss Cheese', os quais foram detectados parcialmente na imagem HiRISE. Essa transformação foi realizada empregando a função *cv2.approxPolyDP* e um valor de *Epsilon* (ϵ), com a delimitação de retângulos envolventes simulando um zoom para realçar as áreas discutidas, bem como suas características específicas: a) Imagem HiRISE com aproximação e fechamento dos polígonos referentes às características *Swiss Cheese*; 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.



As Figuras 38 e 39 destacam claramente o efeito positivo do processo de aproximação e preenchimento de polígonos para características de contorno irregulares e não padronizadas, demonstrando que essa abordagem é adequada para tais feições. A partir disso, realizou-se novamente uma detecção de bordas com o detector *Canny* na etapa vi (conforme o fluxograma ilustrado na Figura 20). Assim como nas Figuras 32 e 33, foram testados diferentes *thresholds* no detector de bordas, originando *wide-range*, *mid-range* e *tight-range*. A detecção de bordas por *Canny* pode ser vista nas Figuras 40 e 41.

Figura 40: Resultado da detecção de bordas por *Canny* após o processo de aproximação e preenchimento de polígonos de *Swiss Cheese Features* na imagem MOC: a) bordas detectadas por *Canny* com *wide-range*; b) bordas detectadas por *Canny* com *mid-range*; e c) bordas detectadas por *Canny* com *tight-range*.

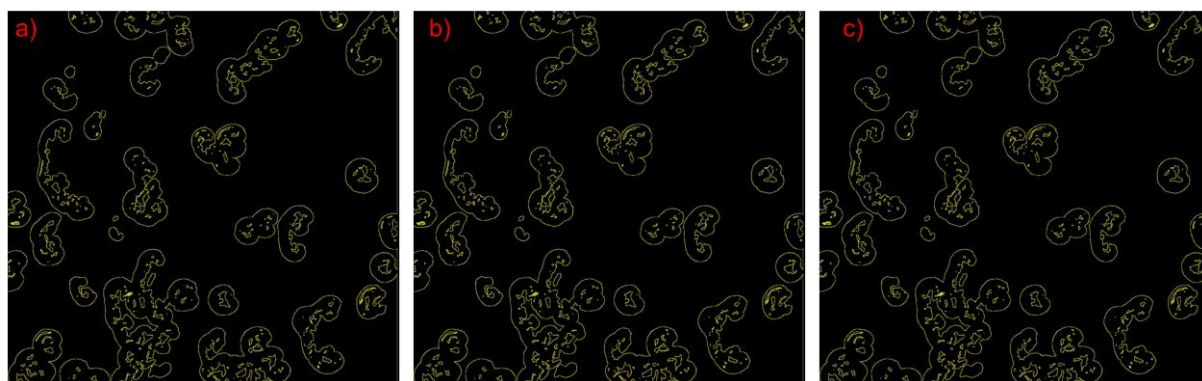
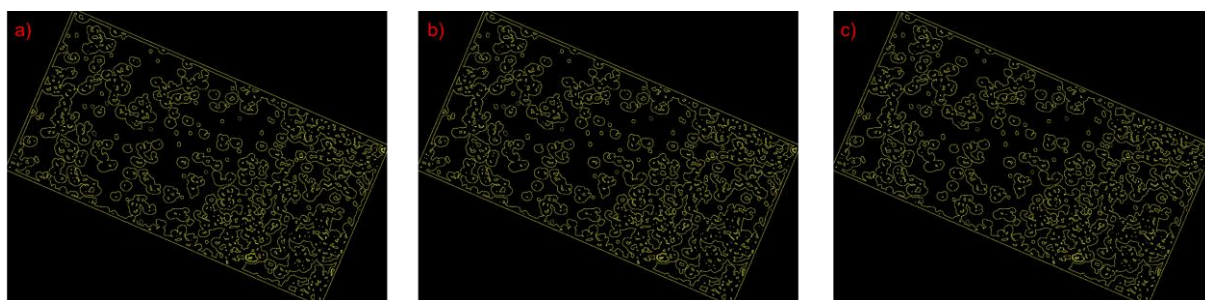


Figura 41: Resultado da detecção de bordas por *Canny* após o processo de aproximação e preenchimento de polígonos de *Swiss Cheese Features* na imagem HiRISE: a) bordas detectadas por *Canny* com *wide-range*; b) bordas detectadas por *Canny* com *mid-range*; e c) bordas detectadas por *Canny* com *tight-range*.



De fato, ao contrário do que foi observado na etapa iv, as bordas identificadas pelo método *Canny* com *tight-range* não demonstraram um desempenho satisfatório ao delinear os polígonos de interesse, como ilustrado nas Figuras 40-c e 41-c. Por outro lado, as bordas identificadas pelo método *Canny* com *wide-range* e *mid-range* exibiram resultados

notavelmente similares entre si. Portanto, no que diz respeito a esses *limiares*, não é essencial selecionar aquele que apresentou um desempenho superior em termos de delineamento das características, contanto que não seja o de *tight-range*. Sendo assim, nas Figuras 42 e 43, pode-se ver o delineamento das bordas com maior detalhamento.

Figura 42: Resultado da detecção de bordas por *Canny* após o processo de aproximação e preenchimento de polígonos de *Swiss Cheese Features* na imagem MOC, com a delimitação de retângulos envolventes simulando um *zoom* para realçar as áreas discutidas, bem como suas características específicas: a) Bordas detectadas por *Canny* com *wide-range*; b) Exemplificação da feição com alguns ruídos residuais; e c) Exemplificação de duas feições com alguns ruídos em forma de polígonos pequenos.

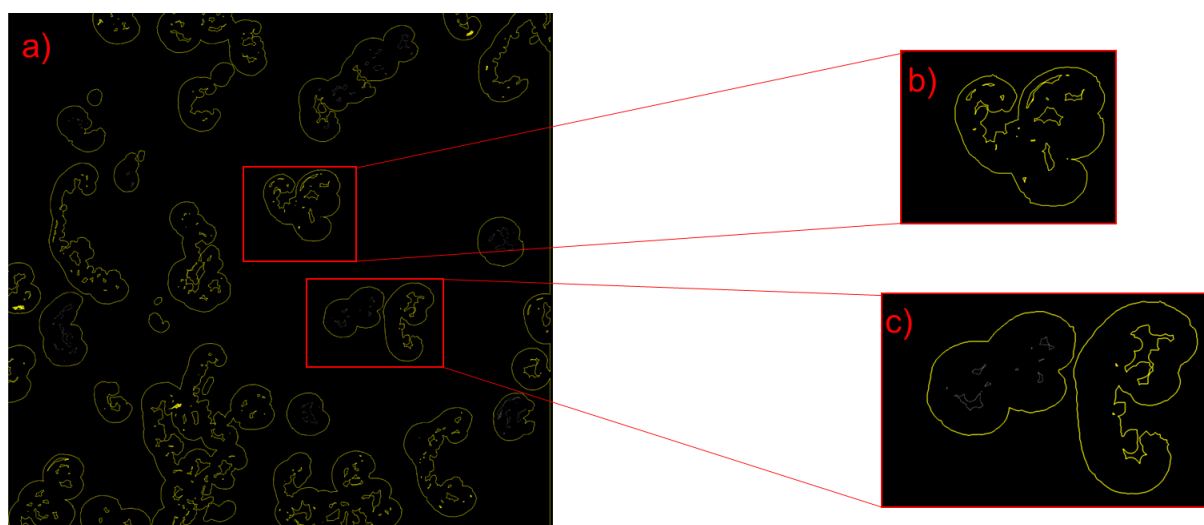
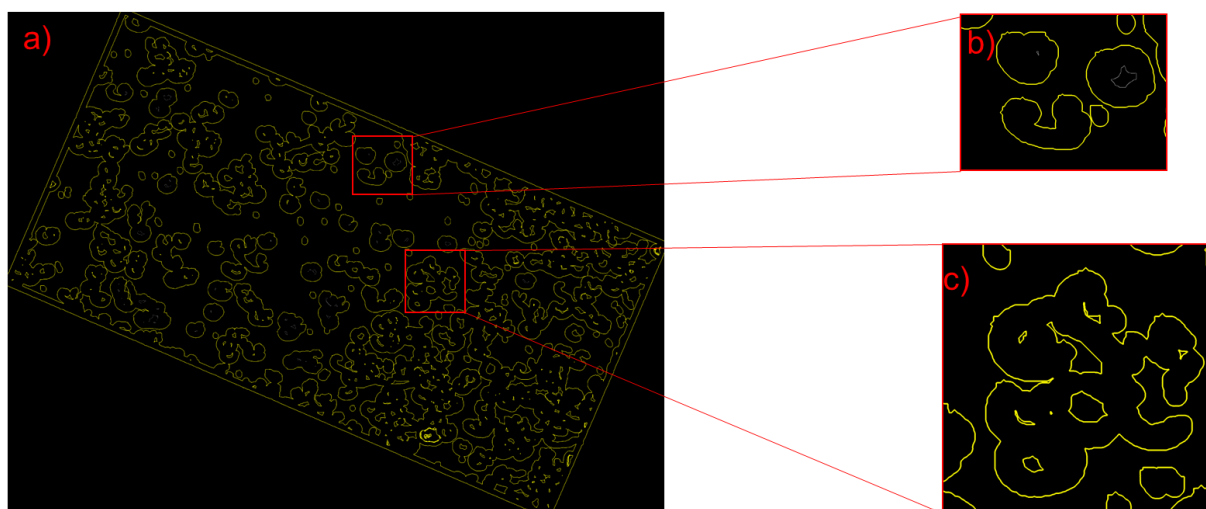


