

## Aplicação da Distância de Mahalanobis para Análise Comparativa entre as Secas de 2010 e 2023 em Manaus Através de Imagens de Satélite

Adriana Bindá Lima<sup>1\*</sup>, Carla Cristina Azevedo Ribeiro<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Amazonas, Departamento de Estatística, Instituto de Ciências Exatas, Av. Rodrigo Otávio Jordão Ramos, 6200, Coroado I, 69067-005, Manaus AM, Brasil.

\*[adriana.lima@super.ufam.edu.br](mailto:adriana.lima@super.ufam.edu.br), \*\*[carlaamordeus10@gmail.com](mailto:carlaamordeus10@gmail.com)

**Palavras-Chave:** Método Estatístico MAHALANOBIS, Sensoriamento Remoto, Secas Extremas.

### Introdução

A Floresta Amazônica, sistema vital para o equilíbrio climático global, tem enfrentado uma recorrência alarmante de secas extremas, com destaque para os eventos históricos de 2010 e 2023. Impulsionados por forçantes climáticos distintos, estes episódios causaram impactos profundos na ecologia e sociedade da região Metropolitana de Manaus. Analisar e comparar a manifestação espacial destas secas demanda uma abordagem metodológica que supere a simples observação de variáveis isoladas de sensoriamento remoto.

Para superar esta limitação, este trabalho adota a Distância de Mahalanobis (DM). Diferentemente de medidas euclidianas convencionais, a DM é uma técnica estatística multivariada que não apenas integra múltiplos parâmetros, mas também incorpora a estrutura de covariância inerente ao conjunto de dados<sup>3</sup>. Este trabalho aplica a DM para combinar indicadores-chave de seca derivados das missões Landsat — como a Temperatura da Superfície Terrestre (LST) e índices de vegetação — em um único índice integrado de estresse ambiental. A vantagem desta abordagem reside em sua sensibilidade para detectar anomalias multivariadas complexas<sup>2</sup>, tornando-a particularmente adequada para quantificar eventos climáticos extremos, como comprovado em estudos recentes<sup>1;4</sup>.

Desta forma, utiliza-se o poder analítico da Distância de Mahalanobis com dados Landsat para realizar uma análise comparativa rigorosa entre as secas de 2010 e 2023. O objetivo é empregar este método robusto para mapear, quantificar e contrastar com precisão a intensidade e os padrões de severidade destes eventos na região de Manaus, oferecendo uma nova perspectiva sobre a dinâmica desses extremos climáticos.

### Materiais e Métodos

#### Área de Estudo e Dados Utilizados

A área de estudo compreende a Região Metropolitana de Manaus e entorno, com foco no rio Negro e seus ecossistemas de áreas alagáveis (igapós e várzeas). A região está situada entre as latitudes 2.5°S-3.5°S e longitudes

59.5°W-60.5°W, abrangendo uma área de 50 km ao redor do Porto de Manaus. A análise concentra-se nos meses de pico de seca (outubro) de 2010 e 2023, permitindo a comparação entre dois dos mais significativos eventos de seca registrados na Amazônia contemporânea.

Foram utilizadas imagens de satélite Landsat 5 TM (2010) e Landsat 8/9 OLI/TIRS (2023), ambas do path 231/row 62, processadas no nível L2SP com correção atmosférica e radiométrica. A partir dessas imagens, derivaram-se os seguintes produtos: NDVI (Índice de Vegetação da Diferença Normalizada), calculado por  $NDVI = (NIR - Vermelho)/(NIR + Vermelho)$ ; NDMI (Índice de Umidade da Diferença Normalizada), obtido por  $NDMI = (NIR - SWIR1)/(NIR + SWIR1)$ ; LST (Temperatura da Superfície Terrestre) mediante algoritmo Mono-Window<sup>2</sup>; e a banda SWIR (Infravermelho de Onda Curta) para análise do estresse hídrico.

#### Método: Análise de Secas com Distância de Mahalanobis

A Distância de Mahalanobis (DM) foi utilizada para quantificar o estresse ambiental multivariado entre os eventos de seca. A medida é definida como:

$$D_M(\mathbf{x}, \boldsymbol{\mu}) = \sqrt{(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})^T \boldsymbol{\Sigma}^{-1} (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})} \quad (1)$$

onde:

- $\mathbf{x}$ : vetor de características do pixel em 2023 [ $NDVI, NDMI, LST, SWIR$ ]
- $\boldsymbol{\mu}$ : vetor de médias da distribuição de referência (2010)
- $\boldsymbol{\Sigma}$ : matriz de covariância da distribuição de referência

#### Etapas de Implementação

##### 1. Cálculo das estatísticas de referência (2010):

$$\boldsymbol{\mu} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{x}_i, \quad \boldsymbol{\Sigma} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\mathbf{x}_i - \boldsymbol{\mu})(\mathbf{x}_i - \boldsymbol{\mu})^T \quad (2)$$

onde  $N = 1000$  pixels da área estável.

