

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

FERNANDA PUGA SANTOS CARVALHO

**DETECÇÃO AUTOMÁTICA E ANÁLISE TEMPORAL DE SLOPE STREAKS NA
SUPERFÍCIE DE MARTE**



TESE

**Presidente Prudente
2016**

FERNANDA PUGA SANTOS CARVALHO

**DETECÇÃO AUTOMÁTICA E ANÁLISE TEMPORAL DE SLOPE STREAKS NA
SUPERFÍCIE DE MARTE**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas para a obtenção do título de doutor pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” Campus de Presidente Prudente.

Área de concentração: Computação de Imagens
Orientador: Professor Titular Erivaldo Antônio da Silva.
Coorientador: Dr. Pedro Miguel Berardo Duarte Pina.

Presidente Prudente
Março de 2016

FICHA CATALOGRÁFICA

C323d Carvalho, Fernanda Puga Santos.
Detecção automática e análise temporal de slope streaks na superfície de Marte / Fernanda Puga Santos Carvalho. - Presidente Prudente : [s.n], 2016
76 f. : il.

Orientador: Erivaldo Antônio da Silva
Coorientador: Pedro Miguel Berardo Duarte Pina
Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia
Inclui bibliografia

1. Slope streaks. 2. Detecção automática. 3. Análise temporal. I. Carvalho, Fernanda Puga Santos. II. Silva, Erivaldo Antônio da III. Pina, Pedro Miguel Berardo Duarte. IV. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências e Tecnologia. V. Detecção automática e análise temporal de slope streaks na superfície de Marte.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. ERIVALDO ANTONIO DA SILVA
(Orientador)



Prof. Dr. AYLTON PAGAMISSE
(UNESP/FCT)



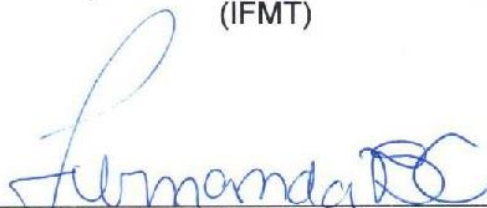
Prof. Dr. JOSÉ ROBERTO NOGUEIRA
(UNESP/FCT)



Prof. Dr. ALVARO PENTEADO CRÓSTA
(UNICAMP)



Prof. Dr. THIAGO STATELLA
(IFMT)



FERNANDA PUGA SANTOS CARVALHO

Presidente Prudente (SP), 31 de março de 2016.

Resultado: APROVADA.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de registrar o meu sincero agradecimento a todos que contribuíram de forma direta e indireta para o desenvolvimento deste trabalho. À minha família, em especial ao meu marido André, cujo apoio e incentivo incondicional foram fundamentais para realização deste meu sonho. Ao professor Erivaldo, pela confiança na minha capacidade em desenvolver uma tese de doutorado e pelo apoio de sempre. Não há palavras para expressar minha gratidão. Ao professor Pedro Pina pela ótima orientação, sem a qual este trabalho não teria alcançado os resultados obtidos. Sou de fato, muito grata a ele. Aos meus amigos da pós, em especial à Miriam, Samara, Guilherme e Raquel, não somente pela ajuda direta na pesquisa e apoio constante nas minhas vindas a Prudente, mas principalmente, pela sólida amizade que construímos durante esses anos. Vou levá-los para a vida. Aproveitando o espaço piegas, não posso deixar de citar o Homer, meu cachorro e fiel companheiro durante a maior parte do doutorado. Aos membros da banca pelas contribuições oferecidas. À Capes pela bolsa concedida no Brasil e no período de intercâmbio no Instituto Superior Técnico de Lisboa. Por fim, ao Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas, o qual viabilizou a obtenção deste título.

RESUMO

Slope streaks são rastros escuros que se estendem por declives íngremes na superfície de Marte. Estes rastros representam um dos poucos processos geológicos ativos na superfície deste planeta. Atualmente, muitos pesquisadores os têm estudado com a finalidade de descobrir sua natureza, a qual permanece controversa. Além disso, os *slope streaks* clareiam com o tempo, fornecendo pistas sobre a deposição de poeira e também sobre a natureza do material da superfície. Embora exista um número considerável de pesquisadores que estudam esses rastros, a identificação destes ainda é realizada por especialistas manualmente, através de amostras de pequena dimensão. A existência de um número elevado destas estruturas na superfície de Marte, a necessidade de caracterizá-las e também de quantificar a sua evolução temporal, não pode continuar a ser efetuada simplesmente por amostragem e de uma forma manual. É neste contexto que esta pesquisa se enquadra. A proposta consiste em contribuir para a automação do processo de extração de informações em imagens da superfície de Marte, especificamente, extração de informações sobre *slope streaks*. Através do desenvolvimento de um método de detecção automática de *slope streaks* em imagens orbitais e, também, de um método automático para análise temporal da taxa de esmaecimento, este objetivo foi alcançado neste trabalho. O método de detecção desenvolvido baseia-se principalmente em Morfologia Matemática e faz uso de operadores morfológicos conectados para o pré-processamento das imagens, transformada *top-hat*, binarização pelo método de Otsu, afinamento e reconstrução geodésica, seguido por um filtro de fator de forma. O método para a análise temporal desenvolvido consiste em um algoritmo que calcula a taxa de contraste entre o interior e a área de vizinhança de um mesmo rastro, em imagens multi-temporais registradas. Os resultados obtidos com ambos os métodos foram bastante satisfatórios e possibilitaram extrair informações inovadoras a respeito do comportamento destes rastros na superfície de Marte. As duas ferramentas desenvolvidas mostraram-se robustas para serem aplicadas a grande escala e a um grande conjunto de imagens.

Lista de palavras: *Slope streaks*, detecção automática, análise temporal, clareamento, Morfologia Matemática.

ABSTRACT

Slope streaks are typically dark, narrow and fan-shaped features that extend down slope on Mars surface. They are one of the most active and dynamic process observed on the planet's surface. Dry and wet processes have been suggested for causing their formation but their origin is still unclear. Moreover, the streaks tend to fade with time, providing clues about dust settling and material properties. Studies that quantify some characteristics of these streaks are based on manual interactive procedures to delineate only a small portion of the available slope streaks and to measure their morphometric characteristics. The availability of a methodology to segment the streaks and to extract meaningful information would naturally increase the regional knowledge and the statistical significance, as a much larger amount of images from different locations could be analyzed, together with a more complete monitoring of the fading/appearance of the dark streaks. Thus, the purpose of this research is to contribute to the information extraction process from surface images of Mars. Hence, a method to automatically detect slope streaks and an algorithm to quantify the temporal fading of each streak over the years were developed. The detection method was based on morphological operators and it was used in a part of the methodology to quantify the fading of the streaks. The results of the detection method and the temporal fading algorithm were very satisfactory. Both methods are able to extract information about the behaviour of the slope streaks on the Martian surface. Finally, the two tools are robust enough to be applied on a large scale and a large set of images.

Keywords: Slope streaks, automatic detection, temporal fading, mathematical morphology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplos de <i>slope streaks</i>	12
Figura 2 - Limiarização de uma imagem monocromática.....	27
Figura 3 – Efeitos da erosão e dilatação sobre a imagem HiRISE	30
Figura 4 - Efeitos da abertura e do fechamento morfológico sobre a Imagem HiRISE.	31
Figura 5 - Efeitos da abertura e do fechamento por área sobre a Imagem HiRISE	32
Figura 6 - Aplicação de <i>top-hats</i> sobre a Imagem HiRISE	33
Figura 7 – Exemplos de texturas dos declives	20
Figura 8 – Imagem mostrando um <i>dark slope streak</i> truncado por outro com menor contraste	21
Figura 9 – Quatro novos <i>slope streaks</i> durante um intervalo de 13 anos terrestres.	21
Figura 10 - Distribuição de <i>slope streaks</i> em Marte.....	22
Figura 11 – Ilustração esquemática do processo de formação de <i>slope streaks</i> por fluxo líquido	24
Figura 12 – Exemplo de cicatrizes triangulares	25
Figura 13 – Exemplos de RSL na superfície de Marte	25
Figura 14 – <i>Slope streaks</i> nos vales secos da Antártica	26
Figura 15 - Distribuição das imagens na superfície de Marte	36
Figura 16 – Exemplo de regiões de estudo em imagens MOC, CTX e HiRISE	37
Figura 17 – Fluxograma do método.....	38
Figura 18 – Resultado do pré – processamento na imagem MOC	39
Figura 19 – Etapas da detecção aplicadas à imagem MOC	40
Figura 20 – Imagem CTX e HiRISE	41
Figura 21 - Processamento aplicado a imagem CTX com <i>top-hat</i> por fechamento	42
Figura 22 – Processamento aplicado a imagem CTX com <i>top-hat</i> por fechamento	42
Figura 23 – Refinamento do método	42
Figura 24 – Refinamento do método aplicado à imagem HiRISE	43
Figura 25 - Refinamento do método aplicado à imagem CTX	44
Figura 26 - Refinamento do método aplicado à imagem MOC	45
Figura 27 – Exemplos de cenas com <i>slope streaks</i> de difícil identificação	47
Figura 28 – <i>Ground truth</i> das imagens	48
Figura 29 - Exemplo dos resultados alcançados com o método de detecção	49
Figura 30 – Fluxograma da metodologia utilizada para a análise temporal.	51
Figura 31 – Exemplo de área contemplada por imagens multitemporais no Lycus Sulci.	51
Figura 32 – Regiões consideradas no estudo de Análise temporal.	52
Figura 33 – Disponibilidade de imagens de quatro regiões de estudo.	53
Figura 34 - Sequência desenvolvida para calcular o contraste.....	55
Figura 35 – Forma de armazenamento dos valores de ND dos rastros analisados.....	55
Figura 36 – Variação na taxa de contraste no quadrante Tharsis.	58
Figura 37 - Variação na taxa de contraste no quadrante Amazonis.....	58
Figura 38 – Variação na taxa de contraste no quadrante Arabia.	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Desempenho do algoritmo.	47
Tabela 2 – Desempenho global para os três conjuntos de imagens.	47
Tabela 3 - Imagens utilizadas para a análise temporal.....	52
Tabela 4 – Valores de albedo dos <i>slope streaks</i> apresentados no gráfico do quadrante Tharsis.	57
Tabela 5 - Valores de albedo dos <i>slope streaks</i> apresentados no gráfico do quadrante Amazonis.....	59
Tabela 6 - Valores de albedo dos <i>slope streaks</i> apresentados no gráfico do quadrante Arabia.	60

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	10
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	10
1.2 OBJETIVOS.....	13
1.3 TRABALHOS RELACIONADOS E JUSTIFICATIVA	13
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1 SENSORIAMENTO REMOTO EM MARTE.....	16
2.1.1 <i>Missões MGS e MRO e seus sistemas sensores</i>	16
2.1.2 <i>Radiometria</i>	18
2.2 SLOPE STREAKS EM MARTE	19
2.2.1 <i>Características</i>	19
2.2.1.1 <i>Morfologia detalhada</i>	19
2.2.1.2 <i>Albedo</i>	21
2.2.1.3 <i>Associações geológicas e distribuição</i>	21
2.2.2 <i>Hipóteses de formação e desencadeamento</i>	22
2.2.3 <i>Relação com outras feições</i>	24
2.2.3.1 <i>Triangular scars</i>	24
2.2.3.2 <i>Recurring slope lineae (RSL)</i>	25
2.2.4 <i>Comparação com slope streaks na Antártica</i>	26
2.3 PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS PARA DETECÇÃO DE SLOPE STREAKS.....	27
2.3.1 <i>Limiarização de intensidade</i>	27
2.3.2 <i>Processamento morfológico</i>	28
2.3.2.1 <i>Operadores elementares: erosão e dilatação</i>	29
2.3.2.2 <i>Filtros de abertura, fechamento e transformada top-hat</i>	30
2.3.2.3 <i>Afinamento e pruning</i>	34
2.3.2.4 <i>Transformação geodésica – Reconstrução por dilatação</i>	35
3. DETECÇÃO AUTOMÁTICA DOS SLOPE STREAKS.....	36
3.1 BANCO DE IMAGENS	36
3.2 MÉTODO DE DETECÇÃO	37
3.2.1 <i>Algoritmo de detecção</i>	37
3.2.1.1 <i>Pré - processamento</i>	38
3.2.1.2 <i>Detecção</i>	39
3.2.1.3 <i>Pós – processamento</i>	40
3.2.2 <i>Escolha dos parâmetros e refinamento do método</i>	41
3.3 VALIDAÇÃO DO MÉTODO E RESULTADOS	46
3.4 CONCLUSÃO	49

4. ANÁLISE TEMPORAL	51
4.1 ABORDAGEM METODOLÓGICA.....	51
4.1.1 <i>Banco de imagens</i>	52
4.1.1.1 Regiões de estudo	53
4.1.2 <i>Algoritmo para a análise temporal</i>	54
4.1.3 <i>Conversão dos NDs em albedo</i>	55
4.2 ANÁLISE QUANTITATIVA DO CLAREAMENTO	56
4.2.1 <i>Quadrante Tharsis</i>	56
4.2.2 <i>Quadrante Amazonis</i>	58
4.2.3 <i>Quadrante Arabia</i>	59
4.3 DISCUSSÃO E CONCLUSÕES.....	60
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
BIBLIOGRAFIA	64
APÊNDICE I	68
APÊNDICE II	71

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Slope streaks (rastros em encosta)¹ representam um dos poucos processos geológicos que ocorrem, sob as atuais condições climáticas, na superfície do planeta Marte. São faixas alongadas, tipicamente mais escuras que suas áreas circundantes e se estendem sobre declives íngremes (SULLIVAN et al., 2001), como mostram os exemplos na Figura 1. Essas feições possuem baixo albedo e costumam ser vistas ao longo da região equatorial do planeta. Além disso, aparecem geralmente em regiões com baixa inércia térmica, nas quais os picos de temperatura excedem 275 K (2° Celsius), pelo menos uma vez ao ano (SHORGHOFER et al., 2002).

As únicas feições terrestres parecidas aos *slope streaks* marcianos foram encontradas na Antártica (HEAD, 2007), porém o mecanismo de formação dos rastros terrestres parece não ser o mesmo para os rastros marcianos, assim, não parece haver feições idênticas na Terra. O estudo de *slope streaks* na superfície de Marte é bastante importante para a compreensão deste planeta, pois pode proporcionar pistas para o entendimento de propriedades básicas da superfície, como, por exemplo, ciclo de poeira e de água, e mudanças climáticas recentes (KRESLAVSKY e HEAD, 2009).

Os primeiros *slope streaks* foram observados em Marte por Morris (1982) e Ferguson e Lucchitta (1984) em imagens com resoluções <100 metros obtidas pelas sondas Viking Orbiters. Posteriormente, foram observados mais detalhadamente por Malin e Edgett (2001) e Sullivan et al. (2001) através de imagens adquiridas pela câmera MOC (*Mars Orbiter Camera*), com resolução espacial de até 1,5 m/pixel. Esta câmera foi enviada pela NASA na missão *Mars Global Surveyor* em novembro de 1996, encerrando suas atividades em outubro de 2006. Em agosto de 2005, as câmeras HiRISE (*High Resolution Imaging Science Experiment*) e CTX (*Context Camera*) foram enviadas a Marte a bordo da missão MRO (*Mars Reconnaissance Orbiter*), e com imagens cuja resolução espacial é de até 0,25m/pixel e 6m/pixel, respectivamente, ambas têm registrado a presença de *slope streaks* desde então (McEWEN et al., 2007).

Com as sobreposições obtidas por imagens MOC em áreas anteriormente imageadas pelas sondas Viking, foi identificada a formação de novos rastros, evidenciando que os mesmos representam um fenômeno dinâmico que está presentemente ativo (SULLIVAN et al., 2001). Os primeiros *slope streaks* observados por Morris (1982) foram classificados como feições com baixo albedo. Entretanto, com o aumento da resolução espacial das imagens foi

¹ Tradução sugerida pela autora

possível realizar observações mais detalhadas e foi constatado que estas feições possuem também variações de albedo global entre os rastros. Os *slope streaks* são tipicamente mais escuros que a área circundante (*dark slope streaks*), todavia, em raras ocorrências, feições mais claras são encontradas e denominadas *bright slope streaks* (Figura 1 (c)).

Através da análise e de avaliações nos padrões temporais de mudança, Sullivan et al. (2001) sugeriram que existe uma relação entre o albedo dos *slope streaks* e a idade de exposição. Observações de contraste relativo entre *slope streaks* imageados pelas câmeras Viking e MOC, determinaram que novos rastros tendem a ser sistematicamente mais escuros que os mais antigos e, por esta razão, concluiu-se que de fato os *slope streaks* clareiam com o tempo (SHORGHOFER et al., 2007). Uma teoria para o clareamento dessas feições é baseada na precipitação da poeira atmosférica que lentamente vai elevando o valor do albedo dos rastros ao longo dos anos até que eles fiquem indistinguíveis da superfície ao seu redor.

Até o presente momento o processo de formação dos *slope streaks* permanece desconhecido. Muitos modelos têm sido propostos pela comunidade científica para explicar a sua formação, e com base em suas características, dois tipos são sugeridos: (1) movimento de massa seca na forma de avalanches de poeira (SULLIVAN et al., 2001; BARATOUX et al., 2006; PHILLIPS et al., 2007, SCHORGHOFER e KING, 2011); (2) fluxo líquido que transporta, lubrifica ou mancha o material da camada da superfície. Em relação a este último, alguns trabalhos sugerem que, como na Antártica (HEAD et al., 2007), a formação dos *slope streaks* pode ser devido à fusão de geada ou gelo de superfície ou sub-superfície (KRESLAVSKY e HEAD, 2009; MUSHKIN et al., 2010). Evidências da existência de água líquida na superfície de Marte foram encontradas em rastros chamados *Recurring slope lineae* (RSL) (MCEWEN et al., 2014; OJHA et al., 2015). Apesar dos RSL serem feições muito parecidas visualmente com os *slope streaks*, ainda não foram encontradas evidências para afirmar que os *slope streaks* são também feições úmidas. Deste modo, a natureza dos mesmos continua controversa, sem existir ainda uma resposta consensual definitiva que explique o seu processo de formação.

Embora exista um número considerável de pesquisadores que estude este fenômeno, sua identificação ainda é realizada por especialistas de forma manual em amostras que supõem representativas, mas de pequena dimensão. A existência de um número muito elevado destas estruturas na superfície de Marte, a necessidade de as caracterizar de uma forma exaustiva e também de quantificar a sua evolução temporal não pode continuar a ser efetuada simplesmente por amostragem e de uma forma manual. A comunidade científica tem desenvolvido metodologias para identificação automatizada de várias estruturas da superfície marciana, tais como dunas de areia (BANDEIRA et al., 2011), *dust devil* (STATELLA et al., 2012), crateras de impacto (BANDEIRA et al., 2012; SALAMUNICCAR et al., 2011) e redes de

vales (MOLLOY e STEPINSKI, 2007). Deste modo, não há, na literatura, trabalhos que contemplem a identificação automática dos *slope streaks*. Além disso, a NASA possui em seu banco de dados uma grande quantidade de imagens MOC, CTX e HiRISE, muitas das quais, ainda não foram analisadas. Esse número cresce em uma velocidade maior que a capacidade humana de analisá-las. Neste sentido, existe a necessidade urgente para desenvolvimento de métodos automatizados de detecção de fenômenos da superfície marciana.

E é neste âmbito que esta tese se enquadra. A proposta consiste em contribuir para a automação do processo de extração de informações em imagens da superfície de Marte. Para tanto, duas abordagens foram desenvolvidas. Uma para a detecção automática dos *slope streaks* em imagens orbitais e a outra para quantificar o clareamento dos rastros ao longo dos anos. A primeira trata-se de um método que é baseado principalmente em Morfologia Matemática e faz uso de operadores morfológicos conectados para o pré-processamento das imagens, transformada *top-hat*, binarização pelo método de Otsu, afinamento e reconstrução geodésica, para filtrar e reconstruir os rastros, seguido por um filtro de fator de forma. A segunda trata-se de uma análise temporal com abordagem dos valores de brilho de todos os *pixels* do interior dos rastros. Os valores de contraste relativo entre o interior e a área circundante são transformados em valores de albedo para eliminar interferências atmosféricas e possibilitar a comparação dos valores obtidos com imagens provenientes de diferentes sensores e em diferentes datas.

Este estudo faz parte de uma parceria entre o grupo de Morfologia Matemática da UNESP, coordenado pelo professor Erivaldo Antônio da Silva, e o Instituto Superior Técnico de Lisboa, representado pelo professor Pedro Pina.

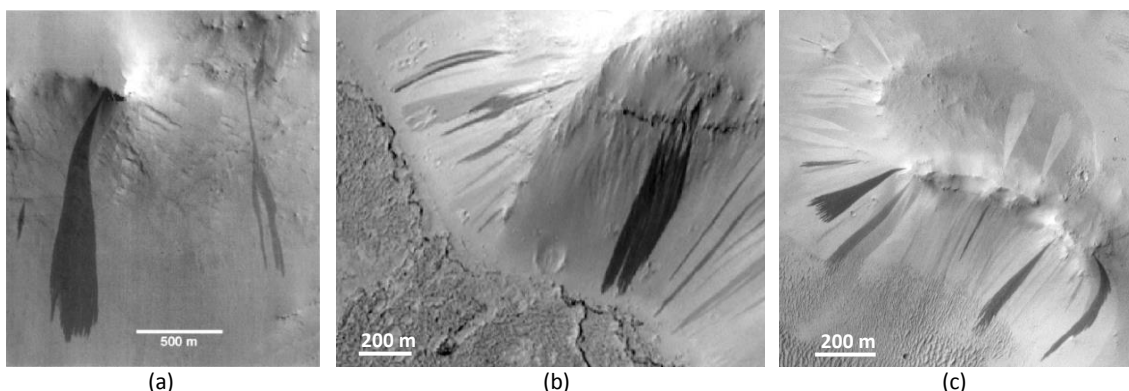


Figura 1 – Exemplos de *slope streaks* nas imagens (a) MOC M0402746 (5,9/pixel); (b) MOC M0002117 (4,3m/pixel); (c) MOC M2000701 (2,9m/pixel).

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho consiste em contribuir para a automação do processo de extração de informações sobre *slope streaks* em imagens da superfície de Marte. Para tanto, foram desenvolvidas duas metodologias com objetivos distintos. A primeira metodologia teve por objetivo desenvolver um algoritmo capaz de detectar automaticamente *dark slope streaks* em imagens MOC, CTX e HiRISE. A segunda metodologia desenvolveu objetivou quantificar a taxa de clareamento de rastros individuais ao longo de 13 anos terrestres entre imagens MOC e CTX, em uma abordagem que contempla todos os *pixels* do interior dos rastros. Os objetivos específicos foram:

- Detectar *slope streaks* através de PDI com ênfase em Morfologia Matemática, empregando atributos de forma e contraste.
- Determinar parâmetros para o método de detecção automática, favorável para imagens MOC, CTX e HiRISE.
- Aplicar indicadores que quantifiquem e qualifiquem o processo de detecção desenvolvido.
- Quantificar automaticamente o esmaecimento de um mesmo rastro em imagens obtidas por diferentes sensores (MOC e CTX) em diferentes anos.
- Transformar os valores de níveis digitais (ND) em valores de albedo lambertiano.
- Gerar e interpretar gráficos de contraste temporal de *slope streaks*.

1.3 TRABALHOS RELACIONADOS E JUSTIFICATIVA

Os processos de formação e de clareamento de *slope streaks* na superfície marciana têm sido observado por mais de três décadas (SCHORGHOFER et al., 2007) e, apesar de haver um número considerável de pesquisadores que estudam este fenômeno, a identificação desses rastros ainda é realizada manualmente por especialistas da área. Atualmente, existem mais de 1000000 de imagens disponíveis no banco de dados *Planetary Data System Imaging Node* obtidas pelas câmeras MOC, CTX e HiRISE. O número de imagens que ainda não foram analisadas e a quantidade de informação contida nas mesmas cresce a uma taxa maior do que a capacidade de operadores humanos em analisar e extrair dados relevantes desses produtos.

Até o presente momento, as abordagens de identificação automatizada de fenômenos da superfície de Marte se concentram principalmente em crateras de impacto (BANDEIRA et al., 2007; DING et al., 2010, PEDROSA et al., 2011), vales (MOLLOY e STEPINSKI, 2007), rastros de *dust devils* (STATELLA et al., 2012), dunas de areia (BANDEIRA et al., 2011) ou *gullies* (LI et al., 2015). O único trabalho encontrado na literatura que aborda detecção

automática de *slope streaks* por meio de técnicas de processamento de imagens é apresentado por Wagstaff et al. (2012). Neste estudo, por meio de medidas estatísticas, os autores criaram um mapa de saliência (regiões díspares na imagem), por medidas de entropia (SHANNON, 1948) e Kullback-Leibler *divergence* (KULLBACK, 1959). Dado o mapa de saliência produzido por estes métodos, criaram-se marcos por contornos fechados em torno das áreas das feições contidas nas imagens. Esses marcos podem representar, por exemplo, crateras, fissuras, vulcões, *dust devils*, *dark slope streaks* entre outros. Os contornos são rotulados por redes neurais e comparados a imagens registradas da mesma região, através das categorias pré-identificadas (marcos). O enfoque do trabalho consiste em estimar o tipo de feição presente na imagem através do contorno aproximado ao redor das feições, e também verificar variações temporais (do tipo positiva ou negativa).

Em contrapartida, a abordagem proposta neste trabalho consiste em segmentar os *slope streaks* presentes nas imagens através de operadores morfológicos, para então possibilitar a extração de informações relevantes dos elementos detectados, tais como, comprimento, largura, orientação, área e brilho médio. O desenvolvimento deste trabalho se justifica pela necessidade da existência de uma metodologia para detecção automática dos *slope streaks*. A automatização deste processo é a única solução prática para o monitoramento contínuo da formação, do esmaecimento e do desaparecimento dessas feições. A justificativa para utilizar Morfologia Matemática no algoritmo de detecção, está no fato desta teoria ser uma excelente ferramenta de extração de informações a partir da análise das estruturas geométricas dos alvos. Além disso, vem se mostrando bastante eficaz na detecção de outras feições da superfície marciana, como por exemplo, crateras de impacto (PEDROSA et al., 2011) e rastros de *dust devils* (STATELLA et al., 2012).

No que concerne à quantificação do clareamento, sabe-se que uma das teorias aceitas é que o clareamento ocorre devido à deposição da poeira atmosférica que vai lentamente elevando o valor do albedo dos rastros. Desta maneira, quantificar o clareamento dos mesmos pode fornecer informações importantes sobre os processos de deposição de poeira a nível regional e global, além de prover pistas para desenvolver e expandir modelos climáticos do presente, passado e futuro do planeta (SCHORGHOFER e KING, 2011). Comparações temporais de características espectrais obtidas através de imagens hiperespectrais CRISM (*Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars*), coregistradas com imagens falsa-cor HiRISE e CTX foram estudadas por Mushkin et al., (2010), Chilton e Phillips (2013) e Amador et al., (2016). Porém, nas três abordagens os dados possuem intervalos de tempo restrito, de no máximo três anos, o que limita a análise temporal realizada. Além disso, os valores espectrais dos rastros foram obtidos por amostragem de

pontos do interior dos mesmos. A abordagem deste trabalho contempla regiões com intervalo temporal de 13 anos terrestres e análises dos valores de albedo de todos os *pixels* do interior dos rastros.

Ressalta-se que a natureza do material que compõe os *slope streaks* permanece ainda controversa. Trabalhos realizados anteriormente para discriminar entre as duas hipóteses existentes (mecanismo seco ou úmido) se concentram em fotointerpretação de imagens de alta resolução (SULLIVAN et al., 2001; MALIN e EDGETT, 2001; PHILLIPS et al., 2007; CHUANG et al., 2010; BERGONIO et al., 2013), caracterização dos seus locais de ocorrência (SCHORGHOFER et al., 2002), modelos teóricos (MIYAMOTO et al., 2004; KRESLAVSKY e HEAD, 2009) e comparação com modelos terrestres (HEAD et al., 2007). Porém, os estudos acima citados se baseiam apenas em restrições físicas e não fornecem evidências de forma inequívoca para resolver o debate em curso. É importante enfatizar que este trabalho não tem por objetivo descobrir a natureza dos *slope streaks*, apenas prover informações espectrais com significância estatística para eventualmente auxiliar nos debates.

Por fim, disponibilizar métodos automáticos capazes de segmentar *slope streaks* em imagens MOC, CTX e HiRISE e quantificar o clareamento dos rastros em valores de albedo, aumenta naturalmente o conhecimento regional, global e a significância estatística, uma vez que um número muito maior de imagens de diferentes localizações podem ser analisadas, juntamente com um monitoramento mais completo da aparência e do clareamento dos *dark slope streaks*. Assim, os resultados desta pesquisa poderão contribuir com dados que possam apoiar futuros estudos visando esclarecimentos tanto da natureza do fenômeno, quanto dos seus mecanismos desencadeadores. Os resultados provenientes desta pesquisa, além de contribuir para o processamento digital de imagens, no que diz respeito ao processo de detecção de feições, contribuirão para a cartografia da superfície planetária de Marte e projetos de mapeamentos científicos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 SENSORIAMENTO REMOTO EM MARTE

2.1.1 Missões MGS e MRO e seus sistemas sensores

As primeiras missões enviadas a Marte ocorreram nos anos 1960, mas somente a partir do início da década de 1970, com as sondas americanas Mariner 9 e Viking foi possível obter quantidade significativa de imagens orbitais da superfície do planeta. Desde então, várias missões científicas têm sido realizadas. Dentre as mais recentes e bem sucedidas estão as missões *Mars Global Surveyor* (MGS) e *Mars Reconnaissance Orbiter* (MRO), que proporcionaram um mapeamento total da superfície do planeta vermelho.

