

---

# Análises métricas e estatística de filtragens espaciais em imagem

---

Sentinel-1 SAR na Amazônia Central, Brasil

---

Análisis métrico y estadístico del filtrado espacial en imágenes Sentinel-1  
en la Amazonia Central, Brasil

Metric analysis and statistics of spatial filtrations in Sentinel-1 SAR image  
in Central Amazon, Brazil

**Ivo Augusto Lopes Magalhães<sup>1</sup>, Osmar Abílio de Carvalho Junior<sup>1</sup> e Edson Eijy Sano<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Universidade de Brasília, Departamento de Geografia,  
Laboratório de Sistemas de Informações Espaciais (LSIE)  
Brasília, Brasil

<sup>2</sup> Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Brasil  
[ivosmagalhaes@gmail.com](mailto:ivosmagalhaes@gmail.com); [osmarjr@unb.br](mailto:osmarjr@unb.br); [edson.sano@gmail.com](mailto:edson.sano@gmail.com)

Magalhães: <https://orcid.org/0000-0003-4136-1972>

Carvalho: <https://orcid.org/0000-0002-0346-1684>

Sano: <https://orcid.org/0000-0001-5760-556X>

---

### Resumo

Objetivou-se com esse estudo comparar o desempenho de sete técnicas de filtragem espacial para redução do ruído *speckle* na imagem do satélite Sentinel-1 SAR na região de Parintins, Amazônia Central. O desenvolvimento metodológico do estudo consistiu na obtenção da imagem por meio do catálogo eletrônico da ESA-Copernicus e posteriormente realizou-se o processamento digital de imagem por etapas: definição de órbita, calibração radiométrica, correção do terreno pelo Ranger doppler, filtragem do ruído *speckle* e conversão do valor de retroespalhamento para decibéis no *software* SNAP 6.0. Utilizou-se métricas estatísticas e o teste não paramétrico Shapiro-Wilk ao nível de significância 95% para análise da normalidade das amostras. Em geral, os métodos de filtragem apresentaram bons desempenhos métricos e estatísticos, entretanto, o filtro de mediana com janela  $11 \times 11$  comprovou ser uma técnica de filtragem alternativa para a dupla polarização VH e VV, pois apresentou ótimos resultados estatísticos.

**PALAVRAS-CHAVE:** sensoriamento remoto; radar de abertura sintética; geoprocessamento; índices métricos; filtros espaciais.

### Resumen

El objetivo de este estudio fue comparar el rendimiento de siete técnicas de filtrado espacial para reducir el ruido de moteado en la imagen del satélite Sentinel-1 SAR en la región de Parintins, Amazonia Central. El desarrollo metodológico del estudio consistió en la obtención de la imagen a partir del catálogo electrónico ESA-Copernicus y posterior procesamiento digital por etapas: definición de la órbita, calibración radiométrica, corrección del terreno por *doppler ranger*, filtrado del ruido *speckle* y conversión del valor de *backscatter* a decibelios en el software SNAP 6.0. Para analizar la normalidad de las muestras se utilizaron métricas estadísticas y la prueba no paramétrica de Shapiro-Wilk con un nivel de significación del 95%. En general, los métodos de filtrado mostraron un buen rendimiento métrico y estadístico; sin embargo, el filtro de mediana con una ventana de  $11 \times 11$  resultó ser una técnica de filtrado alternativa para la polarización dual VH y VV, ya que mostró excelentes resultados estadísticos.

**PALABRAS CLAVE:** teledetección; radar de apertura sintética; geoprociamiento; métrica; filtros espaciales.

### Abstract

The objective of this study was to compare the performance of seven spatial filtering techniques to reduce speckle noise in the Sentinel-1 SAR satellite image in the Parintins region, Central Amazon. The methodological development of the study consisted of obtaining the image through the electronic catalog of ESA-Copernicus and later the digital image processing was carried out in stages: orbit definition, radiometric calibration, terrain correction by Ranger doppler, speckle noise filtering and conversion of the backscatter value to decibels in the SNAP 6.0 software. Statistical metrics and the non-parametric Shapiro-Wilk test at a significance level of 95% were used to analyze the normality of the samples. In general, the filtering methods presented good metric and statistical performances, however, the median filter with  $11 \times 11$  window proved to be an alternative filtering technique for VH and VV dual polarization, as it presented excellent statistical results.

**KEYWORDS:** remote sensing; synthetic aperture radar; geoprocessing; metric indices; spatial filters.

## 1. Introdução

Atualmente houve um crescimento considerável de obtenção de imagens por meio de dados de sensores remotos. Dentre os diversos modos de obtenção de imagens, destacam-se as imagens por aquisição dos veículos aéreos não tripuláveis (VANT), sensores ópticos e imagens de radar de abertura sintéticas (SAR).

As imagens dos VANT apresentam a desvantagem de captar pequenas áreas por imageamento em baixa altitude de sobrevoo, o que não ocorre na grande maioria das imagens de satélites, pois proporcionam uma visão sinóptica, maior visada de imageamento, periodicidade de varredura e enorme acervo de imagens gratuitas. Em determinadas regiões terrestres com baixa latitude, como na região deste estudo na Amazônia Central, ocorre intensa cobertura de nuvem, limitando o uso dos sistemas passivos, isto é, imagens ópticas de satélites por não conseguir transpor as nuvens (Forkuor *et al.*, 2014).

Além da transposição de nuvens, os sinais provenientes de sensores de radar são sensíveis às propriedades do solo (umidade e rugosidade) e da vegetação (estrutura e biomassa), proporcionando informação adicional dos tipos de cobertura do solo, relativamente à obtida através de imagens óticas (Jin *et al.*, 2014).

Segundo Novo (2014), os sistemas sensores são definidos conforme a aquisição dos dados em ativos ou passivos, sendo que os passivos dependem da propagação da radiação eletromagnética para aquisição dos dados. Os sensores remotos ativos, em que se incluem os radares, geram a sua própria energia eletromagnética que é transmitida do sensor para a superfície do terreno, interage com este produzindo um retroespalhamento da energia que é registrada pelo receptor do sensor remoto (Jensen, 2011).

Dentre os radares imageadores existem os radares de abertura real (*Real Aperture Radar – RAR*) e os radares de abertura sintética (*Synthetic Aperture Radar – SAR*), onde 'abertura' significa antena. Um sistema SAR usa um sofisticado processamento de sinais para sintetizar uma

antena maior do que seu tamanho físico real para a mesma finalidade (Almeida, 2008).

Uma imagem de radar é uma matriz bidimensional de pixels onde cada pixel é formado por um número complexo (amplitude e informação de fase) associado à refletividade dos espalhadores contidos dentro da célula de resolução do radar (Lee e Pottier, 2009). Usualmente, os sistemas de radar utilizam polarizações lineares paralelas, HH e VV, ou cruzadas, HV e VH, em que a primeira letra refere-se à polarização da radiação transmitida e a segunda à polarização da radiação recebida pela antena (Lee e Pottier, 2009).

Em 2014 foi lançado, pela Agência Espacial Europeia (ESA), o satélite Sentinel-1 com um sensor de micro-ondas SAR operante na banda C (ESA, 2017). As imagens Sentinel-1 são adquiridas nos modos de polarização única (HH ou VV) ou dupla (HH/HV ou VV/VH) e com uma alta resolução espacial e temporal. Porém, no Brasil, essas imagens Sentinel-1 SAR estão disponíveis apenas nas polarizações direta VV e cruzada VH.

O principal fator de interferência associado à interpretação de imagens de radar é a presença do ruído *speckle* (Dong *et al.*, 2001; Brekke e Solberg, 2005; Tello *et al.*, 2006; Chang *et al.*, 2007; Santoso *et al.*, 2016; Kuck *et al.*, 2021). Este ruído é inerente ao sistema, causado por interferências locais construtivas ou destrutivas no sinal de retorno retroespalhado pela superfície.

O *speckle* gera, na imagem, uma aparência granular composta por mudanças bruscas no nível de cinza em pixels espacialmente próximos (Fu e Holt, 1982; Kuck *et al.*, 2021; Magalhães *et al.*, 2022). Desse modo, o *speckle* é uma forma de ruído que degrada a qualidade das imagens, interferindo em todas as etapas de detecção dos alvos escuros que, para amenização, é recomendada a utilização do processamento em múltiplas visadas (*multi-look*) ou a aplicação de filtros para sua suavização (Dong *et al.*, 2001; Srinivas e Panda, 2013).

