

Redução de Ruído em Imagens SAR pelo uso de Filtros Robustos

ALEJANDRO C. FRERY
SIDNEI J. S. SANT'ANNA

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Divisão de Processamento de Imagens
(INPE - DPI) Avenida dos Astronautas, 1758
12227-010 São José dos Campos, SP, Brasil
radar@dpi.inpe.br

Abstract. After briefly reviewing some classical filters for speckle removal, we derive and implement three filters with characteristics of robustness, suitable for speckle noise reduction: the ones based on the median, on the inter-quartile range and on the median absolute deviation. Assuming that observations within a synthetic aperture radar image are outcomes of independent Rayleigh random variables, these filters exhibit a good performance from both the signal-to-noise reduction and from the edge preserving criteria. The problem of filtering in an image is posed as an estimation problem.

Key Words: Filtering, multiplicative models, order statistics, robustness, speckle, synthetic aperture radar.

1 Introdução

As técnicas de processamento de imagens têm sofrido um crescimento explosivo nos últimos anos. Isto deve-se, entre outros motivos, ao fato de se dispor de um volume cada vez maior de imagens, provenientes de várias fontes. Sabe-se, por exemplo, que, até hoje, uma porcentagem superior a 50% das imagens enviadas por satélites ambientais nunca foi vista por olhos humanos... e a grande maioria delas carrega informação preciosa.

Essa informação, quando recuperada dentro de prazos aceitáveis, está presente no cotidiano de todos nós: desde dados relevantes para a previsão do tempo, até estatísticas que influem em decisões políticas de concessão de créditos internacionais para as safras de uma nação.

Portanto, cada vez é mais importante poder processar imagens em forma rápida, e de tal forma que a informação procurada seja recuperada em forma precisa. É dentro deste contexto que as ferramentas estatísticas estão tendo um papel central. Outras ferramentas, como por exemplo as de Inteligência Artificial, também estão contribuindo ao desenvolvimento de técnicas para o processamento e a interpretação automática de imagens.

Em sensoriamento remoto o imageamento por radares, principalmente o radar de abertura sintética (SAR), está tendo uma importância cada vez maior. Sistemas de radar possuem sensores ativos, isto é, possuem a sua própria fonte de energia podendo ope-

rar à noite, o que não ocorre com sensores passivos. Os sensores ativos, por operarem na faixa espectral das microondas, fornecem informações a respeito das características dielétricas e texturais do solo. Estes são pouco afetados por condições ambientais tais como nuvens, chuva, etc., que são problemas cruciais para os sistemas que operam na faixa ótica do espectro.

Este trabalho propõe-se a derivar três filtros que apresentem propriedades de robustez, para a redução do nível de ruído em imagens SAR. O desafio maior reside na degradação dessas imagens por um ruído dependente do sinal (denominado *speckle*) devido à natureza coerente da radiação emitida pelo radar.

2 Notação e Distribuições Importantes

As variáveis aleatórias e as suas ocorrências serão denotadas, neste texto, por letras maiúsculas e minúsculas, respectivamente; ou seja X denota uma variável aleatória, e x denota uma ocorrência de X . Os vetores aleatórios serão escritos em negrito, assim como as suas ocorrências. Então, similarmente ao caso anterior, escrever-se-á \mathbf{X} e \mathbf{x} , respectivamente.

A função indicadora do conjunto A será denotada $\mathbb{I}_A(\mathbf{x})$, isto é:

$$\mathbb{I}_A(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1 & \text{se } \mathbf{x} \in A \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

O número de elementos (cardinalidade) do conjunto A será denotada $\#A$. O conjunto dos números in-

teiros será denotado \mathbf{Z} , o dos reais \mathbb{R} , o dos reais não negativos \mathbb{R}^+ , e o dos naturais $\mathbb{N} = \{1, 2, \dots\}$.

Denotar-se-á Z_i uma variável aleatória com distribuição normal padrão, isto é, a sua densidade é

$$f_{Z_i}(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}z^2\right) \text{ para todo } z \in \mathbb{R}.$$

Diz-se que a variável aleatória W tem distribuição χ com $\tau > 0$ graus de liberdade (denotada χ_τ), se a sua densidade é

$$f_W(w) = \left[2^{\frac{\tau}{2}} \Gamma\left(\frac{\tau}{2}\right)\right]^{-1} w^{\tau-1} \exp\left(-\frac{w^2}{2}\right) \mathbb{I}_{\mathbb{R}^+}(w).$$

Os momentos de W são

$$\mathbb{E}(W^k) = 2^{\frac{k}{2}} \frac{\Gamma\left(\frac{\tau+k}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{\tau}{2}\right)}, \quad (1)$$

onde a função Gamma de Euler é dada por:

$$\Gamma(\nu + 1) = \int_{\mathbb{R}^+} t^\nu \exp(-t) dt \text{ para todo } \nu > -1,$$

e vale que $\Gamma(k) = (k-1)!$ se $k \in \mathbb{N}$. Outras propriedades úteis desta função podem ser vistas em [Graham et al., 1988].