A sonda MGS chegou a Marte em setembro de 1997, encerrando suas atividades em novembro de 2006. Esta sonda foi desenvolvida para percorrer órbitas circulares a uma altitude de 400 quilômetros da superfície marciana. Dentre os instrumentos científicos presentes na sonda estão: uma câmera de alta resolução (*Mars Orbiter Camera* - MOC), um altímetro laser (*Mars Orbiter Laser Altimeter* - MOLA), um espectrômetro de emissão térmica (*Thermal Emission Spectrometer* - TES), um refletômetro de elétrons (*Electron Reflectometer* - MAGNETOMER), e um sistema de retransmissão rádio (*Gravity Field Experiment* - RADIO SCIENCE) (<http://mars.jpl.nasa.gov/missions/>, acesso em: fev. de 2016).

A câmera MOC consiste em um sistema de três componentes projetados para capturar imagens de alta resolução espacial, através de uma câmera *Narrow Angle* (NA), e também imagens de menor resolução espacial, mas de maior cobertura da superfície e atmosfera, por meio de duas câmeras *Wide Angle* (WA). As imagens obtidas por estas câmeras são baseadas na técnica *pushbroom*, que consiste em um sistema de varredura do terreno, orientadas perpendicularmente aos vetores velocidade e nadir, ao longo da faixa do solo (Malin et al., 1992). Devido à aquisição simultânea linha a linha, esta técnica permite um tempo maior para realizar a medida de radiância, resultando em uma melhoria na razão sinal/ruído (Richards, 2012). A dimensão transversal da faixa da imagem é definida pelo comprimento de cada detector de CCD e a distância focal do sistema ótico, enquanto a dimensão ao longo do comprimento da faixa da imagem é definida pelo tempo em que os detectores estão ativos. A velocidade de rastreamento no solo, de aproximadamente 3 km/segundo, e o comprimento focal do sistema ótico determinam o tempo de exposição, que é de 0,44 milissegundos para a câmera NA e 75 milissegundos para os dois sistemas WA. Assim, as áreas de cobertura das imagens obtidas pela MOC-NA variam de 2,8 km x 2,8 km para 2,8 km x 25,2 km e podem atingir a resolução de 1,4 m/pixel. Esta câmera (NA) possui uma distância focal de 3,5m (f/10) e opera na faixa do visível no espectro eletromagnético (500-900nm) (Malin et al., 1992).

A sonda MRO foi lançada em agosto de 2005 em direção a Marte em busca da história da existência de água no planeta, e também em busca de evidências de água líquida. Suas atividades começaram em março de 2006, e desde então a sonda coleta imagens e dados da superfície. Dos instrumentos contidos nesta sonda estão: três câmeras (*High Resolution Imaging Science* - HiRISE, *Context Camera* CTX e *Mars Color Imager* - MARCI), um espectrômetro (*Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars* - CRISM), um radiômetro (*Mars Climate Sounder* - MCS) e um radar (*Shallow Radar* - SHARAD) (<http://mars.jpl.nasa.gov/missions/>, acesso em: fev. de 2016).

A câmera CTX foi designada para fornecer contexto espacial para observações obtidas pelos outros instrumentos da missão MRO, além de expandir as investigações dos resultados prévios obtidos com a *Mars Global Surveyor* (MGS) *Mars Orbiter Camera* (MOC). Esta câmera foi projetada para obter imagens com resolução espacial entre 4-6,5 m/pixel, a uma altitude de 255-320 quilômetros da superfície marciana. As imagens são adquiridas entre 500-700nm, para reduzir a dispersão atmosférica no final da faixa azul do espectro eletromagnético (MALIN et al., 2007). Já a câmera HiRISE opera em três intervalos do espectro, quais sejam, vermelho (570-830nm), azul e verde (400-600nm), e infravermelho próximo (800-1000nm), com imagens de altíssima resolução espacial, aproximadamente 0,3m/pixel (McEWEN et al., 2007). Devido à particularidade da sonda MRO em adquirir imagens em modo *off nadir*, ambas as câmeras, CTX e HiRISE, são capazes de produzir pares estereoscópicos.

Contudo, as câmeras MOC-NA, CTX e HiRISE fornecem imagens em níveis digitais (NDs) ou também chamados valores de brilho. Os NDs são o resultado da conversão proporcional à intensidade do sinal recebido pelos detectores de cada câmera. Naturalmente, essa conversão é realizada de maneira diferente por cada sensor e para cada banda, levando em conta as propriedades e características dos sensores. Como consequência, tem-se uma incompatibilidade entre os NDs de diferentes sensores, tornando inviável a comparação e análise do comportamento espectral dos alvos. Desta maneira, quando se deseja comparar o comportamento espectral de alvos em imagens da mesma região tomadas em diferentes épocas com diferentes sensores, é preciso converter os NDs em valores físicos, de modo a recuperar os valores de potência registrada (SCHOWENGERDT, 2007).

2.1.2 Radiometria

A reflectância é a grandeza física que permite caracterizar espectralmente os alvos, devido a sua independência da irradiância solar. Para se obter o valor de reflectância, deve-se primeiro converter os NDs em valores de radiância, também chamada de radiância aparente, através da calibração radiométrica dos dados. A conversão da imagem para valores de radiância aparente permite que bandas de um mesmo sensor ou de sensores diferentes possam ser comparadas, uma vez que os valores estão na mesma escala e representam valores físicos (SCHOWENGERDT, 2007). Entretanto, mesmo com a calibração radiométrica dos dados, permanece a influência e a interferência da atmosfera sobre os valores de radiância (PONZONI et al., 2015).

Como a reflectância é a razão entre a quantidade de energia radiante que deixa uma unidade de área no terreno (radiância) pela quantidade de energia incidente naquela área (irradiância) medida no mesmo instante, por definição, trata-se de uma grandeza física conceitual, pois que, a hipótese de que a irradiância incidente sob uma mesma direção em os pontos da superfície e esta reflete suas propriedades exatamente na direção dos sensores orbitais é inválida (JENSEN, 2009). Assim, considerando as propriedades da reflectância de uma superfície e as possíveis quantidades direcionais, têm-se a chamada função distribuição de reflectância bidirecional – FDRB (HAPKE, 1993). A FDRB descreve a distribuição angular do fluxo refletido pelo alvo em qualquer direção de iluminação e visada, refletido dentro de um ângulo sólido infinitesimal (JENSEN, 2009). Na prática, muitas outras quantidades direcionais são derivadas da FDRB, uma vez que a aquisição sob o ângulo sólido infinitesimal é impossível. Assim surge o fator de reflectância, também chamado por Hapke (1993) de valor estimado de albedo.

Para obter o valor estimado de albedo (fator de reflectância), é necessário primeiro calcular o fator de radiância (IOF), que consiste na razão entre o fluxo refletido bidirecional de uma superfície pelo fluxo incidente de uma superfície ideal e difusa. Dividindo o fator de radiância (IOF) pelo cosseno do ângulo de incidência solar no momento da observação, tem-se então o fator de reflectância (parâmetro R^*), que de acordo com Hapke (1993) é uma estimativa do albedo de Lambert (superfície de dispersão anisotrópica) (BELL et al., 2008), como segue:

$$R^* = \frac{IOF}{\cos(i)} \quad (1)$$

2.2 SLOPE STREAKS EM MARTE

2.2.1 Características

Conceitualmente, *slope streaks* são rastros alongados que se estendem por declives íngremes na superfície de Marte, possuem contraste de brilho com as áreas vizinhas (tipicamente mais escuros, mas existe também a ocorrência de rastros claros), brilho interior uniforme, um ponto inicial denominado *upslope end* (ponto ascendente), e pontos geralmente ramificados no término do fenômeno denominados *downslope ends* (finais descendentes) (SULLIVAN et al., 2001). Os *slope streaks* também possuem albedo relativamente uniforme em seu interior e variação do albedo global entre os rastros. Os comprimentos variam entre 300 a 500 metros, mas em raros casos podem exceder dois quilômetros. As larguras são geralmente inferiores a 200 metros e a relação comprimento e largura é altamente variável entre o intervalo de 30 a 5 (BARATOUX et al., 2006).

2.2.1.1 Morfologia detalhada

Os pontos ascendentes (*upslope end*) são sempre agudos e situados na parte mais elevada do declive em que o corpo principal do rastro se encontra. Como se observa na Figura 1, os rastros estão sempre associados a elevações variadas ou a vertentes, como por exemplo, paredes de crateras e dunas. Nos locais onde vários *slope streaks* ocorrem no mesmo declive, os ápices geralmente dividem a mesma encosta, mesmo se os finais descendentes se estendem por diferentes comprimentos (SULLIVAN et al., 2001).

Os declives onde os rastros ocorrem, geralmente são muito curtos para serem reconhecidos no perfil *Mars Orbiter Laser Altimeter* (MOLA). Desta forma, as avaliações dos mesmos são realizadas a partir de cálculos feitos nas próprias imagens óticas, como mostra o trabalho de Brusnikin et. al., (2015), em que os autores chegaram ao valor médio de 27,8 graus de inclinação nos pontos ascendentes. Existem muitas áreas onde vários rastros se estendem um ao lado do outro, em paralelo, traçando caminhos que não se interceptam, curvando-se em resposta a mudanças sutis no declive local, o que indica que os *streaks* são bastante sensíveis ao declive local como apresenta Figura 2 (a). Além disso, como apresentado no trabalho de Brusnikin et. al., (2015), os rastros podem mudar de direção abruptamente quando ocorre um ângulo de inclinação crescente (aclive) ou mesmo, uma mudança de direção do declive.

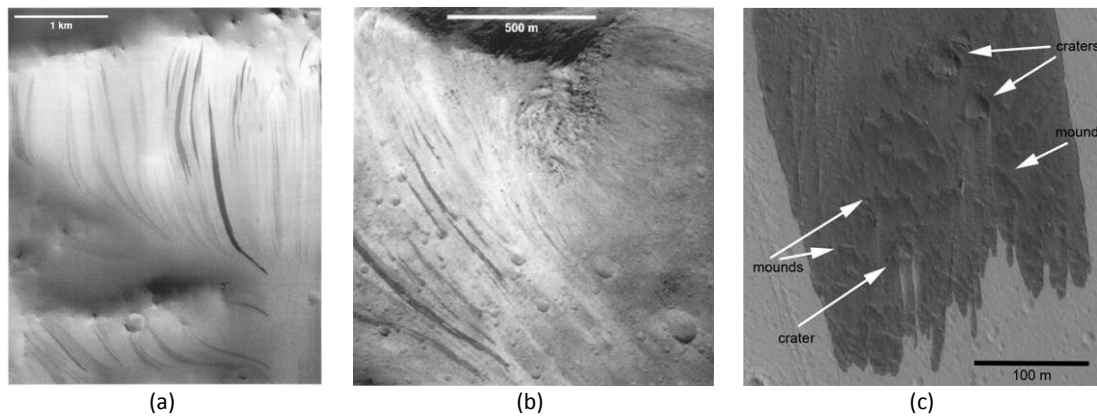


Figura 2 – Exemplos de texturas dos declives. Imagem (a) MOC SP126204 (4,3m/pixel); (b) MOC AB103502 (1,63m/pixel); (c) HiRISE PSP_003542_2035 (Fonte imagem c: Phillips et al., 2007)

As texturas dos declives são bastantes variadas, incluindo superfícies lisas, sem traços característicos e presumidamente recentes como dunas, bem como em superfícies mais antigas, como declives com muitas crateras ou declives das próprias crateras. Através de observações em imagens MOC, Sullivan et al. (2001) concluíram que detalhes sutis nos padrões de rugosidade continuam pelo interior dos rastros sem alterações, e que não há evidências que a formação dos rastros degrade a textura do declive, seja por erosão ou por cobrir a textura preexistente. Ao observar a Figura 2 (b), nota-se que, de fato, os padrões de textura cruzam os rastros sem desvio, e que a rugosidade da superfície antiga do declive com muitas crateras parece não ser afetada, mesmo através de muitos ciclos de formação e clareamento. Entretanto, estudos realizados por Phillips et al. (2007) apontam a formação de pequenos montes lineares, transporte e deposição de sedimentos na direção descendente dos rastros, o que sugere que o fenômeno seja, de algum modo, transporte de sedimentos (Figura 2 (c)).

As margens dos *slope streaks* algumas vezes se misturam onde vários rastros acontecem no mesmo declive. Ocorrências de sobreposição total não foram observadas, pois normalmente os rastros têm grande proporção de comprimento e largura. O que geralmente ocorre é que as margens dos rastros escuros truncam as margens de rastros com menor contraste como mostram os exemplos das Figura 3 (a) e Figura 3 (b) (SULLIVAN et al., 2001).

Os finais descendentes sempre acontecem em um declive menos acentuado que seu início e não se estendem muito pelo nível do terreno (SULLIVAN et al., 2001). Frequentemente são observadas ramificações nesta parte do fenômeno e, até o presente momento, não foram localizados por meio de dados confiáveis, exemplos de finais descendentes propagando em aclives (BRUSNIKIN et al., 2015). Na Figura 3 (c) observam-se exemplos de finais descendentes ramificados em um fundo de vale coberto por dunas que terminam a menos de 10 metros além da base da encosta (SULLIVAN et al., 2001).

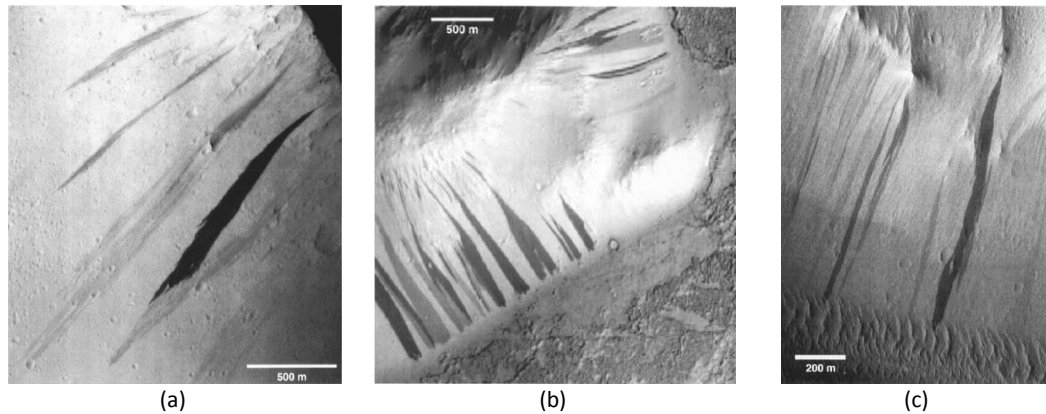


Figura 3 – Imagem (a) MOC M0307769 (6.0 m/pixel) mostrando um *dark slope streak* truncado por outro com menor contraste que presumidamente seja mais velho; (b) MOC M0002117 apresenta exemplos adicionais de sobreposição de *slope streaks* Imagem (c) MOC AB102403 apresenta exemplos de ramificações nos finais descendentes de *slope streaks*.

2.2.1.2 Albedo

Os primeiros *slope streaks* observados por Morris (1982) através de imagens obtidas pela Viking Orbiter, com resolução espacial $<100\text{m/pixel}$, foram classificados como feições com baixo albedo que ocorriam em regiões de baixa inércia térmica. Entretanto, com imagens obtidas pela MOC com melhor resolução espacial ($<5\text{m/pixel}$), foi possível realizar observações mais detalhadas e, então, foi constatado que estas feições possuem variações de albedo global entre os rastros. Através da análise e avaliações nos padrões de mudança, Sullivan et al.,(2001) sugeriram que existe uma relação entre o albedo dos *slope streaks* e a idade de exposição. Posteriormente, Schorghofer et al. (2007) observaram as variações de contraste relativo de *slope streaks* com a câmera MOC e a câmera Viking e constataram que novos *slope streaks* tendem a ser sistematicamente mais escuros que *slope streaks* mais antigos. Por esta razão, os autores concluíram que, de fato, os *slope streaks* clareiam com o tempo. A Figura 4 apresenta exemplos da evolução do clareamento e consequente, alteração no valor de albedo de alguns rastros durante 13 anos terrestres.

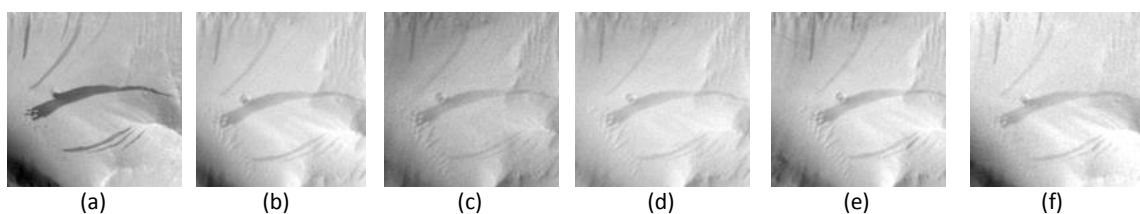


Figura 4 – (a) MOC, 2000; (b) CTX, 2007; (c) CTX, 2008; (d) CTX, 2010; (e) CTX, 2012; (f) CTX, 2013. Quatro novos *slope streaks* durante um intervalo de 13 anos terrestres.

2.2.1.3 Associações geológicas e distribuição

Ferguson e Lucchitta (1984) usaram dados da câmera Viking Orbiter para procurar associações entre *dark slope streaks* e a formação geológica das regiões onde o fenômeno

ocorre e descobriram que, sua localização está correlacionada com alto albedo e baixa inércia térmica. Estas descobertas foram confirmadas por Sullivan et al. (2001), em que os autores constataram que existe uma forte correlação entre a localização dos rastros e inércia termal inferior a $150 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-12} \text{ K}^{-1}$, ainda concluíram que configurações geológicas não são significantes para o processo de formação, apenas na medida em que proporcionam relevo suficiente para a formação dos rastros. Entretanto, além das propriedades de baixo albedo e baixa inércia térmica, o trabalho realizado por Kreslavsky e Head (2009) apresenta assinatura espectral de poeira fina nas regiões dos rastros; aparentemente, a presença de um pó fino de espessura, de pelo menos alguns centímetros na camada sobre a superfície, é essencial para a formação dos *slope streaks*.

Em relação aos locais de ocorrência (distribuição), os *slope streaks* localizaram-se principalmente nas áreas apresentadas na Figura 5. Dentro destas regiões, os padrões de ocorrência são bastante diferentes. Em algumas localidades a cada declive encontra-se facilmente *slope streaks*, e em outras, estes são encontrados aleatoriamente, existem ainda declives em que nenhum *slope streak* é encontrado.

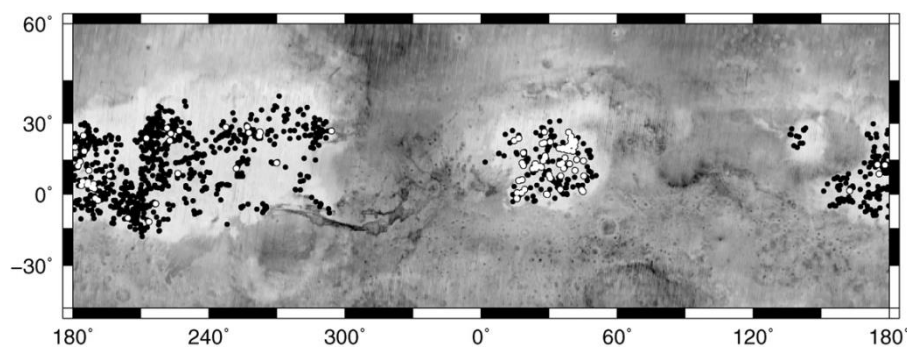


Figura 5 - Distribuição de *slope streaks* em Marte em imagens MOC para *bright slope streaks* (pontos brancos) e *dark slope streaks* (pontos pretos).
(Fonte: Schorghofer et al., 2007)

2.2.2 Hipóteses de formação e desencadeamento

Até o presente momento, a natureza dos *slope streaks* permanece desconhecida. Com base em suas características físicas, existem dois tipos de modelos de formação propostos pela comunidade científica: (1) movimento de massa seca na forma de avalanches de poeira (SULLIVAN et al., 2001; AHARONSON et al., 2003; BARATOUX et al., 2006) e (2) fluxo líquido que transporta, lubrifica ou mancha o material da camada de superfície marciana (HEAD et al., 2007; KRESLAVSKY E HEAD, 2009).

Três modelos explicam a formação dos *dark slope streaks* por avalanche de poeira seca. Nos três modelos de formação, o contraste dos *rastros de declive* diminui na medida em

que a poeira proveniente da atmosfera se acumula sobre a superfície. O primeiro modelo de formação de *slope streaks* foi apresentado por Morris (1982) e consiste em um deslocamento de detritos escuros a partir de um ponto isolado. O alto contraste do *slope streak* com a área circundante se dá por conta da mistura de uma fina camada de detritos escuros com outros tipos de detritos. Posteriormente, Williams (1991) propôs que os *slope streaks* são formados devido à ocorrência de um movimento de massa, que após a ocorrência, um manto fino de poeira é ejetado dos detritos movimentados. O contraste é causado pela deficiência de poeira nos elementos de superfície como blocos, pedregulhos etc., que foram colocados em movimento durante o evento. O terceiro modelo proposto por Sullivan et al., (2001) sugere que não são todos os detalhes que podem ser explicados por uma simples proposta de mecanismo de formação, mas o modelo de avalanche de poeira a qual acumula detritos como cachoeira de detritos, satisfaz a maioria dos requerimentos.

Ferguson e Lucchitta (1984) foram os primeiros autores a propor que os *slope streaks* são um fenômeno que tem relação com fluidos líquidos. Posteriormente, uma variedade de ideias nesta linha de pensamento tem sido proposta para explicar seu processo de formação, como Schorghofer et al., (2002), que propuseram que o alto contraste dos *slope streaks* é produzido por descarregamento aquoso ou detritos úmidos que escoam do ponto de origem onde um aquífero intercepta o rastro e o contraste do *slope streak* é o resultado do escurecimento do material do declive pela descarga aquosa. Outra proposta para o processo de formação por fluidos líquidos foi apresentada por Kreslavsky e Head (2009) e está apresentada na Figura 6. Na ilustração, durante a época de frio (a), a temperatura T está abaixo da temperatura eutética² T_e . Assim, o CaCl_2 e H_2O residem sob a forma de sal hidratado e gelo. Durante a estação quente, a temperatura T excede T_e , e certa quantidade de sal (b), infiltra para baixo (seta preta), recongela na parte inferior (c), produzindo uma camada impermeável e, por vezes, podem formar um *slope streak* (d).

As hipóteses dos mecanismos desencadeadores deste fenômeno são muitas. Schorghofer e King (2011) realizaram um trabalho para o qual são analisados os seguintes mecanismos: fusão de geada sazonal ou de gelo superficial, deslizamento de rochas, impactos de pequenos meteoritos, terremotos marcianos, *dust devils* e colapso repentino de uma camada de poeira instável. Através de mapas gerados e correlações realizadas, os autores concluíram que os *slope streaks* são causados por eventos esporádicos de uma pequena extensão espacial; e o mecanismo mais consistente com as observações realizadas foi

² Temperatura Eutética é a temperatura de fusão de uma mistura eutética.

deslizamento esporádico de rochas. Contudo, estes mecanismos ainda são alvos de debates pela comunidade.

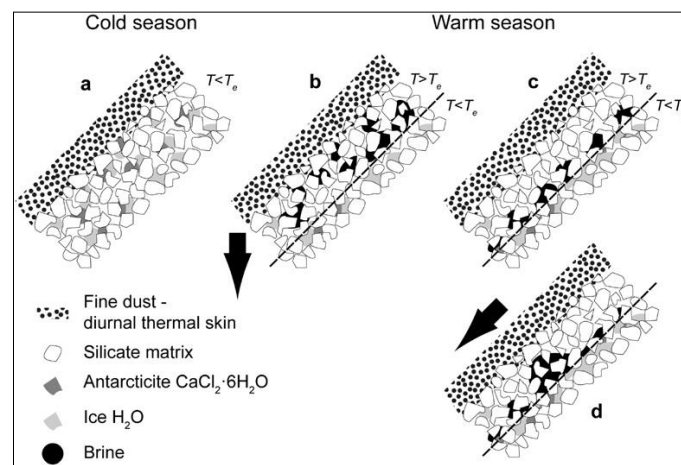


Figura 6 – Ilustração esquemática do processo de formação de *slope streaks* por fluxo líquido (Fonte: Kreslavsky e Head, 2009).

2.2.3 Relação com outras feições

2.2.3.1 *Triangular scars*

As *triangular scars* (cicatrizes triangulares) foram descobertas em imagens MOC e estudadas em detalhes por Gerstell et al. (2005). São feições topográficas com relevo negativo presentes em regiões que contêm *slope streaks* e se assemelham muito com os rastros em declive, como apresenta a Figura 7. Utilizando imagens HiRISE, Phillips et al. (2007) mostraram claramente que alguns *dark slope streaks* se encontram dentro de suas próprias cicatrizes e na interpretação destes autores, as cicatrizes triangulares são antigos *slope streaks* que clarearam totalmente. Apesar de não serem detectadas em todas as imagens, Chuang et al. (2010) afirmam que todos os *slope streaks* as possuem, e que os *rastros* observados sem cicatrizes talvez seja devido a sua diminuta profundidade (feições muito rasas) e em determinadas condições de iluminação, não se tornam visíveis nas imagens HiRISE disponíveis. Estudos posteriores realizados por Kreslavsky e Head (2009) apresentam uma análise mais detalhada sobre as profundidades e espessuras das cicatrizes. Os autores concluíram que apesar da relação genética óbvia, o processo de formação das cicatrizes não é o mesmo que dos *slope streaks*, ou seja, a relação é mais complexa que a proposta por Phillips et al. (2007).

2.2.3.2 *Recurring slope lineae (RSL)*

Desde a divulgação de evidências de água líquida na superfície do planeta Marte pela NASA em setembro de 2015, muitos trabalhos têm sido publicados sobre *Recurring slope lineae (RSL)*. Embora estas feições sejam muito parecidas aos *slope streaks*, e há quem defenda que estas sejam uma subclasse dos *slope streaks* (AMADOR et al., 2016), elas diferem em sua morfologia, propriedades e modo de ocorrência (Figura 8). Por definição, RSL são faixas estreitas de 0,5 a 5 metros de espessura, 40% mais escuras que sua área vizinha, e ocorrem em declives íngremes. No entanto, são feições recorrentes, que se formam e “crescem” em períodos mais quentes, como final da primavera até o começo do outono, e desaparecem nas estações mais frias (McEWEN et al., 2011). Sabe-se que são feições constituídas de água em estado líquido e até o momento sete localizações foram confirmadas com ocorrências de RSL, muitas vezes em grupos separados, predominantemente no hemisfério sul entre as latitudes 32° a 48°. Dentre várias hipóteses do mecanismo de formação, Ohja et al., (2015) apresentou evidências espectrais de sal hidratado nas linhas.

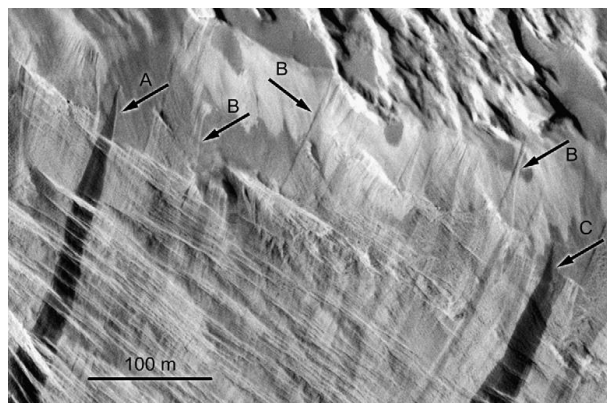


Figura 7 – Exemplo de cicatrizes triangulares. Imagem HiRISE PSP_006694_1895. (Fonte: Kreslavsky e Head, 2009).