Figura 43: Resultado da detecção de bordas por *Canny* após o processo de aproximação e preenchimento de polígonos de *Swiss Cheese Features* na imagem HiRISE, com a delimitação de retângulos envolventes simulando um *zoom* para realçar as áreas discutidas, bem como suas características específicas: a) bordas detectadas por *Canny* com *wide-range*; b) Exemplificação da feição com alguns ruídos residuais; e c) Exemplificação das feições com alguns ruídos em forma de polígonos pequenos.



Nas Figuras 42 e 43, é evidente que, apesar das etapas de processamento realizadas, ainda há a presença de alguns polígonos residuais de ruído na imagem. Contudo, é importante ressaltar que a detecção abrangeu a totalidade dos polígonos, os quais exibem resultados visuais satisfatórios.

Na etapa *vii*, conforme o fluxograma da Figura 20, realizou-se a sobreposição do resultado da detecção de bordas por *Canny* na imagem original. Os resultados podem ser vistos nas Figuras 44 e 45.

Figura 44: Resultado da sobreposição do resultado da rotina desenvolvida (em azul) sobre a imagem original MOC.

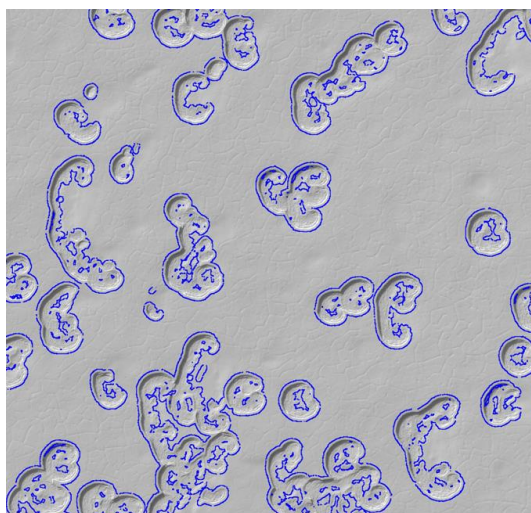
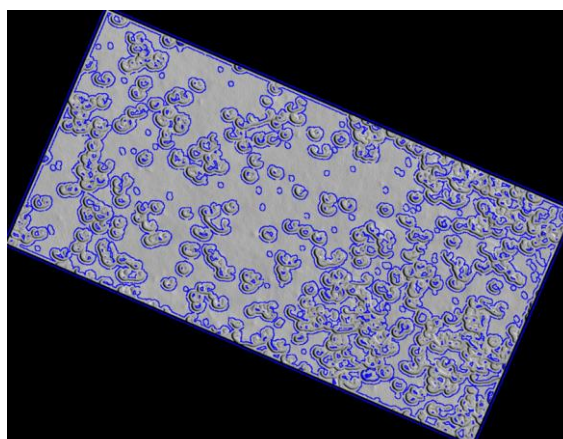


Figura 45: Resultado da sobreposição do resultado da rotina desenvolvida (em azul) sobre a imagem original HiRISE.



Nas Figuras 44 e 45, é evidente que os polígonos do tipo *Swiss Cheese* foram efetivamente identificados e detectados. Além disso, é possível notar a presença de alguns polígonos resultantes de ruídos localizados no interior das feições, especialmente notável na Figura 44. Adicionalmente, também se observa a ocorrência de polígonos derivados de ruídos na região externa ao *Swiss Cheese*, conforme representado na Figura 45. As Figuras 46 e 47, corroboram a discussão apresentada neste parágrafo.

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 zoom 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.

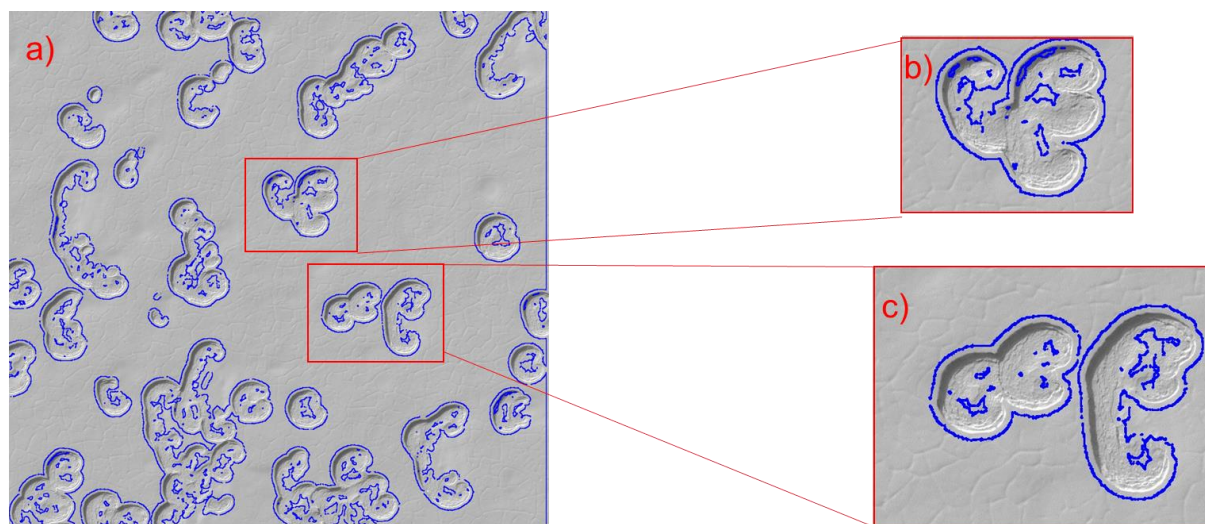
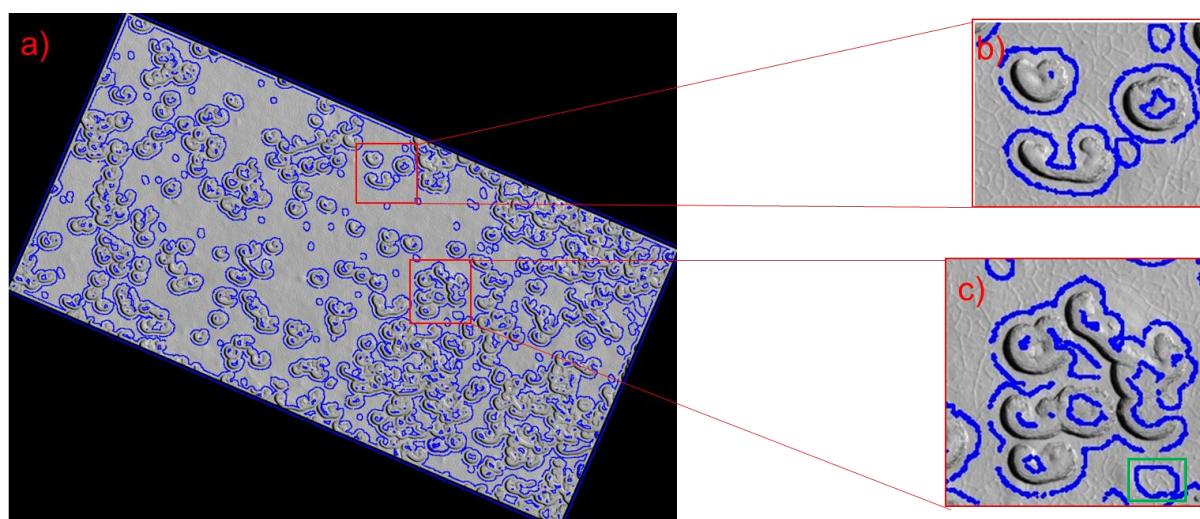