É possível ver em [Koroliuk, 1986] que a distribuição da variável aleatória V definida, para todo $n \in \mathbb{N}$, por:

$$V = \sqrt{\sum_{1 \leq i \leq n} Z_i^2}$$

é χ_n se, para todo $i \neq j$, Z_i é independente de Z_j . É de uso comum em estatística a distribuição da variável aleatória V^2 , que se chama distribuição χ^2 com n graus de liberdade, e se denota χ_n^2 .

Será de interesse a distribuição χ_2 , que recebe o nome de distribuição de Rayleigh unitária. Ela é a distribuição da distância de um ponto à origem, em \mathbb{R}^2 , que partindo da origem anda em cada eixo uma quantidade aleatória independente e com distribuição normal padrão.

Seja ξ um número real positivo; diz-se que Y é uma variável aleatória Rayleigh com parâmetro ξ (e essa variável aleatória é denotada como $Y \sim \mathcal{R}(\xi)$) se tem densidade dada por:

$$f_\xi(y) = \frac{y}{\xi^2} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\xi}\right)^2\right) \mathbb{I}_{\mathbb{R}^+}(y). \quad (2)$$

Integrando-a com relação a y tem-se a função de distribuição acumulada da variável aleatória Y :

$$F_\xi(x) = \left[1 - \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\xi}\right)^2\right)\right] \mathbb{I}_{\mathbb{R}^+}(x), \quad (3)$$

que será necessária para o cálculo dos filtros.

O leitor pode verificar facilmente que se $X \sim \mathcal{R}(1)$ então $\xi X \sim \mathcal{R}(\xi)$, isto é, as variáveis aleatórias Rayleigh são uma família de escala.

Sejam $F: \mathbb{R} \rightarrow [0, 1]$ a função de distribuição acumulada da variável aleatória Y , e α um número positivo tal que $0 < \alpha < 1$; define-se então o α -quantil de Y como $\inf\{t \in \mathbb{R}: F(t) \geq \alpha\}$. Essa quantidade será denotada y_α .

Usando a equação (3) é imediato calcular, para $Y \sim \mathcal{R}(\xi)$, o seu α -quantil:

$$y_\alpha = \xi \sqrt{2 \ln \frac{1}{1-\alpha}},$$

onde podem ser derivadas a sua mediana e a sua distância inter-quartil, dadas por:

$$\text{Med}(Y) = y_{\frac{1}{2}} = \xi \sqrt{2 \ln 2}, \text{ e} \quad (4)$$

$$\text{IQR}(Y) = y_{\frac{3}{4}} - y_{\frac{1}{4}} = \xi \left(\sqrt{2 \ln 4} - \sqrt{2 \ln \frac{4}{3}} \right), \quad (5)$$

respectivamente. Dois dos filtros aqui apresentados baseiam-se nessas medidas.

Se $Y \sim \mathcal{R}(\xi)$ então, utilizando-se a equação (1) e a propriedade de escala, vem que a sua esperança e a sua variância são dadas por:

$$\mathbb{E}(Y) = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \xi \text{ e } \text{Var}(Y) = \left(2 - \frac{\pi}{2}\right) \xi^2, \quad (6)$$

respectivamente. Na Figura 1 é mostrado o desenho de três destas densidades (equação (2)), para diferentes valores do parâmetro ξ .

Para todo $x \in \mathbb{R}^+$ denotar-se-á a sua parte inteira como $[x]$, i. e., $[x] = \max\{k \in \mathbb{N}: k \leq x\}$. Por simplicidade notacional, define-se \mathcal{P} o conjunto dos números pares, e \mathcal{I} o conjunto dos números ímpares.

Sejam agora $\mathbf{a} = (a_1, \dots, a_N)$ um vetor N -dimensional de números reais, e $A \subset \{1, \dots, N\}$ um subconjunto das suas coordenadas. Denotar-se-á \mathbf{a}_A a restrição do vetor \mathbf{a} ao conjunto de coordenadas A , isto é, $\mathbf{a}_A = \{a_j\}$ tal que $j \in A$. Seja ainda $\mathbf{a}_{(\bullet)}$ o vetor \mathbf{a} ordenado em ordem crescente; será escrito $\mathbf{a}_{(\bullet)} = (a_{N:1}, \dots, a_{N:N})$ (i. e., $a_{N:1} \leq a_{N:2} \leq \dots \leq a_{N:N}$). Então, a mediana amostral de \mathbf{a} é definida como

$$Q_2(\mathbf{a}) = \begin{cases} a_{N:[N/2]+1} & \text{se } N \in \mathcal{I} \\ \frac{1}{2}(a_{N:N/2} + a_{N:N/2+1}) & \text{se } N \in \mathcal{P}; \end{cases}$$

o quartil amostral inferior de \mathbf{a} como

$$Q_1(\mathbf{a}) = \begin{cases} a_{N:(\ell+1)/2} & \text{se } \ell \in \mathcal{I} \\ \frac{1}{2}(a_{N:\ell/2} + a_{N:\ell/2+1}) & \text{se } \ell \in \mathcal{P}; \end{cases} \quad (7)$$

e o quartil amostral superior de \mathbf{a} como

$$Q_3(\mathbf{a}) = \begin{cases} a_{N:(N+1-(\ell+1)/2)} & \text{se } \ell \in \mathcal{I} \\ \frac{1}{2}(a_{N:N+1-\ell/2} + a_{N:N-\ell/2}) & \text{se } \ell \in \mathcal{P}. \end{cases} \quad (8)$$

