



# DETERMINAÇÃO DA DIREÇÃO DE DUST DEVILS COM A UTILIZAÇÃO DE COVARIÂNCIAS MORFOLÓGICAS

DETERMINATION OF THE DIRECTION OF DUST DEVILS THROUGH MORPHOLOGICAL COVARIANCES

Thiago Statella<sup>1</sup>

## Resumo

O presente artigo apresenta a covariância morfológica como ferramenta para definição automática da orientação de alvos em imagens digitais. Os alvos são rastros de *dust devils* da superfície de Marte em imagens da câmera HiRISE, a bordo da sonda *Mars Reconnaissance Orbiter* (MRO). Dust Devils são vórtices convectivos bastante comuns na superfície de Marte. Sua direção, e, portanto, a direção dos ventos, pode ser obtida da análise das orientações dos rastros deixados pelos vórtices. Para a detecção dos rastros foi utilizado o método desenvolvido por Statella et al. (2012). A saída deste método são imagens binárias com os rastros com valor 1 e fundo com valor 0. Sobre uma destas imagens foi aplicada a covariância morfológica e o resultado coincide com a análise visual da cena. O método poderá ser largamente empregado na determinação das direções dos vórtices convectivos, o que levará a um melhor entendimento do regime de ventos na baixa atmosfera marciana.

**Palavras-chave:** Feições de albedo, vórtices convectivos, Morfologia Matemática.

---

<sup>1</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso – (IFMT), Campus Cuiabá, Cuiabá – Mato Grosso – Brasil. Professor do Departamento de Área de Construção Civil. E-mail: [thiago.statella@cba.ifmt.edu.br](mailto:thiago.statella@cba.ifmt.edu.br)

**Abstract**

This paper presents the morphological covariance as a tool for automatically defining the orientation of targets in digital images. These targets are dust devil tracks on the surface of Mars as depicted by images of the HiRISE camera, onboard the Mars Reconnaissance Orbiter probe (MRO). Dust devils are convective vortices frequently found on Mars surface. Their directions, and, therefore, the wind directions, can be obtained from the analysis of the orientations of the tracks produced by the vortices. For detecting those tracks, the method developed by Statella et al. (2012) was used. The output of the method is a binary image with tracks having the value 1 as attribute and the background having the value 0. Such image was the input for the morphological covariance and the results agreed with the visual analysis of the scene. The method can be extensively applied to infer the direction of the convective vortices, which will allow a better understanding of the low atmospheric winds on Mars.

**Keywords:** Albedo features, convective vortices, Mathematical Morphology.

## 1. INTRODUÇÃO

*Dust devils* são vórtices convectivos formados por correntes de ar quente instáveis, próximas à superfície, provocadas por insolação. Eles têm sido estudados na Terra por mais de um século (BADDELEY, 1860; IVES, 1947; BROOKS, 1960; TANNER, 1963; SINCLAIR, 1966; IDSO, 1974) e foram observados pela primeira vez em Marte nas imagens orbitais obtidas pelo programa *Viking* (1975) (THOMAS e GIERASCH, 1985). Esses fenômenos são semelhantes aos tornados terrestres, exceto pelo fato de que são causados exclusivamente pelo fluxo de calor superficial e de sua intensidade depender da profundidade da *camada limite planetária* (camada atmosférica sujeita a rápidas variações de pressão, temperatura e umidade, em parte por causa de sua proximidade com a superfície), enquanto tornados são alimentados pela liberação de calor latente em sua coluna (HINSON et al., 2008; SPIGA et al., 2010). O conhecimento sobre a atividade dos *dust devils* é de vital importância para compreender o clima, a geologia e as modificações da superfície de Marte, e o perfeito entendimento do ambiente marciano é essencial para o planejamento de missões tripuladas ao planeta (BALME, WHELLEY e GREELEY, 2003; BALME e GREELEY, 2006).

Portanto, o objetivo do trabalho foi determinar automaticamente, a partir de imagens orbitais, as direções preponderantes dos vórtices convectivos, as quais podem ser inferidas indiretamente por meio de seus rastros.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A Morfologia Matemática (MM) é um ramo do processamento não linear de imagens. As transformações básicas da MM são a Erosão e a Dilatação, apresentadas a seguir.