As técnicas de filtragem apresentam a vantagem de manter mais próximo os valores reais de retroespalhamento dos alvos nas imagens de radar. Na região em estudo, ocorre uma

carência de dados de cunho geoespaciais, o que de fato fez-se jus ao desenvolvimento de análise de alvos por meio de imagens do satélite Sentinel-1. Todavia, para uma análise criteriosa dos dados inseridos na imagem, é necessário testar estatisticamente qual método de filtragem é mais adequado para cada polarização, pois se comprova que a potencialidade do filtro é diferente para cada região mapeada devido à distinção de alvos em cada região geográfica.

Diante do exposto, o objetivo deste estudo é comparar o desempenho de sete diferentes técnicas de filtragens espaciais para redução do ruído nas imagens do satélite Sentinel-1 SAR na Amazônia Central.

## 2. Material e métodos

### 2.1 Área de estudo

O estudo foi desenvolvido entre os municípios de Uruará e Parintins a leste do município de Manaus, estado do Amazonas. A região em estudo situa-se em um trecho do rio Amazonas no quadrante com as seguintes coordenadas geográficas:  $2^{\circ} 32' 11''$  S e  $57^{\circ} 45' 38''$  W; e  $2^{\circ} 37' 42''$  S e  $56^{\circ} 44' 11''$  W na projeção Universal Transverse Mercator (UTM), Zona 21 Sul, no sistema de referência World Geodesic System (WGS-84), (FIGURA 1).

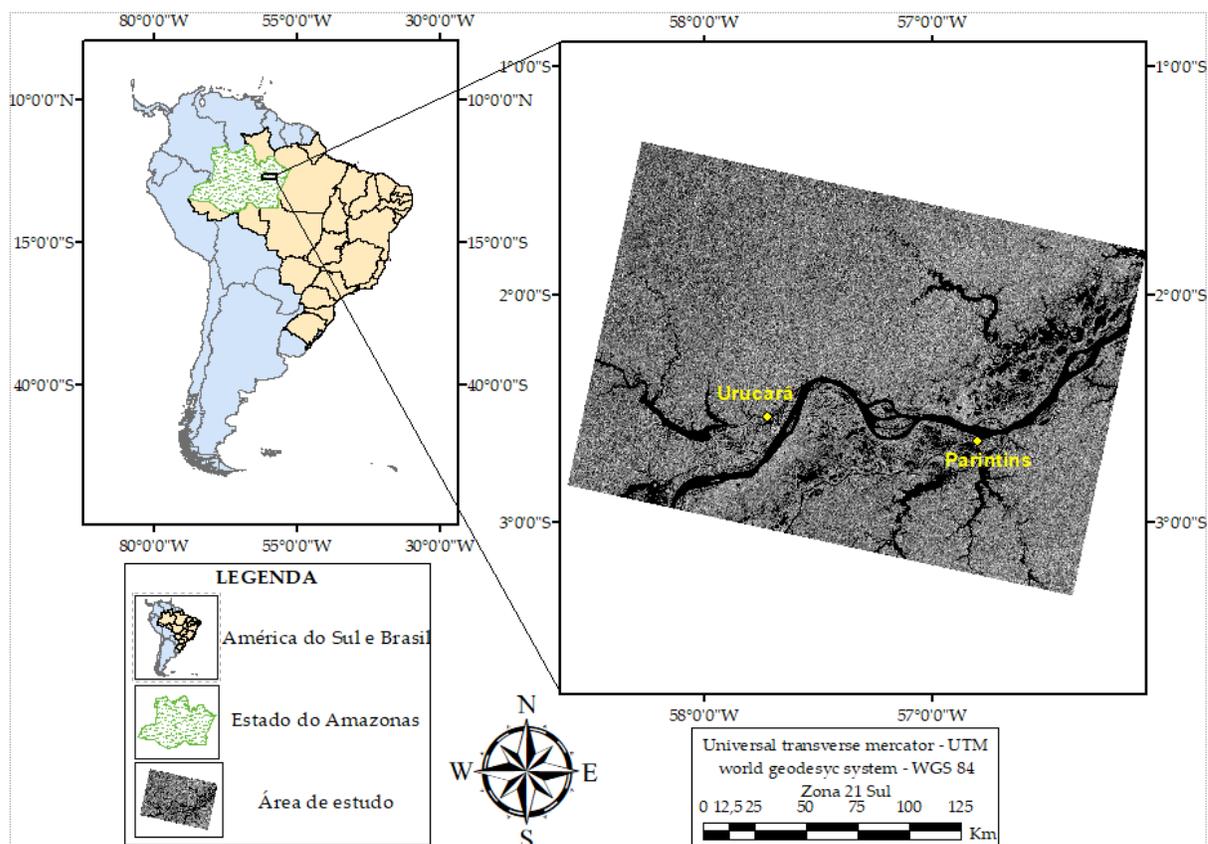


FIGURA 1. Mapa de Localização geográfica da área de estudo na Amazônia Central, Brasil

## 2.2 Caracterização climática

O clima é do tipo Am na classificação de Köppen, com precipitação anual de 1.355 mm a 2.839 mm. A temperatura média oscila de 25,6 °C a 27,6 °C, com umidade relativa do ar variando de 84% a 90% ao longo do ano; os meses mais chuvosos vão do período de dezembro a maio e com estiagem nos meses de agosto a novembro (Fisch *et al.*, 1998).

**2.3 Processamento digital de imagem – PDI** O desenvolvimento metodológico deste estudo consistiu nas seguintes etapas (FIGURA 2): 1)

aquisição da imagem SAR do satélite Sentinel-1 na dupla polarização VV/VH (resolução espacial de 10 m); 2) pré-processamento digital da imagem; 3) minimização de ruído *speckle* por meio dos sete filtro de suavização; 4) análise estatística da normalidade das amostras; 5) comparação entre as técnicas de filtragem por meio de métricas estatísticas e, 6) análise dos alvos na região em estudo. As etapas metodológicas desenvolvidas para a elaboração deste estudo consistiram na sequência conforme o fluxograma (FIGURA 2).

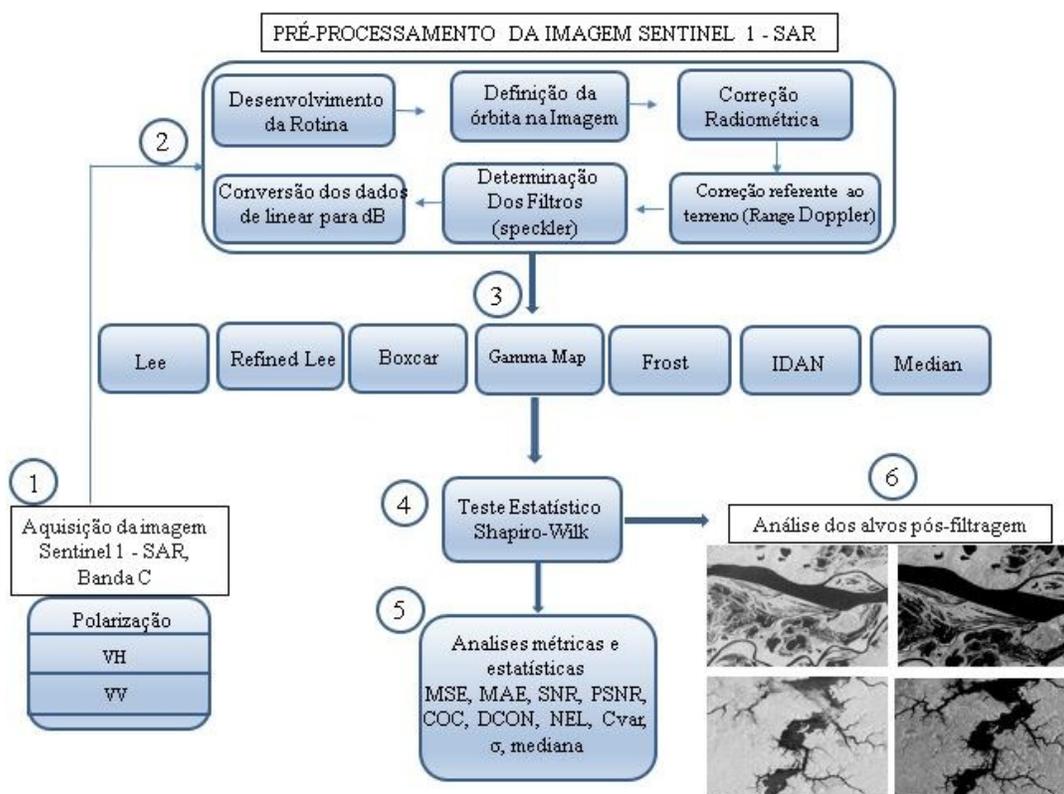


FIGURA 2. Fluxograma metodológico das etapas de desenvolvimento do estudo

Realizou-se a aquisição de uma cena SAR da área em estudo por meio do site da ESA no endereço eletrônico (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>). As

imagens Sentinel-1 apresentam quatro diferentes modos de aquisição: *Stripmap* (SM); *Interferometric Wide Swath* (IWS); *Extra Wide Swath* (EW); e *Wave* (WV). (TABELA 1).