Nas equações (7) e (8) denotou-se:

$$\ell = \begin{cases} \frac{N-1}{2} & \text{se } N \in \mathcal{I} \\ \frac{N}{2} & \text{se } N \in \mathcal{P}. \end{cases}$$

3 Propriedades das Imagens SAR

Denota-se por S o suporte de uma imagem. Por definição $S \subset \mathbf{Z}^2$ é finito e da forma $S = S_1 \times S_2$, com $S_i = \{a_i, \dots, b_i\} \subset \mathbf{Z}$ para $i = 1, 2$. No contexto de processamento de imagens SAR, o parâmetro ξ das distribuições Rayleigh é chamado *backscatter* ou *retroespalhamento*. Uma das hipóteses mais aceitas é que a distribuição marginal de observações obedece à distribuição de Rayleigh, devido à presença do chamado ruído *speckle*.

Supondo que a "verdade terrestre" é uma coleção de posições, cada uma com um entre L valores possíveis $0 < \xi_1 < \dots < \xi_L < +\infty$ de retroespalhamentos, o sistema imageador retorna, para essa posição, a observação de uma variável aleatória Rayleigh com o parâmetro correspondente. É o *modelo multiplicativo* proposto para este tipo de imageamento.

Este modelo de degradação é um caso particular do estudado em [Bustos-Frery (1992)]. Isto é equivalente a supor que, dado o *backscatter* do terreno, o ruído *speckle* é independente de *pixel* para *pixel* e que o imageamento SAR foi feito com uma visada (*look*) e detecção linear. Duas referências completas para estes assuntos são os artigos [Derin et al. (1990), Kelly et al. (1988)] e os trabalhos neles indicados.

Esta hipótese pode ser verificada, por exemplo, estimando-se o coeficiente de variação em regiões homogêneas, $C(Y)$, e conferindo-se que é constante. Das equações (6), deduz-se que

$$C(Y) = \frac{\sigma(Y)}{\mathbb{E}(Y)} = 2\sqrt{\frac{1}{\pi} - \frac{1}{4}}.$$

Supondo válida esta hipótese, e dado que o valor do parâmetro da Rayleigh é desconhecido, pode-se estimá-lo baseado em $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_n)$, um vetor de observações de tamanho n usando-se, por exemplo, o estimador de máxima verossimilhança:

$$\hat{\xi}_{MV} = \sqrt{\frac{1}{2v} \sum_{1 \leq i \leq v} y_i^2}. \quad (9)$$

Este estimador possui todas as propriedades desejáveis de eficiência e consistência assintóticas.

Outro estimador que aparece com certa frequência na literatura é o dos momentos baseado no primeiro momento amostral, dado por:

$$\hat{\xi}_{MO} = \frac{1}{v} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sum_{1 \leq i \leq v} y_i. \quad (10)$$

Note que $\sqrt{\pi/2} \hat{\xi}_{MO}$ é a média amostral das n observações do vetor \mathbf{y} .

Neste trabalho, aborda-se o problema de *filtragem* de uma imagem SAR como o problema de se *estimar parâmetros* dentro de uma janela da imagem. Portanto, em princípio, seria possível utilizar os estimadores dados pelas equações (9) ou (10) para reduzir o ruído em uma imagem.

Esses estimadores apresentam um bom desempenho somente quando a amostra sobre a qual são aplicados é de observações *puras*. Isto é, quando cada observação provém da mesma distribuição e quando todas são coletivamente independentes. Esta hipótese pode não ser verificada nas imagens reais por vários motivos: o mais evidente é quando se realiza a filtragem em regiões de borda, ou seja, perto da separação entre duas ou mais regiões com valores de retroespalhamento diferentes. Outro motivo possível para a não validade desta hipótese é o aparecimento de correlação entre observações, fato decorrente das propriedades do sistema de imageamento e/ou do tipo de alvo imageado.

4 Filtros de Ruído Speckle

Nesta seção são apresentados apenas os filtros mais conhecidos desta área e, aos leitores interessados, recomendam-se as referências indicadas para maiores detalhes. Filtragem com preservação de bordas é uma preocupação presente em vários trabalhos da literatura de processamento de imagens ([Nagao-Matsuyama (1979)], [Frost et al. (1982)], por exemplo).

Muitos filtros espaciais têm sido desenvolvidos para a redução do *speckle* e para o aumento da relação sinal-ruído, objetivando uma melhoria na imagem final. Estes filtros podem ser divididos em dois grupos: os filtros convolucionais e os filtros pontuais, adaptativos ou não. No primeiro grupo encontram-se:

- Filtro da Média: é o filtro mais simples para a redução do ruído. Consiste em se trocar o nível de cinza de um *pixel* (valor observado) pela média aritmética dos níveis de cinza de uma janela de tamanho $N \times N$, centrada neste *pixel*. É um filtro geral, por não adotar nenhum modelo específico para o ruído.