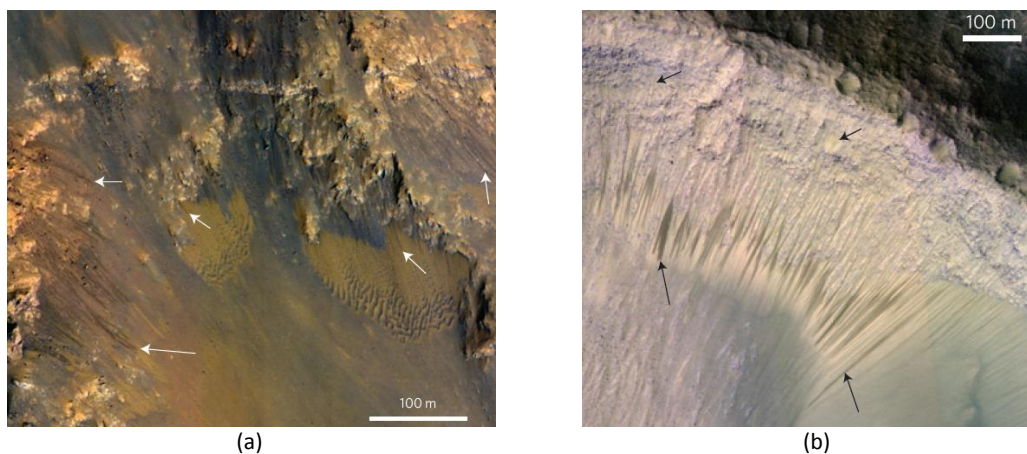


Figura 8 – Exemplos de RSL na superfície de Marte. Imagem (a) HiRISE ESP_027815_1670 (b) ESP_031059_1685. (Fonte: McEwen et al., 2014)

2.2.4 Comparação com *slope streaks* na Antártica

As feições terrestres mais similares aos *slope streaks* encontrados em Marte são os *rastros em declive* dos Vales Secos da Antártica (*Antartic Dry Valleys*) (HEAD et al., 2007). Esses rastros geralmente apresentam um brilho baixo em relação ao seu entorno, não mostram nenhum relevo detectável, possuem os finais descendentes alongados, a largura em média é inferior a 60 metros, as distâncias se estendem por 100 a 400 metros, e ocorrem em encostas íngremes. Assim como em Marte, os rastros recentes são tipicamente mais escuros, e também encontram-se rastros claros nas regiões circundantes. Os rastros seguem a topografia local e possuem ramificação nas extremidades. Suas plataformas apresentam notável semelhança com o corpo principal e os finais descendentes dos *slope streaks* encontrados em Marte, porém, ao contrário dos rastros marcianos, os da Antártica não possuem finais ascendentes bem definidos e pontiagudos. Através de observações, Head et al. (2007) concluíram que o modo de formação dos *slope streaks* da Antártica é devido à acumulação de neve durante o inverno em ambientes específicos, como por exemplo, faces de precipício. Durante o verão, em áreas com geometria de insolação favorável, a neve derrete e se acumula no subsolo seco e então o material escorre sobre o declive, formando os *dark slope streak* vistos na imagem Figura 9. Contudo, conforme descrevem Kreslavsky e Head (2009), este mecanismo de formação não pode ser exportado diretamente para Marte. Até o momento, não há nenhuma evidência de acumulação de neve na região equatorial do planeta, se isto hipoteticamente ocorre, as quantias são limitadas e microscópicas devido ao baixo conteúdo de vapor de água total da atmosfera. Além disso, os autores afirmam que os *slope streaks* marcianos acontecem a partir de um ponto agudo (*upslope end*) e os terrestres não. Desta maneira, o processo de formação dos *slope streaks* de Marte não é uma réplica do processo de formação dos *slope streaks* observados nos vales secos da Antártica.

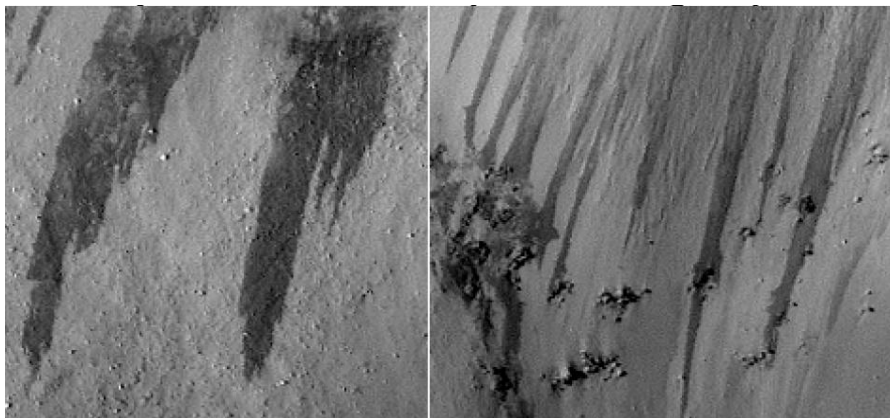


Figura 9 – *Slope streaks* nos vales secos da Antártica
(Fonte: Head et al., 2007).

2.3 PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS PARA DETECÇÃO DE SLOPE STREAKS

2.3.1 Limiarização de intensidade

O princípio da limiarização consiste em separar as regiões de uma imagem quando esta apresenta duas classes (o fundo e o objeto). A forma mais simples de limiarização consiste na bipartição do histograma, convertendo os *pixels* cujo tom de cinza é maior ou igual a um valor de limiar T em brancos e os demais em pretos (Figura 10). Matematicamente, esta operação pode ser descrita como uma técnica de processamento de imagens na qual uma imagem de entrada $f(x, y)$ de N níveis de cinza produz à saída uma imagem $g(x, y)$, chamada de imagem limiarizada, cujo número de níveis de cinza é menor que N . Normalmente, $g(x, y)$ apresenta dois níveis de cinza, sendo:

$$g(x, y) = \begin{cases} 0, & \text{se } f \leq k \\ 1, & \text{se } f > k \end{cases} \quad (2)$$

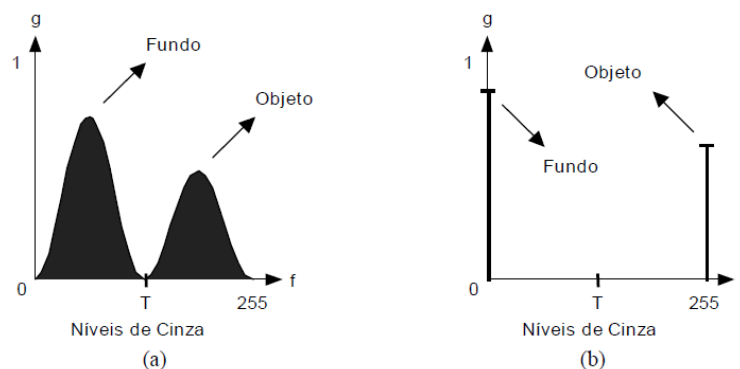


Figura 10 - Limiarização de uma imagem monocromática utilizando limiar T : (a) histograma original, (b) histograma da imagem binarizada.

Fonte: Marques Filho e Vieira Neto (1999)

O sucesso da limiarização de intensidade está diretamente relacionado com a largura e profundidade dos vales que separam as modas do histograma. Os principais fatores que afetam as propriedades dos vales são: separação entre picos; índice de ruído da imagem; tamanho relativo dos objetos e do fundo; uniformidade da fonte de iluminação; e uniformidade das propriedades de reflexão da imagem (GONZALEZ e WOODS, 2010).

A escolha do limiar k que separa as classes é relativamente simples quando a imagem estudada possui vales bem definidos, como apresenta o histograma da Figura 10. Porém em algumas situações essa escolha não é tão simples e para estes casos, pode-se utilizar algum tipo de método automático para definição do limiar. O método proposto por Otsu (1979) é um conhecido método de limiarização automática. A ideia básica consiste em calcular um limiar k , que oferece a melhor separação entre as classes em termos de valores de intensidade, o processo funciona da seguinte maneira:

Considera-se o histograma de uma imagem como uma distribuição de probabilidade: $p_i = n_i/N$. Em que n_i é o número de *pixels* da imagem com o nível de cinza i , N é o total de *pixels* da imagem e p_i é a probabilidade de um *pixel* apresentar o nível de cinza i . Se for utilizado um limiar $g(x, y) = k$ para segmentar essa imagem em duas classes distintas C_1 e C_2 , então as probabilidades de ocorrência de cada uma das classes são dadas, respectivamente, por:

$$\omega_1 = Pr(C_1) = \sum_{i=1}^k p_i = \omega(k) \quad (3)$$

$$\omega_2 = Pr(C_2) = \sum_{i=k+1}^L p_i = 1 - \omega(k) \quad (4)$$

Em que L são os distintos níveis de intensidade da imagem, de acordo com a resolução radiométrica da imagem e por definição $Pr(C_1) + Pr(C_2) = 1$. As médias (μ_1, μ_2) e variâncias (σ_1^2, σ_2^2) das classes C_1 e C_2 são calculadas como:

$$\mu_1 = \frac{1}{Pr(C_1)} \sum_{i=1}^k ip_i \quad \mu_2 = \frac{1}{Pr(C_2)} \sum_{i=k+1}^L ip_i \quad (5)$$

$$\sigma_1^2 = \sum_{i=0}^k \frac{(i - \mu_1)^2 p_i}{\omega_1} \quad \sigma_2^2 = \sum_{i=k+1}^L \frac{(i - \mu_2)^2 p_i}{\omega_2} \quad (6)$$

Com base nas médias e variâncias calculadas anteriormente, as medidas de separabilidade entre as classes são definidas como:

$$\sigma_G^2 = \omega_1 \sigma_1^2 + \omega_2 \sigma_2^2 \quad (7)$$

$$\sigma_B^2 = \omega_1 \omega_2 (\mu_1 - \mu_2)^2 \quad (8)$$

Em que σ_G^2 e σ_B^2 são variância global (intraclasse) e variância entre classes (interclasse), respectivamente. Analisando a equação da variância entre classes (σ_B^2) observa-se que, quanto maior a distância entre as médias μ_1 e μ_2 , maior será σ_B^2 , indicando que a variância interclasse é uma medida de separabilidade entre as classes. Desta forma, o objetivo é então determinar o valor limiar k que maximiza a variância entre classes.

2.3.2 Processamento morfológico

A abordagem da Morfologia Matemática em processamento e análise de imagens é assunto um tanto conhecido na literatura e bastante consolidado, especialmente em aplicações onde aspectos geométricos dos objetos são relevantes. Sabe-se que esta teoria é baseada na teoria de conjuntos, geometria integral e álgebra booleana, e que analisa a forma e

a estrutura dos objetos nas imagens através de um modelo geométrico denominado elemento estruturante.

A definição e a escolha do elemento estruturante tem importância crucial nas transformações morfológicas, uma vez que sua correta seleção permitirá identificar ou realçar a informação pretendida. Desta forma, o elemento estruturante é a chave para o sucesso das operações, desde que seja escolhido de forma adequada. Para selecionar o elemento apropriado pode-se considerar a forma dos objetos, definir um tamanho específico e, em alguns casos considerar também a orientação. Determinar seu tamanho e forma é um processo predominantemente empírico, contudo, a seleção depende da geometria do objeto a ser extraído na imagem (objeto de interesse). O elemento estruturante é um pequeno conjunto ou subimagem $B(x, y)$, completamente definido e conhecido (forma, tamanho e origem), usado para examinar uma imagem $f(x, y)$ buscando propriedades de interesse. Assim, a origem de B passa por todas as posições dos *pixels* de f resultando em uma transformação morfológica (SOILLE, 2004).

No que diz respeito às transformações morfológicas, estas foram elaboradas inicialmente para imagens binárias, sendo posteriormente ampliadas para imagens em tons de cinza e coloridas. As imagens digitais em níveis de cinza podem ser tratadas como conjuntos cujos componentes estão em Z^3 . Neste caso, as coordenadas passam a assumir a forma (x, y, z) , onde z corresponde ao valor discreto de intensidade do *pixel*. Além disso, em Morfologia Matemática em níveis de cinza os operadores são baseados na teoria de reticulados, em que as operações então assumem valores máximo e mínimo (FACON, 1996).

De maneira geral, a Morfologia Matemática, seja binária, em níveis de cinza ou em cores, é constituída a partir de duas transformações básicas, denominadas por Matheron (1967) e Serra (1982) como erosão e dilatação. A erosão e a dilatação são a base para a construção da vasta gama de transformações morfológicas existentes. Além dos inúmeros artigos e teses que abordam com riqueza de detalhes estas transformações, a teoria de Morfologia Matemática é profundamente discutida por autores como Facon (1996) e Soille (2004). Desta forma, nos tópicos a seguir serão descritas, de maneira pragmática, apenas as transformações utilizadas neste trabalho.

2.3.2.1 Operadores elementares: erosão e dilatação

Para falar sobre qualquer transformação morfológica é necessário, primeiramente, definir o conceito de erosão e dilatação. A erosão em níveis de cinza é determinada através da seleção do valor mínimo de todos os valores da imagem f contido na

região que coincide com o elemento estruturante B em qualquer posição x . De acordo com Soille (2004) é denotada como $\varepsilon_B(f)$, e é definida como o valor mínimo da imagem na região coincidente com B quando a origem de B está em x :

$$[\varepsilon_B(f)](x) = \min_{b \in B} \{f(x+b)\} \quad (9)$$

De forma oposta à erosão, a dilatação em níveis de cinza da imagem f pelo elemento estruturante B , denotada como $\delta_B(f)$, é definida como o valor máximo da imagem na região do elemento estruturante quando sua origem está em x (Soille, 2004):

$$[\delta_B(f)](x) = \max_{b \in B} \{f(x+b)\} \quad (10)$$

A dualidade desses operadores resulta em efeitos opostos sobre as imagens, enquanto a dilatação causa um clareamento e alargamento dos picos (padrões claros) da imagem, a erosão ocasiona um escurecimento e alargamento dos vales (padrões escuros), como apresenta a Figura 11 (FACON, 1996).

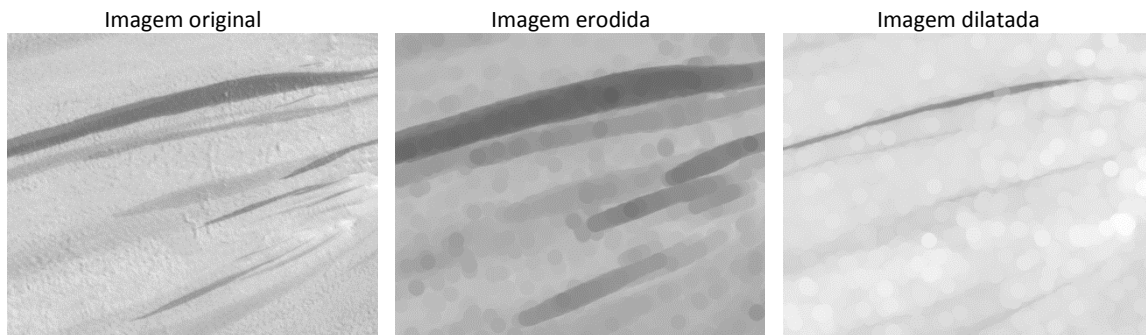


Figura 11 – Efeitos da erosão e dilatação sobre a imagem HiRISE ESP_011730_2105_RED (0,29m/pixel) com elemento estruturante em formato de disco.

2.3.2.2 Filtros de abertura, fechamento e transformada *top-hat*

A dilatação e a erosão são, entre si, transformações duais, mas não são reversíveis, ou seja, depois de uma imagem f ser erodida pelo elemento estruturante B , em geral, não é possível reconstituí-la dilatando a imagem erodida $\varepsilon_B(f)$ usando o mesmo elemento estruturante. A ideia por trás da abertura morfológica é dilatar a imagem erodida para recuperar o máximo de elementos perdidos no processo de erosão. A abertura γ de uma imagem f por um elemento estruturante B é denotada por $\gamma_B(f)$, sendo definida como a erosão de f por B seguido da dilatação com o elemento estruturante transposto $\delta_{\bar{B}}(f)$ (SOILLE, 2004):

$$\gamma_B(f) = \delta_{\bar{B}}[\varepsilon_B(f)] \quad (11)$$

Analogamente, o fechamento da imagem f pelo elemento estruturante B , denotado por $\phi_B(f)$ é definido como a dilatação de f com elemento estruturante B seguido da erosão com o elemento estruturante transposto (SOILLE, 2004):

$$\phi_B(f) = \varepsilon_B[\delta_B(f)] \quad (12)$$

Os efeitos produzidos pela abertura em uma imagem em tons de cinza são: a imagem aberta é mais regular e menos rica em detalhes. Enquanto o fechamento morfológico, além de o resultado ser mais regular e menos rico em detalhes, também se observa a suavização de fronteiras (FACON, 1996), como apresenta a Figura 12.

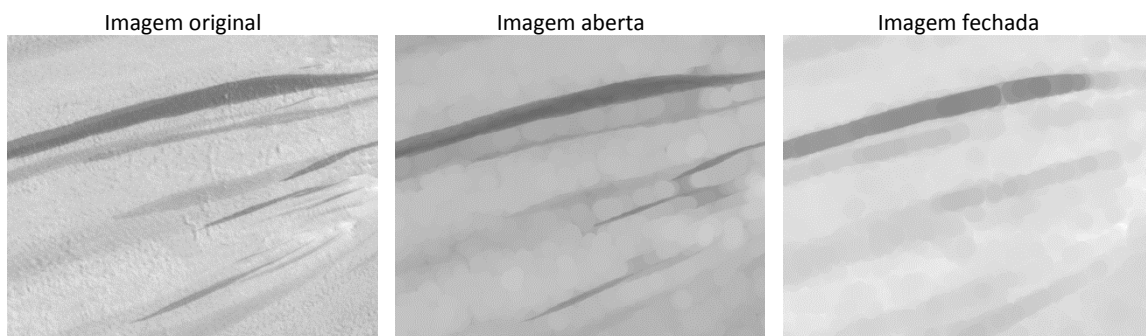


Figura 12 - Efeitos da abertura e do fechamento morfológico sobre a Imagem HiRISE ESP_011730_2105_RED (0,29m/pixel) com elemento estruturante em formato de disco.

Os filtros morfológicos de abertura e fechamento são transformações orientadas aos objetos da imagem, pois a transformação é realizada por um elemento estruturante com tamanho e forma definidos. No entanto, definir uma forma e tamanho constantes pode limitar aplicações em que os objetos de interesse possuem certas características de forma, tamanho ou orientação. Como alternativa para estes casos, existem os operadores morfológicos que utilizam elementos estruturantes adaptativos, também chamados de componentes conectados. Esses componentes estabelecem relações de inclusão em regiões de imagens com o mesmo valor de intensidade (para imagens em tons de cinza), formadas por sua decomposição em seções transversais. Esta abordagem permite que os objetos formados em cada seção transversal sejam analisados separadamente, possibilitando operações de filtragem por atributos dos objetos. Deste modo, baseados no conceito de filtragem por atributos surgiram o fechamento e a abertura por área.

Também chamada por Soille (2004) como abertura algébrica, a abertura por área γ_λ é uma transformação que filtra os componentes conectados de acordo com um parâmetro de área em análises em cada seção transversal da imagem. Não pode ser descrita como uma única erosão seguida pela dilatação, pois, por definição, é equivalente à união (\vee) de todas as

aberturas com elementos estruturantes conectados cujas áreas, em número de *pixels*, sejam iguais a λ :

$$\gamma_{\lambda}(f) = \underset{i}{\vee} \{ \gamma_{B_i}(f) \} \quad (13)$$

A transformação dual da abertura por área é o fechamento por área. Assim, em vez de remover as estruturas conectadas na imagem, o fechamento por área as preenche. Soille (2004) define o fechamento por área ϕ_{λ} como uma transformação equivalente à intersecção de todos os fechamentos com o elemento estruturante conectado B cuja área, em número de *pixel*, é igual a λ :

$$\phi_{\lambda}(f) = \underset{i}{\wedge} \{ \phi_{B_i}(f) \} \quad (14)$$

Os filtros de abertura e fechamento por área são filtros adaptativos, pois o elemento estruturante B adapta seu formato a cada localização da imagem, de modo a se ajustar nas estruturas, de acordo com o tamanho requerido (componentes conectados). Quando se usa esses filtros, não há nenhuma restrição quanto à forma do elemento estruturante, desde que as estruturas presentes na imagem se encontrem conectadas e possuam área λ em número de *pixels*. Essas transformações são como filtros de suavização, como apresenta a Figura 13.

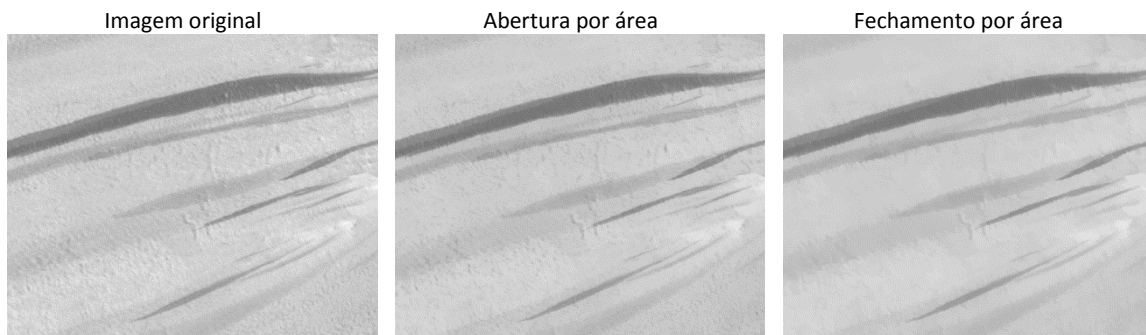


Figura 13 - Efeitos da abertura e do fechamento por área sobre a Imagem HiRISE ESP_011730_2105 (0,29m/pixel)

Ainda em relação às transformações de abertura e fechamento, estas podem ser exploradas na combinação de seus resultados (imagem aberta ou fechada) com a imagem de entrada, através de subtração. Desta forma, são definidas as transformadas *top-hat*. Como a abertura ou fechamento remove as estruturas da imagem que não contém o elemento estruturante, essas estruturas podem ser recuperadas através da diferença aritmética entre a imagem original e sua abertura (*top-hat* por abertura) ou entre o fechamento e a imagem original (*top-hat* por fechamento). Como define Soille (2004), o *top-hat* por abertura de uma imagem f denotado como $\eta_B(f)$, é a diferença aritmética entre f e $\gamma_B(f)$. Por outro lado, o *top-hat* por fechamento $\mu_B(f)$, é a diferença aritmética entre $\phi_B(f)$ e f :

$$\eta_B(f) = f - \gamma_B(f) \quad (15)$$

$$\mu_B(f) = \phi_B(f) - f \quad (16)$$

A principal aplicação dessas transformadas está na remoção de objetos de uma imagem digital usando um elemento estruturante na abertura ou fechamento que não contém o objeto a ser removido. Desta maneira, a operação de diferença produz uma imagem que apresenta apenas os componentes removidos pela abertura ou fechamento. Uma aplicação interessante dessas transformadas está na correção dos efeitos de iluminação da cena (GONZALEZ e WOODS, 2010). Como apresenta a Equação 15 o *top-hat* por fechamento destaca os elementos mais escuros da imagem. Esta característica foi explorada neste projeto uma vez que *dark slope streaks* são justamente os elementos mais escuros das imagens utilizadas. A forma e tamanho do elemento estruturante usado para transformações *top-hat* dependem da morfologia das estruturas a serem extraídas. A Figura 14 mostra exemplos de *top-hat* sobre imagens em tons de cinza.

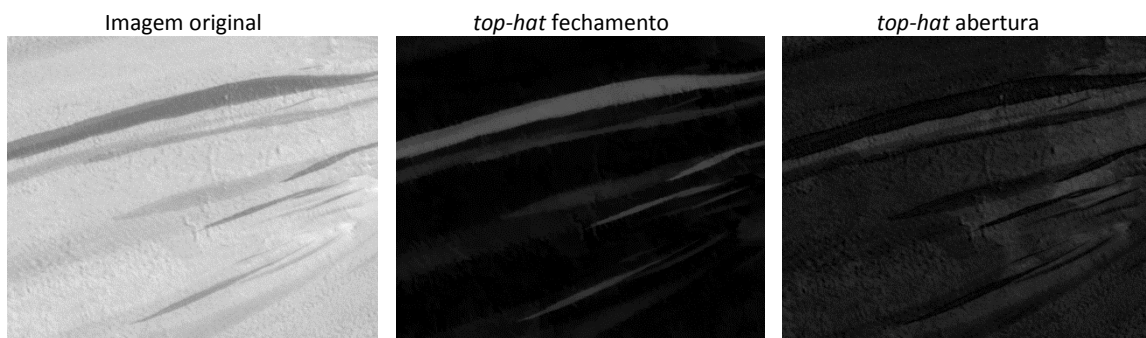


Figura 14 - Aplicação de *top-hats* sobre a Imagem HiRISE ESP_011730_2105 (0,29m/pixel)

As quatro transformações morfológicas apresentadas até o momento (erosão, dilatação, abertura e fechamento), baseiam-se, de forma genérica, em relações de inclusão ou de intersecção do elemento estruturante com a estrutura que está sendo analisada. Para estudar mais detalhadamente a vizinhança de um ponto, há um conjunto de transformações de vizinhança, as quais contêm as quatro transformações anteriormente descritas. Uma transformação de vizinhança aplicada a uma imagem consiste genericamente em, analisar primeiro e modificar depois, o conteúdo dos pontos da imagem seguindo critérios pontuais ou de vizinhança. O afinamento é, pois, uma transformação de vizinhança elementar, a qual modifica o conteúdo de um ponto da imagem em função da análise do conteúdo dos pontos na sua vizinhança (PINA, 1998).

2.3.2.3 Afinamento e *pruning*

Basicamente, o afinamento reduz a espessura do objeto para um *pixel*, gerando um eixo minimamente conectado e equidistante às bordas do objeto. Por definição, o afinamento de uma imagem f por um elemento estruturante B é denotado $THIN_B(f)$ e definido como a diferença aritmética entre f e a transformada *hit-or-miss* de f por B (SOILLE, 2004):

$$THIN_B(f) = f - HMT_B(f) \quad (17)$$

As transformadas *hit-or-miss* são compostas por um par de elementos estruturantes, que compartilham a mesma origem. No caso binário, a transformação consiste em extrair todos os *pixels* correspondentes a uma dada configuração de vizinhança, de forma que, o primeiro elemento estruturante define o conjunto de *pixels* que deve coincidir com o primeiro plano (elemento a ser afinado), enquanto o segundo define o conjunto de *pixels* que correspondem fundo da imagem de entrada (SOILLE, 2004).

Interações sequenciais de afinamento, compostas por elementos estruturantes específicos, geram um eixo médio do conjunto de entrada, denominado esqueleto. Um esqueleto obtido por afinamento sequencial homotópico é, portanto, uma imagem submetida a um afinamento iterativo por uma sequência de elementos estruturantes homotópicos, especificamente as letras L, M e D do alfabeto de Golay (1969), até que a estabilidade seja atingida. No que concerne à letra L, esta conduz a resultados mais “corretos” por ser a que mais se aproxima do eixo mediano da estrutura (PINA, 1998).

Os esqueletos obtidos por transformação de vizinha apresentam uma espessura unitária, e cada um de seus pontos tem em sua vizinhança dois pontos (esqueleto normal) ou mais pontos (ramificações). Uma maneira de amenizar o efeito de ramificação é realizar o *pruning* do esqueleto. O objetivo desse processo é tirar, a partir de uma imagem já afinada, os pontos extremos. Contudo, ao contrário do afinamento, o *pruning* não preserva a homotopia. Assim, se for realizado até a idempotência, permitirá eliminar todas as ramificações, porém pode resultar em uma redução ou até em uma destruição parcial da imagem afinada (FACON, 1996).

2.3.2.4 Transformação geodésica – Reconstrução por dilatação

Diferentemente dos filtros morfológicos de abertura e fechamento, que utilizam em suas transformações a combinação de apenas uma imagem de entrada e um elemento estruturante com propriedades específicas, nas transformações geodésicas consideram-se duas imagens de entrada (marcadora e máscara) e por definição, as duas imagens, máscara e marcadora, devem ter o mesmo domínio. Na dilatação geodésica a imagem “máscara” deve ser maior que a imagem “marcadora” e a imagem resultante dilatada é forçada a permanecer “abaixo” da imagem máscara, a qual age como limite para a propagação da imagem marcadora. Conceitualmente, a dilatação geodésica de tamanho 1 de uma imagem marcadora f com respeito a uma imagem máscara g é denotada por $\delta_g^{(1)}(f)$ e é definida como mínimo entre a imagem máscara e a dilatação $\delta^{(1)}$ da imagem marcadora (SOILLE, 2004):

$$\delta_g^1 = \delta^{(1)}(f) \wedge g \quad (18)$$

Por sua vez, a dilatação geodésica de tamanho n de uma imagem marcadora f com respeito a uma imagem máscara g é obtida realizando n dilatações geodésicas sucessivas de f com respeito a g :

$$\delta_g^{(n)}(f) = \delta_g^{(1)}[\delta_g^{(n-1)}(f)] \quad (19)$$

Quando a dilatação geodésica ocorre até a estabilidade, o processo é conduzido para a reconstrução morfológica, neste caso reconstrução por dilatação. Soille (2004) define a reconstrução por dilatação de uma imagem máscara g por uma imagem marcadora f é definida como a dilatação geodésica de f com respeito a g até que a estabilidade seja atingida e é denotada por $R_g^\delta(f)$:

$$R_g^\delta(f) = \delta_g^{(i)}(f) \quad (20)$$

em que (i) é tal que $\delta_g^{(i)}(f) = \delta_g^{(i+1)}(f)$.