**Definição 1:** Seja  $B$  um subconjunto de  $\mathbf{Z}^2$ ,  $B \subset E$  ( $E$  sendo uma imagem digital). A erosão  $\varepsilon$  de uma imagem  $f$ , binária ou em tons de cinza, por  $B$  (denotada por  $\varepsilon_B$ ) é o valor mínimo (ínfimo) entre as translações de  $f$  pelos vetores  $-b$  de  $B$ . Chama-se  $B$  de *Elemento Estruturante* (EE).

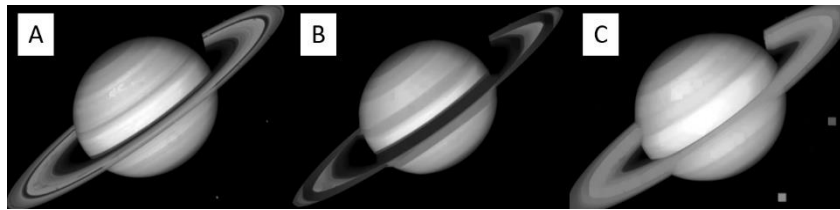
$$\varepsilon_B(f) = \bigwedge_{b \in D(B)} f_{-b}. \quad (1)$$

**Definição 2:** A dilatação  $\delta$  de uma imagem  $f$ , binária ou em tons de cinza, por  $B$  (denotada por  $\delta_B$ ) é o valor máximo (supremo) entre as translações de  $f$  pelos vetores  $b$  de  $B$ .

$$\delta_B(f) = \bigvee_{b \in D(B)} f_b. \quad (2)$$

A título de ilustração a Figura 1 mostra os efeitos da erosão e dilatação sobre uma imagem em tons de cinza.

**Figura 1** – Ilustração da aplicação dos operadores morfológicos erosão (B) e dilatação (C) sobre a imagem original (A).



Fonte: adaptada de Matlab (2008).

Com base na erosão e dilatação vários operadores morfológicos podem ser definidos, como por exemplo, a covariância morfológica. A covariância morfológica é obtida a partir da erosão da imagem por um par de pontos. O resultado permite inferir informação sobre a periodicidade das estruturas e também sua direção predominante.

**Definição 3:** A covariância morfológica  $Cov$  de uma imagem  $f$  consiste em medir o volume da imagem erodida por um par de pontos  $P$  separados por um vetor  $v$  (SOILLE, 2004):

$$Cov(f; P, v) = \mathbb{V}[\varepsilon_{P,v}(f)]. \quad (3)$$

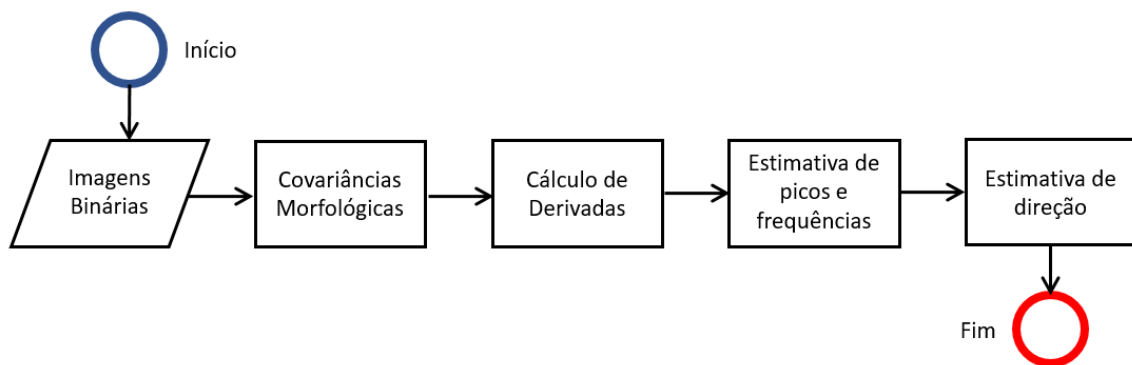
A covariância é analisada ao se observar o comportamento do volume da imagem erodida conforme  $v$  aumenta de tamanho. No caso binário, a covariância é a área  $A$  da interseção da imagem  $X$  com sua translação pelo vetor  $v$  ( $X_v$ ):