- Filtro de Frost (Frost et al., 1982): é um filtro convolucional linear, derivado da minimização do erro médio quadrático sobre o modelo multiplicativo do ruído. Neste filtro incorpora-se a dependência estatística do sinal original, uma vez que se supõe uma função de correlação espacial Exponencial entre os *pixels*. É um filtro adaptativo que preserva a estrutura de bordas.

e no segundo grupo encontram-se:

- Filtro Sigma de Lee (Lee, 1981b): teve seu desenvolvimento baseado no fato de que, em muitas imagens degradadas, o ruído tem distribuição gaussiana e é aditivo ao sinal. O valor do *pixel* filtrado resulta da observação dos níveis de cinza numa janela de tamanho $N \times N$. Dessas observações, consideram-se apenas aquelas cujo valor encontra-se dentro do intervalo (estimado) 2σ ; calcula-se, então, a média aritmética destas. Trata-se, portanto, de um filtro da média *apurada*.
- Filtro de Lee (Lee, 1981a): adota um modelo multiplicativo para o ruído e obedece o critério de *local linear minimum mean square error*. *Local*, porque utiliza estatísticas locais do *pixel* a ser filtrado, admitindo a não estacionaridade da média e da variância do sinal; *linear*, porque realiza uma linearização por expansão em série de Taylor da multiplicação do sinal e o ruído em torno da média, utilizando apenas os termos lineares. O resultado da linearização transforma o modelo multiplicativo do ruído em aditivo, ou seja, o ruído e o sinal tornam-se independentes; e, finalmente, *minimum mean square error*, porque minimiza o erro médio quadrático através do filtro de Wiener. É um filtro adaptativo e geral.
- Filtro de Kuan/Nathan (Kuan et al., 1982; Nathan et al., 1987): adota um modelo multiplicativo. O procedimento é semelhante àquele de Lee, onde a estimação ponto a ponto é feita utilizando-se o filtro de Wiener. A diferença entre eles, entretanto, consiste no fato de que no filtro de Kuan/Nathan não se realiza nenhuma aproximação. É também um filtro adaptativo e geral.
- Filtro MAP (para imagens de radar; Sant'Anna, 1993): adota um modelo multiplicativo para o ruído. Dadas duas variáveis aleatórias X e Y com função densidade de probabilidade conjunta $f_{XY}(x, y)$, a estimativa de máximo *a posteriori* (MAP) de X dado $Y = y$ é obtida maximizando-se a função densidade de probabilidade

a posteriori com relação a x , isto é, $\hat{x}_{MAP} = \max_x^{-1} f_{X|Y=y}(x|y)$. O *pixel* filtrado poderá ser a média local se o coeficiente de variação dos valores observados for menor que o coeficiente de variação do ruído ($C_n > C_y$) ou ainda poderá ser a solução da equação MAP caso esta solução esteja entre a média e a observação. É um filtro adaptativo e geral, dependendo apenas de sua modelagem.

5 Filtros Robustos

Alguns antecedentes no uso de técnicas robustas em processamento de imagens podem ser encontrados nos artigos de [Bovik et al. (1983)], de [Kundu et al. (1984)] e de [Kie-Bum-Kashyap (1987)]. Duas referências bastante completas para assuntos ligados à robustez de estimadores são [Barnett-Lewis, 1978] e [Bustos, 1981].

Prosseguindo com a idéia de que *filtrar é estimar*, e levando em conta a possibilidade do aparecimento de contaminação dentro da janela de estimação, é possível pensar no uso de algum dos seguintes estimadores baseados nas observações y_w :

$$\hat{\xi}_{MAD} = \frac{1}{K_1} Q_2(z_w), \quad (11)$$

$$\hat{\xi}_{IQR} = \frac{Q_3(y_w) - Q_1(y_w)}{K_2}, \quad (12)$$

$$\hat{\xi}_{Med} = \frac{1}{K_3} Q_2(y_w), \quad (13)$$

onde $z_w = (z_1, \dots, z_v)$, com $z_i = |y_i - Q_2(y_w)|$ para todo $i \in W$, e $v = \#W$.

As equações acima correspondem aos estimadores MAD (*Median Absolute Deviation*) (11), o baseado na distância inter-quartil (ou IQR: *Inter Quartil Range*) (12), e o da mediana (13).

As constantes K_1 , K_2 e K_3 são calculadas para que esses estimadores sejam assintoticamente consistentes. Para K_2 e K_3 basta conhecer $y_{1/4}$, $y_{1/2}$ e $y_{3/4}$, dados nas equações (4) e (5), e aplicar o método de substituição. Chega-se assim aos valores de $K_2 = \sqrt{2 \ln 4} - \sqrt{2 \ln 4/3}$ e $K_3 = \sqrt{2 \ln 2}$. Já K_1 pode ser determinada usando métodos numéricos, e o seu valor aproximado é $K \approx 0.4485$. Para chegar nesse valor é preciso calcular a distribuição da variável aleatória $Z = |Y - \text{Med}(Y)|$, sendo que $Y \sim \mathcal{R}(1)$, e define-se $K_1^{-1} = \text{Med}(Z)$.