Figura 47: Sobreposição do resultado da rotina desenvolvida (em azul) à imagem original HiRISE, com a delimitação de retângulos envolventes simulando um zoom para realçar as áreas discutidas, bem como suas características específicas: a) Sobreposição do resultado na imagem original HiRISE; b) Exemplificação 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.



As Figuras 46 e 47 demonstram a presença de um *buffer* ao redor de cada feição de interesse, como se uma escala ou dilatação tivesse sido aplicada no momento da detecção, sendo necessária uma etapa adicional para a diminuição desses *buffers* e a tentativa de retirada e/ou

diminuição dos ruídos poligonais nos resultados. Esse *buffer* pode ser atribuído por decorrência das aplicações de fechamento e dilatação, da quais tem por propriedade a modificação do tamanho do objeto. Para tal, foi aplicado um elemento estruturante para a operação morfológica de erosão (*cv2.erode*). Foi identificada na etapa v, representada pelos resultados apresentados nas Figuras 38 e 39, a presença de dilatação dos polígonos após a utilização da função *cv2.approxPolyDP*.

Dessa forma, os resultados apresentados nas Figuras 38 e 39 foram submetidos a essa etapa adicional, com o objetivo de diminuir o espaço entre o objeto e a borda detectada (*buffer*) e a eliminar alguns ruídos. O resultado da operação morfológica de erosão foi submetido novamente às etapas vi e vii (pelo detector de borda *Canny* e sobreposição à imagem original, respectivamente). O resultado dessa etapa adicional pode ser visto nas Figuras 48 e 49.

Figura 48: Sobreposição do resultado da rotina desenvolvida (em azul) à imagem original MOC com a diminuição do *buffer*, pós aplicação da operação morfológica *cv2.erode*. Delimitaram-se retângulos envolventes simulando um *zoom* 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 *buffer*; e c) Exemplificação de duas feições sem a presença de ruídos poligonais no seu interior e diminuição *buffer*.

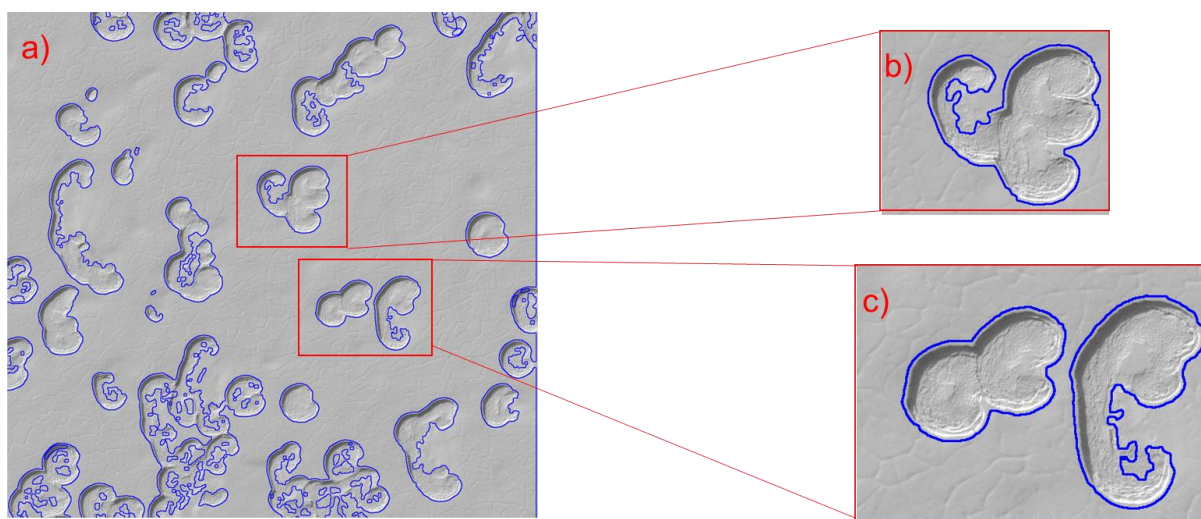
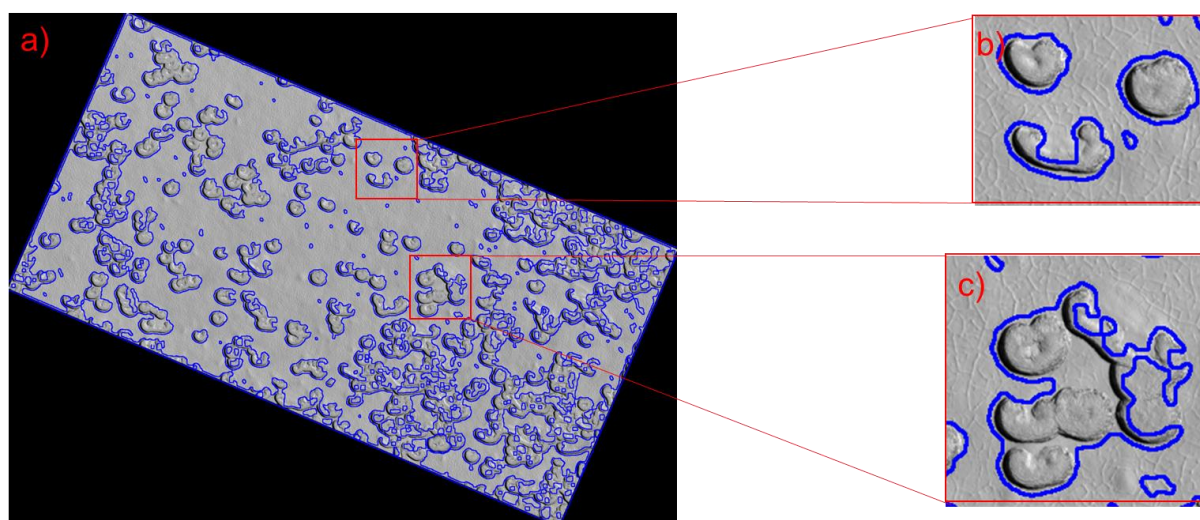


Figura 49: Sobreposição do resultado da rotina desenvolvida (em azul) à imagem original HiRISE com a diminuição do *buffer*, pós aplicação da operação morfológica *cv2.erode*. Delimitaram-se retângulos envolventes simulando um *zoom* para realçar as áreas discutidas, bem como suas características específicas: a) Sobreposição do resultado na imagem original HiRISE; b) Exemplificação da feição com a diminuição do *buffer* 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 *buffer*.