3. DETECÇÃO AUTOMÁTICA DOS *SLOPE STREAKS*

3.1 BANCO DE IMAGENS

Com o intuito de criar um conjunto representativo para o desenvolvimento do algoritmo de detecção, uma grande diversidade de *slope streaks* presentes na superfície marciana foi considerada. A seleção das imagens foi guiada com base nos trabalhos publicados acerca do fenômeno. Deste modo, foi criada uma lista com regiões de ocorrência e nomes das imagens que contêm *slope streaks*. Para garantir que o banco criado tivesse imagens com diferentes condições de iluminação e capturadas em diferentes períodos do dia também foi feita uma busca manual por imagens. O conjunto mencionado é composto por 95 imagens, distribuídas entre MOC (resoluções na faixa de 1,4-6,5 m/pixel), CTX (5-6 m/pixel) e HiRISE (0,25-0,50 m/pixel), provenientes de diferentes zonas do planeta Marte, como mostra a Figura 15. As informações pertinentes às imagens selecionadas neste trabalho estão apresentadas no APÊNDICE I.

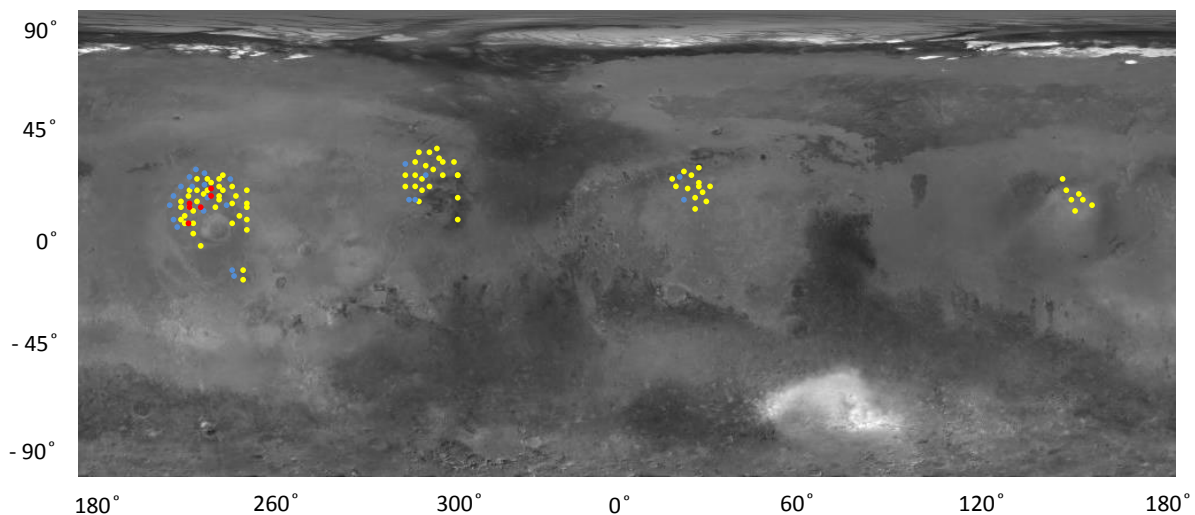


Figura 15 - Distribuição das imagens na superfície de Marte: pontos amarelos, azuis e vermelhos marcam as posições das imagens MOC, CTX e HiRISE, respectivamente

A fim de desprezar informações não relevantes, como áreas sem feições relevantes para o problema em análise, e também diminuir o tempo de processamento, especialmente por conta do tamanho das imagens CTX e HiRISE (25 - 150 megabytes), as imagens foram recortadas em regiões de estudo, formando um banco com 210 imagens sendo 100 MOC-NA, 90 CTX e 20 HiRISE. Alguns exemplos dos recortes utilizados e do conjunto representativo dos *slope streaks* estão apresentados na Figura 16.

3.2 MÉTODO DE DETECÇÃO

3.2.1 Algoritmo de detecção

O método de detecção proposto foi desenvolvido com base em duas características principais do fenômeno: 1) O albedo; sabe-se que a grande maioria dos *slope streaks* são feições mais escuras que o material da sua vizinhança (com exceção dos raros *bright slope streaks*) e que os rastros mais novos (os formados mais recentemente) são sempre muito escuros. 2) A forma; os *slope streaks* são sempre feições estreitas e alongadas como mostram os exemplos na Figura 16.

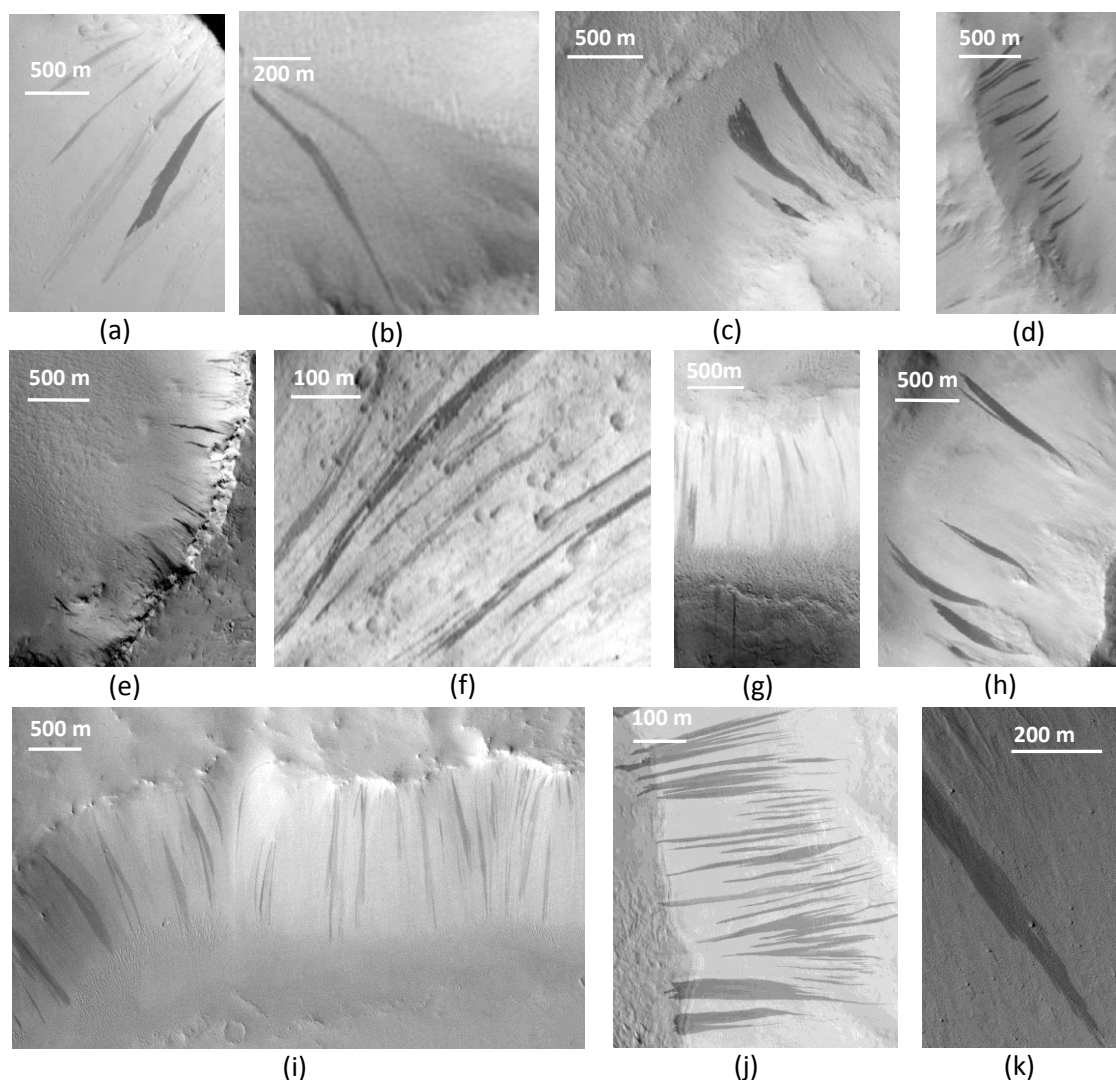


Figura 16 – Exemplo de regiões de estudo em imagens MOC, CTX e HiRISE. (a) MOC M0307769 (6,03m/pixel) (b) CTX D13_032327_2067 (5,68m/pixel) (c) MOC E021355 (3,07m/pixel) (d) CTX G12_022991_2073 (5,7m/pixel) (e) MOC M0904872 (2,88m/pixel) (f) MOC AB103502 (1,63m/pixel) (g) MOC E1400638 (6,37m/pixel) (h) MOC E0302197 (4,58m/pixel) (i) CTX B07_012383_1903 (5,44m/pixel) (j) HiRISE PSP_001656_2175_RED (0,29m/pixel) (k) HiRISE PSP_008513_2060_BG (1,16m/pixel)

Levando em consideração as características mencionadas, o método de detecção é constituído por uma sequência de três passos principais, quais sejam: pré – processamento

(etapa de filtragem), detecção (segmentação) e pós – processamento (filtragem para caracterização das estruturas). O algoritmo é baseado em operadores morfológicos, método de segmentação por Otsu e filtragem por critério de tamanho e forma, e foi todo implementado em *Matlab*. O fluxograma apresentado na Figura 17 sumariza o método desenvolvido.

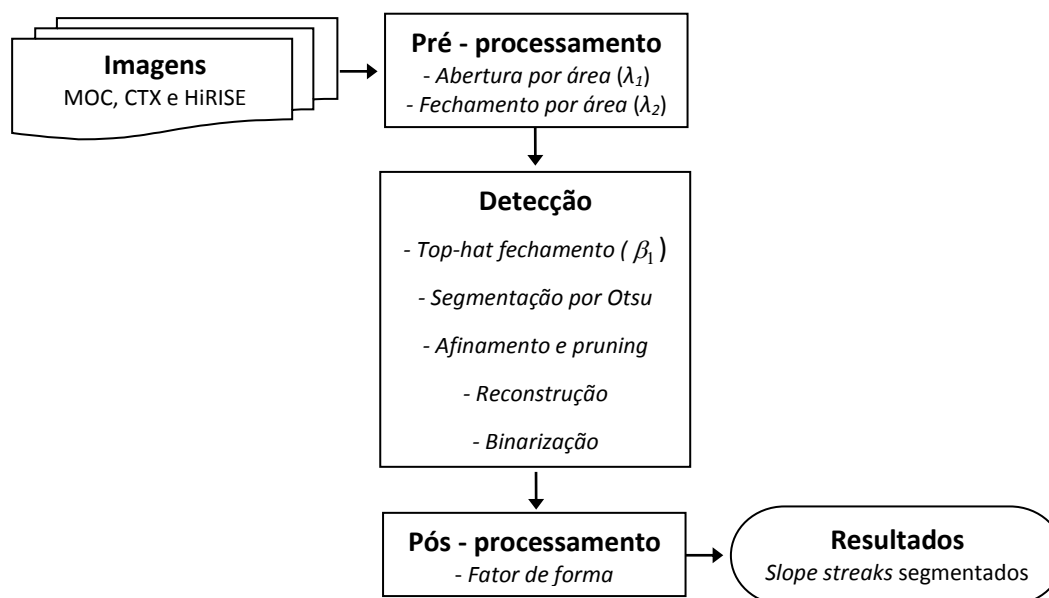


Figura 17 – Fluxograma do método.

3.2.1.1 Pré - processamento

A etapa de pré - processamento consiste em atenuar alguns ruídos presentes nas imagens, como pequenas feições escuras ou feições muito claras. Para tanto, foram utilizadas operações de filtragem baseadas em abertura e fechamento por área (SOILLE, 2004).

A abertura por área é utilizada para atenuar a reflectância de algumas feições presentes na superfície do planeta, como por exemplo, dunas de areia e pedregulhos. Como foi descrito no capítulo 2, esta é uma abertura algébrica que remove todos os componentes conectados cuja área, em número de *pixels*, é menor do que um dado valor λ . Por outro lado, o fechamento por área é usado para atenuar manchas escuras causadas por sombras de pequenas rochas e sombras formadas por colinas ou paredes de crateras, onde os *slope streaks* são formados. O valor de área λ , considerado para a abertura e fechamento é determinado com base no tamanho de cada imagem. Como, normalmente, os *slope streaks* são os maiores objetos presentes nas cenas, foi considerado o número de linhas da imagem (n) para determinar o valor λ . Visto que, o fechamento atua sobre as estruturas mais escuras da imagem e o objetivo não é removê-los ou atenuá-los, o valor de um quarto de n foi usado para o λ do fechamento (λ_2). Em contrapartida, como as estruturas mais claras não são interessantes para o propósito do trabalho e a abertura age sobre essas estruturas,

considerou-se um valor maior para o λ da abertura (λ_1), que foi a metade de n . Em resumo, λ_1 corresponde a $n/2$ e λ_2 a $n/4$ para a área de abertura e para a área de fechamento, respectivamente, para cada imagem analisada. A imagem resultante do pré – processamento apresenta, em geral, leve desfocagem da cena, além de causar suavização nas bordas das feições, como mostra a Figura 18.

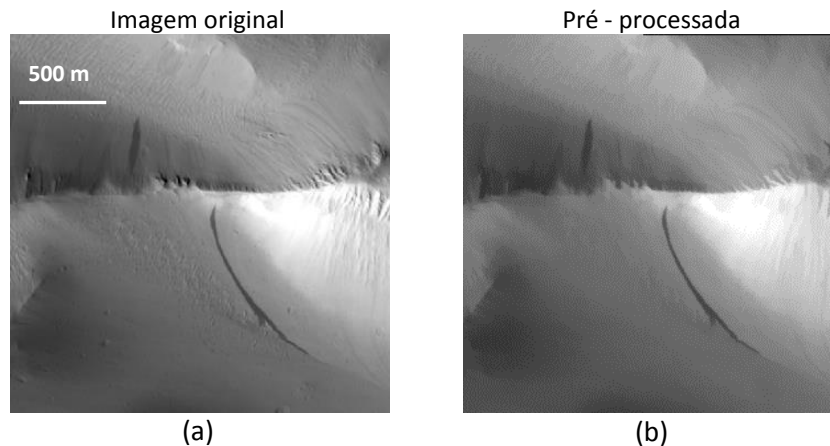


Figura 18 – Resultado do pré – processamento na imagem MOC M0307769 (6,03m/pixel)

3.2.1.2 Detecção

Nesta etapa, os *slope streaks* são primeiramente realçados através da transformada *top-hat* por fechamento. A largura (ou espessura) é a feição geométrica usada por esta transformação para distinguir dimensionalmente os *slope streaks* das outras feições presentes na cena. As regiões escuras ou estruturas que não contêm completamente o elemento estruturante β_1 são removidas da imagem, para posteriormente, serem recuperadas por meio da diferença aritmética entre a imagem fechada (Figura 19 (b)) e a imagem inicial (Figura 19 (a)). O passo seguinte da etapa de detecção consiste na segmentação automática pelo método de Otsu. Este método permite binarizar automaticamente imagens através de seus histogramas. A saída deste processo é, portanto, uma imagem binária, na qual, a maioria das feições em branco corresponde às feições de interesse (*slope streaks*) (Figura 19 (d)). Após o processo de segmentação por Otsu algumas feições de interesse (*slope streaks*) foram degradadas, como nota-se no círculo vermelho da Figura 19 (d). Para reconstituir essas feições utilizou-se reconstrução por dilatação. Entretanto, primeiro, com o objetivo de criar a imagem marcadora para a reconstrução geodésica, foram realizadas as operações afinamento e *pruning*. O afinamento até a idempotência com a configuração homotópica da letra L do alfabeto de Golay, marcou todas as estruturas, enquanto a operação de *pruning* removeu pequenas ramificações resultantes do processo de afinamento. Assim, a imagem resultante do procedimento afinamento e *pruning* (Figura 19 (e)) é empregada como imagem marcadora na

dilatação geodésica, e a imagem resultante da transformação *top-hat* é utilizada como máscara. As feições contidas na imagem máscara delimitam a região da Figura 19 (e) até que a estabilidade da dilatação seja atingida (setas em vermelho).

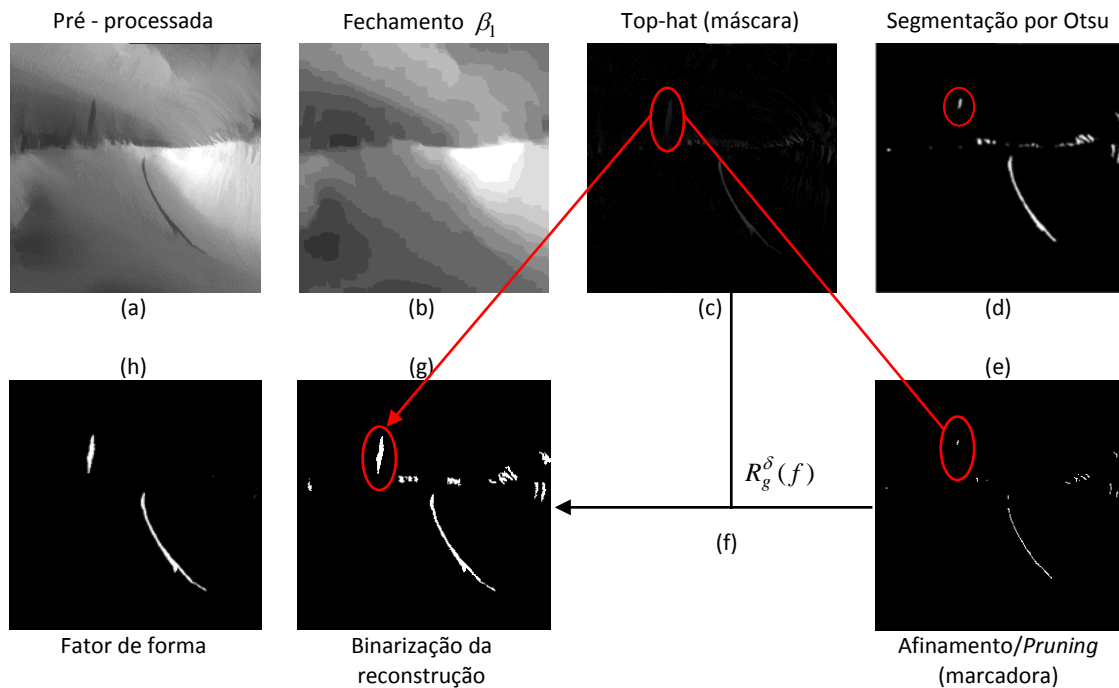


Figura 19 – Etapas da detecção aplicadas à imagem MOC M0307769 (6,03m/pixel).

3.2.1.3 Pós – processamento

A etapa de pós – processamento foi desenvolvida com base na morfologia dos *slope streaks*. Como essas feições são sempre alongadas, pode-se afirmar que existe um padrão entre o comprimento e a largura dos rastros. Assim, feições que não seguem esse padrão podem ser eliminadas. Por exemplo, feições que se encontravam próximas umas das outras e com as etapas anteriores se tornaram uma única feição, irão muito provavelmente, apresentar o valor da razão entre o comprimento e a largura muito discrepante do valor da razão do comprimento e da largura de um *slope streak*. Para tanto, foram analisadas as razões entre os comprimentos e as larguras de vários *slopes streaks*, e verificou-se que a maioria deles possuem o comprimento pelo menos 5 vezes maior do que a sua largura. Portanto, esse foi o valor limite (limiar) adotado como critério de decisão para permanência ou exclusão de todas as feições presentes nas imagens binárias. Esta etapa é fundamental para filtrar os falsos positivos resultantes do processo de detecção, como mostram as Figuras 19 (g) e (h).

3.2.2 Escolha dos parâmetros e refinamento do método

Durante os testes realizados, observou-se que o valor do elemento estruturante β_1 (eficiente para muitas cenas no conjunto construído) não correspondia às expectativas em certas imagens, sobretudo, em imagens que apresentam rastros com baixo contraste. Para exemplificar, a Figura 20 (a) apresenta uma imagem com um *slope streak* bastante claro e a Figura 21 (a) a segmentação desta imagem pelo método de Otsu (após a transformada *top-hat* com β_1). Nota-se, no caso da Figura 20 (a), que o limiar utilizado pela segmentação automática (Otsu) fracionou o rastro, o que ocasionou sua eliminação na etapa de pós - processamento (Figura 21 (d)). Neste caso foi necessário modificar o tamanho do elemento estruturante ($\beta_1 < \beta_2$), não somente por conta das diferentes dimensões dos rastros, mas principalmente, para criar um histograma bi-dimensional separável em níveis de cinza (*slope streak* e fundo) e consequentemente, uma definição mais eficiente de um limiar automático pelo método de Otsu, como no exemplo apresentado na Figura 23.

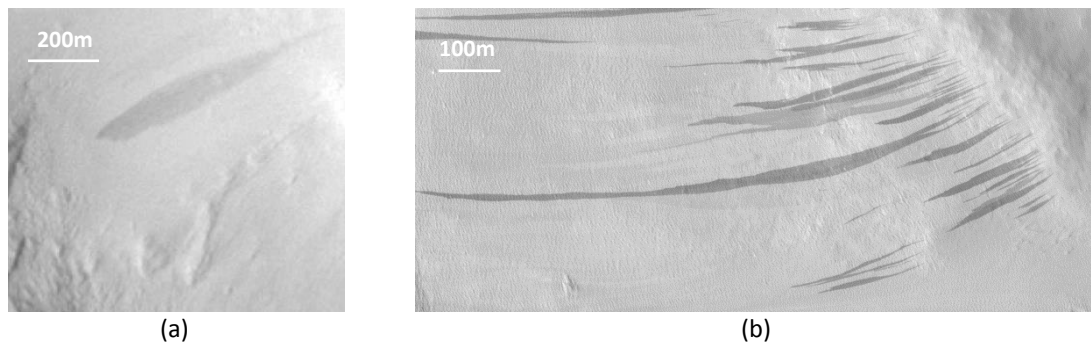


Figura 20 – Imagem (a) CTX P03_002276_2067 (5,6m/pixel) (b) HiRISE PSP_001656_2175_RED (0,58m/pixel)

Analogamente, o mesmo acontece para os *slope streaks* apresentados pela Figura 20 (b). Contudo, neste caso, não se trata de diferença de contraste e sim da resolução espacial. Como o método proposto contempla imagens MOC, CTX e HiRISE, as quais possuem variações significativas na resolução espacial, naturalmente o tamanho do elemento estruturante deve ser aumentado para imagens de maior resolução. Na Figura 24 está exposto o processamento da Figura 20 (b) com três tamanhos de elemento estruturante, sendo o último o elemento com dimensão ideal para imagens HiRISE ($\beta_1 < \beta_2 < \beta_3$). Os tamanhos de 6, 18 e 40 em forma de caixa para β_1 , β_2 e β_3 foram determinados empiricamente. Entretanto, ao se utilizar elementos estruturantes de tamanhos distintos, o modelo automático sugerido fica comprometido, pois para cada imagem a ser segmentada é necessário definir o elemento apropriado. Como alternativa, testou-se somar os três resultados, como mostra o fluxograma do refinamento do método apresentado na Figura 23. As Figuras 24, 25 e 26 exibem os

resultados dos processamentos das Figuras 18 (a) e 20 (a) e (b) com β_1 , β_2 e β_3 , e expõem o tamanho adequado para a segmentação dos *slope streaks* em cada imagem, bem como suas respectivas somas. A análise visual da união dos três resultados aponta que, para esta metodologia, os elementos estruturantes de tamanho não ideal não interferem no resultado final, notadamente devido ao fator de forma adotado na etapa de pós - processamento. A validação do método foi feita através de análises quantitativa, descrita a seguir.

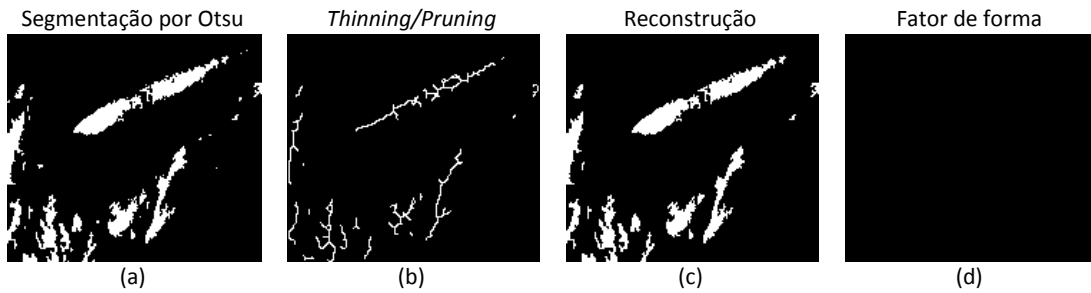


Figura 21 - Processamento aplicado a imagem CTX P03_002276_2067 com *top-hat* por fechamento utilizando o elemento estruturante β_1

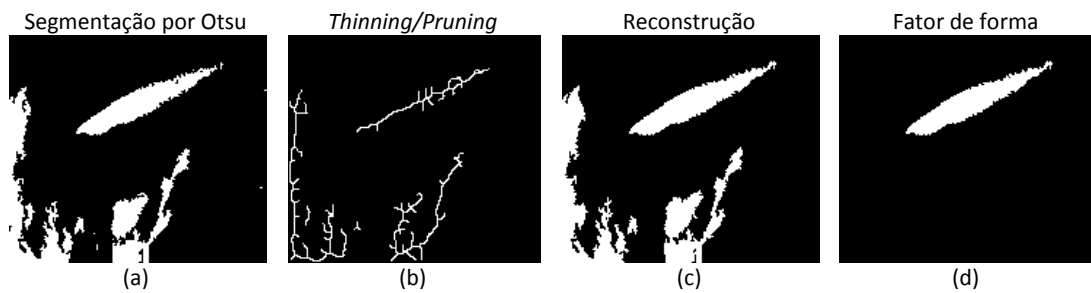


Figura 22 – Processamento aplicado a imagem CTX P03_002276_2067 com *top-hat* por fechamento utilizando o elemento estruturante β_2

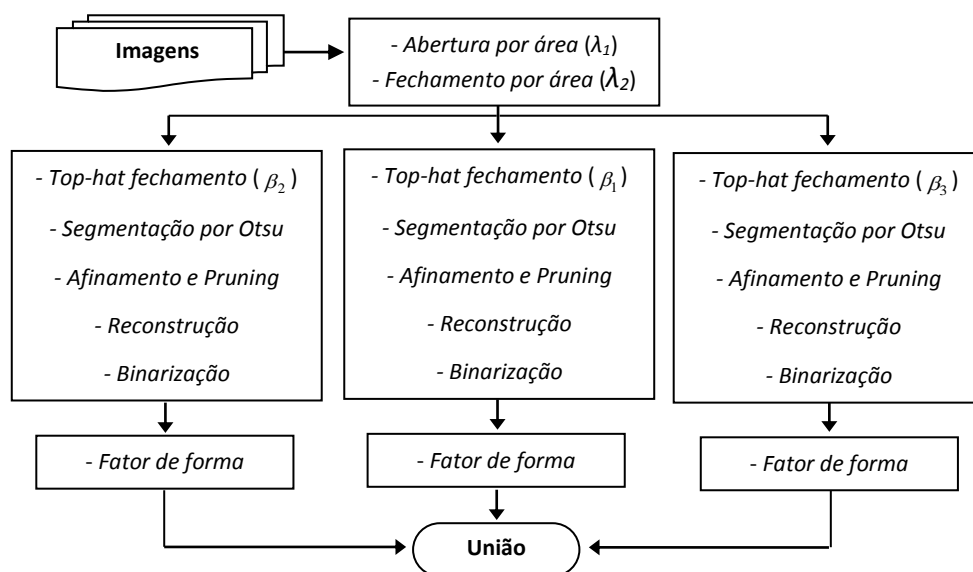


Figura 23 – Refinamento do método

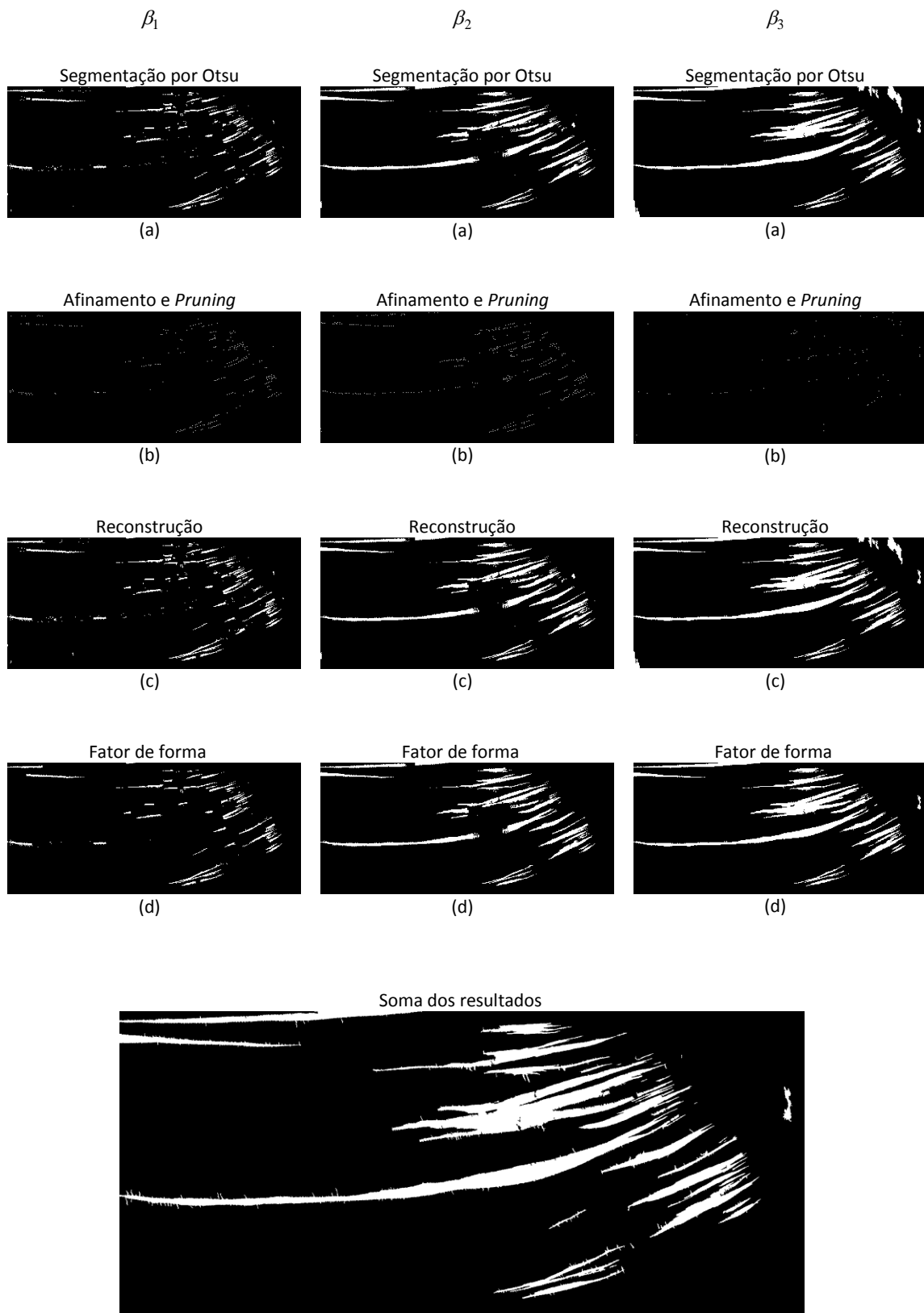


Figura 24 – Refinamento do método aplicado à imagem HiRISE PSP_001656_2175_RED com três tamanhos de elemento estruturante.