TABELA 1. Parâmetros dos modos de aquisição da missão Sentinel-1 SAR. Fonte: ESA (2017)

Modo	Ângulo Incidente	Resolução Espacial	Largura de Faixa	Polarização
SM	20° - 45°	5 × 5 m	80 km	HH/HV, VV/VH, HH, VV
IW	29° - 46°	5 × 20 m	250 km	HH/HV, VV/VH, HH, VV
EW	19° - 47°	20 × 40 m	400 km	HH/HV, VV/VH, HH, VV
WV	22° - 35° 35° - 38°	5 × 5 m	20 × 20 km	HH, VV

A imagem utilizada na pesquisa compreende parte da região da Amazônia Central na data de 26 de setembro de 2016, no modo interferométrico IW, descendente, nas polarizações VH e VV e processada no nível 1.

Este nível de pré-processamento indica que a imagem é fornecida com um processamento de calibração inicial de dados. Cada cena IW é formada por uma composição de três observações sobre o solo, que produz uma imagem com 250 km de largura de faixa e resolução espacial de 10 metros. Os produtos resultantes são *single-look complex* (SLC) ou *ground range detected* (GRD).

Utilizou-se, nesse estudo, o produto GRD e posteriormente realizaram-se os processamentos iniciais para o tratamento das informações deste produto na seguinte sequência metodológica: no *toolbox Graph Builder*, primeiramente aplicou-se o *Appy Orbit File*, *Radiometric Calibrate* ( $\sigma_0$ ) e o *Correction Geometric* pelo método de *Range-Doppler Terrain Correction*. No *Speckle Filter*, analisou separadamente cada técnica de filtragem.

Para finalizar o processamento, converteu-se o valor de linear para valores em decibéis (dB). Metodologia semelhante para o tratamento inicial em imagens SAR foi demonstrado nos estudos de Furtado *et al.* (2016) e Magalhães *et al.* (2022a).

De acordo com Lee e Pottier (2009), as imagens SAR possuem ruídos que prejudicam a interpretação visual dos dados. Com o intuito de amenizar esses ruídos, diversos filtros têm sido desenvolvidos. Nesse sentido, no presente estudo compararam-se estatisticamente os dados de retroespalhamento e visual das imagens pós-filtragem do ruído. Os testes estatísticos e métricas consideraram 200 amostras distribuídas uniformemente por toda a imagem referência com diâmetro de 5 km. O mapa do projeto TerraClass de uso e ocupação da terra do ano de 2016 foi utilizado como suporte para distinção e localização de cada alvo na imagem de radar (Almeida *et al.*, 2016).

As amostras coletadas correspondem a áreas de floresta amazônica, corpos hídricos e área urbana em quatro repetições diferentes nos respectivos alvos (Figura 3). Com a finalidade de analisar a normalidade entre os dados amostrais nas duas polarizações VH e VV utilizou-se o teste estatístico não paramétrico Shapiro-Wilk ao nível de significância de 95%. Para análise das filtragens do ruído *speckle* utilizou-se os seguintes filtros com três dimensões de janelas (3 × 3, 7 × 7 e 11 × 11), *Frost*; *Gamma Map*; *Lee Enhanced*; *Lee*; *IDAM* 1, 2 e 3; mediana e *Boxcar*.

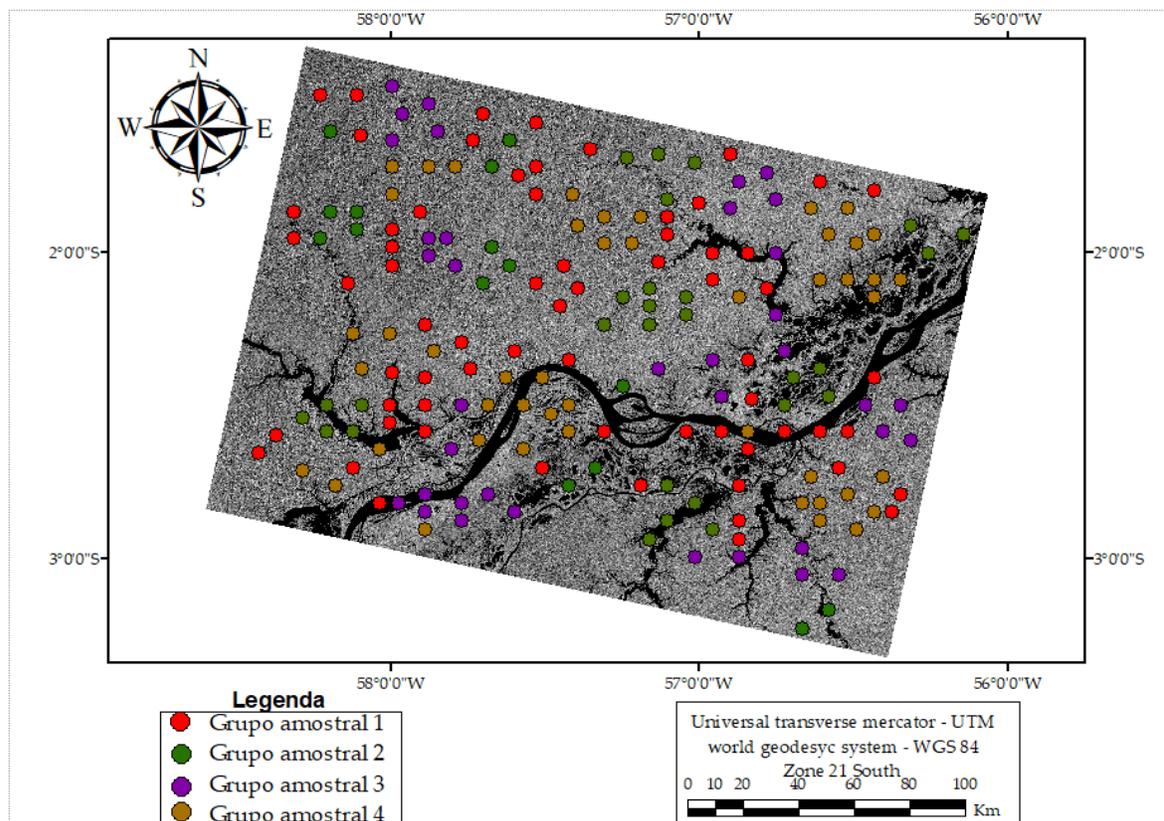


FIGURA 3. Localização espacial das amostras nos alvos analisados na Amazônia Central, Brasil

Os aplicativos computacionais empregados nos processamentos digital da imagem SAR foi o *S1-Toolbox*, desenvolvido na plataforma *Sentinel Application Platform* (SNAP), versão 6.0.0, ArcGIS 10.6 nas etapas de geoprocessamento e o SISVAR para análise estatística das amostras.

## 2.4 Técnicas de filtragem

### 2.4.1 Filtro mediana

O filtro da mediana é um método de transformação comum para suavizar os ruídos do tipo impulsivo em sinais de imagens digitais. A filtragem provoca um amaciamento do sinal ao descartar pontos muito altos ou muito baixos com relação à média do sinal, sem, no entanto, borrar as bordas das regiões como no caso do filtro passa-baixa.

O filtro de mediana é um filtro de vizinhança onde o valor de um pixel  $(x,y)$  é substituído pela mediana dos valores dos pixels da sua vizinhança. O valor mediano é aquele cujos elementos são

menores ou iguais em valor, ou, são maiores ou iguais em valor na lista ordenada.