Sempre é considerada a seguinte situação: serão filtrados apenas os *pixels* com um número de vizinhos suficiente; aqueles que não satisfaçam esta propriedade, ficarão com o valor original. As imagens original e filtradas serão escritas $y = [y_s]_{s \in S}$ e $\hat{x} = [\hat{x}_s]_{s \in S}$, respectivamente.

Denota-se \mathcal{F} um filtro qualquer; ele é uma função da forma $\mathcal{F}: \Xi^W \rightarrow \Xi$, onde Ξ é o contradomínio de cada *pixel* (por exemplo, em muitas aplicações, tem-se que $\Xi = \{0, \dots, 255\}$) e supõe-se que todos os *pixels* têm o mesmo contradomínio. Acima $W \subset \mathbb{Z}^2$ é denominado o suporte do filtro, ou *janela*, que é da forma $\{-t, \dots, 0, \dots, t\} \times \{-t, \dots, 0, \dots, t\}$, onde se escreve $s = (s_1, s_2)$ e diz-se que o filtro tem tamanho $2t+1$. Portanto, o filtro usa $v = (2t+1)^2$ observações para cada *pixel*. Define-se ainda a translação da janela do filtro pelo ponto $r = (r_1, r_2)$ como $W_r = \{s \in \mathbb{Z}^2: s - r \in W\}$.

Finalmente, a operação de filtragem pode ser escrita como:

$$\hat{x}_s = \begin{cases} \sqrt{\pi/2} \mathcal{F}(y_{W_s}) & \text{se } W_s \subset S \\ y_s & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

Caso haja necessidade de se filtrar todos os *pixels* da imagem, basta que se redefina o suporte do filtro para cada caso. Preferiu-se não fazer isto por simplicidade computacional, e para usar as bordas (observações não processadas) como uma forma rápida de comparação da imagem filtrada com a imagem original.

Uma pequena modificação deve ser introduzida nas definições acima para que os filtros preservem o contradomínio Ξ (um conjunto discreto) da imagem. Considerar-se-á como *valor filtrado* ao inteiro mais próximo do resultado da operação de filtragem, i. e., $\lfloor \frac{1}{2} + \sqrt{\pi/2} \mathcal{F}(y_{W_s}) \rfloor$.

Ainda, se todas as observações dentro da janela forem iguais, anulando o valor dos estimadores MAD e IQR, considerar-se-á como *valor filtrado* a própria observação.

Como deseja-se manter o nível médio de cinza na imagem, e este se relaciona com o parâmetro ξ através da equação (6), na implementação dos filtros cada resultado é multiplicado pelo fator $\sqrt{\pi/2}$. Fica claro que $\hat{x} = \mathcal{F}(y)$ é um estimador da imagem não observada $x = \sqrt{\pi/2} [\xi_s]_{s \in S}$ baseado na imagem observada y , e justifica-se assim a notação empregada.

6 Resultados

A seguir pode ser visto um exemplo da aplicação desta técnica a uma imagem SAR aerotransportado obtida pelo sensor SAR-580 (Banda L), sobre a região de Freiburg, Alemanha, com uma visada e deteção linear.

A Figura 2 é um pedaço de 128×128 *pixels* da imagem original, apresentando o ruído *speckle*, típico das imagens SAR. Nele observam-se duas regiões homogêneas: uma clara, de floresta e uma escura, de solo exposto.

As Figuras 3, 4 e 5 são, respectivamente, as filtrações obtidas pelos métodos IQR, MAD e Med. A Figura 6 mostra o resultado de uma filtragem utilizando-se a média amostral. Em todos os casos mostram-se os resultados obtidos quando se utiliza uma janela de tamanho 5.

Para comparar a redução do ruído, foi utilizado \widehat{C}^{-1} , a recíproca do coeficiente de variação (relação sinal-ruído) medido dentro de regiões homogêneas. Os valores de assimetria e de kurtosis compararam a relativa "normalidade" das observações.

Na Tabela 1 mostram-se os resultados para um total de 3500 observações adquiridas dentro da região mais escura.

	\widehat{C}^{-1}	Assimetria	Kurtosis
Teórico	1.913	0.631	3.245
Original	1.965	0.665	0.276
IQR	3.082	1.103	2.364
MAD	3.088	0.914	2.061
Med	3.881	0.960	3.429
Média	4.057	1.419	7.061

Tabela 1: Estimações na região escura

Na Tabela 2 mostram-se os resultados para um total de 2679 observações adquiridas dentro da região mais clara.