A etapa adicional exibiu resultados notáveis, evidenciados nas Figuras 48 e 49. Estas ilustrações refletem a capacidade do processo morfológico de erosão em eliminar as áreas indesejadas de *buffer* e diminuir o tamanho dos ruídos no interior e exterior da feição de interesse. Observa-se claramente na Figura 48 um notável avanço em relação à Figura 46. Entre as melhorias evidenciadas, destaca-se a significativa redução do *buffer* que previamente separava a detecção da feição original. Além disso, foram notáveis a completa eliminação dos ruídos no interior da feição e a notória ausência de segmentações e discontinuidades das bordas, anteriormente presentes. Esses refinamentos indiscutivelmente realçam a qualidade da metodologia desenvolvida, demonstrando um progresso bastante positivo.

Parte da discussão também se estende à comparação entre a Figura 49 e Figura 47. A área do do *buffer* também foi diminuída, e alguns polígonos oriundos de ruídos também. Contudo, na Figura 49-c, houve uma simplificação excessiva na região onde um conjunto de feições se encontra extremamente próximo. Nesse caso, ocorreu uma generalização que negligenciou a distinção entre essas feições individuais.

Na Figuras 48 e 49, uma observação relevante destaca-se nos cantos, onde a detecção englobou erroneamente uma linha azul correspondente à borda da imagem. Além disso, foram observados alguns polígonos ruidosos dentro e fora das feições de interesse. Para abordar essa

questão, foi tentada uma interseção de imagens entre uma versão sem as bordas detectadas e a imagem resultante. Contudo, o algoritmo enfrentou dificuldades em distinguir o que era do que não era de interesse. Diante disso, optou-se por realizar uma filtragem com base em área, com valor de 160 (MOC) e 100 (HiRISE), respectivamente, visando eliminar os polígonos ruidosos, tanto dentro quanto fora dos contornos. Nas Figuras 50 e 51, a seguir, demonstra-se a aplicação dessa filtragem por área, buscando exclusivamente a remoção dos ruídos em forma de polígonos.

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.

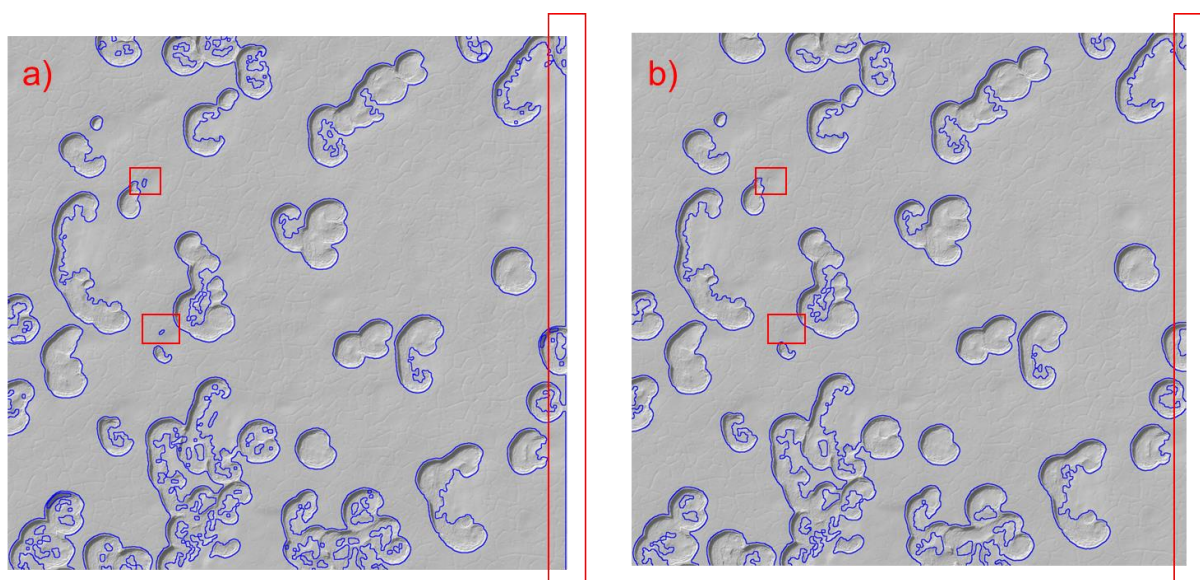
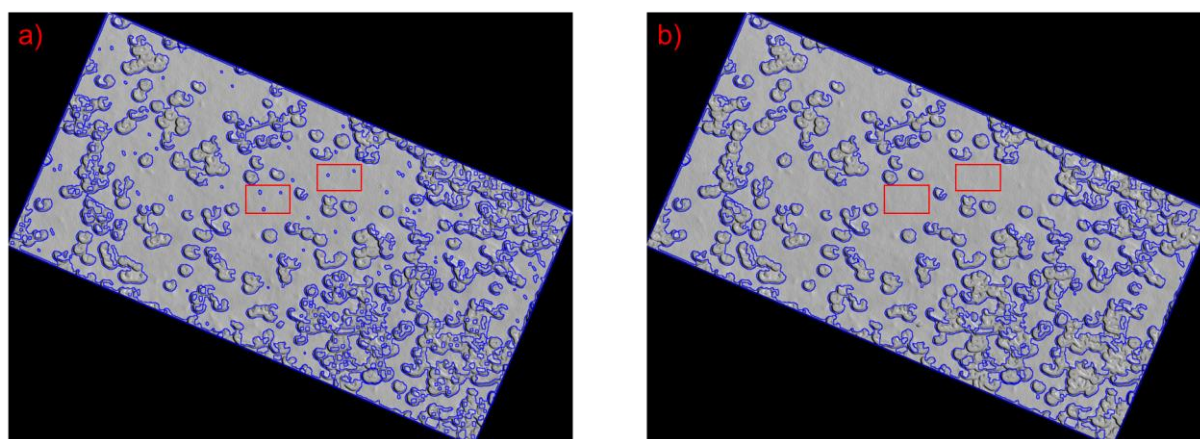


Figura 51: Sobreposição do resultado da rotina desenvolvida (em azul) à imagem original HiRISE, pós aplicação da operação filtragem por área. a) Imagem HiRISE antes da aplicação de filtragem por área. b) Imagem HiRISE pós aplicação da filtragem por área.



Na Figura 50-b, apresenta-se a imagem MOC após a aplicação da filtragem por área.

Destaca-se, em vermelho, a eficaz eliminação dos ruídos, além da correção da borda detectada erroneamente, comparado à Figura 50-a. Na Figura 51-b, similar à imagem anterior, nota-se que os polígonos externos às feições foram removidos, entretanto, as bordas exteriores à imagem persistiram.

5.3 Análise dos Resultados

Seguindo as etapas destacadas na Figura 20, representadas pelo fluxograma, a etapa *viii* consistiu nas análises dos resultados. Essa etapa, inicialmente, consistiu em uma análise visual e, posteriormente, em uma análise estatística, a partir de uma imagem representando o *Ground Truth* e o *software Cartomorph*.

5.3.1 Análise Visual

A Figura 48-a apresentou o resultado da sobreposição da rotina desenvolvida à imagem original MOC. Uma observação importante é feita no canto superior direito, onde a detecção acabou englobando uma linha azul que corresponde à borda direita da imagem. Isso ocorreu devido à confusão causada pela presença de um polígono aberto do tipo *Swiss Cheese* que está em contato com o limite da imagem. Essa confusão aconteceu porque a rotina interpretou erroneamente essa parte como um polígono (FP), levando-a até o canto inferior direito da imagem e criando a ilusão de ser uma borda contínua. Além disso, é possível observar a presença de ruídos em formato de polígonos pequenos, principalmente no interior das feições *Swiss Cheese* que se encontram nos extremos da imagem. Com o objetivo de superar essas questões, optou-se por implementar uma filtragem por área, como evidenciado na Figura 50-b. Essa abordagem solucionou as questões relacionadas à borda à direita e a alguns polígonos localizados tanto dentro quanto fora das feições.