### 2.4.2 Filtro Boxcar

Este filtro apresenta, como característica, capacidade de atenuar com muito rigor as altas frequências presente na imagem, mantendo as baixas frequências. É o filtro mais reconhecido para redução do ruído *speckle*, sendo convolucional, linear e geral por não apresentar um modelo específico para o ruído (Sant'anna, 1995).

Este filtro consiste em substituir um pixel (valor observado) pela média aritmética dos níveis de cinza de uma janela  $J \times J$  centrada nesse pixel. O algoritmo de filtragem Boxcar é um filtro polarimétrico que substitui cada pixel da imagem por uma média de valores calculada para uma janela englobando um pixel central. Todos os canais de varredura na imagem de entrada são filtrados independentemente. A aplicação do

Boxcar é vantajosa, pois reduz o *speckle* preservando a informação polarimétrica da imagem (Vasconcelos, 2016).

#### 2.4.3 Filtro Lee

De acordo com Lee (1980), este filtro tem a capacidade de transformar o modelo multiplicativo a uma aproximação usando um modelo linear por meio da expansão em série de Taylor em 1ª ordem em torno da média. Esta técnica utiliza estatística local para minimizar o Erro Quadrático Médio (EQM), por meio do filtro de Wiener. O filtro Lee é um filtro adaptativo e tem, como característica, a preservação de bordas nas imagens filtradas (Lee, 1980).

Este filtro estima o valor de um pixel através da soma ponderada do valor do pixel central e da média. A ponderação considerada é obtida como uma função da heterogeneidade dos sinais que compõe o valor do pixel. O valor  $\hat{x}$  do pixel corrente  $(x,y)$  é associado pelo filtro de Lee, de acordo com a Equação 1.

$$\hat{x} = \bar{x} + k(z - \bar{x})$$

em que  $\bar{x}$  é a média local da janela,  $z$  é o valor do pixel corrente e  $k$  o coeficiente adaptativo entre 0 e 1.

#### 2.4.4 Filtro Frost

É um filtro convolucional e linear que minimiza o EQM, incorporado a dependência dos pixels vizinhos (correlação exponencial entre os pixels). É adaptativo e preserva estruturas do tipo bordas. O filtro de *Frost* substitui o pixel de interesse pela soma ponderada dos valores interiores à janela  $(n \times n)$ , (Mansourpour *et al.*, 2006). A ponderação de fatores decresce com a distância do pixel de interesse aos pixels locais e é definido por meio da Equação 2.

$$DN = \sum_{n \times n} k a e^{-a/t/}$$

em que:  $a = \left(\frac{4}{n\sigma^{-2}}\right) \cdot \left(\frac{\sigma^2}{I^2}\right)$ ,

$K$  é a constante de normalização,

$I$  é a média local,

$\sigma$  a variância local,

$\sigma^{-}$  é a imagem com valor de coeficiente de variação,  $t$  é expresso pela fórmula:

$$(x - x_0) + (y - y_0);$$

e  $n$  é a resolução espacial do pixel.

#### 2.4.5 Filtro Refined Lee

Lee e Pottier (2009) propuseram um aprimoramento do sigma no filtro *Lee*, que apresenta deficiências, tais como: o viés dos dados filtrados, pontos pretos permanecendo nas imagens, borramento e omissão de objetos. A variação de sigma  $(I_1, I_2)$  foi redefinida baseando-se nas distribuições teóricas do *speckle*.

Assim, o novo intervalo para a seleção dos pixels, para qualquer média  $x$ , pode ser calculado como  $(I_1 x, I_2 x)$ . A média  $x$  é estimada por meio do erro quadrático médio mínimo (MMSE) dada por Lee (1980) em uma janela  $3 \times 3$ .

#### 2.4.6 Filtro Gamma Map

Conforme Lopes *et al.* (1990), o Máximo a Posteriori (MAP) é um filtro baseado no modelo do ruído multiplicativo, com os parâmetros de média e variância não estacionários. Este filtro assume que o valor do número digital original está entre o nível digital ou valor de retroespalhamento do pixel de interesse e da janela Kernel (Mansourpour *et al.*, 2006). De acordo com Lopes *et al.* (1990), o algoritmo de *Gamma Map* incorpora a hipótese de que, em áreas naturais, a seção transversal em *Gamma* é a mais apropriada para representar o modelo de distribuição, conforme representado pela Equação 3 de ordem cúbica.

$$I^3 - II^2 + \sigma(I - ND) = 0$$

em que  $I$  é o valor procurado

$II$ : média local  $DN$ : valor digital de entrada do pixel

$\sigma$ : variância da imagem original

#### 2.4.7 Filtro Intensity-driven adaptive-neighborhood (IDAN)

O filtro IDAN possui a característica de possuir um alto número de amostras, preservando a estacionaridade e a resolução espacial da imagem

pós-filtragem. Nessa técnica, ao invés de empregar janelas alinhadas com bordas, é definido um conjunto de pixels estacionários que cercam o pixel em análise, adaptando-se à morfologia local dos dados (Vasile *et al.*, 2006).

Nesse sentido, nesse método de filtragem, considera-se apenas a informação fornecida pelos elementos diagonais das matrizes de covariância para determinar os pixels estacionários (Foucher e Lopez-Martínez, 2014).

O processo de busca do valor do vizinho mais próximo é iniciado por meio dos valores médios de um pixel derivado com janela  $3 \times 3$  e o valor estimado da matriz de covariância é obtido por meio do valor médio dos pixels dentro do vizinho mais próximo adaptável.

## 2.5 Métricas de Avaliação da Qualidade de imagens SAR

A definição da melhor técnica de filtragem utilizou medidas ou métricas quantitativas de qualidade das imagens, tais como: Erro Quadrático Médio (EQM), Erro Absoluto Médio (MAE), Relação Sinal Ruído (SNR), Pico de Relação Sinal Ruído (PSNR), Índice de Preservação de Borda (EPI), Coeficiente de Correlação de Pearson, Distorção de Contraste (DCON), Número Equivalente de Looks (NEL), Análise da Variância, Desvio-Padrão e Coeficiente de Correlação de Pearson, cujo valor obtido estará entre  $-1$  e  $1$ , em que os valores mais próximos de  $1$  significa que houve uma maior similaridade positiva entre a imagem original e a imagem filtrada, já valores negativos representa uma maior similaridade negativa.

### 2.5.1 Erro médio quadrático (Mean Square Error – MSE)

Este parâmetro é utilizado no intuito de encontrar diferenças da média entre o sinal das amostras da imagem ruidosa e a imagem filtrada, sendo definida pela Equação 4. Na comparação entre os filtros é desejável um baixo valor para o MSE.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{s}_i - s_i)$$

em que  $\hat{s}_i$  e  $s_i$  são os  $i$ -ésimos pixels da imagem filtrada,  $\hat{s}$  é a imagem original ruidosa,  $s$  é a imagem filtrada e  $N$  é o tamanho (quantidade de pixels) da imagem.

### 2.5.2 Erro Absoluto Médio (MAE)

A estimativa do erro absoluto médio é definida conforme a Equação 5. Assim como na métrica MSE, é desejável um baixo valor para o MAE.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_j - y_j)$$

em que  $x_j$  e  $y_j$  são as coordenadas dos pixels das duas imagens

### 2.5.3 Relação Sinal-Ruído (SNR)

A relação sinal-ruído (SNR) em imagens SAR é expressa pela razão entre o desvio-padrão e a média em regiões homogêneas, onde os dados se ajustam ao modelo multiplicativo. Valores abaixo de  $0,5222/\sqrt{N}$  em que,  $N$  é número de visadas da imagem, indicam uma redução do desvio-padrão do ruído e de sua intensidade (Marques, 2004).

Para comparação entre os filtros, é desejável um maior valor de SNR. A relação entre o sinal e o ruído da imagem é definido por meio da Equação 6.

$$SNR = 10 \log_{10} \left( \frac{\sum_{i=1}^n s_i^2}{\sum_{i=1}^n (\hat{s}_i - s_i)^2} \right)$$

### 2.5.4 Pico de Relação Sinal-Ruído (PSNR)

Este parâmetro representa a relação entre a potência máxima possível do sinal obtido e a imagem de ruído. É a medida do desempenho da redução de ruído *speckle* na imagem. Uma imagem de melhor qualidade é indicada por um alto valor de PSNR. Quanto maior o valor de PSNR significa que mais o ruído foi removido. Essa relação é calculada por meio da Equação 7.

$$PSNR = 10 \log_{10} \left( \frac{2^n - 1}{MSE} \right)^2$$

### 2.5.5 Distorção de Contraste (DCON)

A métrica distorção de contraste realiza uma comparação entre as imagens com ruído *speckle*

e após a filtragem. Essa métrica é calculada conforme a Equação 8.

$$DCON = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(x_j - y_j)}{v + x_j + y_j}$$

em que  $v$  é a relação entre a luminância e o nível de cinza do display. A utilização do valor  $v = 23/255$  para esta métrica é sugerida por Baxter e Seibert (1998).