$$Cov(X; P, v) = A(X \cap X_v). \quad (4)$$

### 3. METODOLOGIA

O método consiste em se aplicar sobre imagens binárias com os rastros segmentados a covariância morfológica para determinar a direção preponderante dos *dust devils*. O fluxograma da Figura 2 apresenta o método proposto. A seguir, de maneira a esclarecer cada uma das etapas, faz-se a exemplificação do método utilizando-se uma imagem sintética, gerada apenas com este propósito.

**Figura 2** – Fluxograma demonstrando o encadeamento lógico de cada etapa do método seguido para obtenção dos resultados.

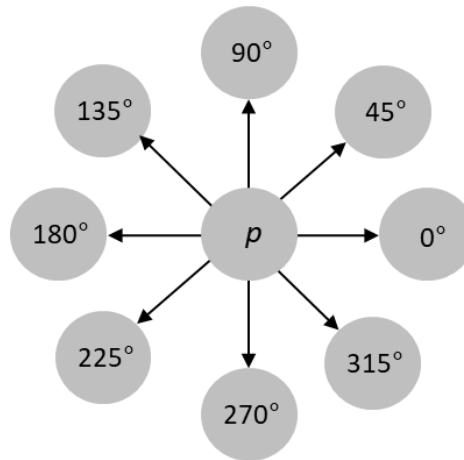


Fonte: autoria própria.

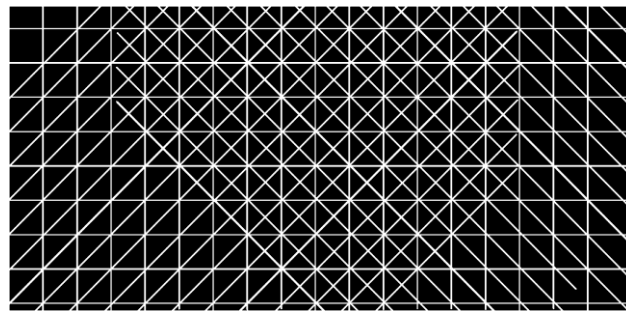
#### 3.1. Exemplificação do método

As direções em uma imagem podem ser definidas da seguinte maneira. Para um dado pixel  $p$ , as direções de seus vizinhos  $N_d(p)$ , em que  $d = 0^\circ, 45^\circ, \dots, 315^\circ$ , são definidas conforme a Figura 3. Como exemplo, a covariância morfológica para a imagem mostrada na Figura 4 foi calculada nas direções  $0^\circ$ - $180^\circ$ ,  $45^\circ$ - $225^\circ$ ,  $90^\circ$ - $270^\circ$  e  $135^\circ$ - $315^\circ$  (daqui para frente tratadas apenas como  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $135^\circ$ ). O resultado é apresentado na Figura 5, em que as covariâncias foram normalizadas para o intervalo  $[0,1]$ . Tal normalização foi feita com base na propriedade de conhecimento local das erosões:

$$\forall [\varepsilon_{p,v}(f) | \varepsilon_{p,v}(D_f)] / \forall [f | \varepsilon_{p,v}(D_f)]. \quad (5)$$

**Figura 3** – Direções a partir de um pixel.

Fonte: autoria própria.