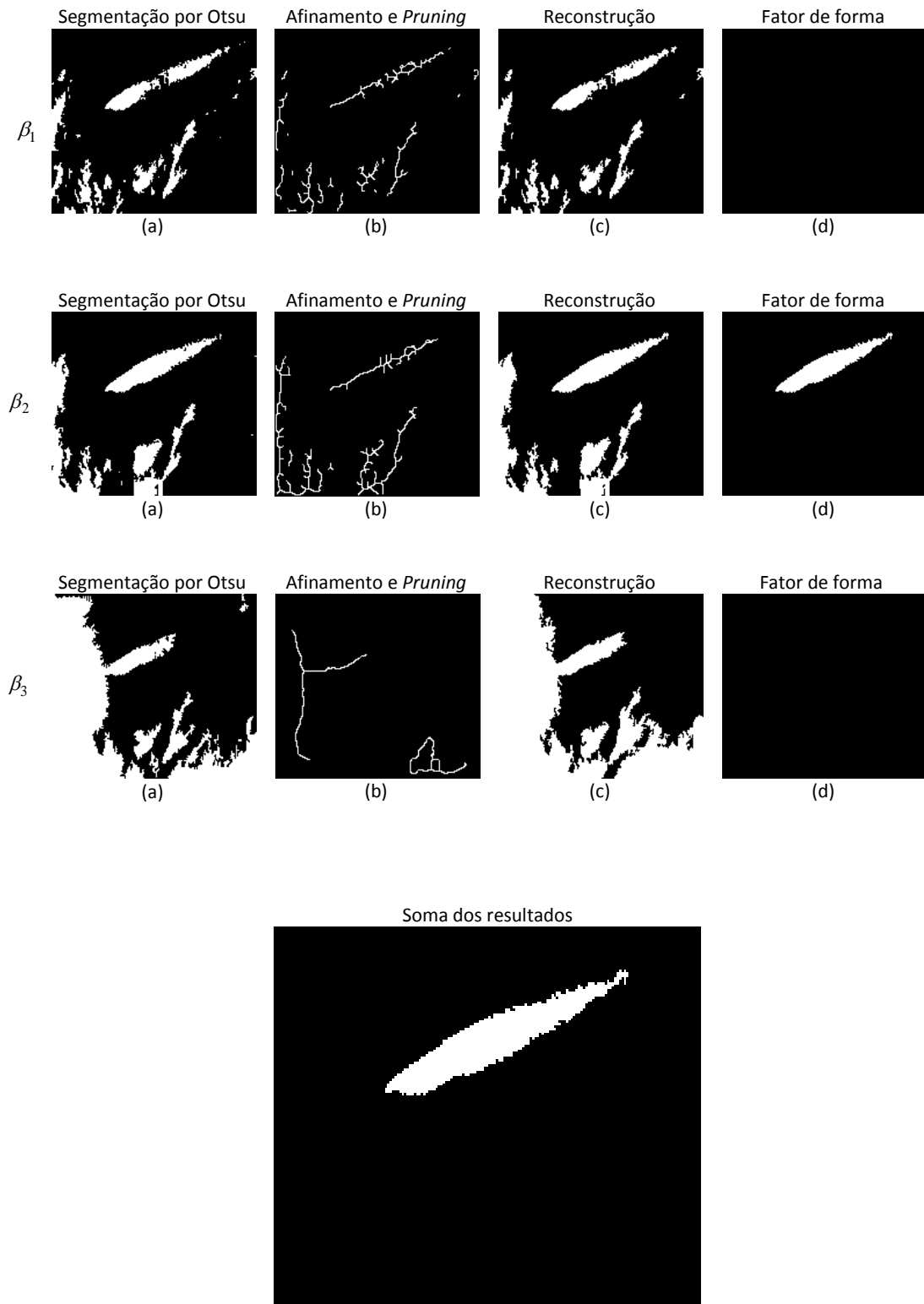


Figura 25 - Refinamento do método aplicado à imagem CTX P03_002276_2067 com três tamanhos de elemento estruturante

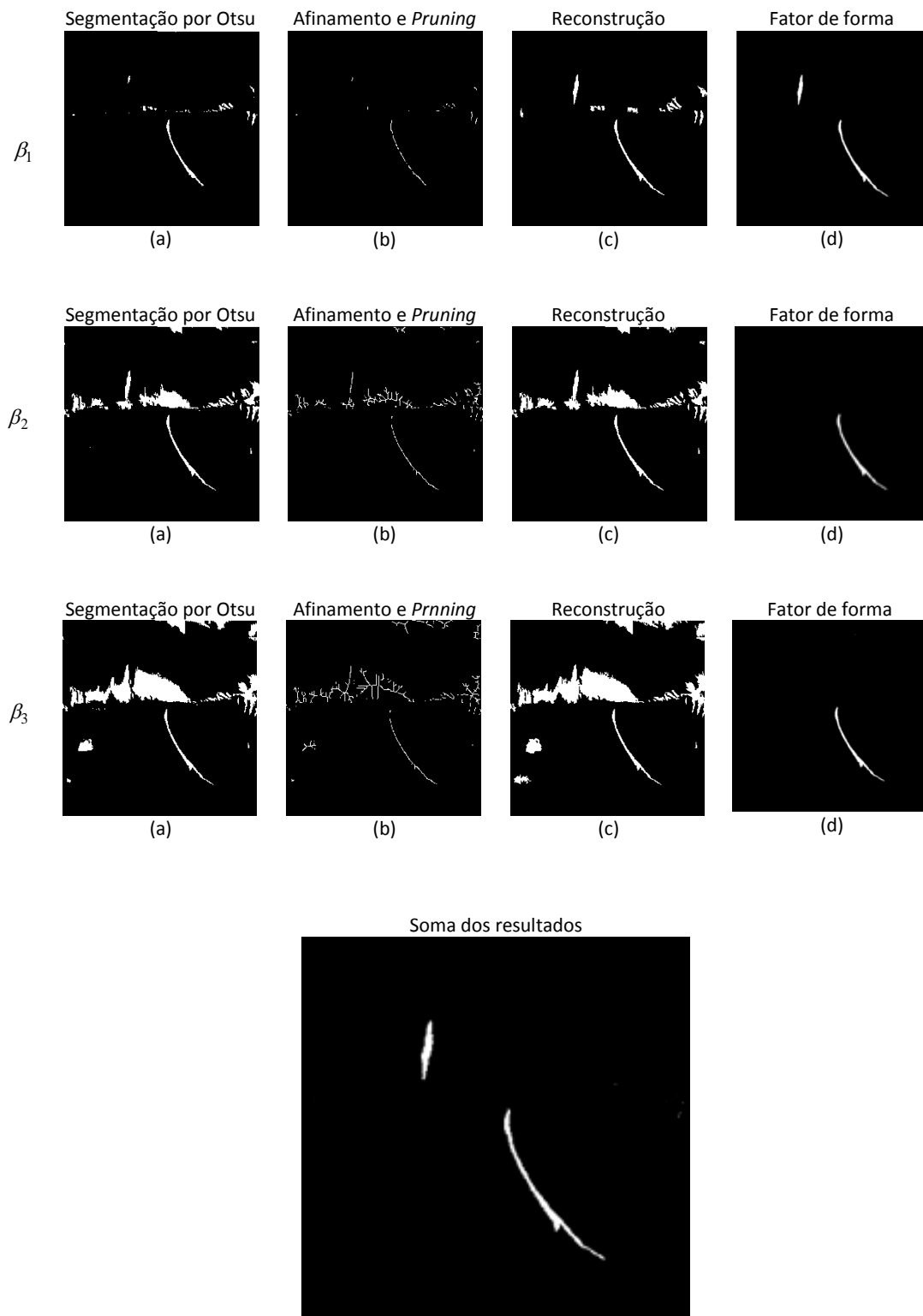


Figura 26 - Refinamento do método aplicado à imagem MOC M0307769 com três tamanhos de elemento estruturante

3.3 VALIDAÇÃO DO MÉTODO E RESULTADOS

A validação do método proposto e a avaliação do desempenho (acurácia) de detecção dos *slope streaks* foram realizadas por meio de métricas quantitativas e qualitativas baseadas em *pixels*, que se seguem: taxa de detecção verdadeira (*TDV*), taxa de detecção falsa (*TDF*), fator de ramificação (*B*, *branching factor*) e porcentagem da qualidade, (*Q*) obtidas respectivamente pelas equações:

$$TDV = \frac{TP}{(TP+FP)} \times 100 \quad (21)$$

$$TDF = \frac{FP}{(TP+FP)} \times 100 \quad (22)$$

$$B = \frac{FP}{TP} \quad (23)$$

$$Q = \frac{TP}{(TP+FP+FN)} \times 100 \quad (24)$$

Em que *TP* (do inglês, *true positive*) é definido como as detecções verdadeiras positivas, *FP* (do inglês, *false positive*) as detecções falsas positivas, e *FN* (do inglês, *false negative*) as detecções falsas negativas. Os valores *TP*, *FP* e *FN* foram calculados através da comparação dos resultados com as imagens de referência geradas manualmente. Assim, para uma imagem processada (*PI*) e uma imagem de referência (*GT*, do inglês *ground-truth*), os valores *TP*, *FP* e *FN* são:

$$TP = \text{Area}(GT \cap PI)$$

$$FP = \text{Area}(PI \cap \sim GT)$$

$$FN = \text{Area}(GT \cap \sim PI)$$

Em que \cap e \sim são operadores de intersecção e negação, respectivamente. Para cada uma das 210 regiões de estudo, uma imagem de referência (*GT*) foi gerada. Esta parte do trabalho demandou tempo e atenção, pois existem cenas em que é complicado distinguir entre um *slope streak* e outro tipo de feição geomorfológica. Além disso, há cenas em que os *slope streaks* apresentam-se pouco definidos. Portanto, em alguns casos foi necessário desprezar alguns rastros, como mostra os exemplos apresentados na Figura 27. A decisão sobre qual *slope streak* deveria ser marcado em cada cena foi tomada com base no contraste e na definição de suas bordas com as áreas vizinhas. Rastros com muito baixo contraste e com bordas pouco definidas não foram considerados. A Figura 28 apresenta os *ground truth* das imagens apresentadas na Figura 16.

O método proposto foi aplicado às 210 regiões de estudo do banco criado. Além dos resultados apresentados nas Figuras 24, 25 e 26, alguns outros exemplos do desempenho

do algoritmo, em situações variadas, estão apresentados na Figura 29, os quais foram obtidos a partir das imagens apresentadas na Figura 16. O desempenho do algoritmo para as respectivas imagens é apresentado na Tabela 1. Analisando os resultados obtidos, verifica-se que em sete dos casos apresentados o desempenho foi satisfatório, com fator de qualidade acima de 88%. Os piores resultados foram para a imagem MOC M0904872, apresentada na Figura 29 (e), na qual o algoritmo alcançou uma taxa de detecção verdadeira de 70,34% e uma taxa de detecções falsas de 29,65%, e para a imagem MOC E1400638 (Figura 29 (g)), na qual o valor do fator de qualidade alcançado foi de 52%.

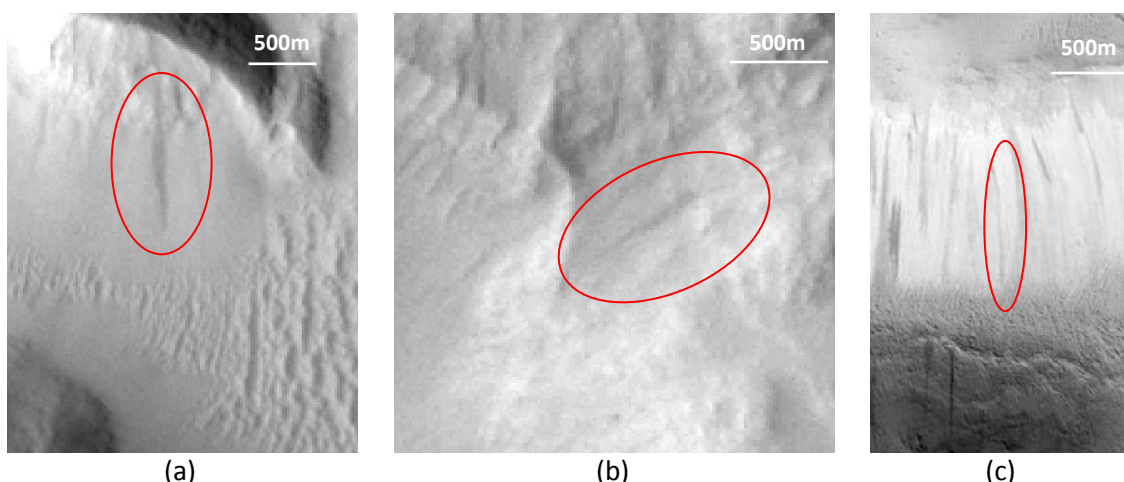


Figura 27 – Exemplos de cenas com *slope streaks* de difícil identificação. Em (a) CTX P03_002276_2067 (5,6m/pixel) o *slope streak* ao centro da cena (considerado no *ground truth*) se assemelha com as ondulações presentes no canto inferior direito. Em (b) CTX P20_008750_2067 (5,6m/pixel) e (c) MOC E1400638 (6,37m/pixel) rastro com bordas pouco definidas não considerados no *ground truth*.

Tabela 1- Desempenho do algoritmo para as imagens apresentadas nas Figuras 24, 25, 26 e 29, respectivamente.

Imagem	Sensor	Resolução (m/pixel)	TDV %	TDF %	B	Q %
PSP_001656_2175_RED	HiRISE	0,58	95,67	3,59	0,037	92,38
P03_002276_2067	CTX	5,60	96,98	0,00	0,000	96,98
M0307769	MOC	6,03	99,41	0,00	0,024	99,41
M0307769	MOC	6,03	91,16	2,08	0,021	89,43
D13_032327_2067	CTX	5,68	95,87	4,12	0,043	88,87
E021355	MOC	3,07	99,68	0,31	0,003	99,12
G12_022991_2073	CTX	5,70	85,96	14,03	0,163	82,65
M0904872	MOC	2,88	70,34	29,65	0,421	60,52
AB103502	MOC	1,63	83,73	16,26	0,194	75,73
E1400638	MOC	6,37	73,52	26,47	0,360	52,24
E0302197	MOC	4,58	93,11	6,88	0,073	84,32
B07_012383_1903	CTX	5,44	85,10	14,89	0,175	81,48
PSP_001656_2175_RED	HiRISE	0,29	99,15	1,71	0,017	97,46
PSP_008513_2060_BG	HiRISE	1,16	98,87	7,05	0,075	91,97

Tabela 2 – Desempenho global para os três conjuntos de imagens.

Sensor	Número de imagens	TDV %	TDF %	B	Q %
MOC	100	87,84	12,48	0,141	78,14
CTX	90	92,68	14,37	0,165	80,38
HiRISE	20	90,503	8,38	0,091	83,58
MOC+HiRISE+CTX	210	89,89	10,68	0,119	81,16

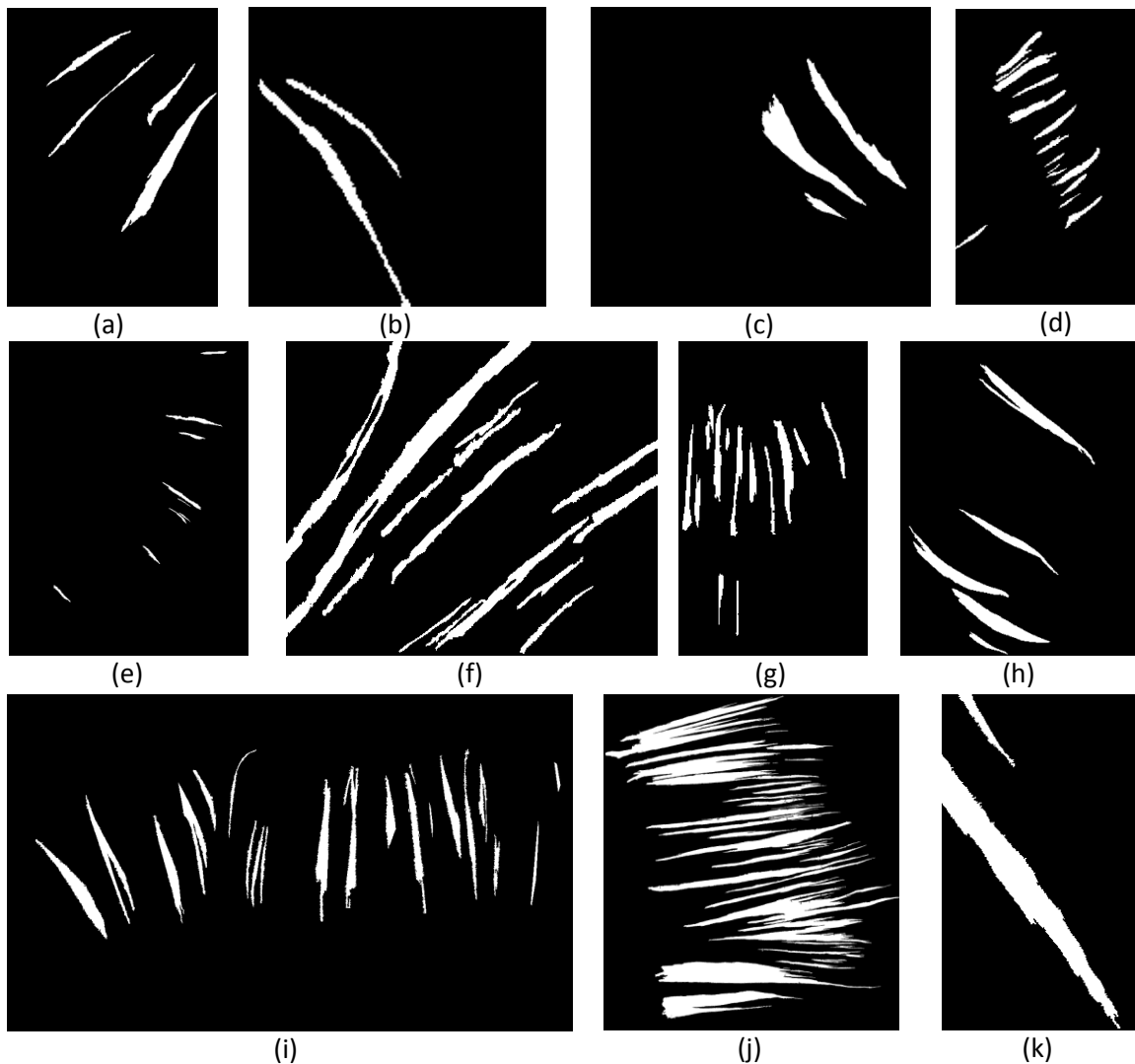


Figura 28 – *Ground truth* das imagens (a) MOC M0307769 (6,03m/pixel) (b) CTX D13_032327_2067 (5,68m/pixel) (c) MOC E021355 (3,07m/pixel) (d) CTX G12_022991_2073 (5,7m/pixel) (e) MOC M0904872 (2,88m/pixel) (f) MOC AB103502 (1,63m/pixel) (g) MOC E1400638 (6,37m/pixel) (h) MOC E0302197 (4,58m/pixel) (i) CTX B07_012383_1903 (5,44m/pixel) (j) HiRISE PSP_001656_2175_RED (0,29m/pixel) (k) HiRISE PSP_008513_2060_BG (1,16m/pixel)

O desempenho global do algoritmo para as 210 imagens do conjunto de dados (MOC+CTX+HiRISE) apresentou uma acurácia global de cerca de 81% (Tabela 2). O pior percentual de qualidade individual foi de 52% e o melhor de 99%, representadas pelas Figuras 28 (g) e 26, respectivamente. Estes resultados estão em concordância com os exemplos apresentados na Tabela 1, que são representativos do conjunto de dados construído, isto é, os *slope streaks* são mal identificados em cerca de 1 em cada 8 imagens. Essas imagens, normalmente, apresentam terrenos acidentados e um diferencial de iluminação muito acentuado. Além disso, há casos em que os *slope streaks* são muito claros e apresentam, na imagem, as bordas pouco definidas como mostra a Figura 16 (e) (f) e (g). Nestas amostras, o algoritmo não é capaz de segmentar corretamente os *slope streaks* e em muitos casos, o algoritmo classifica outros tipos de feições geomorfológicas semelhantes (falsos positivos).

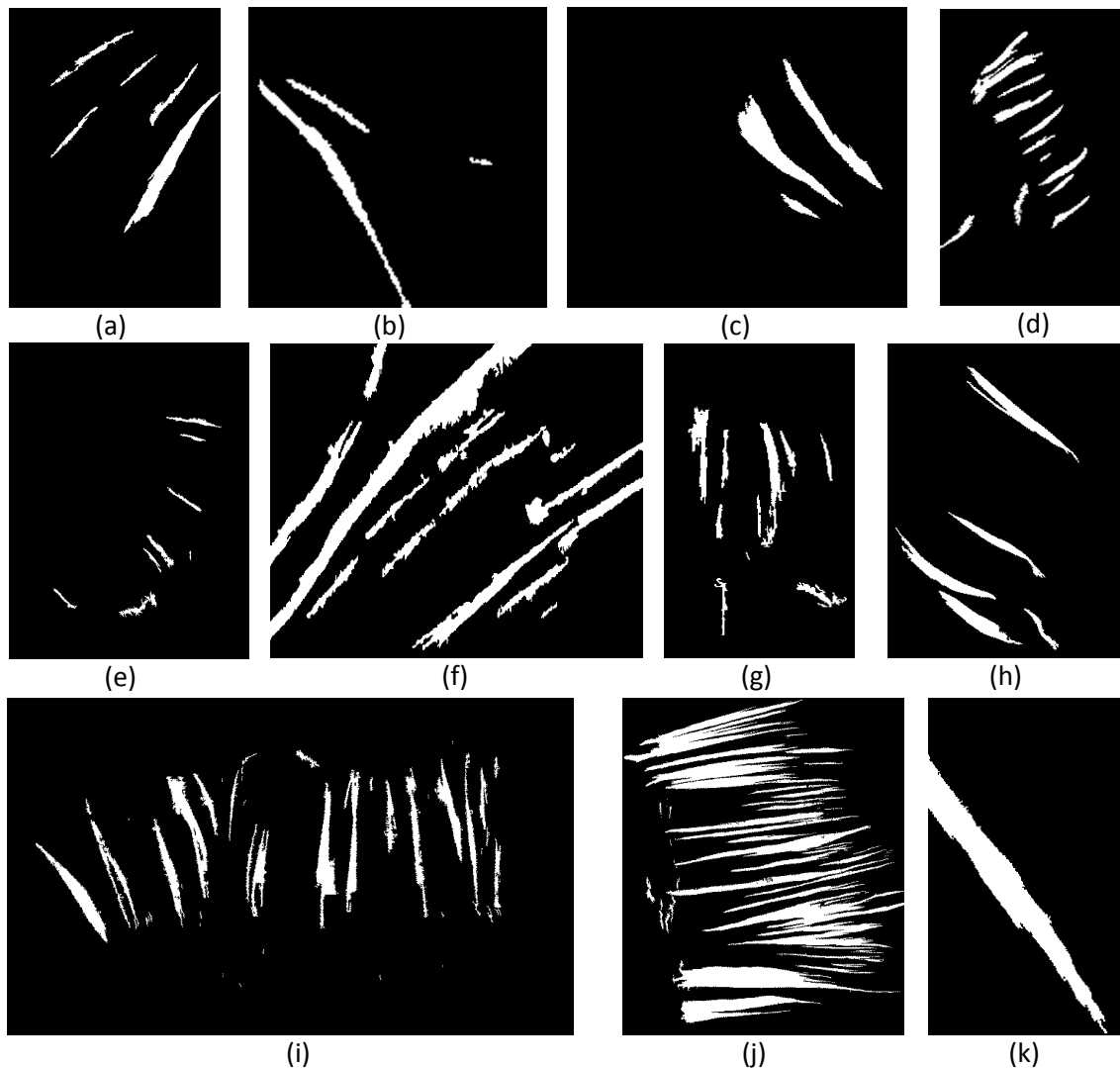


Figura 29 - Exemplo dos resultados alcançados com o método de detecção obtidos a partir das imagens: (a) MOC M0307769 (6,03m/pixel) (b) CTX D13_032327_2067 (5,68m/pixel) (c) MOC E021355 (3,07m/pixel) (d) CTX G12_022991_2073 (5,7m/pixel) (e) MOC M0904872 (2,88m/pixel) (f) MOC AB103502 (1,63m/pixel) (g) MOC E1400638 (6,37m/pixel) (h) MOC E0302197 (4,58m/pixel) (i) CTX B07_012383_1903 (5,44m/pixel) (j) HiRISE PSP_001656_2175_RED (0,29m/pixel) (k) HiRISE PSP_008513_2060_BG (1,16m/pixel)

3.4 CONCLUSÃO

O método de detecção desenvolvido opera em imagens obtidas por três sensores distintos, MOC, CTX e HiRISE. A principal diferença entre as imagens provenientes dessas câmeras é com relação à resolução espacial. Porém, esse fator não influenciou no desempenho do algoritmo, pois, como pode ser visto na Tabela 2, os resultados globais alcançados para os três conjuntos de imagens são bastante similares. Todavia, para as imagens HiRISE o algoritmo alcançou um resultado um pouco melhor, em relação aos outros dois conjuntos. Isso pode ser visto no valor da qualidade que foi de 83,58% enquanto que a MOC alcançou 78,14% e a CTX 80,38%. Esse valor pode ser justificado pela resolução espacial da câmera HiRISE. Como consequência de sua alta resolução, a maior parte das imagens

apresentam regiões muito pequenas, as quais contêm predominantemente os rastros escuros (*slope streaks*) e poucas outras feições, como se observa no exemplo da Figura 16 (k). Esta característica auxilia no bom desempenho do algoritmo desenvolvido e explica o valor do fator de qualidade estar um pouco acima dos outros dois conjuntos.

A definição dos tamanhos dos elementos estruturantes na etapa de pré – processamento (λ_1 e λ_2) é feita de modo automático, de acordo com o tamanho da imagem. Por outro lado, os elementos estruturantes da etapa de detecção (β_1 , β_2 e β_3), foram definidos empiricamente. Uma possível alternativa para automatizar a definição desses elementos, seria realizar uma análise granulométrica para verificar o tamanho dos maiores objetos em cena e escolher automaticamente o tamanho adequado para cada imagem. Mas ainda é necessário testar essa abordagem para verificar sua viabilidade. Quanto ao fator de forma, na etapa de pós – processamento nota-se que este foi fundamental para eliminar os falsos positivos e alcançar resultados satisfatórios do algoritmo desenvolvido.

Contudo, o algoritmo apresenta algumas limitações, como por exemplo, em áreas em que o terreno possui ondulações, onde na maioria dos casos, o algoritmo as classificou como *slope streaks*. Em situações em que os rastros estão muito claros, o algoritmo também falha ao não conseguir detectá-los. Visando sanar essas limitações outras abordagens foram testadas sem sucesso. No entanto, ainda há espaço para melhorias, especialmente no que concerne na separação e caracterização *slope streaks* com valores de albedo distintos e também para obtenção de uma segmentação mais fina e eficiente.

No geral, a qualidade de detecção de aproximadamente 81% pode ser considerada muito satisfatória, uma vez que o banco de imagem construído é bastante representativo e contempla uma ampla diversidade de tipos de declive e textura, onde os *slope streaks* ocorrem. Desta forma, pode-se concluir que o método desenvolvido foi capaz de detectar os mais variados tipos de *slope streaks*, sob imagens com características distintas, sobretudo com relação à resolução espacial que varia de 0,25 a 6,5-m/pixel.