### 2.5.6 Número Equivalente de Looks (NEL)

Esse parâmetro representa a equivalência de valores médios de intensidade independentes por pixel. Este parâmetro é aplicado não apenas para descrever os dados originais, mas também para caracterizar os efeitos de suavização de operações de pós-processamento. O NEL para uma região homogênea de uma imagem é a razão entre a média ao quadrado da variância, sendo definido por meio da Equação 9.

$$NEL = \frac{(4 - \pi)}{\pi} x \frac{(1)}{Cv}$$

em que  $Cv$  é o coeficiente de variação amostral estimado. Vale ressaltar que a SNR é diretamente proporcional ao NEL, ou seja, quanto maior o NEL maior também será o SNR.

### 3. Resultados e discussão

O teste não paramétrico Shapiro-Wilk indicou normalidade gaussiana dos dados amostrais para as duas polarizações VV/VH (FIGURA 4). As amostras analisadas para a polarização VV apresentaram uma maior normalidade com  $w$  calculado no valor de 0,11 e 0,06 para a polarização VH, essa diferença entre a normalidade dos dados pode ser observada por meio do polígono de frequência e do histograma das amostras, pois o formato do polígono de frequência dos dados da polarização VV apresentou uma curva mais sinuosa. Entretanto, as duas polarizações apresentaram valores superiores ao limite para normalidade do teste Shapiro-Wilk que determina 0,05.

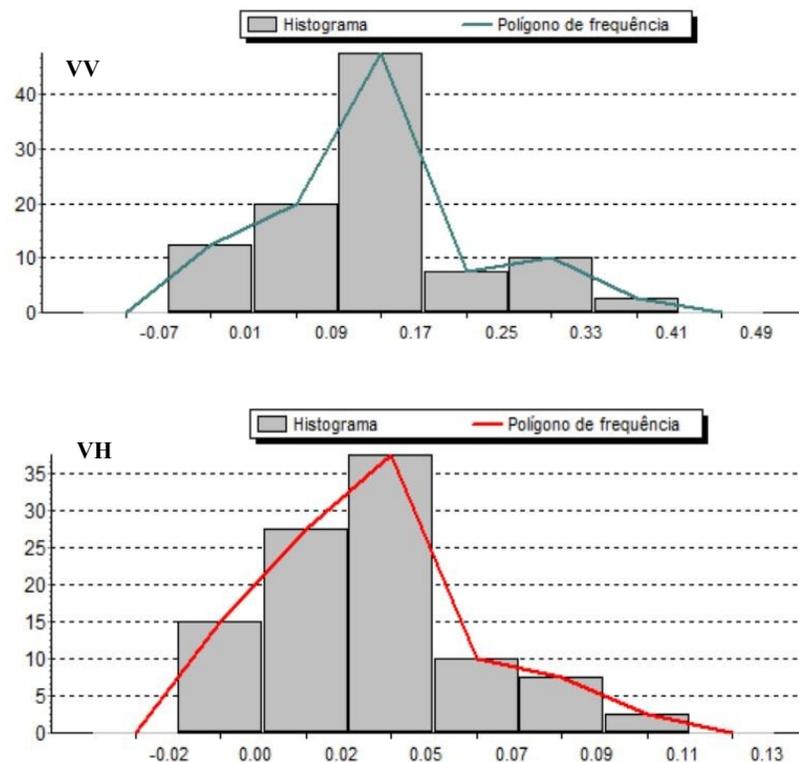


FIGURA 4. Histograma e polígono de frequência das amostras coletadas nas polarizações VV/VH por meio do teste Shapiro-Wilk ao nível de 95% de significância estatística

As TABELAS 2 e 3 mostram os valores das métricas de qualidade para cada filtro na polarização VH e VV. Na polarização VH, a imagem filtrada pelo filtro Lee 3×3 apresentou os melhores resultados na redução do ruído com o menor MSE (1,88) e MAE (1,638), como também os maiores valores de PSNR (13,35) e SNR (10,27).

TABELA 2. Valores referente aos Índices métricos para as técnicas de filtragem na polarização VH

Filtros VH	MSE (dB)	MAE (dB)	SNR (dB)	PSNR (dB)	CoC	DCON (dB)	NEL (dB)	Cvar	$\sigma$	Média
<b>Frost 3x3</b>	8,95	1,634	4,1377	12,68	0,4702	1,7266	4,641	0,803	0,032	0,0405
<b>Frost 7x7</b>	2,88	1,638	8,6336	13,17	0,6994	1,7224	13,443	0,472	0,018	0,0395
<b>Frost 11x11</b>	2,68	1,637	8,9233	13,2	0,7222	1,7231	21,345	0,374	0,016	0,044
<b>G M 3x3</b>	3,89	1,641	6,804	13,04	0,6011	<b>1,719</b>	12,664	0,486	0,019	0,0395
<b>G M 7x7</b>	2,60	1,636	9,184	13,21	0,7361	1,724	22,513	0,365	0,016	0,044
<b>G M 11x11</b>	3,40	1,636	8,033	13,1	0,6303	1,724	<b>23,899</b>	0,354	0,016	0,045
<b>Refined Lee</b>	3,91	1,638	7,6331	13,04	0,644	1,721	7,782	0,620	0,023	<b>0,038</b>
<b>Lee 3x3</b>	<b>1,88</b>	<b>1,633</b>	<b>10,277</b>	<b>13,35</b>	<b>0,824</b>	1,722	8,454	0,595	0,022	<b>0,038</b>
<b>Lee 7x7</b>	2,490	1,636	9,6613	13,23	0,751	1,724	15,130	0,445	0,019	0,043
<b>Lee 11x11</b>	2,713	1,635	9,2503	13,19	0,725	1,725	20,795	0,379	0,017	0,045
<b>IDAM 1</b>	2,73	1,638	8,294	13,19	0,714	1,722	16,784	0,422	0,017	0,0421
<b>IDAM 2</b>	2,915	1,640	8,030	13,16	0,696	1,720	18,564	0,401	0,016	0,0400
<b>IDAM 3</b>	3,551	1,640	7,1902	13,08	0,614	1,720	17,560	0,413	0,016	0,0399
<b>Mediana 3x3</b>	3,46	1,637	8,2216	13,09	0,662	1,723	11,829	0,503	0,021	0,043
<b>Mediana 7x7</b>	3,64	1,637	7,7089	13,07	0,6112	1,723	15,084	0,445	0,018	0,041
<b>Mediana 11x11</b>	3,43	1,6394	7,4250	13,09	0,6212	1,72138	22,818	<b>0,362</b>	<b>0,015</b>	0,0415
<b>Boxcar 3x3</b>	3,48	1,638	8,0076	13,09	0,6602	1,72218	1,4121	0,556	0,08	0,1609
<b>Boxcar 7x7</b>	2,22	1,637	8,5251	12,28	0,6747	1,72378	1,9142	0,400	0,062	0,1556
<b>Boxcar 11x11</b>	2,17	1,636	8,4309	12,29	0,669	1,7242	2,9944	1,0009	0,043	0,0438

A maioria dos filtros apresentaram resultados aproximados. No entanto, o filtro *Frost* 3×3 apresentou uma discrepância entre as filtrações na polarização VH com alto de MSE (8,95). A polarização VV apresentou resultados diferentes da polarização VH, onde o melhor desempenho

foi o filtro *Frost* com janela  $3 \times 3$  com baixos valores de MSE (1,2), MAE (6,28) e de distorção de contraste, quando comparado com a imagem original. Em geral, as métricas na polarização VV apresentaram valores concisos e aproximados. Contudo, o filtro IDAM 3 apresentou valores

discrepantes dos demais com alto valor de MSE (6,4).

Em geral, as métricas na polarização VV apresentaram valores concisos e aproximados. Contudo, o filtro IDAM 3 apresentou valores discrepantes dos demais com alto valor de MSE (6,4) para o MSE.

