

Desenvolvimento de um banco de dados HiRISE com *slope streaks* marcianos a partir de estimativa de densidade Kernel

Christiano Ribeiro dos Santos Júnior^{1*}, Thiago Statella²

¹Mestre em Geociências, Universidade Federal de Mato Grosso, Brasil.

²Doutor Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista, Brasil.

Histórico do Artigo: Submetido em: 02/10/2023 – Revisado em: 20/11/2023 – Aceito em: 13/12/2023

RESUMO

Slope streaks são feições escuras e alongadas que se formam rapidamente na superfície de Marte. Elas estão ligadas a áreas com baixa inércia térmica e regiões de grande albedo. Esses rastros clareiam gradualmente ao longo dos anos. Compreender sua formação é crucial para entender os fatores ambientais em Marte. Este estudo visa criar um banco de dados de imagens HiRISE contendo *slope streaks*. Esse banco de dados foi construído a partir de um mapa de densidade das imagens da câmera HiRISE a bordo da *sonda Mars Reconnaissance Orbiter (MRO)*. O mapa de densidade Kernel reuniu 217 cenas de 84.772 imagens do *Planetary Imagery Research Laboratory*, e concorda com distribuições globais relatadas na literatura. Isso permite que os pesquisadores encontrem cenas específicas com filtros personalizados e acessem detalhes das imagens HiRISE. As datas de observação incluídas permitem rastrear a evolução dos *slope streaks* ao longo do tempo, identificando tendências e padrões sazonais. Em resumo, este estudo aprofunda nossa compreensão das *slope streaks* em Marte e oferece uma ferramenta valiosa para pesquisa contínua dessas características geológicas únicas na superfície marciana.

Palavras-Chaves: *slope streaks*, Marte, HiRISE.

Development of a HiRISE database with Martian slope streaks using Kernel density estimation

ABSTRACT

Slope streaks are dark and elongated features on Mars that form rapidly on the Martian surface. They are associated with areas of low thermal inertia and regions with high albedo. These streaks gradually lighten over the years. Understanding their formation is crucial for comprehending environmental factors on Mars. This study aims to create a database of HiRISE images containing slope streaks. This database was constructed from a density map of images taken by the HiRISE camera aboard the Mars Reconnaissance Orbiter (MRO). The Kernel density map gathered 217 scenes from 84,772 images from the Planetary Imagery Research Laboratory, and it aligns with global distributions reported in the literature. This enables researchers to locate specific scenes with customized filters and access detailed information about the HiRISE images. The included observation dates allow for tracking the evolution of slope streaks over time, identifying trends and seasonal patterns. In summary, this study deepens our understanding of slope streaks on Mars and provides a valuable tool for ongoing research into these unique geological features on the Martian surface.

Keywords: slope streaks, Mars, HiRISE.

Keywords: slope streaks, Mars, HiRISE.

dos Santos Júnior, C. R., & Statella, T. (2023). Desenvolvimento de um banco de dados HiRISE com slope streaks marcianos a partir de estimativa de densidade Kernel. *Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto*, v.4, n.3, p.56-64.