A Figura 49-a ilustra o resultado preliminar da sobreposição da rotina desenvolvida à imagem original HiRISE. É perceptível que os quatro cantos da imagem apresentam uma espécie de borda azul. Semelhante a Figura 48-a, discutida anteriormente, isso ocorre devido aos polígonos que se encontram na fronteira da imagem, estando parcialmente dentro dela. Isso levou a uma interpretação equivocada por parte da rotina, resultando em uma detecção incorreta dessas partes como bordas contínuas que se estendem por todos os lados da imagem. Diferentemente da imagem MOC, o resultado da imagem HiRISE exibe polígonos pequenos provenientes de ruídos, principalmente na área externa das feições de interesse. Acredita-se que

essa situação é resultado do pré-processamento, que realçou a área externa ao *Swiss Cheese*. Devido à alta resolução espacial da HiRISE (superior à da MOC), esse processo enfrentou dificuldades, convertendo essa área em polígonos de ruído que não são relevantes para o objetivo da detecção. Adicionalmente, na Figura 49-c, foram observadas algumas generalizações nos polígonos, possivelmente devido a sua proximidade. Assim, procedeu-se à aplicação da filtragem por área na imagem HiRISE, resultando na eliminação da maior parte dos polígonos externos à feição. No entanto, vale ressaltar que ainda não foi possível remover as bordas da imagem, conforme ilustrado na Figura 51-b.

Destaca-se que a etapa adicional trouxe a metodologia, em que, com apenas uma análise visual entre as Figuras 48, 46 e 49, e 47, é possível notar a melhora no delineamento, que passou a ser mais fiel à imagem original com a eliminação e diminuição de alguns ruídos. Além disso, a fase de filtragem desempenhou um papel crucial na metodologia, permitindo a exclusão de ruídos que poderiam ser interpretados erroneamente como falsas detecções (Figuras 50 e 51).

5.3.2 Análise Estatística

A fim de amparar a análise visual, tem-se a análise estatística, na qual foram utilizadas as métricas *Completeza*, *Correção*, *Qualidade* e *F1-Score*. A performance estatística dos resultados pode ser vista na Tabela 1 e Tabela 2, para as extrações na imagem MOC e HiRISE, respectivamente.

Tabela 1: Tabela apresentando a performance estatística da extração das feições do tipo *Swiss Cheese* para a imagem MOC.

<i>Imagem MOC</i>	Valores (%)
<i>Completeza</i>	98,64
<i>Correção</i>	83,07
<i>Qualidade</i>	82,13
<i>F1-Score</i>	90,19

Tabela 2: Tabela apresentando a performance estatística da extração das feições do tipo *Swiss Cheese* para a imagem HiRISE

<i>Imagem HiRISE</i>	Valores (%)
<i>Completeza</i>	91,50

<i>Correção</i>	77,54
<i>Qualidade</i>	72,34
<i>F1-Score</i>	83,94

De forma geral, os resultados obtidos pelas métricas são notáveis, todos acima de 70% (Tabela 1 e Tabela 2). Ao avaliar a aplicação da rotina na imagem MOC (Tabela 1), destaca-se a métrica de *Completeza* com um valor de 98%. Isso significa que cerca de 98% dos pixels da imagem foram extraídos com precisão a partir da imagem de referência. Além disso, a métrica de *Correção* atingiu um valor de 83%, indicando a porcentagem de pixels na imagem extraída que se alinham com a imagem de referência. A avaliação global de *Qualidade* alcançou um valor de 82%, o que reflete a alta precisão na rotina desenvolvida. Destacando ainda mais o desempenho da metodologia, o *F1-Score* atingiu a marca de 90%. Esse valor traduz de maneira eficaz o equilíbrio entre as métricas, revelando a eficiência do método.

Já para a rotina aplicada na imagem HiRISE (Tabela 2), a métrica *Completeza* apresentou um valor de 91%, que significa a porcentagem dos pixels da imagem que foram corretamente extraídos a partir da imagem de referência. Simultaneamente, a métrica de *Correção* revelou um índice de 77%, o que indica a proporção de pixels na imagem extraída que se alinham com a imagem de referência, indicando uma alta taxa de FP, que pode ser entendido pela borda detectada. Uma análise mais ampla do *Qualidade* revelou uma pontuação de 72%, evidenciando a precisão do método empregado. Além disso, o *F1-Score* foi calculado em 83%, destacando de maneira perspicaz a convergência entre as métricas.

Além dos valores estatísticos, foram geradas as imagens de comparação exata entre a detecção e a imagem de referência. Os resultados podem ser vistos nas Figuras 52 e 53.

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).

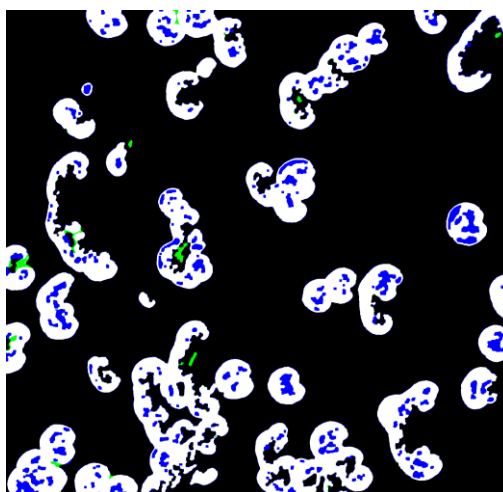
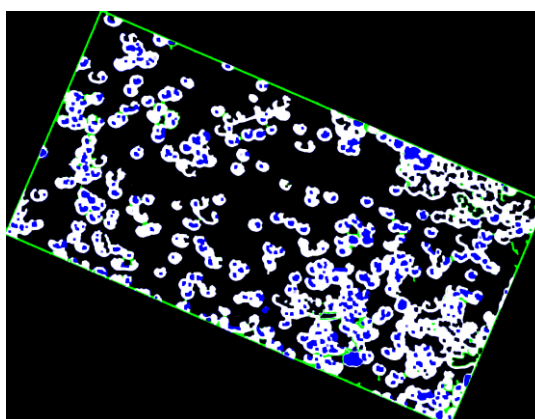


Figura 53: Imagem representando a comparação exata entre a imagem de detecções HiRISE e sua referência. Em azul os verdadeiros negativos (TN), em verde os falsos positivos (FP), em vermelho os falsos negativos (FN) e em branco os verdadeiros positivos (TP).



É perceptível que as imagens retratadas nas Figuras 52 e 53 refletem as discussões examinadas na seção 5.3.1. Dentre essas observações, destaca-se a notável ausência de falsos negativos (indicados em vermelho) em ambas as imagens. Esse êxito pode ser atribuído à capacidade da rotina desenvolvida de identificar de forma abrangente todas as características das *Swiss Cheese features*. Adicionalmente, chama-se a atenção para uma predominância das colorações verde (falsos positivos) e azul (verdadeiros negativos) na Figura 53. Essa percepção pode ser explicada pela resolução espacial mais elevada da Figura 53, o que resulta em um maior nível de detalhamento, além da dimensão expandida da imagem e a proximidade das feições de interesse, que reforçam essa interpretação. Tais fatores estão em concordância com as métricas estatísticas apresentadas na Tabela 2.