TABELA 3. Valores referente aos Índices métricos para as técnicas de filtragem na polarização VV

Filtros VV	MSE (dB)	MAE (dB)	SNR (dB)	PSNR (dB)	CoC	DCON (dB)	NEL (dB)	Cvar	$\sigma$	Média
<b>Frost 3x3</b>	<b>1,2</b>	<b>6,26</b>	<b>13,54</b>	<b>12,51</b>	<b>0,91</b>	6,59	12,09	0,49	0,77	0,15
<b>Frost 7x7</b>	3,4	6,28	8,97	12,09	0,75	6,59	17,67	0,41	0,63	0,15
<b>Frost 11x11</b>	4,5	6,27	8,11	11,97	0,64	6,59	21,78	0,37	0,61	0,16
<b>G M 3x3</b>	2,1	6,28	11,58	12,29	0,85	6,59	11,65	0,5	0,81	0,16
<b>G M 7x7</b>	3,9	6,27	8,92	12,03	0,7	6,6	18,38	0,4	0,66	0,165
<b>G M 11x11</b>	4,4	6,27	8,06	11,98	0,65	6,59	23,48	0,35	0,58	0,16
<b>Refined Lee</b>	4,1	6,29	7,86	12,01	0,7	<b>6,58</b>	14,02	0,46	0,67	0,14
<b>Lee 3x3</b>	3,7	6,27	9,44	12,06	0,74	6,6	11,559	0,5	0,81	0,16
<b>Lee 7x7</b>	4,9	6,27	7,78	11,93	0,61	6,59	18,17	0,4	0,65	0,16
<b>Lee 11x11</b>	5	6,27	7,73	11,92	0,6	6,6	21,23	0,37	0,6	0,16
<b>IDAM 1</b>	3,5	6,28	8,7	12,08	0,75	6,59	19,74	0,38	0,59	0,152
<b>IDAM 2</b>	4	6,28	8,33	12,02	0,7	6,59	20,13	0,38	0,59	0,154
<b>IDAM 3</b>	6,4	6,29	5,77	11,82	0,5	<b>6,58</b>	15,45	0,44	0,62	0,142
<b>Mediana 3x3</b>	2,5	6,29	3,76	11,22	0,22	<b>6,58</b>	10,49	0,53	0,74	0,14
<b>Mediana 7x7</b>	4,7	6,28	7,43	11,95	0,63	6,59	19,81	0,38	0,6	0,15
<b>Mediana 11x11</b>	5	6,28	6,99	11,92	0,6	<b>6,58</b>	25,58	<b>0,34</b>	<b>0,54</b>	0,16
<b>Boxcar 3x3</b>	3	6,28	8,34	11,15	0,68	6,59	18,74	1,45	0,6	<b>0,041</b>
<b>Boxcar 7x7</b>	2,9	6,27	7,14	11,16	0,55	6,59	24,62	1,25	<b>0,54</b>	0,043
<b>Boxcar 11x11</b>	2,9	6,27	7,55	11,15	0,57	6,6	<b>39,78</b>	1	1	0,043

Em ambas as polarizações VH e VV, o filtro de mediana 11×11 apresentou resultados próximos às melhores técnicas e obteve o melhor desempenho estatístico de coeficiente de variação, desvio-padrão e média. Os baixos valores para os índices estatísticos comprovaram a eficiência do filtro de mediana 11 × 11 nas imagens filtradas para as duas polarizações.

Sun *et al.* (2016) realizaram um estudo comparativo entre os filtros clássicos e os atuais para amenização do ruído *speckle* com intuito de analisar o desempenho as informações espaciais e polarimétrico de imagens PolSAR na região Central de Rosário na Argentina. Os autores obtiveram bons resultados métricos de NEL para o filtro *Lee* e *B oxcar*, corroborando com este estudo na qual, também foram obtidos bons valores de NEL por meio das duas técnicas de filtragem espacial.

Hatwa e Kher (2015) utilizaram e compararam técnicas de filtros adaptativos para na eliminação do ruído *speckle* em imagens do satélite Sentinel-1 SAR. Os autores atribuíram pesos distintos para as respectivas variâncias de 0,01 e 0,4 por meio da linguagem de programação no *software Matlab*. Diante dessa adaptação, os filtros que apresentaram melhores desempenhos estatísticos foram os filtros *Enhanced Lee* para a variância 0,1 e *Enhanced Kuan* para a variância 0,4.

Kuck *et al.* (2022) analisaram a performance de diversos filtros espaciais para amenização do ruído *speckle* em alvos in presentes no bioma Amazônico por meio de imagens SAR do satélite *COSMO Sky-Med*, como resultado neste estudo os autores obtiveram os melhores resultados métricos de desvio padrão ENL e ENL<sub>ratio</sub> para o filtro *Lee* com janela 3 x 3, por ser um estudo desenvolvido em áreas semelhantes, corrobora com os desempenhos métricos obtidos pelo filtro *Lee* nessa pesquisa.

Neste estudo, o filtro *Lee Refined* apresentou um bom desempenho de filtragem perante as duas polarizações, obtendo o melhor valor de média com 0,038 na polarização VH e melhor valor para a distorção de contraste com 6,38 na polarização VV.

Santoso *et al.* (2016) corroboraram com os resultados obtidos neste estudo ao analisar o desempenho das métricas estatísticas para imagens ALOS-PALSAR após a redução do ruído *speckle*. Os resultados obtidos demonstraram melhor desempenho para o filtro *Frost* nos parâmetros SNR, ENL e SSIM. Entretanto, esses autores observaram uma maior preservação de bordas por meio do filtro *Lee*. Nesse artigo, os alvos com maiores predominâncias são: os corpos hídricos, área urbana e vegetação que são os alvos também com maior predominância neste estudo na Amazônia Central.

A FIGURA 5 demonstra a imagem original do satélite Sentinel-1 nas polarizações VH e VV. Os alvos mais distinguíveis e de maior presença são os corpos hídricos, floresta Amazônica e área urbana da região do município de Parintins, AM. Nessa figura, foram selecionadas essas áreas com aplicação de zoom para melhor distinção visual da imagem pós-filtradas por meio das técnicas *Lee* 3 × 3 na polarização VH e *Frost* 3 × 3 na polarização VV, que, respectivamente obtiveram os melhores desempenhos para os índices métricos.

A análise visual das imagens filtradas nas duas polarizações da imagem Sentinel-1 permitiu distinguir uma maior presença de ruído *speckle* nos corpos hídricos, quando comparado às áreas florestais e urbanas.

Os corpos hídricos e a floresta amazônica apresentam semelhança na análise visual para as duas polarizações após a filtragem do ruído *speckle* tanto para as técnicas de filtragem *Frost* 3 × 3 quanto para o *Lee* 3 × 3. Já na análise visual da área urbana, comprovou-se que a imagem de SAR na polarização VV apresentou uma maior discriminação para esta classe de uso e ocupação, com a prevalência de pixels mais claros e mais distinguíveis quando comparado com a polarização VH.

Após a filtragem, a imagem com polarização VV também apresentou maior nitidez do alvo área urbana, aumentando a análise visual e distinguindo da floresta amazônica que são alvos próximos na área em estudo. Em geral, os valores nas métricas estatísticas para as filtrações na polarização VH apresentaram os melhores

resultados quando analisado aos valores métricos obtidos pela polarização VV na área de estudo.

Para ilustrar a comparação entre os valores obtidos para cada índice métrico nas distintas polarizações, é apresentado por meio do gráfico (FIGURA 6).