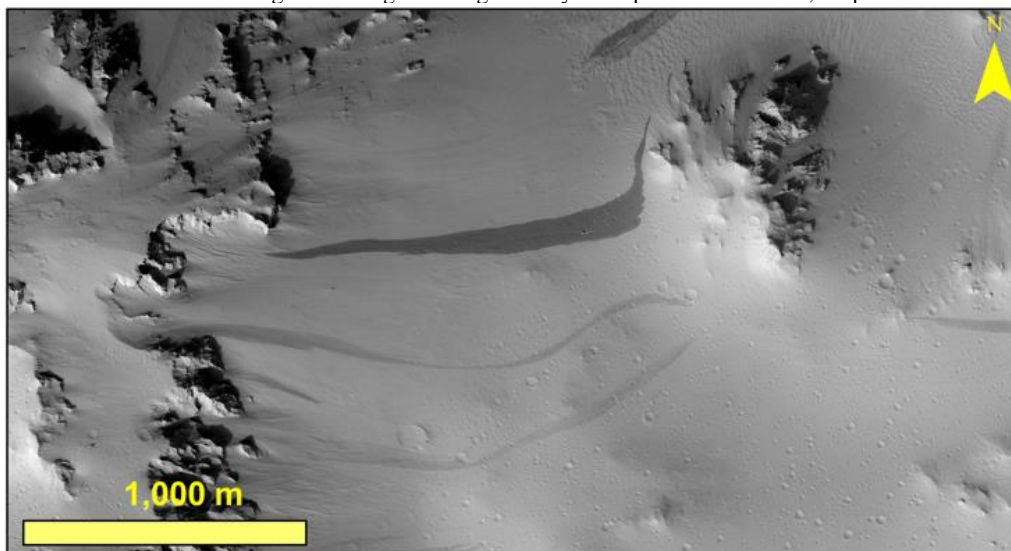
1. Introdução

Slope streaks são feições escuras e lineares encontradas nas regiões equatoriais de Marte. Elas se destacam por sua baixa refletância e aspecto alongado (Figura 1), surgindo em regiões com altas concentrações de poeira, baixa inércia térmica e alto albedo, como documentado por diversos autores (Ferguson e Lucchitta, 1984; Williams, 1991; Sullivan et al., 2001; Schorghofer et al., 2002; Kreslavsky e Head, 2009; Brusnikin et al., 2015).

A descoberta inicial dessas feições ocorreu em imagens da missão Viking na década de 1970, destacando a importância das contribuições de Morris (1982) e Ferguson e Lucchitta (1984) nesse campo. Elas surgem de maneira súbita nas encostas durante os períodos quentes marcianos e, ao longo do tempo, gradualmente desaparecem, como apontado por Sullivan et al. (2001). A abundância dessas marcas as colocam como uma das formas mais significativas de movimento de massa em Marte, conforme discutido por Phillips et al. (2007). A pesquisa sobre esses rastros é motivada pela necessidade de entender sua formação e a variação do albedo ao longo do tempo. Em encostas que apresentam múltiplos *slope streaks* de diferentes idades, há uma notável diversidade no brilho e tamanho das marcas. Vários modelos foram propostos por pesquisadores para explicar a formação e o desaparecimento dessas características, mas permanece um debate em curso sobre qual modelo é o mais adequado.

Estes rastros, ainda de natureza desconhecida, são encontrados em encostas inclinadas com baixa inércia térmica e experimentam temperaturas que atingem pelo menos 0°C uma vez por ano, conforme documentado por Schorghofer et al. (2002). Elas se manifestam como marcas alongadas, frequentemente mais escuras do que as áreas circundantes, embora variações mais claras também ocorram, sendo referidas como *bright slope streaks* (Sullivan et al., 2001).

Figura 1 – Região de alta variedade de *slope streaks* em cor, forma e tamanho.
Figure 1 – Region of high variety of slope streaks in color, shape and size.



Fonte: Adaptado de NASA/JPL/UArizona (2011).
Source: Adapted from NASA/JPL/UArizona (2011).

A sonda *Mars Reconnaissance Orbiter* (MRO), desenvolvida pelo Laboratório de Jato-Propulsão (JPL) e enviada pela NASA em 12 de agosto de 2005 acoplada ao foguete Atlas V, teve como objetivo procurar evidências de uma possível existência pretérita de água na superfície do Planeta. A MRO possui três câmeras de alta resolução acopladas em seu sistema: a *High Resolution Imaging Experiment* (HiRISE), *Context Camera*