A metodologia foi aplicada a um conjunto de 22 imagens. Dois exemplos já foram apresentados (MOC- Imagem de número 1 e HiRISE- Imagem de número 20). Os valores de limiares utilizados para cada imagem processada estão disponíveis no Apêndice B. É importante ressaltar que a escolha de diferentes limiares para cada imagem é justificada pelas suas características complexas e únicas. Fatores como a captura da cena em momentos distintos, regiões variadas e tipos de iluminação diferentes podem influenciar na variação dos limiares de uma imagem para outra.

A validação do método implicará na aplicação de métricas a todo o conjunto de dados de imagens. O desempenho estatístico dos resultados é apresentado na Tabela 3.

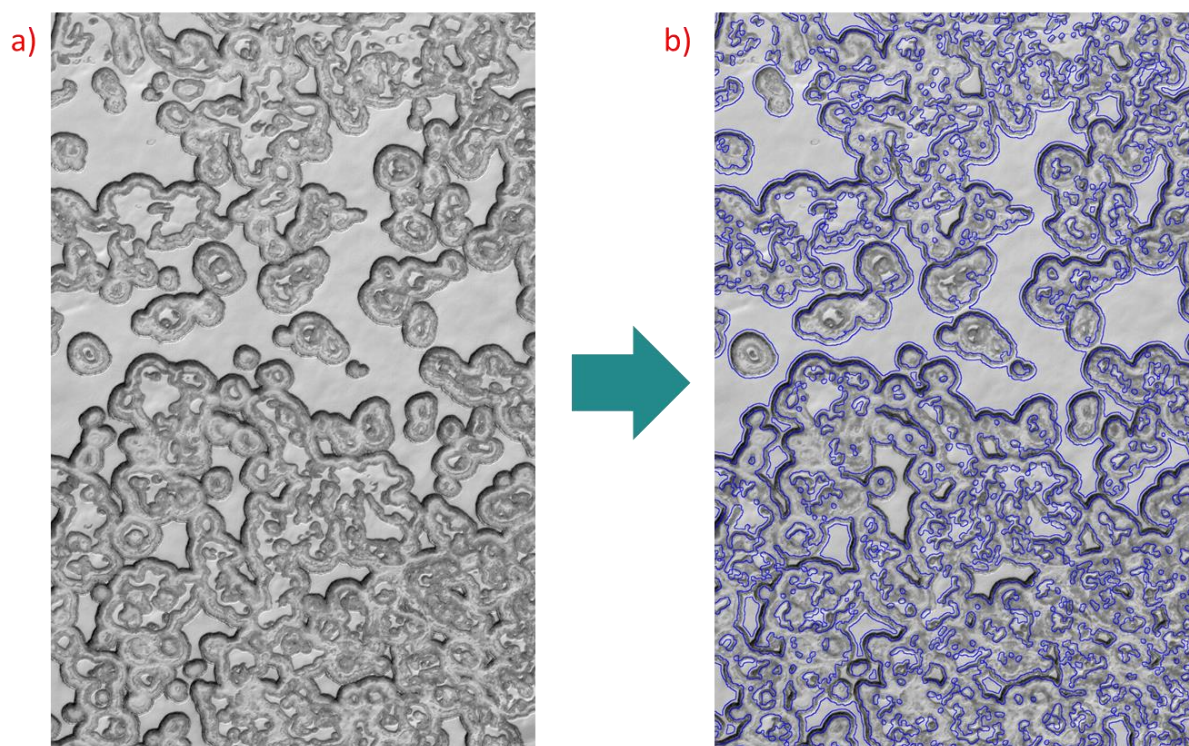
Tabela 3: Avaliação do desempenho da extração de recursos do *Swiss Cheese* nas imagens MOC/HiRISE

<i>Imagem</i>	<i>Sensor</i>	<i>Completeza</i> (%)	<i>Correção</i> (%)	<i>F1-Score</i> (%)	<i>Qualidade</i> (%)
1	MOC	98	83	90	82
2	MOC	98	75	85	74
3	MOC	94	90	92	85
4	MOC	85	97	91	83
5	MOC	95	58	72	56
6	MOC	97	38	55	38
7	MOC	98	93	96	92
8	MOC	99	70	82	70
9	MOC	99	74	85	74
10	MOC	76	49	59	42
11	MOC	98	96	97	95
12	MOC	99	65	79	65
13	MOC	99	86	92	86
14	MOC	98	83	90	81
15	MOC	92	96	94	89
16	MOC	95	83	89	80
17	MOC	98	91	94	90

18	MOC	98	90	94	89
19	MOC	99	87	93	87
20	HiRISE	91	77	83	72
21	HiRISE	85	89	87	77
22	HiRISE	87	82	84	73

Depois de analisar a Tabela 3, que ilustra o desempenho estatístico da extração de recursos do tipo *Swiss Cheese* nas imagens MOC/HiRISE, fica evidente que os resultados são notáveis em um contexto mais amplo, com a maioria das métricas ultrapassando consistentemente o limite de 77%. Em termos de *completeza*, a Imagem 8 se destaca com uma pontuação notável de 99,98%, o que significa a extração precisa de quase todos os pixels quando comparado com a imagem de referência. Isso demonstra um ótimo desempenho na captura de detalhes intrincados da imagem. Com relação à *correção*, a imagem 4 obteve uma pontuação alta de 97,83%, indicando um alinhamento notavelmente próximo entre os pixels da imagem extraída e os da imagem de referência. Isso demonstra uma ótima precisão no processo de extração. Com relação à qualidade, a imagem 11 recebeu uma pontuação notavelmente alta de 95,33%, ressaltando a excelência geral do processo de extração. Isso sugere que a imagem extraída é altamente fiel à original, preservando detalhes cruciais. No contexto da pontuação F1, a Imagem 11 atingiu um valor notavelmente alto de 97,61%, refletindo o equilíbrio bem-sucedido entre precisão e recuperação no processo de extração de recursos. No entanto, é essencial reconhecer que alguns resultados ficaram abaixo da média. Por exemplo, a Imagem 6 apresentou um F1-Score relativamente baixo de 55,44% e uma Qualidade de 38,35%. Isso pode ser atribuído à proximidade de recursos do tipo queijo suíço na imagem e à complexidade dos detalhes presentes, como pode ser visto na Figura 54.

Figura 54: Imagem 6 MOC. a) Imagem MOC original. b) Sobreposição do resultado da rotina desenvolvida (em azul) à imagem original MOC.



Na Figura 54, observa-se que os padrões polares presentes na parte inferior da imagem foram generalizados na figura b), evidenciando uma deficiência do método em regiões que apresentam certa proximidade.

Esses resultados ressaltam a variabilidade no desempenho da metodologia em diferentes imagens, com algumas imagens demonstrando um sucesso notável, enquanto outras enfrentam desafios específicos, como a proximidade de recursos ou a complexidade da imagem. Para chegar a uma conclusão abrangente sobre a eficácia da metodologia, foi realizada uma avaliação completa, incluindo o cálculo de médias e desvios padrão para as métricas em todo o conjunto de dados. Essa perspectiva mais ampla nos permite determinar o desempenho geral e a adequação da metodologia para atender aos objetivos da pesquisa, conforme detalhado na Tabela 4.