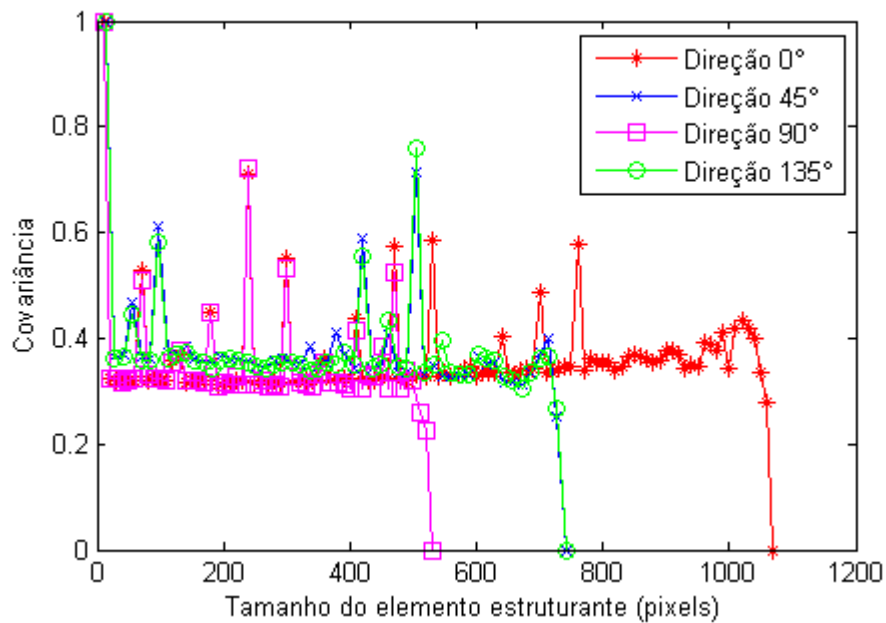
**Figura 4** - Imagem binária criada para exemplificar a aplicação de covariância morfológica.

Fonte: autoria própria.

Na Figura 5, a direção de maior covariância (ou correlação, já que os dados são binários) foi 135° (~0,76), seguida da direção 45°, com a segunda maior covariância (~0,72). A análise do gráfico permite inferir também em que direção as estruturas são mais periódicas. Em tais direções o número de picos do gráfico será maior. No exemplo da Figura 5 a direção de maior periodicidade foi 0° (27 picos).

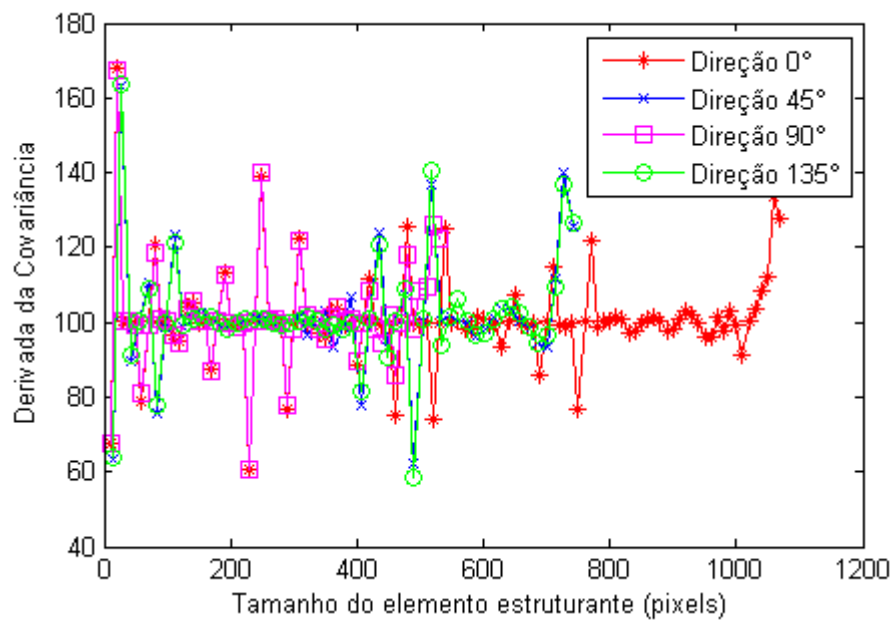
Os picos podem ser contados automaticamente aplicando a seguinte sequência de operações: cálculo da primeira derivada para realçar as variações de frequência do gráfico (Figura 6), filtragem *top-hat* para detectar os picos (Figura 7) e, por fim, aplicação de um algoritmo de rotulação para contagem dos picos. O *top-hat* é a subtração entre o sinal original, neste caso as curvas de covariância, e sua versão erodida pela equação 1.