(CTX) e Mars Color Image (MARCI). O HiRISE, desenvolvida pelo Laboratório Lunar e Planetário da Universidade do Arizona e Bell Aerospace Corporation, acoplado no MRO é um sistema de imagem estéreo multi colorido projetado para capturar imagens de alta resolução da atmosfera e da superfície marciana (NASA, 2005). O diferencial no desenvolvimento da câmera foi o intuito de identificar feições muito menores e de menor contraste que não podiam ser analisadas por sondas anteriores (Delamere et al., 2003). As imagens capturadas pela câmera HiRISE têm sido de grande importância para o estudo e pesquisa sobre *slope streaks* em Marte devido à alta resolução espacial (Chuang et al., 2007a). Essa resolução excepcional permite aos cientistas examinar minuciosamente as características das *slope streaks*, revelando detalhes essenciais para compreender sua formação e evolução (e.g., Chuang et al., 2007a; Chuang et al., 2007b; Mushkin et al., 2008; Mushkin et al., 2010; Schorghofer e King, 2011; Brusnikin et al., 2016; Bergonio et al., 2013).

Dada a complexidade das condições ambientais envolvidas na formação dos *slope streaks*, bem como a importância de disponibilizar informações acessíveis sobre esse fenômeno, este artigo propõe a criação de um banco de dados abrangente. Esse banco de dados consistirá em um modelo de densidade de cenas com *slope streaks*, derivado de imagens HiRISE, juntamente com a elaboração de um catálogo que incluirá essas cenas de regiões com alta densidade de rastros, suas interseções e metadados relevantes.

O objetivo é fornecer uma ferramenta que facilite a pesquisa e análise desse fenômeno único na superfície marciana, permitindo que os pesquisadores acessem dados de forma eficaz e contribuam para uma compreensão mais profunda dos *slope streaks* em Marte.

2. Material e Métodos

Desenvolveram-se duas etapas de processamento para a metodologia. Inicialmente criou-se um mapa de densidade Kernel para identificar regiões com alta densidade de *slope streaks* registrados por cenas HiRISE. Após isso, criou-se um banco de dados a partir das cenas incluídas nas regiões de alta densidade.

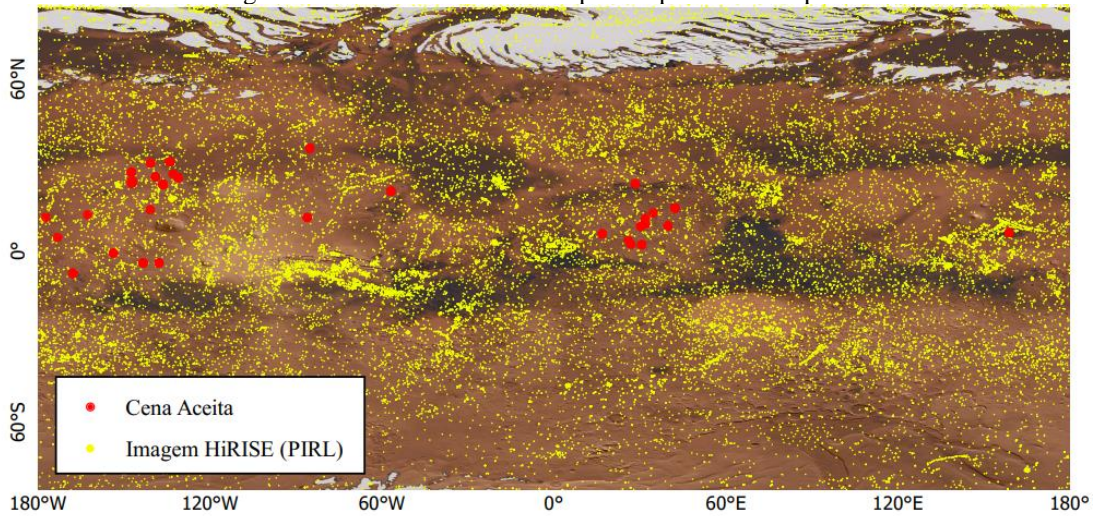
2.1 Mapa de densidade Kernel e Banco de dados

O estimador Kernel (Rosenblatt, 1956; Parzen, 1962) é uma técnica em análise estatística e de dados não-paramétricos com finalidade de estimar a função de densidade de probabilidade subjacente a um conjunto de dados. Este modelo não impõe suposições rígidas sobre a forma da distribuição subjacente o que torna uma ferramenta flexível e poderosa em análises estatísticas e essa abordagem cria uma representação suave e contínua dos dados ao redor de cada ponto de interesse, onde a densidade é calculada considerando a contribuição das superfícies criadas com base na função de Kernel quártica (Silverman, 1986).