Os resultados apontam que o método é eficiente e robusto e pode ser utilizado para dar início ao mapeamento, em larga escala, de *slope streaks* em Marte. A disponibilidade de uma metodologia para segmentar e extrair informação significativa aumenta naturalmente o conhecimento regional e a significância estatística de uma análise temporal.

4. ANÁLISE TEMPORAL

4.1 ABORDAGEM METODOLÓGICA

A análise temporal foi realizada de acordo com as etapas que estão ilustradas no fluxograma da Figura 30. As imagens utilizadas foram definidas através de buscas realizadas na ferramenta PILOT (do inglês, *Planetary Image Locator Tool*), desenvolvida pela USGS *Astrogeology Science Center* e disponibilizada pela internet. Esta ferramenta possibilita visualizar e obter imagens georreferenciadas adquiridas por diferentes câmeras e em épocas distintas, e assim, determinar áreas passíveis de análises temporais, como mostra a Figura 31.

As imagens selecionadas em cada região com informação multi-temporal suficiente foram primeiramente processadas no *software* ISIS (do inglês, *Integrated System for Imagers and Spectrometers*). Este *software* consiste em um programa desenvolvido pela USGS para processamento de dados obtidos em missões planetárias realizadas pela NASA e por outros centros espaciais. Este processamento é fundamental, pois possibilita a correção da radiometria e da geometria das imagens. De posse das imagens corrigidas, foram então feitos os recortes das regiões de estudo (RE) no *software* Arcview. Esses recortes foram submetidos ao algoritmo de detecção, e então foi iniciado o desenvolvimento do algoritmo de análise temporal. O código desenvolvido calcula a média interna e externa dos valores de níveis digitais (ND) de cada *slope streaks* ao longo dos anos. Os NDs foram convertidos para valores de albedo e então, foram gerados os gráficos de clareamento.

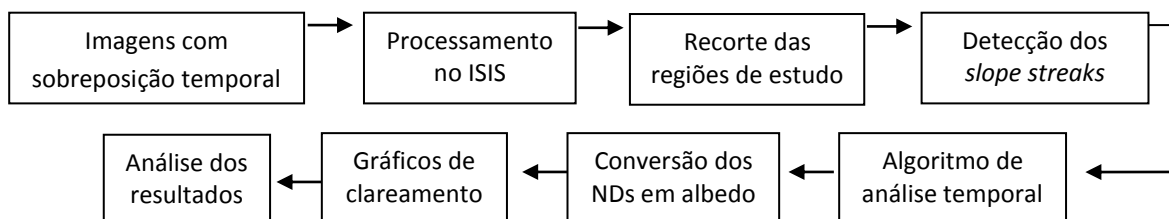


Figura 30 – Fluxograma da metodologia utilizada para a análise temporal.

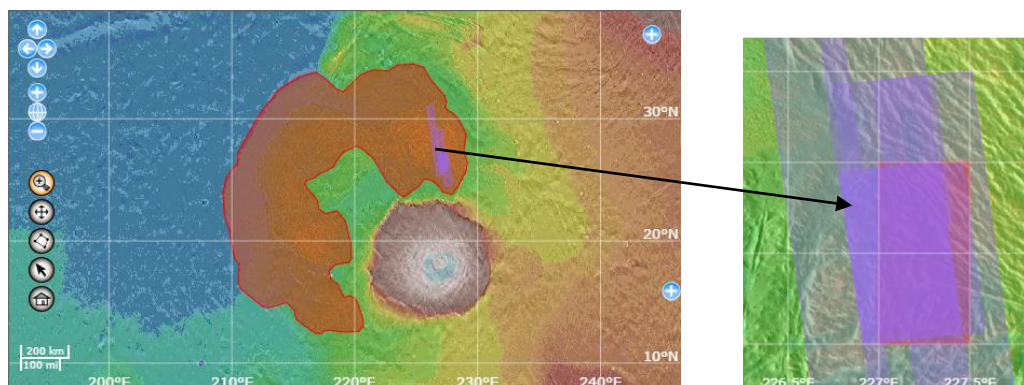


Figura 31 – Exemplo de área contemplada por imagens multitemporais no Lycus Sulci (região representada em vermelho), localizada no quadrante Tharsis do planeta Marte.

4.1.1 Banco de imagens

A busca pelas imagens sobrepostas foi orientada, no primeiro momento, pelo conhecimento prévio de áreas que continham o fenômeno de interesse. Apenas as áreas representadas por mais de três imagens e com um intervalo de tempo mínimo de cinco anos entre a primeira e a última imagem tomada foram consideradas. Seguindo este critério, foram selecionadas 25 imagens, das quais 10 são MOC e 15 CTX (Tabela 3), divididas entre três quadrantes do planeta Marte: Arabia, Amazonis e Tharsis (Figura 32). Convém destacar que se objetivou utilizar regiões com certa distribuição espacial, para possibilitar inferir informações a respeito da correlação entre o clareamento dos *slopes streaks* e sua posição geográfica.

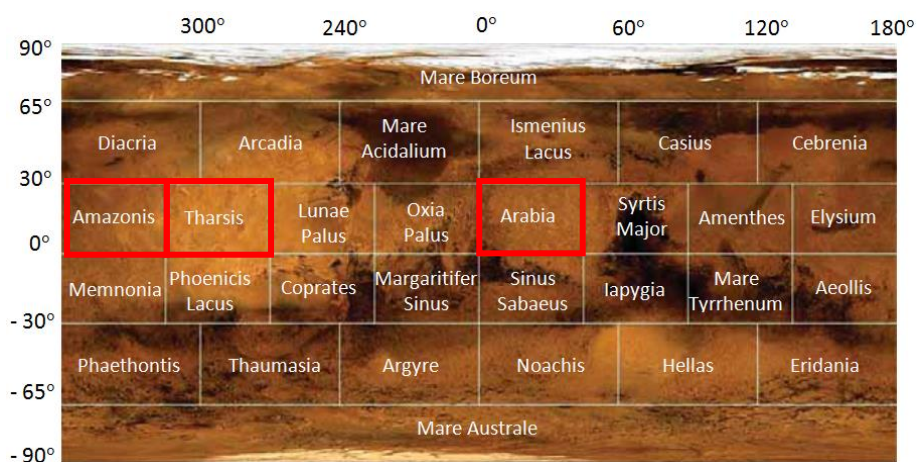


Figura 32 – Regiões consideradas no estudo de Análise temporal.

Tabela 3 - Imagens utilizadas para a análise temporal

Região	Imagem	Camera	Data	Lat °	Long °	Resolução
Tharsis	M16/00596	MOC	12/06/2000	26,54	227,14	6,0
	E15/00356	MOC	12/04/2002	26,56	227,13	6,3
	S16/01059	MOC	12/03/2006	26,54	227,14	4,7
	P20_008750_2067_XN_26N132W	CTX	08/06/2008	26,31	227,15	5,6
	B10_013642_2067_XI_26N132W	CTX	24/06/2009	27,55	226,97	5,7
	B22_018244_2065_XI_26N132W	CTX	18/06/2010	26,47	227,11	5,7
	G12_022846_2067_XI_26N132W	CTX	11/06/2011	26,51	227,12	5,6
	D01_027725_2078_XI_27N133W	CTX	25/06/2012	26,49	227,11	5,7
	D13_032327_2067_XI_26N132W	CTX	19/06/2013	26,50	227,25	5,6
Amazonis	M21/00632	MOC	10/11/2000	25,54	212,75	6,0
	E05/00359	MOC	04/06/2001	25,50	212,73	4,5
	E18/00119	MOC	03/07/2002	25,50	212,76	4,8
	B19_016926_2066_XI_26N147W	CTX	07/03/2010	26,42	212,61	5,7
	D19_034490_2057_XI_25N147W	CTX	05/12/2013	25,49	212,72	5,7
Arabia	M03/07572	MOC	09/08/1999	8,54	30,33	5,8
	M09/02940	MOC	12/11/1999	8,45	30,29	5,8
	E10/01445	MOC	10/11/2001	10,76	41,61	6,2
	E20/00777	MOC	14/09/2002	8,60	30,33	6,1
	P14_006687_1928_XN_12N318W	CTX	30/12/2007	12,71	41,51	5,4
	P17_007874_1895_XI_09N329W	CTX	01/04/2008	9,38	30,25	5,4
	B07_012383_1903_XN_10N318W	CTX	18/03/2009	10,19	41,72	5,5
	G11_022339_1886_XI_08N329W	CTX	03/05/2011	8,52	30,33	5,5
	G22_026796_1886_XI_08N329W	CTX	14/04/2012	8,55	30,32	5,4
	D13_032242_1887_XI_08N329W	CTX	12/06/2013	8,63	30,31	5,5
	D19_034655_1886_XN_08N329W	CTX	17/12/2013	8,58	30,34	5,4

4.1.1.1 Regiões de estudo

Cada uma das 25 imagens selecionadas foi recortada, gerando deste modo, as regiões de estudo (RE). Uma única imagem pôde gerar várias REs e o número de regiões por imagem foi determinado pela quantidade e pela localização de *slope streaks* na mesma. Quanto mais rastros e quanto mais distribuídos espacialmente na imagem inteira, maior a quantidade de REs na imagem em questão. Uma mesma região, necessariamente, será representada por no mínimo três imagens. No entanto, este número é variável, dependendo da região, até sete imagens com intervalo temporal de 13 anos terrestres podem representar a área (Figura 33). Considerando os três quadrantes, foram criadas 40 regiões (6 na Arabia, 10 na Amazonis e 24 na Tharsis), somando 222 recortes no total. O maior número de regiões de estudo na zona de Tharsis se dá pelo fato de ser a área com maior ocorrência do fenômeno.

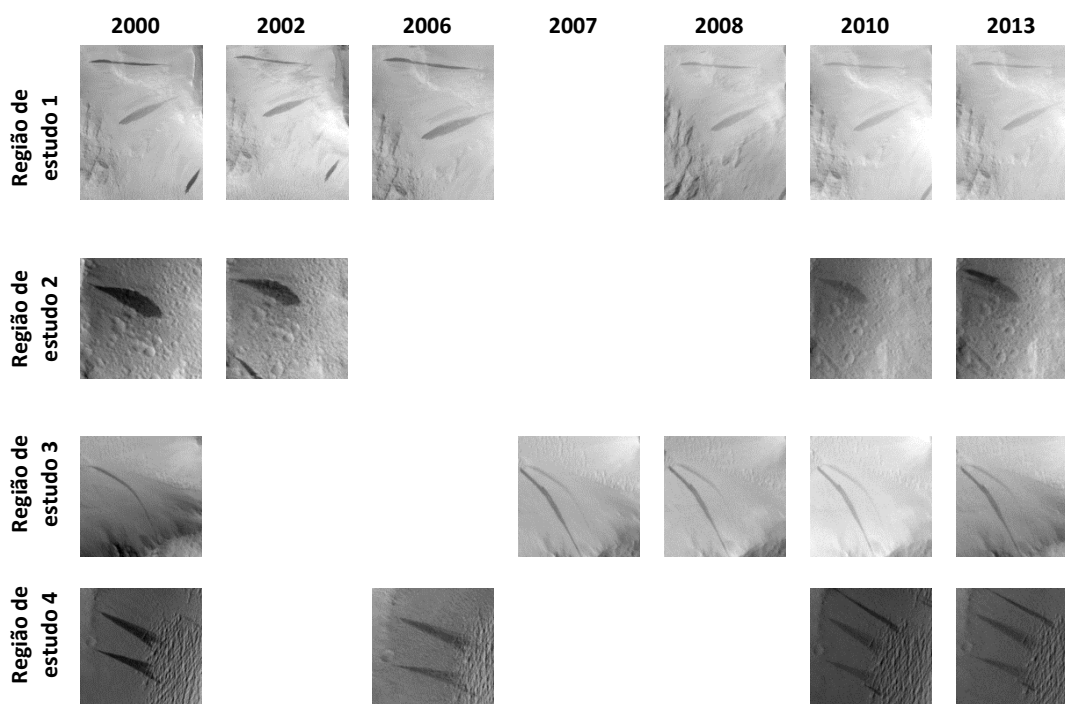


Figura 33 – Disponibilidade de imagens de quatro regiões de estudo entre os anos de 2000 a 2013.

O recorte das regiões de estudo é parte importante do processo, uma vez que, é necessário que se tenha um bom registro espacial entre as imagens, pois o algoritmo de análise temporal faz a correlação dos valores de ND de cada rastro através da sobreposição dos recortes. Portanto, quanto mais semelhantes são as REs, em termos de área representada, mais eficiente será a correspondência entre os elementos (*slope streaks*) feita pelo algoritmo desenvolvido.

4.1.2 Algoritmo para a análise temporal

Basicamente, o algoritmo determina a relação (taxa) de contraste entre o *slope streak* e sua região de vizinhança, em cada imagem multitemporal. Determinar a taxa de contraste é uma maneira menos propensa a erros de avaliar o clareamento dos rastros provenientes da interferência atmosférica, se comparada a avaliar o valor absoluto do albedo de cada *streak* ao longo dos anos, considerando que as imagens são adquiridas por diferentes sensores (MOC e CTX) e em diferentes períodos de tempo, seja horário do dia ou estação do ano.

O método desenvolvido garante que exatamente o mesmo elemento seja corretamente identificado nas imagens de cada ano. O estabelecimento da correspondência entre os rastros é realizado pela sobreposição do elemento segmentado na primeira imagem (mais antiga) com todas as imagens dos anos seguintes. A segmentação é obtida pelo método de detecção apresentado no capítulo 3. Se existe coincidência de no mínimo 1/3 entre a área do elemento de referência e a área do elemento na imagem mais nova, os valores médios de brilho do interior e da vizinhança dos rastros são registrados. A Figura 34 apresenta um exemplo deste processo, em que os *slope streaks* observados na imagem CTX de 2009 são detectados automaticamente (a), em seguida é definido o primeiro elemento de referência (*slope streak*) para realizar a correspondência com os objetos segmentados na imagem de 2010 (c), assim que o algoritmo detecta o objeto correspondente determina-se a região de vizinhança dos rastros análogos (d). Este procedimento é realizado para todos os rastros contidos na imagem mais antiga da RE em todas as imagens dos anos subsequentes. A extensão da área pertencente à região de vizinhança é determinada pela subtração do resultado da dilatação do rastro (feita por um elemento estruturante cujo tamanho varia em função da dimensão da região de interesse) com o próprio elemento segmentado.

Os valores de número digital (ND) de cada rastro são salvos na forma como está apresentada na Figura 35. Na primeira coluna da tabela de dados, o primeiro dígito corresponde ao número do rastro, separado por um traço (_) o segundo número corresponde ao número da região de estudo (no exemplo a região 01), o terceiro número é o ano de tomada da imagem, e o quarto, o início do nome da imagem. Na segunda e terceira coluna estão os valores médios de ND do interior e da vizinhança do rastro, respectivamente. Uma vez determinados os valores de ND, estes são convertidos em valores de albedo.

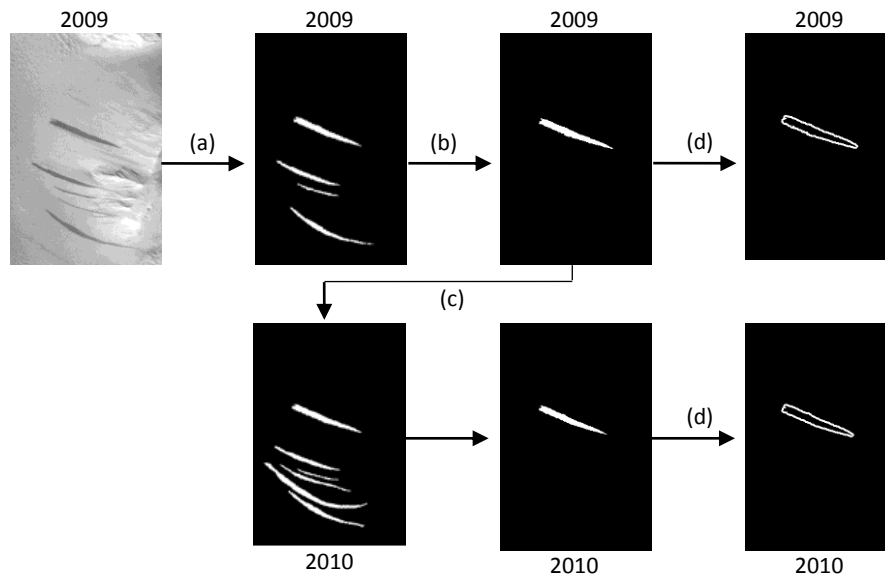


Figura 34 - Sequência desenvolvida para calcular o contraste entre o slope streak e sua vizinhança.

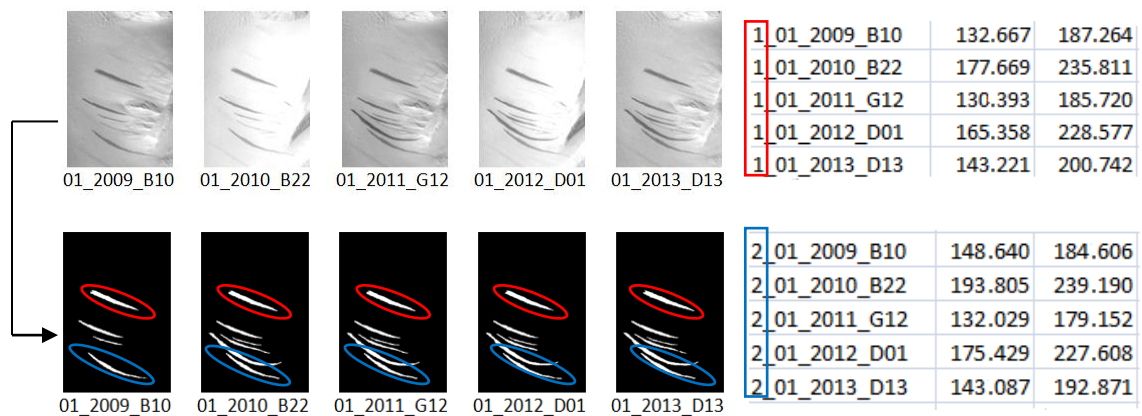


Figura 35 – Forma de armazenamento dos valores de ND dos rastros analisados.

4.1.3 Conversão dos NDs em albedo

Nas imagens CTX, a conversão dos níveis digitais (*ND*) em valores estimados de albedo foi feita de acordo com a abordagem utilizada por Bell et al., (2013), através da divisão do fator de radiância (*iof*) pelo cosseno do ângulo de incidência solar (*i*) no momento da observação. O fator de radiância é obtido através do fator de escala (*SF*) e do *Offset*, como segue a equação:

$$iof = ND \times SF - Offset$$

Para as imagens MOC, a obtenção do valor de albedo foi através da equação radiométrica fornecida na documentação do *software* USGS ISIS (ELIASON et al., 2001), qual seja:

$$r = \frac{(ND - z + off)}{(a - g)} \Big/ (ex - dc)$$

em que r é o sinal médio sendo gerado no plano focal (em ND/msec), z é o *Offset* fixado e off o *Offset* variável, dc o termo escuro (*dark current*), g o ganho dependente do *Offset*, a o ganho do sistema ordenado (onde o ganho mínimo é 1 e os outros ganhos são valores maiores que 1), e ex corresponde ao tempo de exposição em milissegundos. O valor de reflectância (albedo) é obtido pela multiplicação de r pelo fator de radiância (iof).

Todos os parâmetros mencionados, tanto para as imagens MOC quanto para as imagens CTX, são fornecidos pelo *software* USGS ISIS no arquivo CUB, após o processamento de cada imagem. Detalhes adicionais do processo calibração estão descritos nos arquivos *mocal.txt* e *ctxcal.txt*, disponível *on-line* no subdiretório *calib*.

4.2 ANÁLISE QUANTITATIVA DO CLAREAMENTO

O clareamento dos *slope streaks* foi calculado através da razão entre o valor de albedo do interior e o valor de albedo da vizinhança de cada rastro (taxa de contraste). Quanto mais claro o rastro a taxa de contraste tende ao valor 1. No total, 63 *slope streaks* distribuídos nos três quadrantes de estudo (23 na Tharsis, 13 na Amazonis e 27 na Arabia) tiveram sua taxa de contraste calculada ao longo dos anos de 1999 a 2013. Como já mencionado, a disponibilidade de imagens multitemporais das REs guiou a quantidade de informação anual de cada rastro. Algumas regiões de estudo possuem até sete anos de informação, enquanto regiões com menor quantidade de informação possuem três anos de cobertura temporal.

Para facilitar a apresentação dos dados obtidos, foram selecionados rastros que representam exemplos de comportamento em cada quadrante estudado. No entanto, os resultados obtidos com todos os rastros estão apresentados no APÊNDICE II.

4.2.1 Quadrante Tharsis

Os 23 *slope streaks* avaliados na região Tharsis apresentaram uma variação média na taxa de contraste de 0,01006 por ano terrestre (Ey^{-1}). Analisando o clareamento individualmente, nota-se grande diferença nos valores de variação para cada *streak*. Os resultados apresentados na Figura 36 mostram o clareamento de cinco rastros ao longo dos 13 anos estudados, em que o eixo das abscissas representa o instante em que a imagem foi tomada (ex., 12/06/2006 torna-se $2006,4465 = 2006 + 163/365$), e as ordenadas representam a taxa de contraste. Enquanto o *streak* com clareamento mais rápido apresentou a taxa de contraste de 0,7528 em 2006 e 0,9133 em 2013, o que representa uma variação anual de 0,02206 Ey^{-1} (representado pela linha vermelha), o *streak* com clareamento mais lento

apresentou uma taxa de contraste de 0,919339 em 2000 e 0,963043 em 2013, uma variação na taxa de contraste de 0,003362 Ey^{-1} (linha azul).

Todos os 23 *streaks* analisados clarearam ao longo dos anos. Contudo, durante alguns períodos observou-se ligeira reversão ao escurecimento, e então clareamento novamente. Este comportamento é claramente constatado na Figura 36 entre os anos de 2011 a 2013, em que todos os *streaks* exemplificados tiveram seus valores de taxa de contraste reduzidos (o que indica escurecimento) para voltar a clarear na sequência. Além disso, nota-se que entre os anos de 2000 a 2002 os rastros representados pelas linhas rosa e laranja tiveram um leve escurecimento, enquanto o verde continuou o processo de clareamento. Destaca-se que estes dados são provenientes das mesmas imagens, o que torna os valores de variação de albedo mais confiáveis (Tabela 4). Apesar do *slope streak* representado pela linha vermelha apresentar a maior variação total na taxa de contraste por ano, nota-se que entre os anos de 2006 a 2008 houve também um clareamento drástico para o rastro representado pela linha rosa (que havia escurecido entre o período de 2000 a 2006).

Tabela 4 – Valores de albedo dos *slope streaks* apresentados no gráfico do quadrante Tharsis.

Slope streak (ss)	Código de referência do algoritmo	Data	Albedo ss	Albedo Vizinhança	Taxa de contraste	Varição da taxa de contraste total
Vermelho	10_11_2006_S16	2006,19	0,378	0,502	0,7528	0,02206
	10_11_2007_P03	2007,05	0,219	0,255	0,8604	
	10_11_2008_P20	2008,43	0,206	0,232	0,8894	
	10_11_2010_B22	2010,46	0,243	0,268	0,9071	
	10_11_2012_D01	2012,48	0,225	0,257	0,8744	
	10_11_2013_D13	2013,47	0,230	0,252	0,9133	
Laranja	2_02_2000_M16	2000,44	0,443	0,489	0,9068	0,00384
	2_02_2002_E15	2002,27	0,496	0,581	0,8545	
	2_02_2008_P20	2008,43	0,220	0,234	0,9420	
	2_02_2011_G12	2011,44	0,253	0,268	0,9449	
	2_02_2012_D01	2012,48	0,231	0,245	0,9459	
	2_02_2013_D13	2013,47	0,240	0,251	0,9568	
Rosa	1_02_2000_M16	2000,44	0,387	0,474	0,8161	0,01079
	1_02_2002_E15	2002,27	0,426	0,532	0,8019	
	1_02_2006_S16	2006,19	0,371	0,468	0,7918	
	1_02_2008_P20	2008,43	0,221	0,237	0,9345	
	1_02_2011_G12	2011,44	0,243	0,255	0,9519	
	1_02_2012_D01	2012,48	0,232	0,249	0,9314	
	1_02_2013_D13	2013,47	0,233	0,244	0,9566	
	16_17_2000_M16	2000,44	0,449	0,535	0,8391	
Verde	16_17_2002_E15	2002,27	0,533	0,614	0,8691	0,00881
	16_17_2007_P03	2007,05	0,228	0,244	0,9365	
	16_17_2008_P20	2008,43	0,196	0,207	0,9464	
	16_17_2010_B22	2010,46	0,212	0,222	0,9561	
	16_17_2012_D01	2012,48	0,210	0,224	0,9401	
	16_17_2013_D13	2013,47	0,242	0,254	0,9538	
	4_05_2000_M16	2000,44	0,386	0,420	0,9193	
Azul	4_05_2007_P03	2007,05	0,227	0,240	0,9475	0,00336
	4_05_2008_P20	2008,43	0,216	0,226	0,9583	
	4_05_2009_B10	2009,47	0,226	0,235	0,9632	
	4_05_2010_B22	2010,46	0,249	0,259	0,9584	
	4_05_2012_D01	2012,48	0,230	0,243	0,9481	
	4_05_2013_D13	2013,47	0,224	0,233	0,9630	

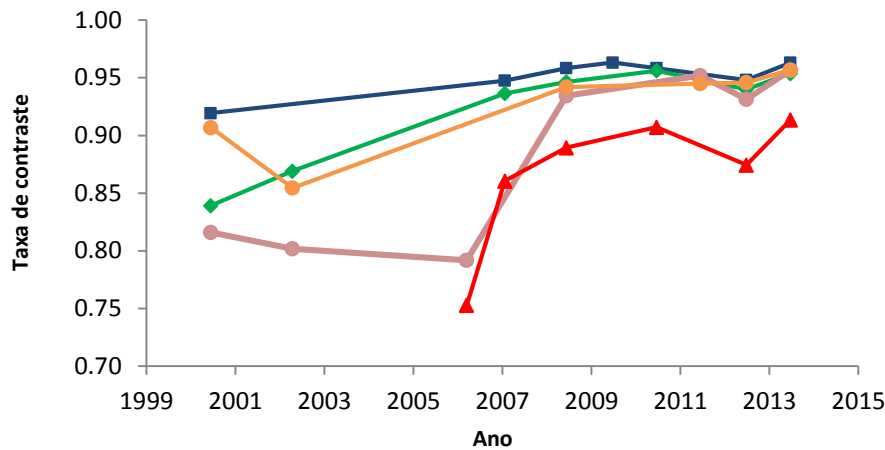


Figura 36 – Variação na taxa de contraste de cinco exemplos de slope streaks no quadrante Tharsis.

4.2.2 Quadrante Amazonis

Dos três quadrantes estudados, a região Amazonis é a área que apresenta menor cobertura de imagens multitemporal. A indisponibilidade de dados anuais dificulta análises mais detalhadas em relação à variação dos valores na taxa de contraste dos rastros. No entanto, é possível estabelecer dados como média da variação total para os 13 *slope streaks* analisados, que foi de $0,01181 \text{ Ey}^{-1}$.

Na Figura 37, o *slope streak* com maior variação, para o quadrante Amazonis, está representado pela linha vermelha com valor de $0,02222 \text{ Ey}^{-1}$, e o rastro com menor variação está representado pela linha azul com $0,00435 \text{ Ey}^{-1}$ (Tabela 5). Assim como no quadrante Tharsis, alguns rastros apresentaram leve escurecimento durante certos períodos, como mostrado pela linha verde entre os anos de 2001 e 2002. Novamente observa-se que na mesma imagem enquanto um *streak* clareia outro escurece (linhas laranja e verde).

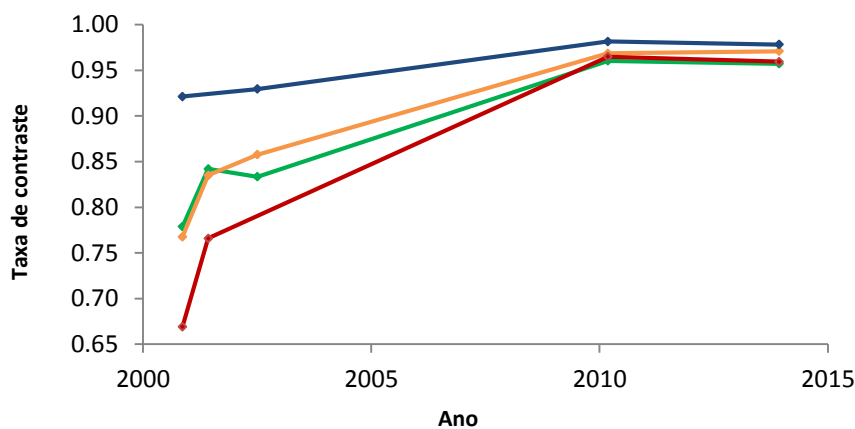


Figura 37 - Variação na taxa de contraste de quatro exemplos de slope streaks no quadrante Amazonis.