**Figura 5** - Covariância morfológica nas direções 0°, 45°, 90° e 135°.



Fonte: autoria própria.

**Figura 6** - Derivadas das covariâncias.

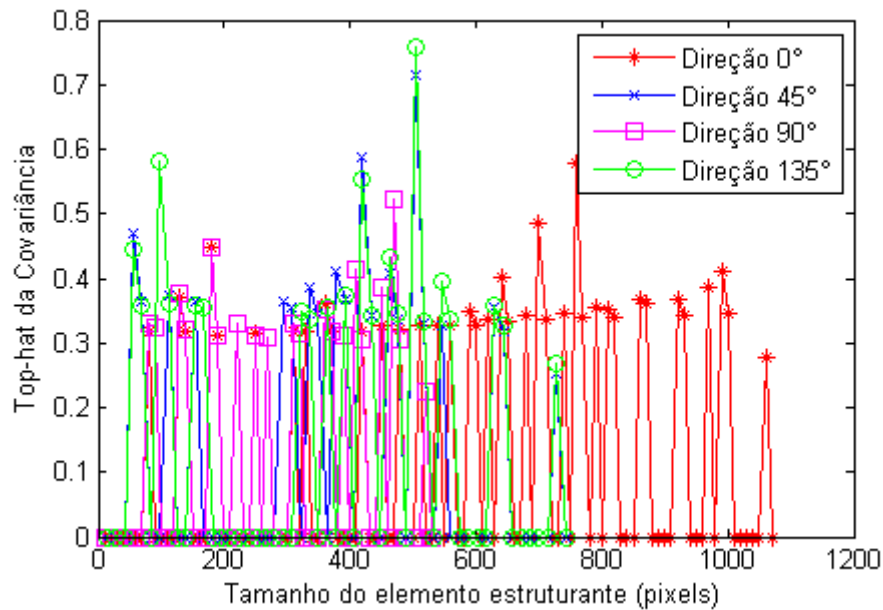


Fonte: próprio autor.

A escala dos valores da ordenada da Figura 6 foi alterada para evitar números negativos e na Figura 7 o primeiro pico das covariâncias em todas as direções foi

desconsiderado. Esta etapa de separação dos picos é necessária para que o algoritmo de contagem de picos seja aplicado em seguida. Em geral, a aparência das covariâncias na Figura 5 é bastante semelhante em todas as direções, e daí se pode concluir que as estruturas são aproximadamente isotrópicas (SERRA, 1983).

**Figura 7** - Picos das covariâncias.



Fonte: próprio autor.

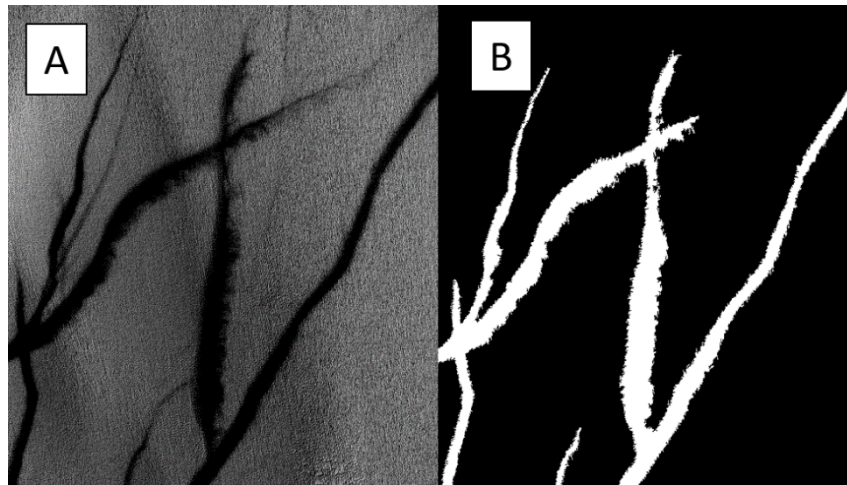
Entretanto, a análise do gráfico deve ser feita com cuidado. Variâncias periódicas resultam de processos periódicos, mas uma covariância aproximadamente periódica pode surgir de um processo completamente não-periódico. Portanto é essencial que seja feita uma análise visual preliminar das estruturas estudadas (SERRA, 1983).