A base para o processamento do mapa de Kernel foram os dados vetoriais (footprints/contornos de cena) das imagens HiRISE extraídos e filtrados da *Planetary Imagery Research Laboratory (PIRL)*. Os 84.772 contornos de cenas extraídos da PIRL (Figura 2) foram filtrados por palavras-chave.

As palavras chaves registradas nos metadados das feições foram filtradas pelas expressões que continham “*slope streaks, dark slope streaks, dark streaks, bright slope streaks, slope streak*”, resultando em um total de 103 cenas, o que representa aproximadamente 0,12% do conjunto total de cenas disponíveis no portal durante o período analisado. Os *slope streaks* são feições que ocorrem nas regiões equatoriais de Marte observadamente $\pm 40^\circ$ de latitude (e.g Sullivan et al., 2001; Martinez e Renno, 2013; Bhardwaj et al., 2017). Devido a essa característica geográfica, as 103 cenas resultantes passaram por um processo de filtragem espacial, no qual apenas as cenas localizadas entre as latitudes 50° N e 50° S foram mantidas.

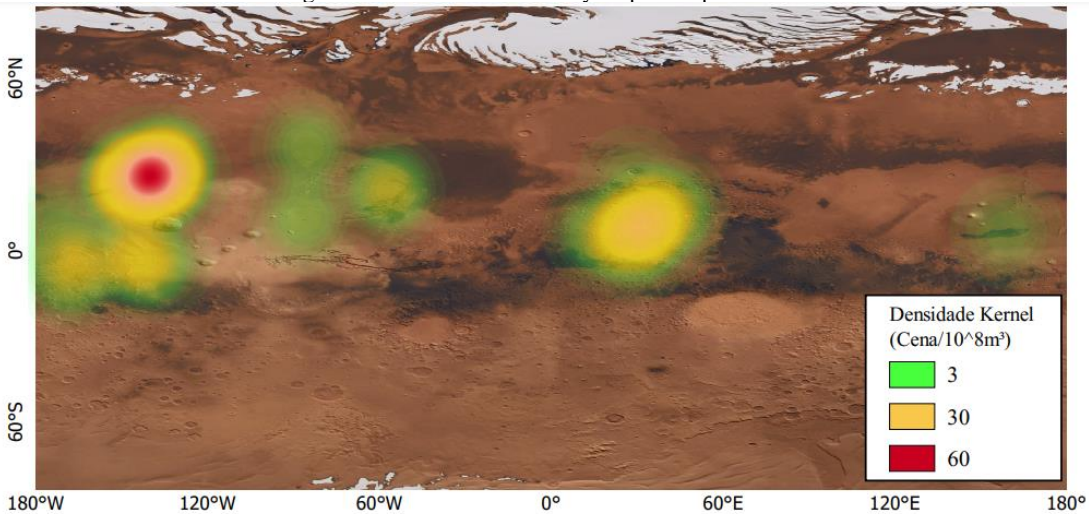
Figura 2 – Mapa Global de distribuição dos footprints dos *slope streaks*.
 Figure 2 – Global distribution map of slope streak footprints.



Fonte: autores.
 Source: Authors.

Após essa etapa, os pontos nas cenas contendo rastros foram utilizados para gerar um mapa global de densidade Kernel com um raio de busca de 2.000 km. Esse processo permitiu identificar áreas com maior probabilidade de conter rastros que não tenham sido indexados pelo provedor de dados (*hotspots*), considerando o limite inferior de 30 cenas/100km². (Figura 3). Em seguida, cerca de 1.200 cenas localizadas nos hotspots passaram por uma seleção manual adicional, resultando em um total de 217 cenas contendo slope streaks.