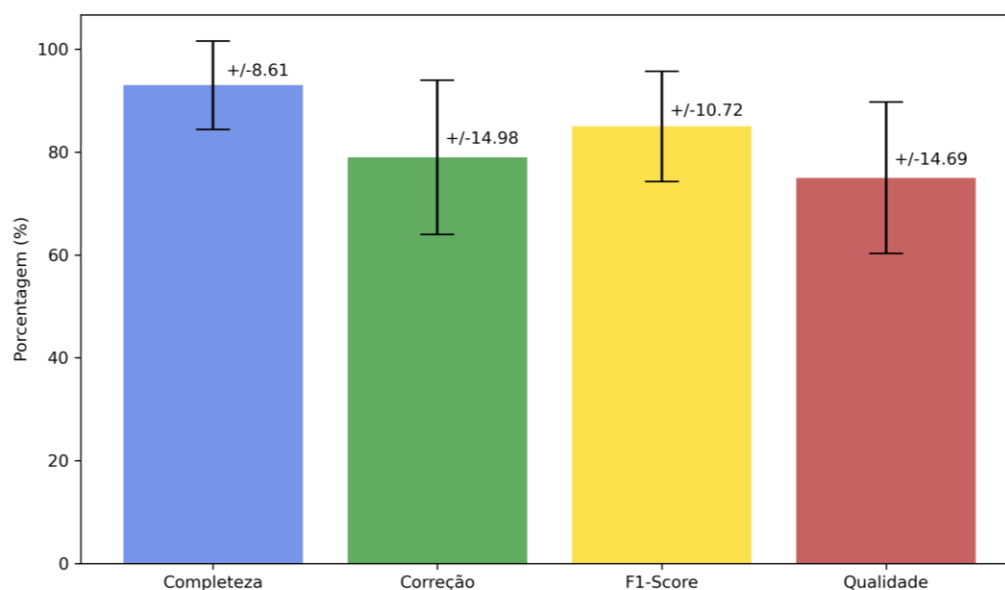
Tabela 4: Avaliação do desempenho da metodologia: Médias e desvios-padrão.

Métricas	Média $\pm$ Desvio Padrão
<i>Completeza</i>	0.93 $\pm$ 0.08
<i>Correção</i>	0.79 $\pm$ 0.15

<i>F1-Score</i>	0.85 ± 0.11
<i>Qualidade</i>	0.75 ± 0.15

A Tabela 4 apresenta uma avaliação geral completa do método, considerando o banco de dados estudado. Vale a pena observar que o método é bastante eficiente e detecta as características do queijo suíço. Deve-se prestar muita atenção às imagens em que os queijos estão muito agrupados e têm muitos detalhes intrincados, pois isso pode levar à confusão do método e resultar em muitos falsos positivos devido à complexidade. De modo geral, o método é muito bom, conforme indicado pelas médias gerais da métrica. O desvio padrão nos fornece o nível de confiança do método, e os resultados se enquadram favoravelmente nessa faixa. Abaixo (Figura 55), há uma análise visual dessa tabela, mostrando graficamente a qualidade do método aplicado neste documento.

Figura 55: Avaliação do desempenho do método com desvio padrão



5.4 Extração de Informações

A técnica *Shape from Shading* foi aplicada a duas imagens HiRISE capturadas no mesmo local durante dois períodos distintos (2007 e 2010). Esse processo ocorreu após a detecção dos *Swiss Cheese*, para extrair informações relacionadas à área e ao volume da feição. A análise buscou inferir mudanças ao longo do tempo. As imagens empregadas nessa

abordagem foram obtidas do sensor HiRISE, capturadas em 4 de junho de 2007 (disponível em https://hirise.lpl.arizona.edu/PSP_004000_0945) e em 30 de dezembro de 2010 (disponível em https://hirise.lpl.arizona.edu/ESP_020746_0945), ambas com latitude central de $-85,670^\circ$ e longitudes leste de $6,276^\circ$ e $6,511^\circ$, respectivamente. Os ângulos de incidência solar para essas imagens foram de 66° e 79° , respectivamente. A técnica Shape from Shading foi implementada usando o software Matlab. Os resultados podem ser vistos nas Figuras 56 e 57.

Figura 56: Esquema da aplicação do método "Shape from Shading" 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 "Shape from Shading".

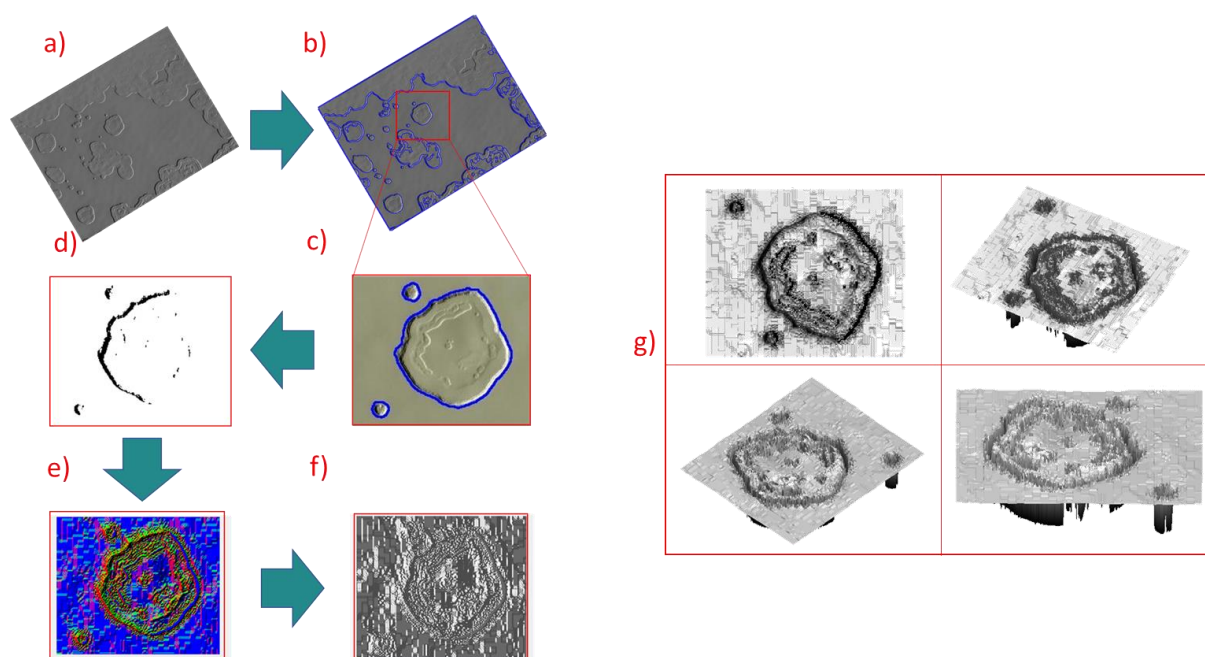
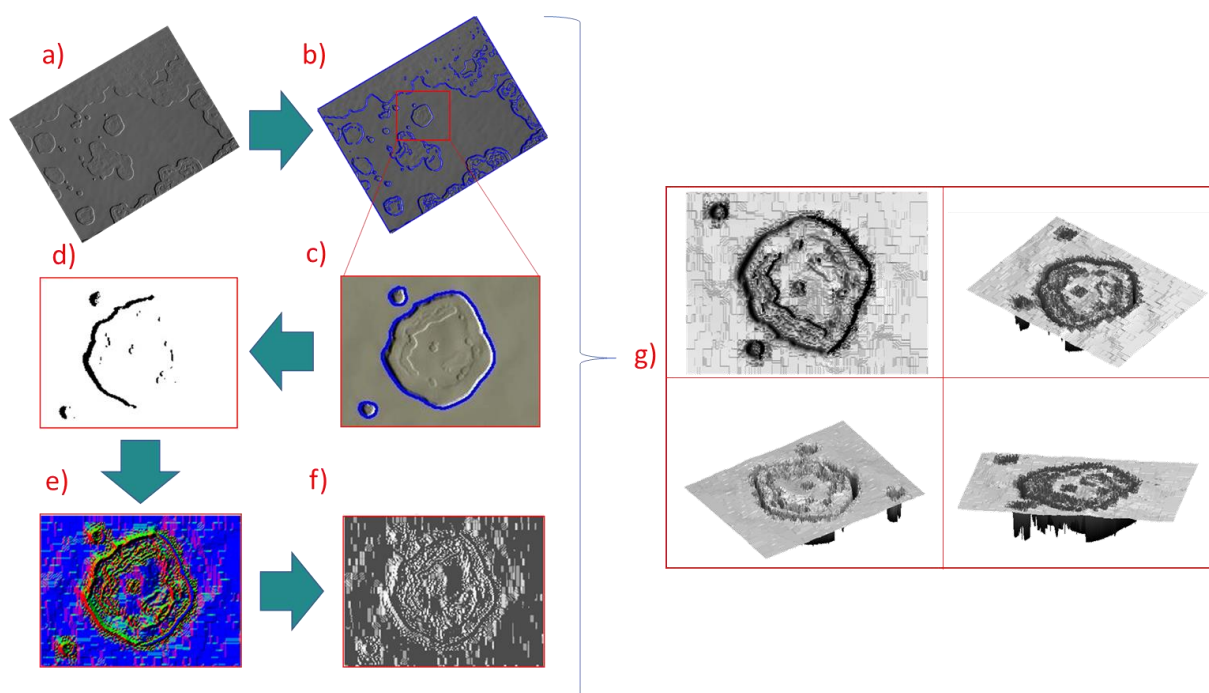
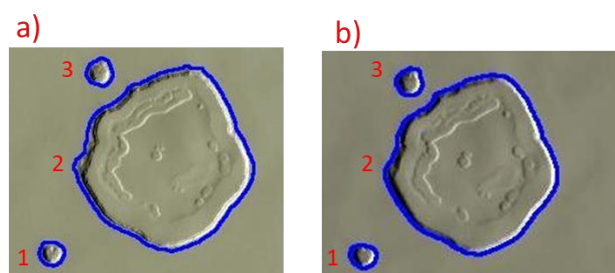