#### 4. RESULTADOS

Para testar o potencial das covariâncias morfológicas na determinação da direção de rastros de *dust devils*, uma imagem da câmera HiRISE foi escolhida. O identificador da cena é o PSP\_006163\_1345, adquirida em 19/11/2007, na região marciana de Argyre, a uma resolução espacial de 0,25 m/pixel, com tamanho de 4.415 x 7.184 pixels. A Figura 8 mostra uma região de interesse recortada da imagem original contendo rastros escuros de *dust devils* (A) e o resultado de sua binarização (B). Da análise visual da cena percebe-se que a direção principal percorrida pelos rastros foi de aproximadamente 45° (de acordo com a Figura 3).



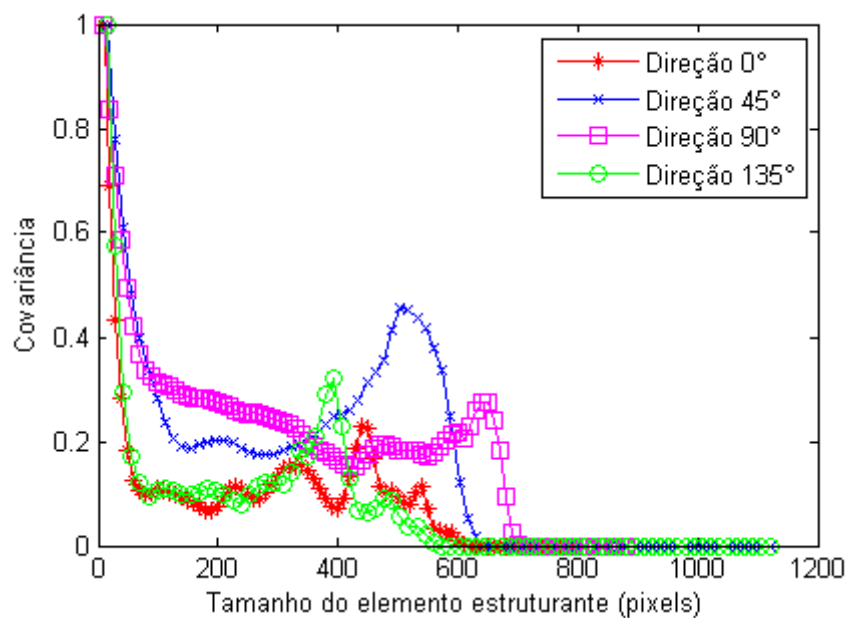
**Figura 8** - Região de interesse da imagem PSP\_006163\_1345 (A) e sua binrização (B).



Fonte: imagem (A): NASA/JPL/University of Arizona. Disponível em < <https://hirise.lpl.arizona.edu/>>. Último acesso em outubro de 2019.

A Figura 9 mostra as curvas de covariância morfológica nas direções 0°, 45°, 90° e 135°, calculadas para a imagem PSP\_006163\_1345.