Figura 3 – Mapa global de densidade de Kernel dos *slope streaks*.
 Figure 3 – Global kernel density map of slope streaks.



Fonte: autores.
 Source: Authors.

A criação do banco de dados para a parametrização das 217 cenas selecionadas foi realizada por meio da extração direta de dados a partir das URLs do acervo da HiRISE (McEwen et al., 2000). As 217 cenas escolhidas foram automaticamente convertidas em URLs utilizando um processo de parametrização simplificado, como ilustrado na Tabela 1. Isso possibilitou a construção de um banco de metadados e uma interface altamente personalizável, facilitando a extração de informações por meio de web scraping.

Tabela 1 – Exemplo de conversão do ID da imagem para URL do metadado. A cor laranja representa o arranjo orbital utilizado pela missão, verde representa o código da cena e preto representa regiões estáticas do texto e o vermelho o arranjo orbital da cena.
 Table 1 - Example of image ID conversion to metadata URL. The orange color represents the orbital arrangement used by the mission, green represents the scene code, black indicates static regions of the text, and red denotes the orbital arrangement of the scene.

Variável	Descrição
REGIÃO	Zona (agrupamento) a qual a cena está disposta. Serve como agrupamento da plataforma
NOME	ID da imagem
DATA	Data do registro da imagem em aaaa/mm/dd hh:mm
OFFSET	Parâmetro offset para conversão radiométrica
INCIDENCE_ANGLE	Parâmetro ângulo de incidência para conversão radiométrica
SCALING_FACTOR	Parâmetro fator de escala para conversão radiométrica
SOLAR_LONGITUDE	Parâmetro Longitude solar para conversão radiométrica
HTTPS:	URL para download da imagem
ESTACAO	Estação do ano marciano

Fonte: Autores
 Source: Authors.

O banco de dados resultou em uma mineração de 192 variáveis para as 217 cenas, totalizando um conjunto completo de 41.664 variáveis. Essas informações foram compiladas para cada agrupamento de cenas com base em seus IDs de grupo. O processo de mineração foi realizado utilizando o Google *Spreadsheet*, especificamente por meio de uma série de funções, incluindo recorte (*Split*) e extração de HTML e XML (*importxml*, *importhtml* e *importdata*).

Variáveis importantes para a escolha das regiões e para conversões radiométricas foram isoladas em uma plataforma facilitada. Estes campos estão mostrados na tabela 2.

Tabela 2 – Variáveis selecionadas para a tabela principal.

Exemplo de ID	URL
ESP_021527_1960	https://hirise-pds.lpl.arizona.edu/PDS/RDR/ESP/ORB_021500_021599/ESP_021527_1960/ESP_021527_1960_RED.LBL

Table 2 – Selected variables for the main table.