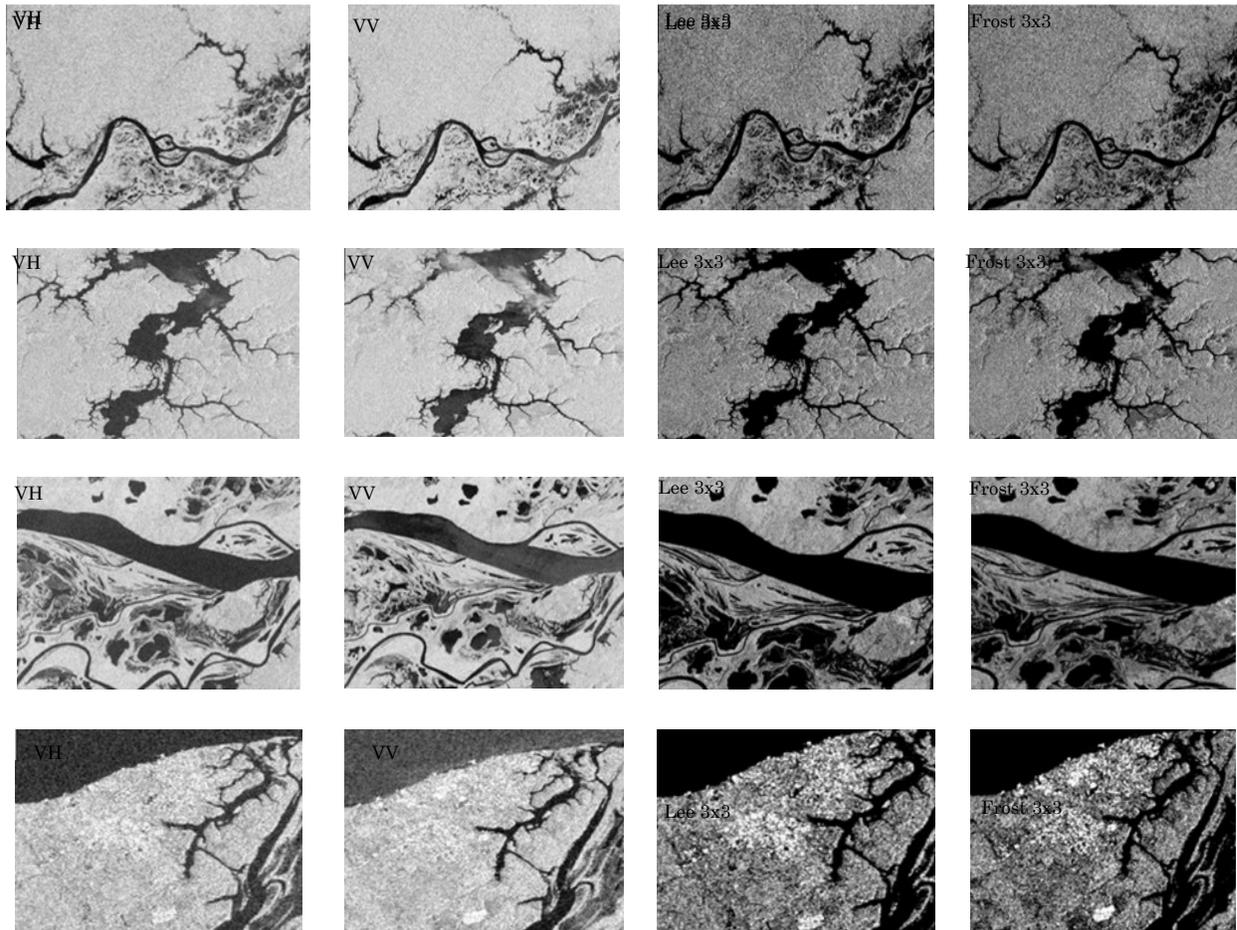


FIGURA 5. Imagem Sentinel-1 SAR, polarizações VH e VV, imagem filtrada por meio do filtro *Lee 3x3* na polarização VH e filtro *Frost 3x3* na polarização VV com ênfase visual nos alvos, floresta amazônica, corpos hídricos e área urbana de Parintins, AM

A análise visual das imagens filtradas nas duas polarizações da imagem Sentinel-1 permitiu distinguir uma maior presença de ruído *speckle* nos corpos hídricos, quando comparado às áreas florestais e urbanas.

Os corpos hídricos e a floresta amazônica apresentam semelhança na análise visual para as duas polarizações após a filtragem do ruído *speckle* tanto para as técnicas de filtragem *Frost 3 x 3* quanto para o *Lee 3 x 3*. Já na análise visual da

área urbana, comprovou-se que a imagem de SAR na polarização VV apresentou uma maior discriminação para esta classe de uso e ocupação, com a prevalência de pixels mais claros e mais distinguíveis quando comparado com a polarização VH.

Após a filtragem, a imagem com polarização VV também apresentou maior nitidez do alvo área urbana, aumentando a análise visual e distinguindo da floresta amazônica que são alvos

próximos na área em estudo. Em geral, os valores nas métricas estatísticas para as filtragens na polarização VH apresentaram os melhores resultados quando analisado aos valores métricos obtidos pela polarização VV na área de estudo.

Para ilustrar a comparação entre os valores obtidos para cada índice métrico nas distintas polarizações, é apresentado por meio do gráfico (FIGURA 6).

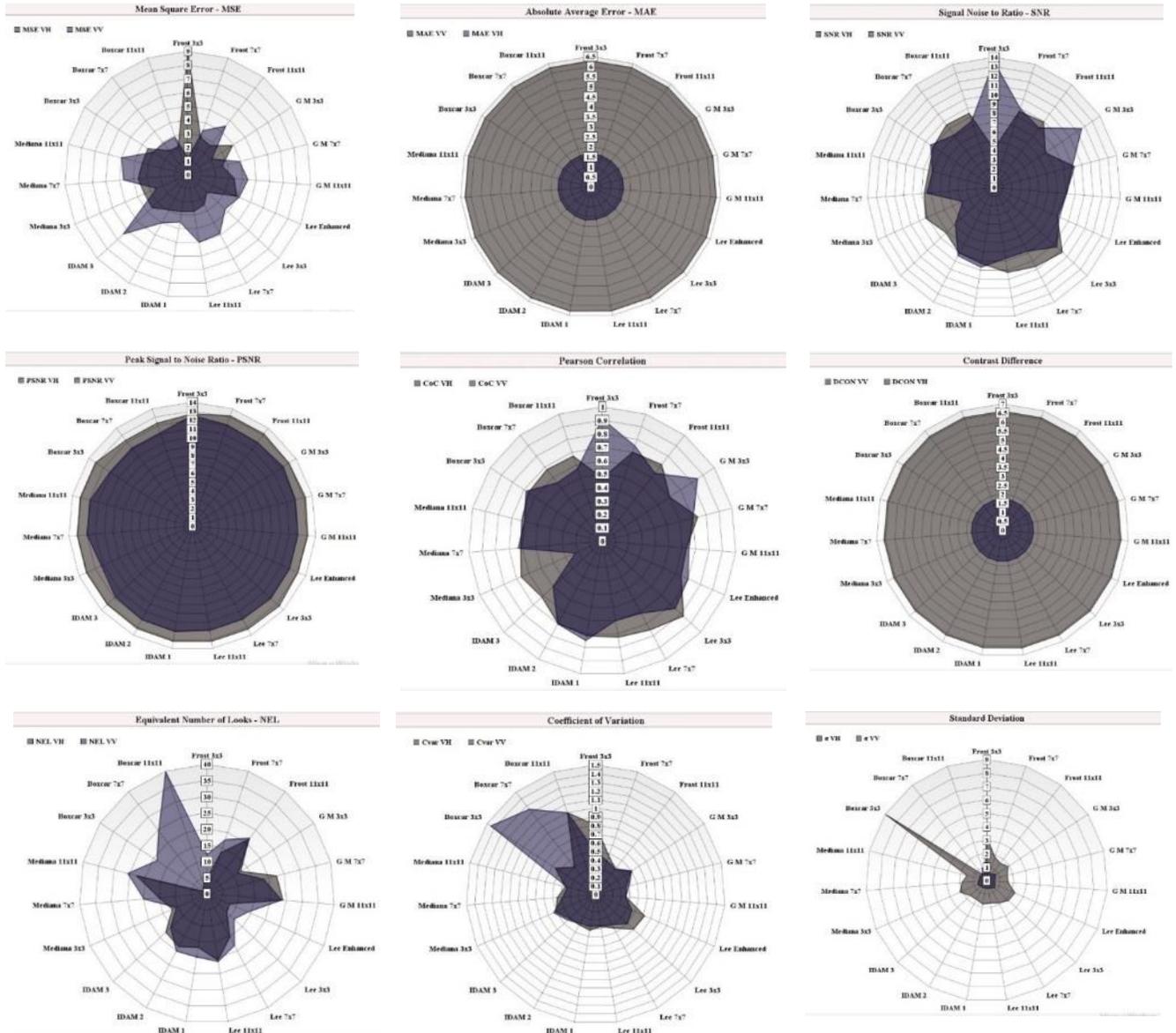


FIGURA 6. Gráfico dos valores métricos mensurados para as polarizações VH e VV na região de Parintins, AM

Nas polarizações VH e VV, as métricas MAE, DCON e PSNR apresentaram os valores mais próximos entre todas as técnicas de filtragem. Entretanto, na análise estatística, os resultados demonstram

diferenças entre as filtragens, tendo como destaque o filtro *Boxcar* com janela  $3 \times 3$  com os maiores valores para a variância e desvio-padrão na polarização VV.