Tabela 5 - Valores de albedo dos slope streaks apresentados no gráfico do quadrante Amazonis.

Slope streak (ss)	Código de referência do algoritmo	Data	Albedo ss	Albedo Vizinhança	Taxa de contraste	Varição da taxa de contraste total
Azul	4_34_2000_m21	2000,86	0,493	0,535	0,921	0,00435
	4_34_2002_E18	2002,50	0,406	0,437	0,930	
	4_34_2010_b19	2010,18	0,238	0,243	0,982	
	4_34_2013_D19	2013,92	0,233	0,239	0,978	
Laranja	13_40_2000_M21	2000,86	0,228	0,298	0,768	0,01554
	13_40_2001_e05	2001,42	0,212	0,254	0,835	
	13_40_2002_E18	2002,50	0,228	0,266	0,858	
	13_40_2010_B19	2010,18	0,177	0,182	0,969	
	13_40_2013_D19	2013,92	0,178	0,184	0,971	
Verde	2_30_2000_M21	2000,86	0,230	0,295	0,779	0,01365
	2_30_2001_e05	2001,42	0,222	0,263	0,842	
	2_30_2002_E18	2002,50	0,226	0,271	0,833	
	2_30_2010_B19	2010,18	0,176	0,183	0,960	
	2_30_2013_D19	2013,92	0,178	0,186	0,957	
Vermelho	6_35_2000_M21	2000,86	0,222	0,332	0,669	0,02222
	6_35_2001_E05	2001,42	0,208	0,272	0,766	
	6_35_2010_B19	2010,18	0,193	0,200	0,965	
	6_35_2013_D19	2013,92	0,190	0,198	0,960	

4.2.3 Quadrante Arabia

Neste quadrante a média de variação na taxa de contraste foi de $0,01192 \text{ Ey}^{-1}$. A menor variação foi de $0,00257 \text{ Ey}^{-1}$ (representada pela linha azul na Figura 38) e a maior foi de $0,02774 \text{ Ey}^{-1}$ (linha vermelha). Dos 27 *slope streaks* apenas três exibiram clareamento entre os anos de 2002 a 2011, e estes estão representados pela linha azul na Figura 38. Além disso, constatou que 18 rastros tiveram sincronia no clareamento e escurecimento entre os anos de 2011 a 2013, como mostram três exemplos na Figura 38 (linhas azul, vermelha e verde).

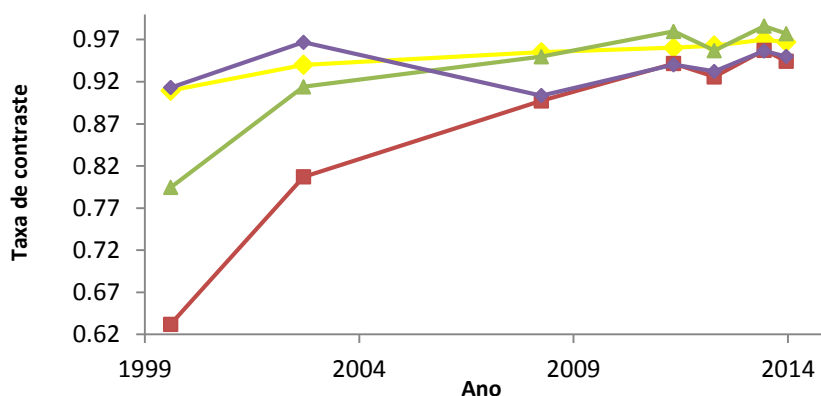


Figura 38 – Variação na taxa de contraste de quatro exemplos de *slope streaks* no quadrante Arabia.

Tabela 6 - Valores de albedo dos *slope streaks* apresentados no gráfico do quadrante Arabia.

Slope streak (ss)	Código de referência do algoritmo	Data	Albedo ss	Albedo Vizinhança	Taxa de contraste	Varição da taxa de contraste total
Azul	7_43_1999_M03	1999,60	0,528	0,578	0,913	0,00257
	7_43_2002_E20	2002,70	0,322	0,333	0,967	
	7_43_2008_P17	2008,24	0,170	0,188	0,904	
	7_43_2011_G11	2011,33	0,218	0,231	0,940	
	7_43_2012_G22	2012,28	0,174	0,187	0,932	
	7_43_2013_D13	2013,44	0,204	0,213	0,957	
	7_43_2013_D19	2013,96	0,170	0,179	0,950	
Amarelo	11_45_1999_M03	1999,60	0,565	0,622	0,909	0,00401
	11_45_2002_E20	2002,70	0,371	0,394	0,940	
	11_45_2008_P17	2008,24	0,203	0,213	0,955	
	11_45_2011_G11	2011,33	0,230	0,240	0,960	
	11_45_2012_G22	2012,28	0,221	0,229	0,963	
	11_45_2013_D13	2013,44	0,216	0,223	0,970	
	11_45_2013_D19	2013,96	0,200	0,206	0,967	
verde	18_53_1999_M03	1999,60	0,400	0,504	0,795	0,01272
	18_53_2002_E20	2002,70	0,275	0,301	0,914	
	18_53_2008_P17	2008,24	0,173	0,182	0,950	
	18_53_2011_G11	2011,33	0,224	0,229	0,980	
	18_53_2012_G22	2012,28	0,172	0,179	0,957	
	18_53_2013_D13	2013,44	0,207	0,210	0,986	
	18_53_2013_D19	2013,96	0,169	0,173	0,977	
Vermelho	14_49_1999_M03	1999,60	0,317	0,502	0,632	0,02774
	14_49_2002_E20	2002,70	0,230	0,285	0,807	
	14_49_2008_P17	2008,24	0,161	0,180	0,897	
	14_49_2011_G11	2011,33	0,216	0,229	0,942	
	14_49_2012_G22	2012,28	0,162	0,175	0,926	
	14_49_2013_D13	2013,44	0,201	0,210	0,957	
	14_49_2013_D19	2013,96	0,159	0,168	0,944	

4.3 DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Todos os 63 rastros clarearam ao longo dos 13 anos estudados. A região geográfica com maior variação média na taxa de contraste foi a Arabia ($0,01192 \text{ Ey}^{-1}$), seguido pela Amazonis com um valor médio muito próximo ($0,01181 \text{ Ey}^{-1}$) e a menor média de variação no valor de albedo dos rastros foi na região Tharsis ($0,01006 \text{ Ey}^{-1}$). De maneira geral, constata-se que a variação na taxa de contraste para os quadrantes Amazonis e Arabia foi bastante próxima, embora sejam regiões opostas geograficamente, 180° em longitude e 30° em latitude. Por outro lado, considerando a relativa proximidade entre as imagens utilizadas das regiões Amazonis e Tharsis, afastadas apenas 15° em longitude, verifica-se maior diferença entre os valores médios de variação do contraste de albedo. Ainda em relação à região geográfica, observa-se que os rastros com maior e menor taxa de variação, $0,02774 \text{ Ey}^{-1}$ e $0,00257 \text{ Ey}^{-1}$ respectivamente, encontram-se na região mais próxima ao Equador (Arabia), os resultados indicam que não há relação entre a taxa de clareamento e a localização geográfica.

No que concerne à velocidade de clareamento, percebe-se que o *slope streak* com maior taxa de variação ($0,02774 \text{ Ey}^{-1}$) é também o rastro mais escuro com taxa de contraste inicial de 0,632. Os dados apontam que este não é um comportamento isolado. A variação na

taxa de contraste é bem maior nos *streaks* mais escuros e vai reduzindo conforme os rastros clareiam. Ao observar as Figuras 36, 37 e 38, percebe-se que, de fato, os rastros que clarearam mais rápido (maior variação na taxa de contraste) também são os rastros com maior contraste inicial (mais escuros). Contrariamente, os rastros que clarearam mais lentamente são os rastros que apresentam menor contraste inicial (mais claros). Esses resultados são um forte indicativo que o processo de clareamento não é linear e gradual como se pensava (AHARONSON et al., 2003; SHORGHOFER et al., 2012). Na realidade, nota-se que a velocidade do clareamento é maior quando os rastros ainda são escuros (normalmente com taxa de contraste menor que 0,80) e vai diminuindo com os anos.

O escurecimento mesmo que sutil observado na grande maioria dos rastros indica que existem mais processos dinâmicos envolvidos do que um simples clareamento, o que pode ser, por exemplo, uma reativação dos rastros, como sugerem Chilton e Phillips (2013). Aliado a isso, a falta de relação entre a diminuição e o aumento nas taxas de contraste entre os *slope streaks*, novamente indica mais aspectos dinâmicos. Nos três quadrantes observou-se que, nas mesmas imagens, enquanto um rastro clareava, outro escurecia, o que se supõe que a taxa de deposição de poeira atmosférica na superfície marciana não é tão determinante no albedo dos *streaks*.

A análise feita neste trabalho, abrangendo todos os *pixels* do interior dos rastros, não foi realizada por nenhum pesquisador até o presente momento. Aliada à transformação dos NDs para valores de albedo, bem como à quantidade significativa de elementos analisados (63), bem distribuídos geograficamente, garante dados confiáveis sobre o fenômeno em questão. Assim, é possível afirmar que o processo de clareamento observado nos três sítios estudados pode ser aplicado em proporções maiores na superfície do planeta.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo geral contribuir para a automação do processo de extração de informações em imagens de Marte. Especificamente, tal contribuição foi concretizada com a criação de um método de detecção automática de *dark slope streaks* em imagens orbitais da superfície de Marte e com o desenvolvimento de um algoritmo para o cálculo de valor de albedo de *slope streaks* em imagens em séries temporais.

No que concerne ao método de detecção desenvolvido, constata-se através dos resultados obtidos que o algoritmo apresentou um desempenho robusto na identificação automática de *slope streaks* marcianos. Além disso, verifica-se elevada capacidade de detecção dos ratos em imagens com uma amplitude de resolução espacial igual a 26 vezes (de 0,25 a 6,5 m/pixel), e aptidão elevada de segmentação em imagens captadas em diferentes regiões do planeta (com diferentes características de albedo do 'background'), e em diferentes estações do ano e horas do dia. Por outro lado, existem alguns aspectos com os quais este algoritmo não consegue ainda lidar adequadamente, e que deverão ser objeto de investigação e melhoria futuras. Incluem-se neste ponto, as dificuldades de identificação das feições muito claras com contraste muito pouco acentuado com a região envolvente, e a existência de sombras alongadas, por exemplo resultantes de ondulações da superfície ou de areia (*ripples*).

Outro tipo de feição muito comum em Marte são os rastros de *dust devils* cuja formação, de origem eólica, é totalmente distinta da dos *slope streaks*, mas cuja forma estreita, alongada e albedo mais escuro do que a sua zona envolvente, pode levar a alguma confusão. No entanto, nas regiões e imagens estudadas nunca se verificou a ocorrência simultânea destes dois tipos de feições. De qualquer forma, o carácter mais irregular e ondulado dos rastros dos *dust devils* poderia ser explorado de forma a efetuar a sua discriminação dos *slope streaks*, de forma muito mais retilínea.

Quanto ao algoritmo de quantificação do clareamento temporal, são destacadas as seguintes características: a robustez na identificação do mesmo elemento em imagens multi-temporais, permitindo construir séries temporais totalmente fiáveis; quantificação completa do contraste de albedo recorrendo a todos os pontos no interior de cada *slope streak* e na área de sua vizinhança, em vez da tradicional amostragem pontual com relativamente poucas avaliações manuais; e possibilidade de, nas tendências gerais, detectar ligeiros escurecimentos no clareamento temporal dos *slopes streaks*.

Finalmente, as duas principais ferramentas desenvolvidas, identificação e quantificação temporal do clareamento de *slope streaks*, são suficientemente robustas para serem aplicadas a grande escala a um grande conjunto de imagens (no limite, a todas as que contenham este tipo de estruturas). A identificação generalizada e a caracterização mais

completa de cada uma destas estruturas, efetuadas através destas abordagens automáticas, permitirá obter um conhecimento espacial ou geográfico à escala de todas as suas regiões de ocorrência (baixas latitudes marcianas), que poderão fornecer informações válidas para ajudar a perceber o seu mecanismo de formação, assim como a compreender melhor e mais detalhadamente alguns processos relacionados, como por exemplo, deposição de poeira a nível regional e global.

BIBLIOGRAFIA

AHARONSON O., SCHORGHOFER N., GERSTELL M F., *Slope streak formation and dust deposition rates on Mars*. Journal of Geophysical Research 108 (E120): 5138, 2003.

AMADOR E. S., MUSHKIN, A., GILLESPIE, A. Spectral characteristics of dark slope streaks on Mars: A global survey with CRISM. In: *47th Lunar and Planetary Science Conference*, 2016.

Astrogeology Science Center, 2010. Map of the Planets and Satellites, April. URL: <<http://astrogeology.usgs.gov/Projects/MapBook/>>.

BANDEIRA, L., SARAIVA, J., PINA, P. Development of a methodology for automated crater detection on planetary images. In: *Pattern Recognition and Image Analysis*, Lecture Notes in Computer Science, v. 4477, Springer Berlin, p. 193–200, 2007

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, 2011.

BANDEIRA, L., DING, W., STEPINSKI, T. F. Detection of sub-kilometer craters in high resolution planetary images using shape and texture features. *Advances in Space Research*. v. 49, p. 64 – 74, 2012.

BARATOUX, D., MANGOLD, N., FORGET, F., CORD, A., PINET, P., DAYDOU, Y., JEHL, A., MASSON, P., NEUKUM, G. The role of the wind-transported dust in slope streaks activity: Evidence from the HRSC data. *Icarus*. v.183, p.30–45, 2006.

BELL, J. F., RICE, M. S., JOHNSON, J. R., and HARE, T. M. Surface albedo observations at Gusev Crater and Meridiani Planum, Mars, *J. Geophys. Res.*, 113, E06S18, doi:10.1029/2007JE002976, 2008.

BELL, J. F., JOSEPH, J., SOHL-DICKSTEIN, J. N., ARNESON, H. M., JOHNSON, M. J. In-flight calibration and performance of the Mars Exploration Rover Panoramic Camera (Pancam) instruments. *J. Geophys. Res.* 111, E02S03., 2006.

BELL, J. F., MALIN, M. C., CAPLINGER, M. A., FAHLE, J. , WOLFF, M. J. , CANTOR, B. A. , GHAEMI, J. T. , POSIOLOVA, L. V., RAVINE, M. A., SUPULVER, K. D., CALVIN, W. M., CLANCY, R. T. , EDGETT, K. S., EDWARDS, L. J., HABERLE, R. M., HALE, A., LEE, S. W., RICE, M. S., THOMAS, P. C., and WILLIAMS, R. M. E. Calibration and Performance of the Mars Reconnaissance Orbiter Context Camera (CTX). *The International Journal of Mars Science and Exploration*. MARS 8, 1-14, 2013

BERGONIO, J. R. ROTTAs, k. M., SCHORGHOFER, N. Properties of Martian slope streak populations. *Icarus*, 225, 194-199, 2013.

BRUSNIKIN, E. S., KRESLAVSKY, M. A., KARACHEVTSEVA P. I., ZUBAREV, A. E., PATRATIY, V. D., HEAD J. W. Slope streaks on Mars: Analysis of geometric parameters. In: *46th Lunar Planet. Sci.*, 2015.

CHILTON, H. and PHILLIPS, C. Temporal Contrast Changes in Dark Slope Streak on Mars. In: *44th Lunar and Planetary Science Conference*, 2013.

HUANG, F. C., BEYER, R. A. and BRIDGES, N. T. Modification of Martian slope streaks by eolian processes, *Icarus*, 205, 154–164, 2010.

DING, W., STEPINSKI, T. F., BANDEIRA, L., VILALTA, R., WU, Y., Lu, Z., CAO, T. Automatic detection of craters in planetary images: Fan embedded framework using feature selection and boosting. *In*

Proceedings of the 19th ACM International Conference on Information and Knowledge Management. p. 749–758., 2010.

ELIASON, E. M., ANDERSON, J. A., BARRETT, J. M., BECKER, K. J., BECKER, T. L., COOK, D. A., SODERBLOM, L. A., SUCHARSKI, T. L. and THOMPSON, K. T. ISIS Image processing capabilities for MGS/MOC imaging data. In: *Lunar Planet. Sci. XXXII*. Abstract 2081, 2001.

FACON, J. *Morfologia Matemática: Teorias e Exemplos*. Editor Jacques Facon, Gráfica Universitária Champagnat da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, xii, 320p: il, 1996.

FERGUSON, H. M e LUCCHITTA, B. K. *Dark streaks on talus slopes, Mars, in: Planetary Geology and Geophysics Program Report*, PP. 188-190, 1984.

GERSTELL, M.F., AHARONSON, O., SCHOGHOFER, N. A distinct class of avalanche scars on Mars. *Icarus* 168, 122–130, 2005.

GOLAY M., Hexagonal parallel pattern transformations, *IEEE Trans. Comp.*, C-18, 8, 733-740., 1969.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. *Digital Image Processing*. 3th Edition. Prentice Hall. 624 p., 2010.

HAPKE B. *Theory of Reflectance and Emittance Spectroscopy*, Cambridge Univ. Press, New York, 455 pp, 1993.

HEAD, J.W., MARCHANT, D.R., DICKSON, J.L., LEVY, J.S., MORGAN, G.A.. Slope streaks in the Antarctic Dry Valleys: Characteristics, candidate formation mechanisms, and implications for slope streak formation in the martian environment. In: *Lunar Planet. Sci. XXXVIII*. Abstract 1935, 2007.

JENSEN, J. R. *Sensoriamento Remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres*. São José dos Campos – SP: Parêntese, 2009. 598 p.

KRESLAVSKY, M. A.; HEAD, J. W. Slope streaks on Mars: A new “wet” mechanism. *Icarus*. v.201, p.517-527, 2009.

KULLBACK, S. *Information Theory and Statistics*. John Wiley and Sons, New York, NY, 1959.

LI, W., Di, K., YUE, Z., LIU, Y., SUN, S. Automated Detection of Martian Gullies from HiRISE Imagery, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Volume 81, Issue 12, Pages 913-920, December 2015.

MALIN, M. C, DANIELSON G. E, INGERSOLL, A. P, MASURSKY, H, VEVERKA, J, RAVINE, M. A, SOULANILLE, T. A. The Mars Observer Camera. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 97(E5), 7699-7718, 1992.

MALIN, M. C. e EDGETT, K. S. Mars global surveyor Mars orbiter camera: Interplanetary Cruise through primary mission. *J. Geophysical Res.* 106, E10, 23429–23570, 2001.

MALIN, M. C. Context Camera Investigation on board the Mars Reconnaissance Orbiter, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2006JE002808, 2007.

MARQUES FILHO, Ogê; VIEIRA NETO, Hugo. *Processamento Digital de Imagens*, Rio de Janeiro: Brasport, 1999.

MATHERON, G. *Éléments pour une Théorie des Milieux Poreux*. Paris: Masson et Cie, 168 p., 1967.

McEWEN, A., ELIASON, E. M., BERGSTROM, J. W., BRIDGES, N. T., HANSEN, C. J., DELAMERE, W. A., GRANT, J. A., GULICK, V. C., HERKENHOFF, K. E., KESZTHELYI, L., KIRK, R. L., MELLON, M. T., SQUYRES, S. W., THOMAS, N. and WEITZ, C. M. Mars reconnaissance orbiter high resolution imaging science experiment (HiRISE). *J. Geophysical Res.* 112, 2007.

McEWEN A. S., OJHA, L., DUNDAS C., MATTSON S., BYRNE, S., WRAY J. J., CULL, S. C., MURCHIE S., THOMAS N. and GULICK, V. C. Seasonal flows on warm martian slopes. *Science*, Vol.333 740-743, 2011.

McEWEN A S., DUNDAS C., MATTSON S., TOIGO A., OJHA L., WRAY J., CHOJNACKI, M., BYRNE S., MURCHIE S. and THOMAS N. Recurring slope lineae in equatorial regions of Mars. *Nature Geoscience*, 7. 2014.

MIYAMOTO, H., DOHM, J. M., BEYER, R. A. and BAKER, V. R. Fluid dynamical implications of anastomosing slope streaks on Mars, *J. Geophys. Res.*, 109, E06008, 2004.

MOLLOY, I. and STEPINSKI, T. F. Automatic mapping of valley networks on Mars. *Comput. Geosci.* v. 33, n. 6, p. 728–738, 2007.

MORRIS, E.C. Aureole deposits of the martian volcano Olympus mons. *J. Geophys. Res.* 87, 1164–1178, 1982.

MUSHKIN, A., GILLESPIE, A. R., MONTGOMERY, D. R., SCHREIBER, B. C. and ARVIDSON, R. E. Spectral constraints on the composition of low-albedo slope streaks in the Olympus Mons Aureole, *Geophys. Res. Lett.*, 37, 2010.

NASA. Mars Global Surveyor Arrival, Press kit. Nasa, 1997. Disponível em: <<http://mars.jpl.nasa.gov/missions/past/globalsurveyor.html>>. Acesso em: março de 2013.

OJHA, L., WILHEIM, M. B., MURCHIE, S. L., McEwen, A. S., WRAY J. J., HANLEY, J., MASSÉ, M., CHOJNACKI, M. Spectral evidence for hydrated salts in recurring slope lineae on Mars. *Nature Geoscience*, Vol. 8, 829-832, 2015.

OTSU, N. A threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, v. 9, n. 1, p. 62-69, 1979.

PEDROSA, M. M.; NOGUEIRA, J. R.; SILVA, E. A. Application of Morphological Operators In Detection Impact Craters On Mars. In: *Lunar Planet. Sci. XLII*. Abstract 1987, 2011.

PINA, P. Caracterização, Modelação e Simulação de estruturas com base na Morfologia Matemática. *Tese de doutoramento*. Universidade Técnica de Lisboa – Instituto superior Técnico, 1998.

PONZONI, F.J.; PINTO, C. T.; LAMPARELLI, R. A. C.; JUNIOR, J. Z.; ANTUNES, M. A. H. Calibração de Sensores Orbitais. São Paulo, Oficina de Textos, 2015.

PHILLIPS, C., BURR, D. M., BEYER, R. A. Mass movement within a slope streak on Mars. *Geophysical Research Letters*, VOL. 34, L21202, doi:10.1029/2007GL031577, 2007

RICHARDS, A. J. Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction. 5 ed. Canberra, Austrália: Springer-Verlag. 494 p., 2012.

SALAMUNICCAR, G.; LONCARIC, S.; PINA, P.; BANDEIRA, L.; SARAIVA, J. MA130301GT Catalogue of Martian impact craters and advanced evaluation of crater detection algorithms using diverse topography and image datasets. *Planetary and Space Science*. v. 59, p. 111-131, 2011.

SCHORGHOFER N., AHARONSON O., KHATIWALA S. Slope streaks on Mars: Correlations with surface properties and the potential role of water. *Geophysical Research Letters* 29, 2126: 41-1-41-4, 2002.

SCHORGHOFER, N; AHARONSON, O; GERSTELL, M. F; TATSUMI, L; Three decades of slope streak activity on Mars. *Icarus*. v. 191, p. 132-140, 2007.

SCHORGHOFER, N e KING, C. M. Sporadic formation of slope streaks on Mars. *Icarus*. v.216, p. 159-168, 2011.

SCHOWENGERDT, R. A. Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing. Academic Press, 3. ed. 560p, 2007.

SDC Morphology Toolbox. *SDC Information Systems*. Disponível em: <<http://www.sdc.com.br/morphology>>. Acesso em: abril de 2013;

SERRA, J. *Image analysis and mathematical morphology*. London: Academic Press, 1982. 610p.

SHANNON, C. E. A mathematical theory of communication. *Bell Syst. Tech. J.* 27, 379–423, 623–656, 1948.

SOILLE, P. *Morphological Image Analysis: Principles and Applications*, 2ed. Berlin: Springer-Verlag, 2004.

STATELLA, T.; PINA, P.; SILVA, E.A. Image Processing Algorithm for the Identification of Martian Dust Devil Tracks in MOC and HiRISE Images. *Planetary and Space Science*. v. 70, p. 46-58, 2012.

SULLIVAN, R., THOMAS, P., VEVERKA, J., MALIN, M., EDGETT, K. Mass movement slope streaks imaged by the Mars Orbiter Camera. *Journal of Geophysical Research*. v.106, n. E10, p.23607–23633, 2001.

WAGSTAFF, K. L; PANETA, J; ANSAR, GREELEY, R; HOFFER M. P, BUNTE, M., SCHORGHOFER, N., KRESLAVSKY. Dynamic Landmarking for Surface Feature Identification and Change Detection. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, v. 3, n. 3, Article 49, 2012.

WILLIAMS, S. H. Dark talus streaks on Mars are similar to Aeolian dark streaks, in: *Lunar Planet. Sci. XXII*, 1509-1510, 1991.

APÊNDICE I – Imagens utilizadas no método de detecção

Sensor	Imagem	Data de aquisição	Projeção	Longitude do Centro	Latitude do Centro	Resolução
MOC-NA	AB102403	20/10/1997	Equirectangular	226,02872786	31,26353508	1,3
MOC-NA	AB103502	05/11/1997	Equirectangular	286,69807444	22,23271556	1,63
MOC-NA	AB111304	01/02/1998	Equirectangular	176,19268685	-5,92320201	3,47
MOC-NA	FHA01162	20/03/1999	Equirectangular	217,02601692	26,19275637	3,03
MOC-NA	M0000087	03/04/1999	Equirectangular	217,46117616	30,04646181	1,51
MOC-NA	M0001728	11/04/1999	Equirectangular	238,23398410	2,72347785	2,83
MOC-NA	M0002117	14/04/1999	Equirectangular	156,05608477	6,72477368	4,35
MOC-NA	M0101278	12/05/1999	Equirectangular	212,82629632	25,67108854	1,21
MOC-NA	M0201567	13/06/1999	Equirectangular	238,95558606	2,93226734	5,71
MOC-NA	M0301743	10/07/1999	Equirectangular	238,78474731	3,05299022	5,72
MOC-NA	M0305769	30/07/1999	Equirectangular	223,06348464	22,95642264	4,48
MOC-NA	M0307769	09/08/1999	Equirectangular	216,33314493	25,04017461	6,03
MOC-NA	M0307769	09/08/1999	Equirectangular	216,3331449	25,04017461	6,03
MOC-NA	M0400072	10/08/1999	Equirectangular	46,99358918	7,48987825	2,89
MOC-NA	M0402746	23/08/1999	Equirectangular	30,55753213	20,54569365	5,99
MOC-NA	M0801170	05/10/1999	Equirectangular	238,79191613	2,41034218	5,68
MOC-NA	M0806884	28/10/1999	Equirectangular	226,16742082	26,98465113	4,52
MOC-NA	M0900039	01/11/1999	Equirectangular	238,17249400	2,81172342	2,85
MOC-NA	M0901872	08/11/1999	Equirectangular	239,13799545	2,93267101	1,13
MOC-NA	M0902358	09/11/1999	Equirectangular	26,75137703	2,17095494	2,9
MOC-NA	M0904872	18/11/1999	Equirectangular	176,24006639	-5,95517065	2,89
MOC-NA	M1501460	22/05/2000	Equirectangular	212,511408841	21,61739296	3
MOC-NA	M1600596	12/06/2000	Equirectangular	227,14694595	26,54171690	6,02
MOC-NA	M2000701	12/10/2000	Equirectangular	41,69923046	10,41248321	2,94
MOC-NA	E0100578	09/02/2001	Equirectangular	238,65889313	2,63352353	2,87
MOC-NA	E0201273	15/03/2001	Equirectangular	226,793270310	24,61221666	6,08
MOC-NA	E0201355	16/03/2001	Equirectangular	213,77189874	28,85610243	3,07
MOC-NA	E0302197	25/04/2001	Equirectangular	213,46832426	28,65214276	4,58
MOC-NA	E0401896	24/05/2001	Equirectangular	238,95600163	2,87375052	5,77
MOC-NA	E0500840	09/06/2001	Equirectangular	239,15021942	2,58948653	4,31
MOC-NA	E1001445	10/11/2001	Equirectangular	41,61959064	10,76934824	6,17
MOC-NA	E1001445	10/11/2001	Equirectangular	41,61959064	10,76934824	6,17
MOC-NA	E1300575	07/02/2002	Equirectangular	221,22948219	26,00627542	6,36
MOC-NA	E1400638	12/03/2002	Equirectangular	225,61375144	28,72761311	6,37
MOC-NA	E1500356	12/04/2002	Equirectangular	227,13645016	26,56383352	6,34