	\widehat{C}^{-1}	Assimetria	Kurtosis
Teórico	1.913	0.631	3.245
Original	1.879	0.573	-0.155
IQR	3.185	0.611	0.579
MAD	3.155	0.627	0.652
Mediana	3.971	0.491	1.100
Média	4.424	0.660	3.472

Tabela 2: Estimações na região clara

Os valores observados dos coeficientes de variação e de assimetria são próximos o suficiente dos respectivos valores teóricos permitindo, assim, não rejeitar a hipótese de distribuição Rayleigh.

Em ambas Tabelas observa-se que os filtros robustos aumentam a relação sinal-ruído e, simultaneamente, tornam mais normais os histogramas finais.

Na Tabela 3 observa-se que o melhor filtro, com relação ao critério de aumento da relação sinal-ruído, é o da média. Este filtro introduz melhoras nesta relação de 106% e 135% nas áreas escura e clara, respectivamente. Por outro lado, o *pior* dos filtros

	Área escura	Área clara
IQR	57%	70%
MAD	57%	68%
Med	98%	111%
Média	106%	135%

Tabela 3: Redução percentual de ruído em áreas homogêneas

propostos com relação a esse critério, o MAD, fornece ganhos de 57% e 68% para as mesmas áreas. Logo, a diferença entre o melhor e o pior filtro não é muito grande, sendo que o segundo preserva os detalhes mais do que o primeiro. Cabe observar que a escolha do filtro mais adequado para determinado tipo de aplicação depende exclusivamente dos objetivos da mesma.

Outra observação importante diz respeito à avaliação qualitativa dos filtros, em geral. Algumas destas formas [Sant'Anna, 1993] são a estimação da perda de resolução através de:

- desempenho de métodos de classificação;
- detecção de bordas;
- análise de Fourier; e
- resposta impusiva de um alvo pontual.

A Figura 7 mostra os histogramas das imagens original e filtradas. Pode-se ver claramente que, após a filtragem, obtém-se uma nítida separação entre as duas classes: os histogramas são bimodais. Antes da aplicação dos filtros, observa-se um histograma unimodal, produzindo-se assim uma confusão entre as duas classes.

No que diz respeito à preservação da borda entre as regiões escura e clara, pode-se notar que os filtros robustos propostos conservam a estrutura de borda muito melhor que o filtro da média.

7 Informação Computacional e Extensões

Os algoritmos foram implementados na linguagem de programação C++; foi usado o compilador C++ da SUN, versão 2 e executados em uma SUN SPARCstation 2, sob OpenWindows versão 3 e UNIX versão 4.1.1.

As imagens foram visualizadas e impressas com o utilitário de imagens SAO (Smithsonian Astrophysical Observatory), e as estimações foram feitas com o sistema KHOROS. A constante K_1 e a Figura 1 foram obtidas pelo uso do sistema Pro-Matlab Versão 3.5h.

O tempo para obter todas as filtragens indicadas neste trabalho foi de, aproximadamente, 9 segundos de CPU para uma janela de tamanho 5 (isto é, usando 25 observações para cada *pixel* filtrado).

Pretende-se dar continuidade a este trabalho pela utilização de técnicas Monte Carlo para uma avaliação cuidadosa do desempenho destes e de outros filtros, comparando-os em termos de consistência, eficiência e de perda de resolução para diferentes tipos e proporções de contaminação. Outras técnicas robustas aparecerão em [Frery-Sant'Anna, 1993].

Os programas fonte estão disponíveis via correio eletrônico.

8 Agradecimentos

Os autores agradecem a participação dos Professores Oscar H. Bustos (Instituto de Matemática, Astronomía y Física, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina) e Nelson D. A. Mascarenhas (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brasil).

9 Referências

- Barnett, V.; Lewis, T. *Outliers in statistical data*. Great Britain, John Wiley & Sons, 1978.
- Bovik, A.C.; Huang, T.S.; Munson, D.C. A generalization of median filtering using linear combination of order statistics. *IEEE Trans. on Acoustics, Speech and Signal Processing*, **ASSP-31**:1342-1349, 1983.
- Bustos, O.H. *Estimación robusta no modelo de posição*. Poços de Caldas, XIII Colóquio Brasileiro de Matemática, 1981.
- Bustos, O.H.; Frery, A. C. A contribution to the study of Markovian degraded images: an extension of a theorem by Geman and Geman. *Matemática Aplicada e Computacional*, **11**:17-29, 1992.
- Derin, H.; Kelly, P.; Vézina, G.; Labbit, S. Modelling and segmentation of speckled images using complex data. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, **GRS-28**:76-87, 1990.
- Frery, A.C.; Sant'Anna, S.J.S. Non adaptive robust filters for speckle noise reduction. A aparecer.
- Frost, V.S.; Stiles, J.A.; Shanmugan, K.S.; Holtzman, J.C. A model for radar images and its applications to adaptive digital filtering of multiplicative noise. *IEEE Trans. Pattern Analysis Machine Intelligence*, **PAMI-4**:157-166, 1982.
- Goodman, J.W. Statistical properties of laser speckle patterns. In: Dainty, J. C., ed. *Laser speckle and related phenomena*. Springer-Verlag,