2. Inversão da matriz de covariância:

- Decomposição LU:

$$\Sigma = LU, \quad \Sigma^{-1} = U^{-1}L^{-1} \quad (3)$$

- Pseudo-inversa de Moore-Penrose (para matriz singular):

$$\Sigma = U\Lambda V^T, \quad \Sigma^+ = V\Lambda^+U^T \quad (4)$$

3. Cálculo da DM para 2023:

$$D_M(\mathbf{y}) = \sqrt{(\mathbf{y} - \boldsymbol{\mu})^T \Sigma^{-1} (\mathbf{y} - \boldsymbol{\mu})} \quad (5)$$

4. Determinação do limiar estatístico:

$$\text{Limiar} = Q_3 + 1.5 \times IQR \quad (6)$$

onde  $Q_3$  é o terceiro quartil e  $IQR$  é a amplitude interquartil da distribuição de  $D_M^{ref}$ .

5. Classificação da severidade da seca:

$$\text{Severidade} = \begin{cases} \text{Extrema} & D_M > P_{95} \\ \text{Severa} & P_{85} < D_M \leq P_{95} \\ \text{Moderada} & P_{75} < D_M \leq P_{85} \\ \text{Leve/Nula} & D_M \leq P_{75} \end{cases}$$

onde  $P_x$  representa o percentil  $x$  da distribuição.

6. Validação hidrológica:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (D_{M_i} - \bar{D}_M)(H_i - \bar{H})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (D_{M_i} - \bar{D}_M)^2 \sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})^2}} \quad (7)$$

onde  $H_i$  são as cotas do rio Negro e  $D_{M_i}$  são os valores médios de DM por sub-bacia.

O método permitiu a identificação robusta de áreas que sofreram mudanças significativas no padrão multivariado de seca entre 2010 e 2023, considerando a variabilidade espectral natural e validando com dados hidrológicos independentes. A abordagem multivariada da Distância de Mahalanobis mostrou-se adequada para capturar a complexidade dos eventos de seca na região amazônica.

Resultados e Discussão

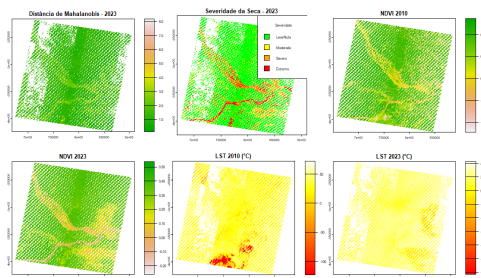


Figura 1: Aplicação do método Distância de Mahalanobis

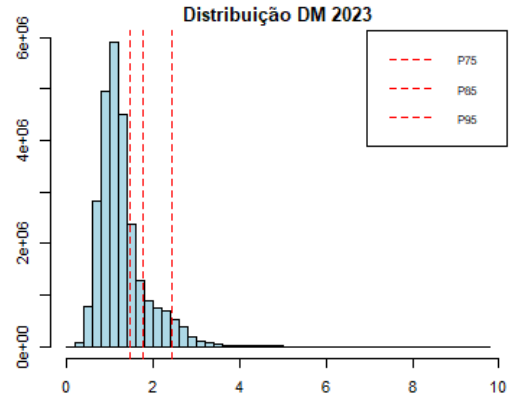


Figura 2: Distribuição DM 2023

O estudo na região de Manaus (2010-2023) revelou melhoras ambientais contraditórias, conforme aplicação do método na **Figura 1**: NDVI (+14,06%), NDMI (+28,76%), LST (-36,55%) e SWIR1 (-11,17%). Entretanto, a seca de 2023 afetou 11,8% da área (2,4% extrema). A Distância de Mahalanobis demonstrou robustez (média 1,275; CV 42,6%), com distribuição evidenciada na **Figura 2**. A forte correlação vegetação-umidade ( $r=0,732$ ) sustenta a eficácia do método para alerta precoce e expansão na bacia amazônica.

Conclusões

A aplicação do método de Mahalanobis na análise comparativa das secas de 2010 e 2023 na região de Manaus revelou um cenário ambiental complexo e multidimensional. A metodologia demonstrou alta eficácia na detecção de anomalias ambientais, capturando padrões espaciais heterogêneos não identificáveis em análises convencionais. Contrariamente ao esperado, os resultados apontaram melhorias significativas nos indicadores de vegetação e umidade, embora tenham detectado focos localizados de seca extrema em 2023. A forte correlação entre variáveis ambientais validou a robustez do método, que se mostra promissor para sistemas de alerta precoce e gestão focalizada de áreas críticas na bacia amazônica.

Agradecimentos

Ao Laboratório de Estatística da UFAM por incentivar e dar o suporte aos seus alunos.

Referências

[1] Bhattacharjee, K.; Mahanta, L. A mahalanobis distance based approach for drought assessment: a case study of karnataka, india. *Environmental Earth Sciences*, 79:1–15. 2020.

[2] De Maesschalck, R.; Jouan-Rimbaud, D.; Massart, D. L. The mahalanobis distance. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 50(1):1–18. 2000.

[3] Johnson, R. A.; Wichern, D. W. *Applied Multivariate Statistical Analysis*. Pearson Prentice Hall, 6th edition. 2007.

[4] Silveira, C. S. et al. Análise de secas usando a distância de mahalanobis e dados de sensoriamento remoto no semiárido brasileiro. In *Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. 2023.