**Figura 9** - Covariâncias morfológicas para a cena HiRISE nas direções 0°, 45°, 90° e 135°.



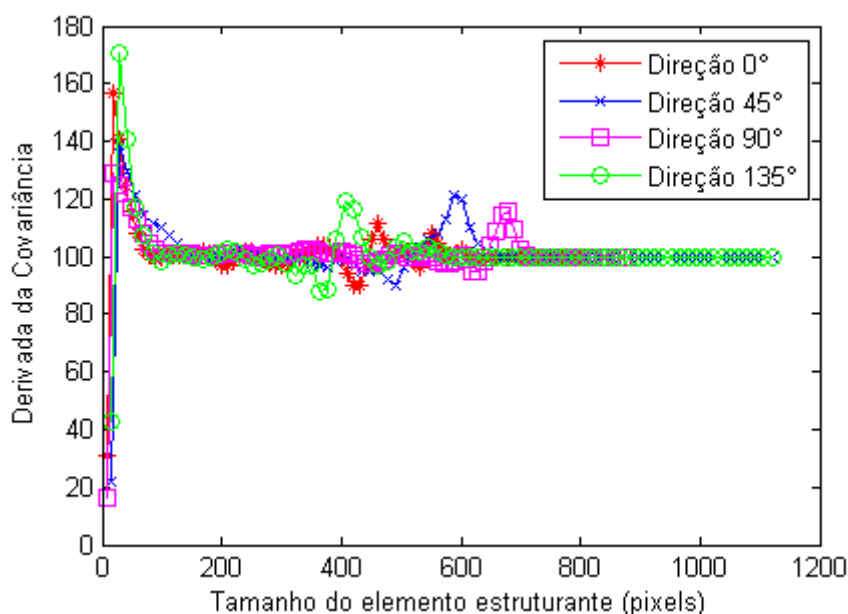
Fonte: próprio autor.

Analisando-se a Figura 9 percebe-se que a maior covariância ( $Cov = 0,45$ ) ocorreu na direção 45°. Pode-se assumir que as estruturas da imagem se correlacionam mais fortemente

nesta direção que nas demais. Este resultado concorda com a análise visual da cena, segundo a qual a direção preponderante dos rastros é de  $45^\circ$ . A periodicidade das estruturas pode ser calculada com base na quantidade de picos nas curvas de covariância. A Figura 10 mostra as derivadas das curvas. Nela os valores de covariância na ordenada do gráfico tiveram sua escala alterada para evitar números negativos.

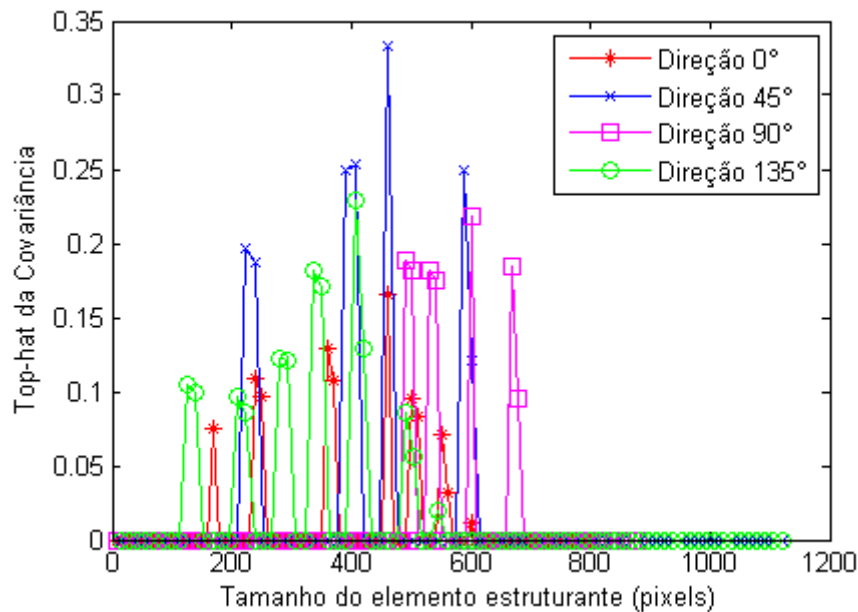
Após aplicar um *top-hat* os picos são extraídos e contados. A Figura 11 mostra os picos das curvas de covariância nas direções  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $135^\circ$ . Estes picos são obtidos a partir do *top-hat*, de maneira a facilitar a contagem dos mesmos. O primeiro pico, causado pela coincidência exata entre as estruturas antes das translações, foi desconsiderado. A periodicidade é maior na direção  $0^\circ$  e  $135^\circ$ , na qual a quantidade de picos da curva é maior. De fato, ao analisar-se a imagem percebe-se que os rastros são aproximadamente periódicos nesta direção de  $135^\circ$ , direção perpendicular àquela percorrida pelos vórtices convectivos. Tais informações podem ser usadas isoladamente ou em conjunto com outras quantidades, como largura média e direção dos rastros, área coberta por rastros, contraste relativo entre rastros e vizinhança, inclinação da tangente à origem da covariância e inclinação da reta assíntota, dentre outros, para melhor entender o fenômeno *dust devil*.