#### 4. Conclusões

Em geral, os métodos de filtragem obtiveram bom desempenho métrico e estatístico, com valores aproximados para os índices nas sete técnicas de filtragem.

Os filtros *Frost* com janela  $3 \times 3$  na polarização VH e o filtro IDAN 3 na polarização VV apresentaram os piores performances para redução do ruído *speckle*, sendo desaconselhável o uso na região da Amazônia Central.

Por meio da análise estatística e visual, comprova-se que a polarização VV na imagem Sentinel-1 apresenta alta interferência do ruído *speckle* nos corpos hídricos, como também os maiores valores métricos.

Por apresentar os melhores valores estatísticos, o filtro de mediana com janela  $11 \times 11$  nas polarizações VH e VV, pode-se ser utilizado como técnica de filtragem alternativa na imagem Sentinel-1 SAR para as duas polarizações.

As melhores técnicas de filtragem foram analisadas pelo conjunto dos resultados obtidos por meio das métricas estatísticas. Contudo, para uma análise de parâmetros específicos na imagem SAR, outros filtros fazem jus, pois neste estudo alguns filtros apresentaram melhores valores métricos e estatísticos quando comparados com o *Lee*  $3 \times 3$  na polarização VH e *Frost*  $3 \times 3$  na polarização VV.

#### 6. Referências citadas

- ALMEIDA, F. C. 2008. *Simulação de resposta de estruturas simplificadas de vegetação ao Radar de Abertura Sintética Interferométrico*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos. Tese de Mestrado.
- ALMEIDA, C. A.; COUTINHO, A. C.; ESQUERDO, J. C. D. M.; ADAMI, M.; VENTURIERI, A.; DINIZ, C. G.; ... & A. R. GOMES. 2016. "High spatial resolution land use and land cover mapping of the Brazilian Legal Amazon in 2008 using Landsat-5/TM and MODIS data". *Acta Amazonica*, 46(3): 291-302.
- BAXTER, R. & M. SEIBERT. 1998. "Synthetic aperture radar image coding". *Lincoln Laboratory Journal*, 11(2): 121-158.
- BREKKE, C. & A. H. S. SOLBERG. 2005. "Oil spill detection by satellite remote sensing". *Remote Sensing of Environment*, 95(15): 1-13.
- CHANG, J.; HANSEN, M. C.; PITTMAN, K.; CARROLL, M. & C. DIMICELI. 2007. "Corn and soybean mapping in the United States using MODN time-series data sets". *Agronomy Journal*, 99(6): 1.654-1.664.
- DONG, Y. M.; MILNE, A. K. & B. C. FORSTER. 2001. "Segmentation and classification of vegetated areas using Polarimetric SAR Image Data". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(2): 321-329.
- EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). 2017. Disponível em: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/home>. [Consulta: dezembro, 2020].
- FISCH, G.; MARENGO, J. A.; & C. A. NOBRE. 1998. "Uma revisão geral sobre o clima da Amazônia". *Acta Amazonica*, 28(2): 101-126.

- FU, L. L. & B. HOLT. 1982. *Seasat Views Oceans and Sea Ice with Synthetic-Aperture Radar*. NASA/JPL. Institute of technology Pasadena. USA.
- FURTADO, L. F. A.; SILVA, T. S. F. & E. M. L. M. NOVO. 2016. "Dual-season and full-polarimetric C band SAR assessment for vegetation mapping in the Amazon varzea wetlands". *Remote Sensing of Environment*, 174(1): 212-222.
- FORKUOR, G.; CORAND, C.; THIEL, M.; ULMANN, T. & E. ZOUNGRANA. 2014. "Integration of optical and synthetic aperture radar imagery for improving crop mapping in Northwestern Benin, West Africa". *Remote Sensing*, 6(7): 6.472-6.499.
- FOUCHER, S. & C. LOPEZ-MARTINEZ. 2014. "Analysis, evaluation and comparison of polarimetric SAR Speckle Filtering Techniques". *IEEE Transactions on Image Processing*, 23: 1.751-1.764.
- HATWAR, P. A. & H. R. KHER. 2015. "Analysis of speckle noise reduction in synthetic aperture radar images". *International Journal of Engineering Research and Technology*, 4(1): 508-512.
- JENSEN, J. R. 2011. *Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres*. Parêntese. São Paulo, Brasil.
- JIN, H.; MOUNTRAKIS, G. & S. V. STEHMAN. 2014. "Assessing integration of intensity, polarimetric scattering, interferometric coherence and spatial texture metrics in PALSAR-derived land cover classification". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 98: 70-84.
- KUCK, T. N.; GOMEZ, L. D.; SANO, E. E.; BISPO, P. C. & D. D. C. HONORIO. 2021. "Performance of speckle filters for COSMO-SkyMed images from the Brazilian Amazon". *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 19: 1-5.
- LEE, J. S. 1980. "Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics". *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2: 165-168.
- LEE, J. S. & E. POTTIER. 2009. *Polarimetric SAR Radar Imaging: From Basic to Applications*. CRC Press. New York, United States.
- LOPES, A.; TOUZI, R. & E. NEZRY. 1990. "Adaptive speckle filters and scene heterogeneity". *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 28(6): 992-1.000.
- MAGALHÃES, I. A. L.; CARVALHO JUNIOR, O. A.; CARVALHO, O. L. F.; ALBUQUERQUE, A. O.; HERMUCHE, P. M.; MERINO, E. R.; .... & R. F. GUIMARÃES. 2022. "Comparing machine and deep learning methods for the phenology-based classification of land cover types in the Amazon biome using Sentinel-1 Time Series". *Remote Sensing*, 14(19): 1-26.
- MAGALHÃES, I. A. L.; CARVALHO JUNIOR, O. A.; GUIMARÃES, R. F. & R. A. T. TRANCOSO. 2022a. "Sentinel-1 time series analysis on central amazon floods". *Mercator*, 21: 1-19.
- MANSOURPOUR, M.; RAJABI, M. A. & J. A. R. BLAIS. 2006. "Effects and performance of speckle noise reduction filters on active radar and SAR images". *Environmental Science*, 1(9): 1-6.

- MARQUES, R. C. P. 2004. *Filtragem de Ruído Speckle em Imagens de Radar de Abertura Sintética e Avaliação dos Efeitos sobre a Segmentação*. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, Brasil. Tese de Mestrado.
- NOVO, E. M. L. M. 2014. *Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações*. Blucher. São Paulo, Brasil.
- SANT'ANNA, S. J. S. 1995. *Avaliação de Filtro redutores do speckle em imagens de radar de abertura sintética*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, São Paulo, Brasil. Tese de Mestrado.
- SANTOSO, A. W.; BAYUAJI, L.; TIEN SZE. L.; LATEH, H. & J. M. ZAI. 2016. "Comparison of various speckle noise reduction filters on Synthetic Aperture Radar Image". *International Journal of Applied Engineering Research*, 11: 8.760-8.767.
- SRINIVAS, R. & S. PANDA. 2013. "Performance analysis of various filters for image noise removal in different noise environment". *International Journal of Advanced Computer Research*, 3(4): 47-52.
- SUN, S.; LIU, R.; YANG, C.; ZHOU, H.; ZHAO, J. & J. MA. 2016. "Comparative study on the speckle filters for the very high-resolution polarimetric synthetic aperture radar imagery". *Journal of Applied Remote sensing*, 10(4): 12-21.
- TELLO, M.; LOPEZ-MARTINEZ, C. & J. J. MALLORQUI. 2006. "Automatic vessel monitoring with single and multidimensional SAR images in the wavelet domain". *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 61(3): 260-278.
- VASCONCELOS, A. O. 2016. *Modelagem da biomassa do manguezal da APA de Guapi-Mirim utilizando dados multitemporais polarimétricos do sensor Radarsat-2*. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil. Tese de Doutorado.
- VASILE, G.; TROUVÉ, E.; LEE, J. & V. BUZULOIU. 2006. "Intensity-Driven-Adaptive-Neighborhood Technique for Polarimetric and Interferometric SAR Parameters Estimation". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(6): 1.609-1.621.

---

Local e data de finalização do artigo:  
Brasília, Brasil; agosto, 2022