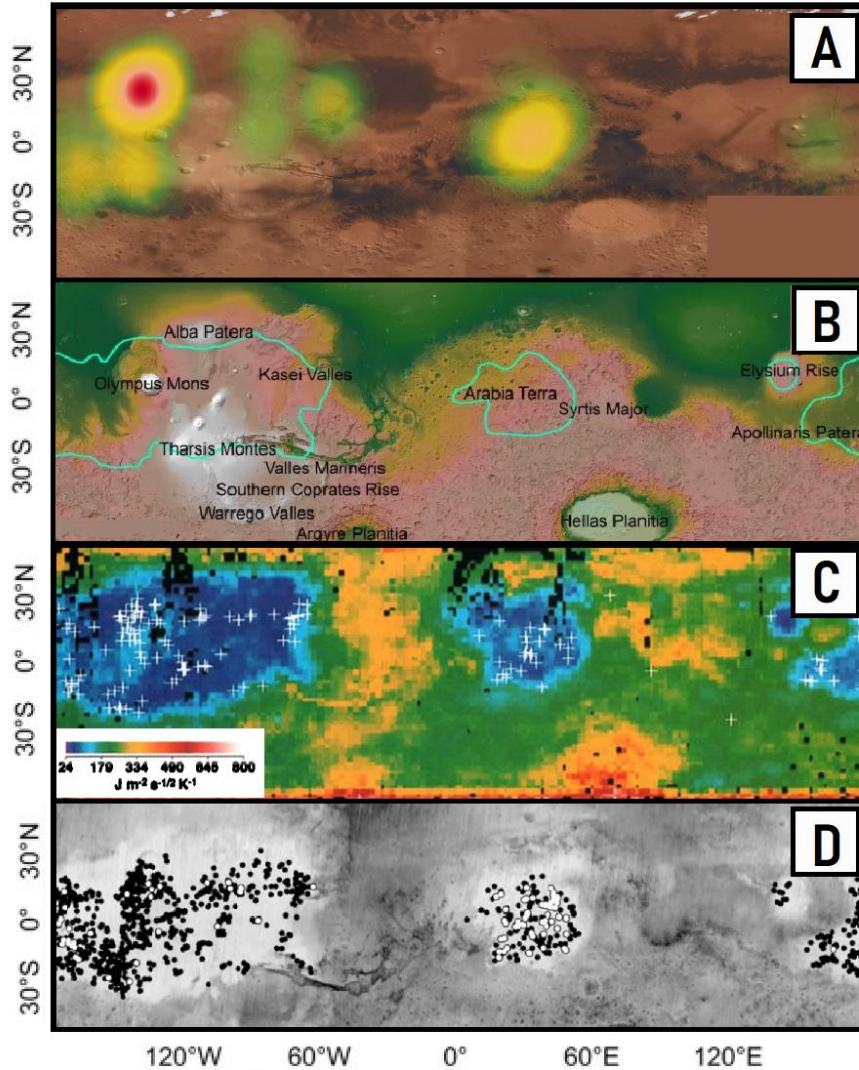
3 Resultado e Discussão

O Mapa de densidade Kernel apresentou uma dispersão espacial compatível com a literatura de *slope streaks* (Sullivan et al., 2001; Schorghofer et al., 2002; Ferris et al., 2002; Schorghofer et al., 2007; Puga et al., 2015; Bhardwaj et al., 2017, 2019). Assim como observado em estudos anteriores, as áreas de *hotspots* de

slope streaks mostram uma preferência por regiões com baixo albedo e baixa inércia térmica, onde a carga de partículas em suspensão atinge seu ponto máximo (Sullivan et al., 2001; Schorghofer et al., 2007) (Figura 4).

Figura 4 – Distribuição dos *slope streaks* em Marte, onde A) Mapa de densidade Kernel; B) distribuição de H₂O equivalente, onde marcadores pretos representam cenas de com *slope streaks* registradas MRO-CTX e HiRISE enquanto C) apresenta mapa global de inércia térmica com cenas Mars Orbiter mission com *slope streaks*. D) Distribuição de Dark e Bright *Slope streaks*.

Figure 4 – Distribution of *slope streaks* on Mars, where A) Kernel density map; B) equivalent H₂O distribution, where black markers represent scenes with *slope streaks* recorded by MRO-CTX and HiRISE while C) presents a global thermal inertia map with Mars Orbiter mission scenes with *slope streaks*. D) Distribution of Dark and Bright *Slope streaks*.



Fonte: B) extraído de Bhardwaj et al., 2017; C) extraído de Sullivan et al., 2001; C) Schorghofer et al., 2007.
 Source: B) extracted from Bhardwaj et al., 2017; C) extracted from Sullivan et al., 2001; C) Schorghofer et al., 2007.

As regiões com as maiores densidades de *slope streaks*, como a área ao redor do Monte Olimpo, o platô de Tharsis e Arabia Terra, são de particular interesse para o desenvolvimento do estudo dos rastros, uma vez

que podem conter pistas cruciais sobre os fatores desencadeantes desses fenômenos e suas variações ao longo do tempo.

Por outro lado, a observação de poucas cenas em regiões dos vales Kaseis e a planície de Elysium pode ser explicada pelo fato de que essas áreas representam limites de inércia térmica, onde as condições podem ser menos propícias à formação de *slope streaks*.