**Figura 10** - Derivadas das covariâncias morfológicas para a imagem PSP\_006163\_1345A nas direções  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $135^\circ$ .



Fonte: próprio autor.

**Figura 11** - Picos das covariâncias morfológicas para a imagem PSP\_006163\_1345A nas direções 0°, 45°, 90° e 135°.



Fonte: próprio autor.

## 5. CONCLUSÕES

Este trabalho explorou o potencial da covariância morfológica na determinação das direções de rastros de *dust devils*. A direção principal percorrida pelos rastros, obtida da análise de covariâncias, foi 45°, o que está de acordo com a análise visual da cena. O estudo deste fenômeno é de suma importância para o entendimento da modificação da superfície marciana e para o refinamento de modelos de circulação da atmosfera. Os resultados preliminares se mostraram promissores e a próxima etapa será aplicar o método a um banco de imagens com 200 cenas. Os resultados poderão ser comparados com os obtidos por Statella et al. (2016) e com simulações feitas pelo modelo marciano de circulação atmosférica. Além disso, em princípio, e, embora não testado, o método também poderia ser aplicado para o estudo de feições de albedo, eólicas ou não, existentes em outras superfícies.

## 6. REFERÊNCIAS

- BADDELEY, P. F. H. **Whirlwinds and Dust Storms of India**. Londres: ed. Bell and Daldey, 1860.
- BALME, M. R.; GREELEY, R. Dust Devils on Earth and Mars. **Reviews of Geophysics**, v. 44, p. 1-22, 2006.

BALME, M. R.; WHELLEY, P. L.; GREELEY, R. Mars: Dust devil track survey in Argyre Planitia and Hellas Basin. **Journal of Geophysical Research**, v. 108, n. E8, 2003.

BROOKS, H. B. Rotation of dust devils. **Journal of Meteorology**, v. 17, p. 84–86, 1960.

IDSO, S. B; A. Tornado or dust devil: the enigma of desert whirlwinds. **American Scientist**, v. 62, n. 5, p. 530– 541, 1974.

IVES, R. L. Behavior of dust devils. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 28, p. 168–174, 1947.

HINSON, D. P.; PÄTZOLD, M.; TELLMANN, S.; HÄUSLER, B.; TYLER, G. L. The depth of the convective boundary layer on Mars. **Icarus**, v. 198, p. 57–66, 2008.

MATLAB. **Software Matlab versão 7.6.0.324 (R2008a)**. The MathWorks, 2008.

SERRA, J. **Image Analysis and Mathematical Morphology**. Londres: Academic Press, 1982. 610 p.

SINCLAIR, P. C., **A quantitative analysis of the dust devil**. 1966. Tese (Doutorado) - Universidade do Arizona, Tucson.

SOILLE, P. **Morphological Image Analysis**. Berlin: Springer-Verlag, 2004. 316 p.

SPIGA, A.; FORGET, F.; LEWIS, S. R.; HINSON, D. P. Structure and dynamics of the convective boundary layer on Mars as inferred from large-eddy simulations and remote-sensing measurements. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, n. 136, p. 414–428, 2010.

STATELLA, T.; PINA, P.; SILVA, E. A.; FRIGERY, A. V.; NETO, F. G. Comparing Wind directions inferred from Martian dust devil tracks analysis wit those predicted by the Mars Climate Database. **Planetary and Space Sciences**, v. 131, p. 60-69, 2016.

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 Sciences**. Vol 70, p. 46-58, 2012.

TANNER, W. F. Spiral flow in rivers, shallow seas, dust devils and models. **Science**, v. 139, p. 41– 42, 1963.

THOMAS, P.; GIERASCH, P. Dust Devils on Mars. **Science**, p. 175-177, 1985.