APÊNDICE I – Imagens utilizadas no método de detecção

Sensor	Imagem	Data de aquisição	Projeção	Longitude do Centro	Latitude do Centro	Resolução
MOC-NA	E1700689	10/06/2002	Equirectangular	226,19519396	26,89270389	4,75
MOC-NA	R0900045	01/09/2003	Equirectangular	222,97601833	29,27130614	6,4
MOC-NA	R0900701	08/09/2003	Equirectangular	223,76327219	23,23182086	1,51
MOC-NA	R0904113	29/09/2003	Equirectangular	238,63681880	3,31264641	4,51
MOC-NA	R1104122	27/11/2003	Equirectangular	18,15085760	7,77960202	3,11
MOC-NA	R1200731	08/12/2003	Equirectangular	222,40565838	29,16614757	4,88
MOC-NA	R1201917	17/12/2003	Equirectangular	40,06942170	8,82479017	3,07
MOC-NA	R1202944	24/12/2003	Equirectangular	224,67794137	27,44060429	3,17
MOC-NA	R1601030	13/04/2004	Equirectangular	40,04617747	8,81530844	3,09
MOC-NA	R1700498	06/05/2004	Equirectangular	39,96231143	8,76477760	3,08
MOC-NA	R1701267	14/05/2004	Equirectangular	223,98733962	28,66988419	6,37
MOC-NA	R1702012	23/05/2004	Equirectangular	226,81655189	26,18104245	6,32
MOC-NA	R1800515	07/06/2004	Equirectangular	224,15274459	26,53457415	4,77
MOC-NA	R1802003	25/06/2004	Equirectangular	228,37562178	29,82177204	4,82
MOC-NA	R1900932	13/07/2004	Equirectangular	221,04944343	27,76014440	5,11
MOC-NA	R1901050	15/07/2004	Equirectangular	221,03291735	27,143622156	6,38
MOC-NA	S0702169	20/06/2005	Equirectangular	25,91736735	3,41154283	6,16
MOC-NA	S0902155	20/08/2005	Equirectangular	221,06537658	27,69688769	4,82
MOC-NA	S1102137	21/10/2005	Equirectangular	221,32791622	26,04559876	1,58
MOC-NA	S1202239	23/11/2005	Equirectangular	224,93468357	27,20793426	1,59
MOC-NA	S1303144	01/01/2006	Equirectangular	26,97385377	1,95503343	3,05
MOC-NA	S1500783	08/02/2006	Equirectangular	25,75348277	1,82567962	3,06
MOC-NA	S1501650	16/02/2006	Equirectangular	225,89606214	25,57730144	3,17
MOC-NA	S1601059	12/03/2006	Equirectangular	227,14305886	26,54855015	4,75
CTX	P03_002276_2067_XI_26N132W	20/01/2007	Equirectangular	227,11532860	26,49455560	5,67
CTX	P03_002278_1740_XI_06S183W	20/01/2007	Equirectangular	176,22045574	-6,00924026	5,31
CTX	P11_005283_2058_XN_25N147W	12/09/2007	Equirectangular	212,76397825	25,56992376	5,70
CTX	P12_005567_1934_XN_13N339W	04/10/2007	Equirectangular	20,70503906	13,30415051	5,48
CTX	P14_006687_1928_XN_12N318W	30/12/2007	Equirectangular	41,51794970	12,71731771	5,47
CTX	P16_007347_1936_XI_13N339W	19/02/2008	Equirectangular	21,03725171	13,50768523	5,53
CTX	P20_008750_2067_XN_26N132W	08/06/2008	Equirectangular	227,25479122	26,50101227	5,67
CTX	B01_009944_1887_XI_08N329W	09/09/2008	Equirectangular	303,25071206	8,61022006	5,45
CTX	B07_012383_1903_XN_10N318W	18/03/2009	Equirectangular	41,72465448	10,19457958	5,45
CTX	B10_013642_2067_XI_26N132W	24/06/2009	Equirectangular	227,12534251	26,50183910	5,63
CTX	B19_016926_2066_XI_26N147W	07/03/2010	Equirectangular	212,61268386	26,42604554	5,72

APÊNDICE I – Imagens utilizadas no método de detecção

Sensor	Imagem	Data de aquisição	Projeção	Longitude do Centro	Latitude do Centro	Resolução
CTX	B22_018244_2065_XI_26N132W	18/06/2010	Equirectangular	227,15135120	26,31168642	5,73
CTX	G11_022339_1886_XI_08N329W	03/05/2011	Equirectangular	303,36515245	8,52574830	5,46
CTX	G12_022846_2067_XI_26N132W	11/06/2011	Equirectangular	227,12071919	26,51245244	5,70
CTX	G12_022991_2073_XN_27N133W	22/06/2011	Equirectangular	227,08177277	27,04429050	5,70
CTX	G18_025114_2062_XN_26N132W	05/12/2011	Equirectangular	227,44266650	25,99673269	5,65
CTX	G22_026796_1886_XI_08N329W	14/04/2012	Equirectangular	303,25323781	8,55885924	5,44
CTX	D01_027725_2078_XI_27N133W	25/06/2012	Equirectangular	226,97513115	27,55367165	5,71
CTX	D13_032242_1887_XI_08N329W	12/06/2013	Equirectangular	303,16703741	8,63301027	5,46
CTX	D13_032327_2067_XI_26N132W	19/06/2013	Equirectangular	227,11748027	26,47980189	5,68
CTX	D14_032540_1752_XI_04S184W	06/07/2013	Equirectangular	176,07738862	-4,84149984	5,36
CTX	D19_034484_1943_XI_14N339W	04/12/2013	Equirectangular	20,90290290	14,16203245	6,14
CTX	D19_034490_2057_XI_25N147W	05/12/2013	Equirectangular	212,72515823	25,49531226	5,74
CTX	D19_034655_1886_XN_08N329W	17/12/2013	Equirectangular	303,47814258	8,58298785	5,45
HiRISE	PSP_001656_2175_RED	03/12/2006	Equirectangular	229,1858348	37,37145523	0,58
HiRISE	PSP_008513_2060_BG12_1	20/05/2008	Equirectangular	220,1846687	25,56185468	1,16
HiRISE	PSP_008513_2060_RED2_1	20/05/2008	Equirectangular	220,2076837	25,56163809	0,29
HiRISE	PSP_008513_2060_RED7_0	20/05/2008	Equirectangular	220,1466811	25,55529586	0,29
HiRISE	PSP_008513_2060_IR10_1	20/05/2008	Equirectangular	220,1846420	25,56171655	1,16
HiRISE	ESP_011730_2105_IR11_0	26/01/2009	Equirectangular	227,4391068	30,00651723	1,16
HiRISE	ESP_011730_2105_IR11_1	26/01/2009	Equirectangular	227,4447393	30,00708652	1,16
HiRISE	ESP_011730_2105_RED6_0	26/01/2009	Equirectangular	227,4282869	30,00294177	0,29
HiRISE	ESP_011730_2105_RED6_1	26/01/2009	Equirectangular	227,4340555	30,00350487	0,29
HiRISE	ESP_011730_2105_BG12_0	26/01/2009	Equirectangular	227,4500829	30,00777454	1,16
HiRISE	ESP_011730_2105_BG12_1	26/01/2009	Equirectangular	227,4557143	30,00834550	1,16
HiRISE	ESP_032288_2045_RED	22/05/2013	Equirectangular	213,0891438	24,46194217	0,29

AMAZONIS

Código de referência do algoritmo	Data	Albedo interior <i>slope streak</i>	Albedo vizinhança <i>slope streak</i>	Taxa de contraste
1_29_2000_M21	2000,8602	0,281	0,331	0,848
1_29_2001_E05	2001,4246	0,224	0,253	0,885
1_29_2010_B19	2010,1808	0,189	0,194	0,977
1_29_2013_D19	2013,9287	0,190	0,195	0,976
2_30_2000_M21	2000,8602	0,230	0,295	0,779
2_30_2001_e05	2001,4246	0,222	0,263	0,842
2_30_2002_E18	2002,5041	0,226	0,271	0,833
2_30_2010_B19	2010,1808	0,176	0,183	0,960
2_30_2013_D19	2013,9287	0,178	0,186	0,957
3_33_2000_m21	2000,8602	0,243	0,320	0,759
3_33_2001_e05	2001,4246	0,197	0,238	0,827
3_33_2010_B19	2010,1808	0,176	0,186	0,947
3_33_2013_D19	2013,9287	0,175	0,181	0,963
4_34_2000_m21	2000,8602	0,493	0,535	0,921
4_34_2002_E18	2002,5041	0,406	0,437	0,930
4_34_2010_b19	2010,1808	0,238	0,243	0,982
4_34_2013_D19	2013,9287	0,233	0,239	0,978
5_34_2000_m21	2000,8602	0,440	0,527	0,835
5_34_2002_E18	2002,5041	0,367	0,435	0,842
5_34_2010_b19	2010,1808	0,231	0,242	0,957
5_34_2013_D19	2013,9287	0,226	0,236	0,959
6_35_2000_M21	2000,8602	0,222	0,332	0,669
6_35_2001_E05	2001,4246	0,208	0,272	0,766
6_35_2010_B19	2010,1808	0,193	0,200	0,965
6_35_2013_D19	2013,9287	0,190	0,198	0,960
7_36_2000_M21	2000,8602	0,480	0,548	0,876
7_36_2010_B19	2010,1808	0,249	0,259	0,961
7_36_2013_D19	2013,9287	0,238	0,249	0,953
8_36_2000_M21	2000,8602	0,457	0,539	0,848
8_36_2010_B19	2010,1808	0,247	0,257	0,959
8_36_2013_D19	2013,9287	0,234	0,244	0,956
9_37_2001_E051	2001,4246	0,230	0,311	0,739
9_37_2002_E18	2002,5041	0,196	0,270	0,726
9_37_2010_B19	2010,1808	0,189	0,197	0,959
9_37_2013_D19	2013,9287	0,182	0,188	0,968
10_38_2000_M21	2000,8602	0,220	0,310	0,708
10_38_2001_E05	2001,4246	0,208	0,264	0,788
10_38_2010_B19	2010,1808	0,188	0,197	0,955
10_38_2013_D19	2013,9287	0,186	0,192	0,968
11_38_2000_M21	2000,8602	0,473	0,529	0,894
11_38_2010_B19	2010,1808	0,244	0,250	0,977
11_38_2013_D19	2013,9287	0,238	0,245	0,971
12_39_2000_M21	2000,8602	0,487	0,532	0,914
12_39_2010_B19	2010,1808	0,245	0,252	0,972
12_39_2013_D19	2013,9287	0,241	0,247	0,974
13_40_2000_M21	2000,8602	0,228	0,298	0,768
13_40_2001_e05	2001,4246	0,212	0,254	0,835
13_40_2002_E18	2002,5041	0,228	0,266	0,858
13_40_2010_B19	2010,1808	0,177	0,182	0,969
13_40_2013_D19	2013,9287	0,178	0,184	0,971

ARABIA

Código de referência do algoritmo	Data	Albedo interior <i>slope streak</i>	Albedo vizinhança <i>slope streak</i>	Taxa de contraste
1_41_2001_e10	2001,8602	0,458	0,529	0,865
1_41_2007_P14	2007,9972	0,174	0,180	0,965
1_41_2009_B07	2009,2109	0,229	0,235	0,975
2_41_2001_e10	2001,8602	0,444	0,566	0,785
2_41_2007_P14	2007,9972	0,172	0,178	0,962
2_41_2009_B07	2009,2109	0,227	0,235	0,966
3_42_2001_E10	2001,8602	0,454	0,499	0,908
3_42_2007_P14	2007,9972	0,200	0,206	0,970
3_42_2009_B07	2009,2109	0,247	0,252	0,983
4_42_2001_E10	2001,8602	0,458	0,510	0,898
4_42_2007_P14	2007,9972	0,199	0,207	0,964
4_42_2009_B07	2009,2109	0,247	0,252	0,983
5_43_1999_M03	1999,6054	0,357	0,462	0,772
5_43_2002_E20	2002,7041	0,240	0,259	0,929
5_43_2008_P17	2008,2493	0,156	0,165	0,948
5_43_2011_G11	2011,3369	0,216	0,227	0,952
5_43_2012_G22	2012,2849	0,155	0,159	0,972
5_43_2013_D13	2013,4465	0,200	0,207	0,968
5_43_2013_D19	2013,9616	0,153	0,158	0,967
6_43_1999_M03	1999,6054	0,300	0,453	0,662
6_43_2002_E20	2002,7041	0,208	0,234	0,888
6_43_2008_P17	2008,2493	0,155	0,164	0,948
6_43_2011_G11	2011,3369	0,215	0,229	0,937
6_43_2012_G22	2012,2849	0,155	0,159	0,975
6_43_2013_D13	2013,4465	0,199	0,209	0,955
6_43_2013_D19	2013,9616	0,153	0,158	0,966
7_43_1999_M03	1999,6054	0,528	0,578	0,913
7_43_2002_E20	2002,7041	0,322	0,333	0,967
7_43_2008_P17	2008,2493	0,170	0,188	0,904
7_43_2011_G11	2011,3369	0,218	0,231	0,940
7_43_2012_G22	2012,2849	0,174	0,187	0,932
7_43_2013_D13	2013,4465	0,204	0,213	0,957
7_43_2013_D19	2013,9616	0,170	0,179	0,950
8_43_1999_M03	1999,6054	0,374	0,567	0,660
8_43_2002_E20	2002,7041	0,264	0,324	0,815
9_44_1999_M03	1999,6054	0,616	0,704	0,875
9_44_2002_E20	2002,7041	0,435	0,471	0,923
9_44_2008_P17	2008,2493	0,228	0,245	0,929
9_44_2011_G11	2011,3369	0,229	0,240	0,953
9_44_2012_G22	2012,2849	0,247	0,264	0,938
9_44_2013_D13	2013,4465	0,219	0,228	0,961
9_44_2013_D19	2013,9616	0,217	0,229	0,947
10_44_1999_M03	1999,6054	0,630	0,720	0,874
10_44_2002_E20	2002,7041	0,416	0,437	0,951
10_44_2008_P17	2008,2493	0,225	0,237	0,949
10_44_2011_G11	2011,3369	0,234	0,239	0,979
10_44_2012_G22	2012,2849	0,243	0,250	0,972
10_44_2013_D13	2013,4465	0,221	0,225	0,980
10_44_2013_D19	2013,9616	0,214	0,220	0,976
11_45_1999_M03	1999,6054	0,565	0,622	0,909
11_45_2002_E20	2002,7041	0,371	0,394	0,940
11_45_2008_P17	2008,2493	0,203	0,213	0,955

11_45_2011_G11	2011,3369	0,230	0,240	0,960
11_45_2012_G22	2012,2849	0,221	0,229	0,963
11_45_2013_D13	2013,4465	0,216	0,223	0,970
11_45_2013_D19	2013,9616	0,200	0,206	0,967
12_46_1999_M09	1999,8657	0,278	0,358	0,777
12_46_2008_P17	2008,2493	0,161	0,173	0,933
12_46_2011_G11	2011,3369	0,204	0,211	0,965
12_46_2012_G22	2012,2849	0,165	0,174	0,950
12_46_2013_D13	2013,4465	0,194	0,199	0,972
12_46_2013_D19	2013,9616	0,157	0,161	0,973
13_47_1999_M09	1999,8657	0,328	0,440	0,745
13_47_2008_P17	2008,2493	0,165	0,185	0,891
13_47_2011_G11	2011,3369	0,220	0,232	0,946
13_47_2012_G22	2012,2849	0,168	0,182	0,925
13_47_2013_D13	2013,4465	0,204	0,213	0,961
13_47_2013_D19	2013,9616	0,162	0,172	0,940
14_49_1999_M03	1999,6054	0,317	0,502	0,632
14_49_2002_E20	2002,7041	0,230	0,285	0,807
14_49_2008_P17	2008,2493	0,161	0,180	0,897
14_49_2011_G11	2011,3369	0,216	0,229	0,942
14_49_2012_G22	2012,2849	0,162	0,175	0,926
14_49_2013_D13	2013,4465	0,201	0,210	0,957
14_49_2013_D19	2013,9616	0,159	0,168	0,944
15_50_2008_P17	2008,2493	0,164	0,187	0,876
15_50_2011_G11	2011,3369	0,214	0,232	0,921
15_50_2012_G22	2012,2849	0,165	0,180	0,916
15_50_2013_D13	2013,4465	0,200	0,213	0,940
15_50_2013_D19	2013,9616	0,162	0,173	0,932
16_50_2008_P17	2008,2493	0,166	0,192	0,861
16_50_2011_G11	2011,3369	0,215	0,235	0,915
16_50_2012_G22	2012,2849	0,171	0,189	0,904
16_50_2013_D13	2013,4465	0,202	0,216	0,937
16_50_2013_D19	2013,9616	0,167	0,180	0,930
17_51_2001_e10	2001,8602	0,452	0,563	0,804
17_51_2007_P14	2007,9972	0,173	0,182	0,952
17_51_2009_B07	2009,2109	0,229	0,237	0,967
18_53_1999_M03	1999,6054	0,400	0,504	0,795
18_53_2002_E20	2002,7041	0,275	0,301	0,914
18_53_2008_P17	2008,2493	0,173	0,182	0,950
18_53_2011_G11	2011,3369	0,224	0,229	0,980
18_53_2012_G22	2012,2849	0,172	0,179	0,957
18_53_2013_D13	2013,4465	0,207	0,210	0,986
18_53_2013_D19	2013,9616	0,169	0,173	0,977
19_53_1999_M03	1999,6054	0,371	0,555	0,669
19_53_2002_E20	2002,7041	0,270	0,332	0,811
19_53_2008_P17	2008,2493	0,174	0,193	0,900
19_53_2011_G11	2011,3369	0,220	0,233	0,947
19_53_2012_G22	2012,2849	0,176	0,189	0,931
19_53_2013_D13	2013,4465	0,205	0,214	0,961
19_53_2013_D19	2013,9616	0,171	0,180	0,951
20_54_1999_M03	1999,6054	0,620	0,702	0,883
20_54_2002_E20	2002,7041	0,439	0,473	0,930
20_54_2008_P17	2008,2493	0,229	0,246	0,932
20_54_2011_G11	2011,3369	0,229	0,239	0,955
20_54_2012_G22	2012,2849	0,250	0,266	0,940
20_54_2013_D13	2013,4465	0,219	0,227	0,966
20_54_2013_D19	2013,9616	0,219	0,231	0,946
21_54_1999_M03	1999,6054	0,588	0,706	0,833

21_54_2002_E20	2002,7041	0,404	0,452	0,894
21_54_2008_P17	2008,2493	0,222	0,241	0,921
21_54_2011_G11	2011,3369	0,230	0,244	0,943
21_54_2012_G22	2012,2849	0,240	0,259	0,927
21_54_2013_D13	2013,4465	0,218	0,229	0,955
21_54_2013_D19	2013,9616	0,212	0,226	0,938
22_54_1999_M03	1999,6054	0,565	0,714	0,791
22_54_2002_E20	2002,7041	0,396	0,439	0,901
22_54_2008_P17	2008,2493	0,218	0,237	0,920
22_54_2011_G11	2011,3369	0,227	0,241	0,940
22_54_2012_G22	2012,2849	0,231	0,251	0,920
22_54_2013_D13	2013,4465	0,215	0,226	0,952
22_54_2013_D19	2013,9616	0,207	0,220	0,940
23_55_1999_M03	1999,6054	0,641	0,704	0,910
23_55_2002_E20	2002,7041	0,422	0,452	0,932
23_55_2008_P17	2008,2493	0,226	0,241	0,938
23_55_2011_G11	2011,3369	0,235	0,244	0,966
23_55_2012_G22	2012,2849	0,246	0,259	0,951
23_55_2013_D13	2013,4465	0,222	0,228	0,972
23_55_2013_D19	2013,9616	0,217	0,226	0,961
24_55_1999_M03	1999,6054	0,611	0,704	0,868
24_55_2002_E20	2002,7041	0,416	0,445	0,935
24_55_2008_P17	2008,2493	0,223	0,238	0,936
24_55_2011_G11	2011,3369	0,231	0,241	0,955
24_55_2012_G22	2012,2849	0,242	0,256	0,944
24_55_2013_D13	2013,4465	0,219	0,227	0,964
24_55_2013_D19	2013,9616	0,213	0,223	0,954
25_56_1999_M09	1999,8657	0,316	0,398	0,794
25_56_2011_G11	2011,3369	0,213	0,223	0,954
25_56_2013_D13	2013,4465	0,199	0,204	0,978
26_56_1999_M09	1999,8657	0,247	0,336	0,737
26_56_2011_G11	2011,3369	0,191	0,205	0,934
26_56_2013_D13	2013,4465	0,185	0,194	0,954
27_57_1999_M09	1999,8657	0,293	0,366	0,802
27_57_2011_G11	2011,3369	0,203	0,215	0,942
27_57_2013_D13	2013,4465	0,191	0,199	0,957

THARSIS

Código de referência do algoritmo	Data	Albedo interior <i>slope streak</i>	Albedo vizinhança <i>slope streak</i>	Taxa de contraste
1_02_2000_M16	2000,4465	0,3870	0,4743	0,8161
1_02_2002_E15	2002,2794	0,4269	0,5323	0,8019
1_02_2006_S16	2006,1945	0,3710	0,4686	0,7918
1_02_2008_P20	2008,4356	0,2216	0,2372	0,9345
1_02_2011_G12	2011,4438	0,2432	0,2555	0,9519
1_02_2012_D01	2012,4821	0,2323	0,2494	0,9314
1_02_2013_D13	2013,4700	0,2331	0,2437	0,9566
2_02_2000_M16	2000,4465	0,4438	0,4894	0,9068
2_02_2002_E15	2002,2794	0,4964	0,5809	0,8545
2_02_2008_P20	2008,4356	0,2209	0,2345	0,9420
2_02_2011_G12	2011,4438	0,2535	0,2683	0,9450
2_02_2012_D01	2012,4821	0,2318	0,2450	0,9459
2_02_2013_D13	2013,4700	0,2406	0,2515	0,9568
3_04_2000_M16	2000,4465	0,2874	0,3681	0,7808
3_04_2007_P03	2007,0547	0,1869	0,2038	0,9170
3_04_2008_P20	2008,4356	0,1932	0,2081	0,9286
3_04_2010_B22	2010,4630	0,2305	0,2455	0,9388

3_04_2012_D01	2012,4821	0,1989	0,2162	0,9202
3_04_2013_D13	2013,4700	0,1998	0,2117	0,9436
4_05_2000_M16	2000,4465	0,3866	0,4205	0,9193
4_05_2007_P03	2007,0547	0,2275	0,2401	0,9475
4_05_2008_P20	2008,4356	0,2167	0,2261	0,9583
4_05_2009_B10	2009,4794	0,2267	0,2353	0,9632
4_05_2010_B22	2010,4630	0,2491	0,2599	0,9584
4_05_2012_D01	2012,4821	0,2306	0,2432	0,9481
4_05_2013_D13	2013,4700	0,2245	0,2331	0,9630
5_06_2007_P03	2007,0547	0,2090	0,2358	0,8864
5_06_2008_P20	2008,4356	0,2072	0,2288	0,9058
5_06_2009_B10	2009,4794	0,2089	0,2212	0,9445
5_06_2010_B22	2010,4630	0,2411	0,2632	0,9159
5_06_2012_D01	2012,4821	0,2209	0,2468	0,8951
5_06_2013_D13	2013,4700	0,2097	0,2228	0,9411
6_07_2000_M16	2000,4465	0,4580	0,5151	0,8891
6_07_2012_D01	2012,4821	0,2402	0,2507	0,9580
6_07_2013_D13	2013,4700	0,2497	0,2570	0,9719
8_09_2000_M16	2000,4465	0,3877	0,4788	0,8097
8_09_2007_P03	2007,0547	0,2430	0,2609	0,9313
8_09_2008_P20	2008,4356	0,2184	0,2321	0,9411
8_09_2010_B22	2010,4630	0,2484	0,2639	0,9414
8_09_2012_D01	2012,4821	0,2403	0,2583	0,9301
8_09_2013_D13	2013,4700	0,2393	0,2492	0,9606
9_10_2000_M16	2000,4465	0,4616	0,5185	0,8902
9_10_2007_P03	2007,0547	0,2544	0,2694	0,9441
9_10_2008_P20	2008,4356	0,2314	0,2415	0,9582
9_10_2012_D01	2012,4821	0,2422	0,2568	0,9430
9_10_2013_D13	2013,4700	0,2509	0,2572	0,9754
10_11_2006_S16	2006,1945	0,3786	0,5030	0,7528
10_11_2007_P03	2007,0547	0,2195	0,2551	0,8605
10_11_2008_P20	2008,4356	0,2067	0,2324	0,8894
10_11_2010_B22	2010,4630	0,2438	0,2688	0,9071
10_11_2012_D01	2012,4821	0,2253	0,2576	0,8744
10_11_2013_D13	2013,4700	0,2302	0,2520	0,9133
11_12_2007_P03	2007,0547	0,2341	0,2715	0,8623
11_12_2008_P20	2008,4356	0,2209	0,2526	0,8746
11_12_2012_D01	2012,4821	0,2397	0,2736	0,8761
11_12_2013_D13	2013,4700	0,2322	0,2540	0,9141
12_13_2000_M16	2000,4465	0,2580	0,3235	0,7974
12_13_2002_E15	2002,2794	0,2570	0,3100	0,8291
12_13_2007_P03	2007,0547	0,1782	0,1876	0,9495
12_13_2010_B22	2010,4630	0,2149	0,2230	0,9635
12_13_2013_D13	2013,4700	0,1875	0,1938	0,9676
13_14_2000_M16	2000,4465	0,3785	0,4587	0,8250
13_14_2007_P03	2007,0547	0,2296	0,2484	0,9245
13_14_2008_P20	2008,4356	0,2241	0,2415	0,9282
13_14_2012_D01	2012,4821	0,2254	0,2485	0,9071
13_14_2013_D13	2013,4700	0,2184	0,2335	0,9354
14_15_2002_E15	2002,2794	0,3454	0,4335	0,7966
14_15_2007_P03	2007,0547	0,2336	0,2539	0,9201
14_15_2008_P20	2008,4356	0,2299	0,2467	0,9319
14_15_2010_B22	2010,4630	0,2437	0,2634	0,9253
14_15_2012_D01	2012,4821	0,2357	0,2588	0,9109
14_15_2013_D13	2013,4700	0,2137	0,2296	0,9307
15_16_2000_M16	2000,4465	0,3225	0,3875	0,8323
15_16_2007_P03	2007,0547	0,2220	0,2334	0,9509

15_16_2008_P20	2008,4356	0,2260	0,2379	0,9502
15_16_2010_B22	2010,4630	0,2459	0,2579	0,9537
15_16_2012_D01	2012,4821	0,2309	0,2443	0,9453
15_16_2013_D13	2013,4700	0,2065	0,2128	0,9702
16_17_2000_M16	2000,4465	0,4494	0,5355	0,8391
16_17_2002_E15	2002,2794	0,5338	0,6142	0,8691
16_17_2007_P03	2007,0547	0,2287	0,2442	0,9365
16_17_2008_P20	2008,4356	0,1964	0,2075	0,9464
16_17_2010_B22	2010,4630	0,2127	0,2225	0,9561
16_17_2012_D01	2012,4821	0,2107	0,2242	0,9401
16_17_2013_D13	2013,4700	0,2426	0,2544	0,9538
17_19_2000_M16	2000,4465	0,3893	0,4620	0,8427
17_19_2002_E15	2002,2794	0,4383	0,5185	0,8453
17_19_2007_P03	2007,0547	0,2370	0,2546	0,9309
17_19_2010_B22	2010,4630	0,2333	0,2487	0,9380
17_19_2013_D13	2013,4700	0,2248	0,2350	0,9567
18_21_2000_M16	2000,4465	0,3799	0,4715	0,8059
18_21_2002_E15	2002,2794	0,4424	0,5341	0,8282
18_21_2007_P03	2007,0547	0,2433	0,2600	0,9356
18_21_2010_B22	2010,4630	0,2345	0,2501	0,9377
18_21_2013_D13	2013,4700	0,2333	0,2437	0,9576
19_22_2000_M16	2000,4465	0,4479	0,4953	0,9043
19_22_2002_E15	2002,2794	0,5026	0,5866	0,8568
19_22_2007_P03	2007,0547	0,2498	0,2626	0,9515
19_22_2010_B22	2010,4630	0,2328	0,2477	0,9399
19_22_2013_D13	2013,4700	0,2398	0,2502	0,9585
20_23_2000_M16	2000,4465	0,3730	0,4987	0,7479
20_23_2002_E15	2002,2794	0,4539	0,5860	0,7746
20_23_2007_P03	2007,0547	0,2281	0,2491	0,9155
20_23_2010_B22	2008,4356	0,2110	0,2325	0,9074
20_23_2013_D13	2013,4700	0,2306	0,2471	0,9334
21_24_2000_M16	2000,4465	0,3934	0,4767	0,8253
21_24_2007_P03	2007,0547	0,2409	0,2579	0,9340
21_24_2010_B22	2010,4630	0,2289	0,2472	0,9261
22_25_2000_M16	2000,4465	0,3797	0,5026	0,7555
22_25_2007_P03	2007,0547	0,2350	0,2557	0,9190
22_25_2010_B22	2010,4630	0,2243	0,2441	0,9187
22_25_2013_D13	2013,4700	0,2363	0,2511	0,9413
23_27_2000_M16	2000,4465	0,3525	0,3945	0,8933
23_27_2002_E15	2002,2794	0,3320	0,3923	0,8464
23_27_2007_P03	2007,0547	0,2322	0,2430	0,9556
23_27_2010_B22	2010,4630	0,2392	0,2553	0,9370
23_27_2013_D13	2013,4700	0,2113	0,2213	0,9548
24_27_2000_M16	2000,4465	0,3157	0,3898	0,8098
24_27_2002_E15	2002,2794	0,4383	0,3894	1,1255
24_27_2007_P03	2007,0547	0,2161	0,2319	0,9320
24_27_2010_B22	2010,4630	0,2242	0,2450	0,9148
24_27_2013_D13	2013,4700	0,2070	0,2183	0,9481