Figura 57: Esquema da aplicação do método "*Shape from Shading*" com o objetivo de extrair informações de área e volume da imagem HiRISE de 2010. Em a), a imagem original é apresentada; em b), a imagem após a aplicação da detecção Swiss Cheese. Em c), o corte selecionado para extração de informações. 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 "*Shape from Shading*".



Após a reconstrução tridimensional usando a técnica *Shape from Shading*, a área e o volume foram calculados conforme descrito na Seção 3.6 Na Figura 58, são mostradas as crateras identificadas na região selecionada.

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.



A Tabela 5 fornece as medidas de área e volume das crateras presentes nas imagens de 2007 e 2010.

Tabela 5: Informações sobre a área e o volume extraídos das três crateras nas duas imagens HiRISE, juntamente a suas respectivas diferenças.

Imagens	Crateras	Area (m²)	Volume (m³)
<i>2007</i>	1	18,81	2,66
	2	725,38	102,16
	3	18,50	2,86
<i>2010</i>	1	19,63	2,78
	2	751,44	109,70
	3	21,13	3,02
<i>Diferença</i>	1	0,82	0,12
	2	26,06	7,54
	3	2,63	0,36

Observou-se que, como resultado da metodologia implementada, houve um aumento significativo tanto na área (variando de 0,82m² até 26,06 m²) quanto no volume (variando de 0,12 m³ até 7,54 m³) de 2007 a 2010, conforme evidenciado na linha "diferença" da Tabela 5. Esse fenômeno pode ser atribuído à natureza do recurso, caracterizado pela sublimação de dióxido de carbono. Com o passar do tempo, essas estruturas sofrem erosão substancial, o que leva a uma expansão em tamanho e profundidade, aumentando, assim, sua área e volume totais.

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 SIIAPE 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.

Apêndice A: Localização das imagens no banco de dados

Tabela 6: Localização das imagens utilizadas nessa Dissertação

<i>Imagem</i>	<i>Sensor</i>	Localização da Imagem	Data	Tamanho
1	MOC	https://www.msss.com/mars_images/moc/nature_polar/np_2a/	08/03/2000	2016 x 1920
2	MOC	https://www.msss.com/mars_images/moc/2004/02/05/	05/02/2004	1024 x 1536
3	MOC	https://www.msss.com/mars_images/moc/2005/07/04/	04/07/2005	1024 x 2506
4	MOC	https://www.msss.com/mars_images/moc/2004/04/13/	13/04/2004	836 x 1254
5	MOC	https://www.msss.com/mars_images/moc/2005/02/25/	25/02/2005	768 x 1072
6	MOC	https://www.msss.com/mars_images/moc/2006/04/07/	07/04/2006	2048 x 3132
7	MOC	https://www.msss.com/mars_images/moc/2004/07/07/	07/07/2004	1024 x 1536
8	MOC	http://www.msss.com/mars_images/moc/nature_polar/swiss2/	08/03/2000	549 x 610
9	MOC	https://www.msss.com/mars_images/moc/2005/06/24/	24/06/2005	1024 x 2121
10	HiRISE	https://www.autoevolution.com/news/martian-swiss-cheese-terrain-looks-like-petri-dish-cells-under-a-microscope-162225.html#agal_0	16/06/2021	1500 x 808
11	MOC	https://www.msss.com/mars_images/moc/2005/03/17/	17/03/2005	1024 x 2566
12	MOC	https://www.msss.com/mars_images/moc/2005/08/17/	17/08/2005	2048 x 3243
13	MOC	https://www.jpl.nasa.gov/images/pia02368-more-south-polar-swiss-cheese	24/04/2000	220 x 438

14	MOC	http://www.msss.com/mars_images/moc/nature_polar/np_2a	08/03/2000	941 x 611
15	HiRISE	https://imars.uwo.ca/resources/images/landforms/large/South_Polar_Pits_2.jpg	07/08/2014	743 x 655
16	HiRISE	https://imars.uwo.ca/resources/images/landforms/large/South_Polar_Pits.jpg	07/08/2014	743 x 611
17	MOC	https://www.msss.com/mars_images/moc/2003/04/21/	21/04/2004	540 x 810
18	MOC	https://www.msss.com/mars_images/moc/2004/07/19/	19/07/2004	1024 x 2440
19	MOC	https://www.msss.com/mars_images/moc/2004/03/19/	19/03/2004	836 x 1254
20	HiRISE	https://www.uahirise.org/ESP_014141_0930	02/08/2009	2048 x 1569
21	HiRISE	https://hirise.lpl.arizona.edu/PSP_004000_0945	04/06/2007	1679 x 1583
22	HiRISE	https://hirise.lpl.arizona.edu/ESP_020746_0945	30/12/2010	1338 x 1261

- Imagens MOC possuem resolução espacial de 1,5 m;
- Imagens HiRISE possuem resolução espacial de 30 cm;
- A banda utilizada para a imagem MOC foi a pancromática;
- A banda utilizada para a imagem HiRISE foi a do vermelho (que é a banda disponibilizada para *download*).

Apêndice B: Limiares de Pré-Processamento, fechamento de polígono e filtragem por área

Tabela 7: Limiares utilizados para processamento, fechamento de polígono e de filtragem por área

<i>Imagem</i>	<i>Sensor</i>	γ	ε	<i>Filtragem</i> (Área mínima)
1	MOC	0.5	0,02	160
2	MOC	0.5	0,02	-
3	MOC	0.5	0,02	120
4	MOC	0.5	0,02	100
5	MOC	0.7	0,02	100
6	MOC	0.5	0,02	120
7	MOC	0.5	0,02	120
8	MOC	0.5	0,02	170
9	MOC	0.5	0,02	120
10	MOC	0.5	0,02	170
11	MOC	0.7	0,02	70
12	MOC	1.7	0,02	250
13	MOC	0.7	0,02	-
14	MOC	0.5	0,02	200
15	MOC	0.5	0,02	110
16	MOC	0.5	0,02	150
17	MOC	0.5	0,02	170
18	MOC	0.5	0,02	200
19	MOC	1.9	0,02	100
20	HiRISE	0.5	0,02	100
21	HiRISE	0.5	0,02	-
22	HiRISE	0.5	0,02	-