1982. cap. 2.
- Graham, R.; Knuth, D.; Patashnik, O. *Concrete mathematics: a foundation for computer science*. USA, Addison-Wesley, 1988.
- Kelly, P.; Derin, H.; Hartt, K. Adaptive segmentation of speckled images using a hierarchical random field model. *IEEE Trans. on Acoustics, Speech and Signal Processing*, **ASSP-36**:1628-1641, 1988.
- Kie-Bum, E.; Kashyap, R.L. Robust image model based noise suppression. In: Scandinavian Conference on Image Analysis, 5., Stockholm, June 2-5, 1987.
- Koroliuk, V. *Manual de la teoría de probabilidades y estadística matemática*. 1. reimp. Moscú, Editorial Mir, 1986.
- Kuan, D.T.; Sawchuk, A.A.; Strand, T.C.; Chavel, P. Adaptive restoration of images with speckle. [Washington], 1982. p. 28-38. (SPIE Proceeding v. 359).
- Kundu, A.; Mitra, S.K.; Vaidyanathan, P.P. Application of two-dimensional generalized mean filtering for removal of impulse noises from images. *IEEE Trans. on Acoustics, Speech and Signal Processing*, **ASSP-32**:600-609, 1984.
- Lee, J.S. Speckle analysis and smoothing of synthetic aperture radar images. *Computer Graphics and Image Processing*, **17**:24-32, 1981a.
- Lee, J.S. A simple speckle smoothing algorithm for synthetic aperture radar images. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, **SMC-13**:85-89, 1981b.
- Nagao, M.; Matsuyama, T. Edge preserving smoothing. *Computer Graphics and Image Processing*, **9**:394-407, 1979.
- Nathan, K.S.; Kurlander, J.C. Speckle noise reduction of 1-look SAR imagery. In: IGARSS'87 Symposium. Ann Harbour, 18-21 May, 1987. *Proceedings*.
- Sant'Anna, S.J.S. Avaliação de filtros redutores de speckle. (Tese de Mestrado em Sensoriamento Remoto) - INPE, São José dos Campos. A ser apresentada em 1993.

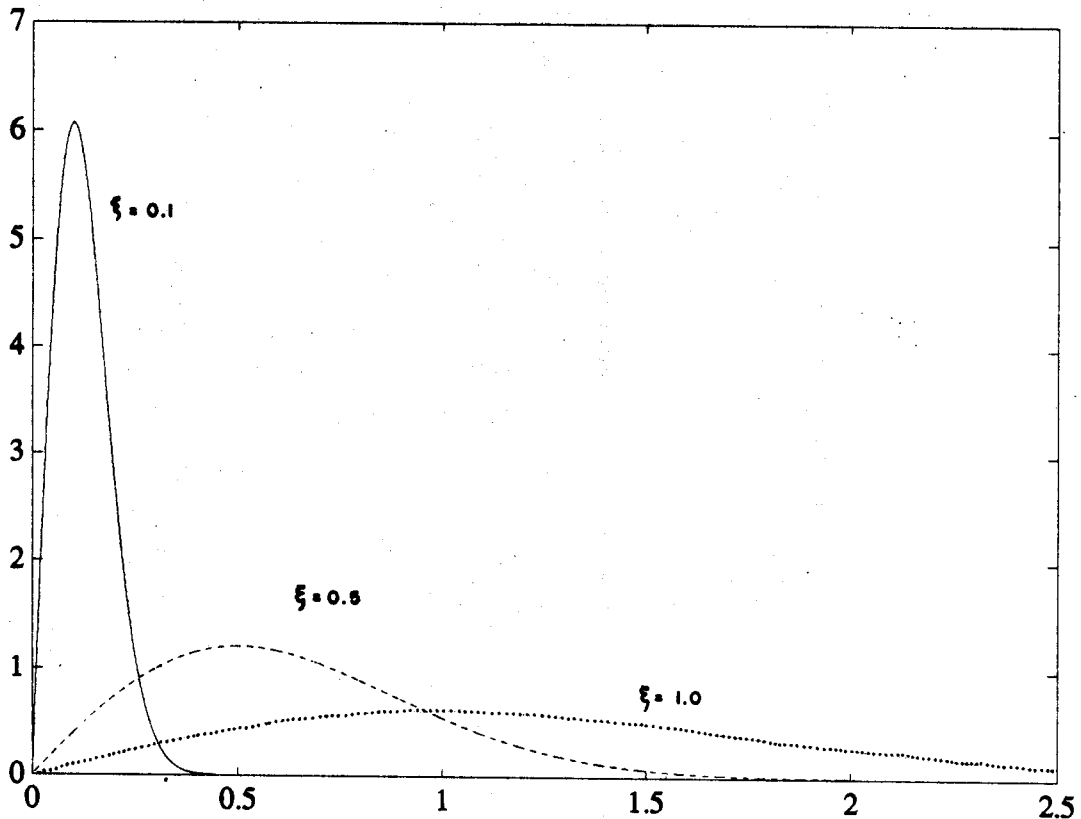


Figura 1: Densidades Rayleigh para $\xi = 0.1$, $\xi = 0.5$ e $\xi = 1$.