Desta forma, o mapa de Kernel gerado a partir dessas análises fortalece nossa compreensão sobre a distribuição e a preferência geográfica dos *slope streaks* em Marte, lançando luz sobre os processos geológicos e ambientais que moldam a superfície marciana e contribuindo significativamente para a pesquisa planetária.

Estabelecer um limite inferior de corte 30 cenas/108 km² (Figura 3) aumentou a variedade de cenas conhecidas em 110,67%, mais que dobrando o acesso em comparação à uma busca tradicional manual pelo indexador de busca. A ausência de resolução temporal da HiRISE (Mcewen et al, 2007) e sua característica operacional sob demanda faz com que quaisquer intersecções de imagens ao longo do tempo tenham alto valor analítico (Heyer et al, 2019; Santos Júnior e Statella, 2023).

No que tange ao Banco de Dados, suas principais contribuições decorrem da facilidade ao acesso aos parâmetros de correção radiométricas da HiRISE e a velocidade da coleta de imagens para download. A estrutura dos metadados das imagens HiRISE (Mcewen et al., 2007), composta por 192 parâmetros dispostos em XML naturalmente interfere na velocidade de coleta manual das informações. O desenvolvimento do banco de dados possibilitará aos pesquisadores localizar de forma ágil as cenas específicas que desejam analisar, utilizando filtros para refinar suas buscas com base em critérios particulares. Esses critérios podem incluir uma região geográfica específica em Marte, datas de observação específicas ou condições sazonais. Além disso, o banco de dados permitirá a coleta de variáveis cruciais para a pesquisa, como identificação de regiões por meio de Ids e a obtenção de parâmetros para converter números digitais em fator de reflectância (I/F). Isso economiza tempo e auxilia na identificação eficaz de cenas relevantes.

Os links disponíveis no banco de dados possibilitam o acesso direto a imagens e informações detalhadas coletadas pelo instrumento HiRISE (acesso: <https://figshare.com/s/f71b035fce1ac93a299c>). Isso significa que os pesquisadores terão rápida acessibilidade aos dados brutos ou processados relacionados aos *slope streaks*, permitindo análises mais aprofundadas.

A inclusão das datas de observação no banco de dados será essencial para acompanhar a evolução dos *slope streaks* ao longo do tempo. Isso desempenha um papel fundamental na identificação de tendências, padrões sazonais e possíveis eventos que possam afetar essas formações.

3. Conclusões

O desenvolvimento do banco de dados baseado no mapa de densidade oferece aos pesquisadores uma ferramenta facilitadora para análises contínuas e aprofundadas *dos slope streaks*. A capacidade de localizar cenas específicas com critérios personalizados e o acesso direto a imagens e informações do instrumento HiRISE economizarão tempo e promoverão pesquisas avançadas.

A inclusão das datas de observação permitirá o rastreamento da evolução dos *slope streaks*, identificando tendências, padrões sazonais e eventos significativos que possam afetar essas formações ao longo do tempo. Isso contribuirá para uma compreensão mais completa acerca dos mecanismos que controlam a formação dos *slope streaks*.

5. Referências

Aharonson, O., Schorghofer, N., & Gerstell, M. F. (2003). **Slope streak formation and dust deposition rates on Mars. Journal of Geophysical Research**, 108(E12). doi:10.1029/2003je002123

- Baratoux, D., Mangold, N., Forget, F., Cord, A., Pinet, P., Daydou, Y., et al. The **HRSC** co-investigator team. (2006). **The role of the wind-transported dust in slope streaks activity: Evidence from the HRSC data.** *Icarus*, 183(1), 30–45. doi:10.1016/j.icarus.2006.01.023
- Bergonio, J. R., Rottas, K. M., & Schorghofer, N. (2013). **Properties of martian slope streak populations.** *Icarus*, 225(1), 194–199. doi:10.1016/j.icarus.2013.03.023
- Bhardwaj, A., Sam, L., Martín-Torres, F. J., Zorzano, M.-P., & Fonseca, R. M. (2017). **Martian slope streaks as plausible indicators of transient water activity.** *Scientific Reports*, 7(1), 7074. doi:10.1038/s41598-017-07453-9
- Bhardwaj, A., Sam, L., Martín-Torres, F. J., & Zorzano, M.-P. (2019). **Are slope streaks indicative of global - scale aqueous processes on contemporary Mars?** *Reviews of Geophysics* (Washington, D.C.: 1985), 57(1), 48 – 77. doi:10.1029/2018rg000617
- Brusnikin, E. S. (2015). **Slope streaks on Mars: Analysis of geometric parameters.** 46th Lunar Planet. Planet. Sci.
- Brusnikin, Eugene S., Kreslavsky, M. A., Zubarev, A. E., Patratiy, V. D., Krasilnikov, S. S., Head, J. W., & Karachevtseva, I. P. (2016). **Topographic measurements of slope streaks on Mars.** *Icarus*, 278, 52–61. doi:10.1016/j.icarus.2016.06.005
- Delamere, A. (2003). **MRO high resolution imaging science experiment (HIRISE): instrument development. In Sixth International Conference on Mars.** LPI.
- Ferguson, H., & Lucchitta, B. K. (1984). **Dark streaks on talus slopes, Mars.** *Mars. Planetary Geology and Geophysics Program Report*, 188–190.
- Ferris, J. C., Dohm, J. M., Baker, V. R., & Maddock, T., III. (2002). **Dark slope streaks on Mars: Are aqueous processes involved?** *Geophysical Research Letters*, 29(10), 128-1-128-4. doi:10.1029/2002gl014936
- Kreslavsky, M. A., & Head, J. W. (2009). **Slope Streaks On Mars: A New Wet Mechanism.** *Icarus*. v, 201, 517–527.
- Martínez, G. M., & Renno, N. O. (2013). **Water and Brines on mars: Current evidence and implications for MSL.** *Space Science Reviews*, 175(1–4), 29–51. doi:10.1007/s11214-012-9956-3
- Keszthelyi, L., Jaeger, W., McEwen, A., Tornabene, L., Beyer, R. A., Dundas, C., & Milazzo, M. (2008). **High Resolution Imaging Science Experiment (HiRISE) images of volcanic terrains from the first 6 months of the Mars Reconnaissance Orbiter Primary Science Phase.** *Journal of Geophysical Research*, 113(E4). doi:10.1029/2007je002968
- Morris, E. C. (1982). **Aureole deposits of the Martian volcano Olympus Mons.** *Journal of Geophysical Research*, 87(B2), 1164–1178. doi:10.1029/jb087ib02p01164
- Phillips, C. B., Burr, D. M., & Beyer, R. A. (2007). **Mass movement within a slope streak on Mars.**
-

Geophysical Research Letters, 34(21). doi:10.1029/2007gl031577

Puga, F., Silva, E. A., & Pina, P. (2015, September). **Automatic slope streak detection on Mars**. 2015 9th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis (ISPA). ,doi:10.1109/ispa.2015.7306040

Sullivan, R., Thomas, P., Veverka, J., Malin, M., & Edgett, K. S. (2001). **Mass movement slope streaks imaged by the Mars Orbiter Camera**. Journal of Geophysical Research, 106(E10), 23607–23633. doi:10.1029/2000je001296

Schorghofer, N., Aharonson, O., & Khatiwala, S. (2002). **Slope streaks on Mars: Correlations with surface properties and the potential role of water**. Geophysical Research Letters, 29(23), 41-1-41–44. doi:10.1029/2002gl015889

Silverman, B. W. (1986). **Estimação de Densidade para Estatísticas e Análise de Dados**. Nova York: Chapman and Hall.

Santos Júnior, C., Ribeiro, & Statella, T. (2023). **Monitoring martian slope streaks in the northeast of Lycus Sulci**. Icarus, v, 406.