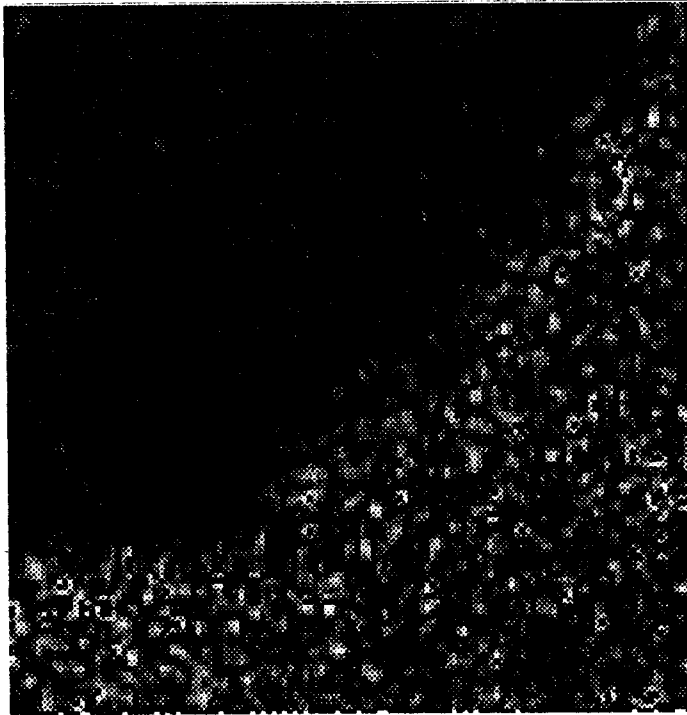


Figura 2: Imagem SAR-580, banda L.

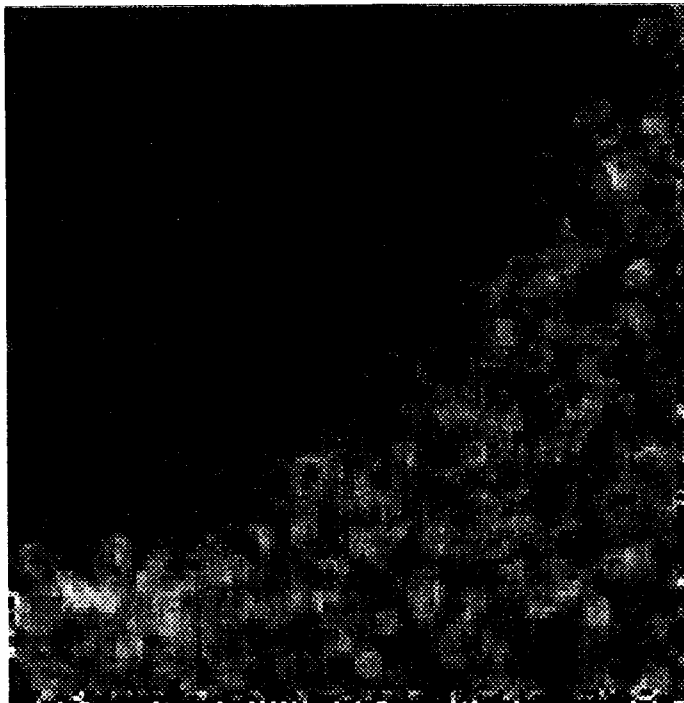


Figura 3: Imagem filtrada pelo algoritmo IQR.

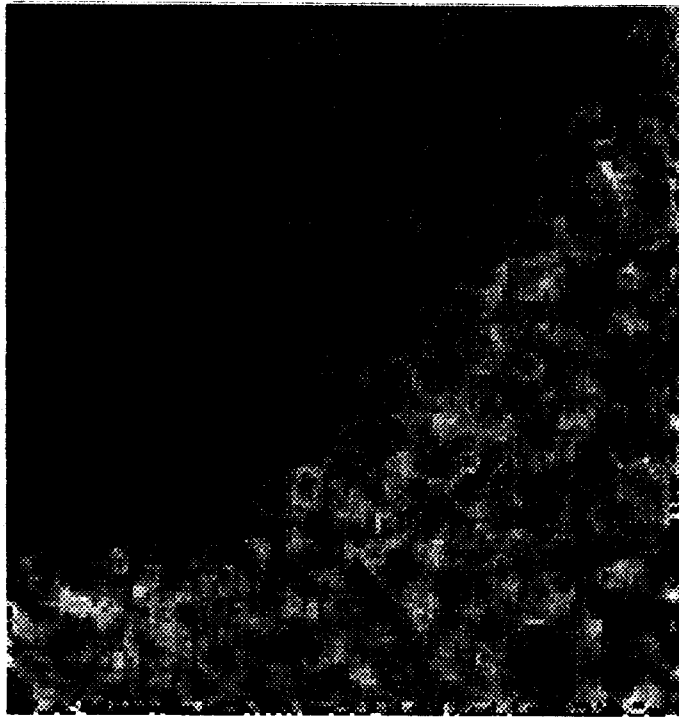


Figura 4: Imagem filtrada pelo algoritmo MAD.

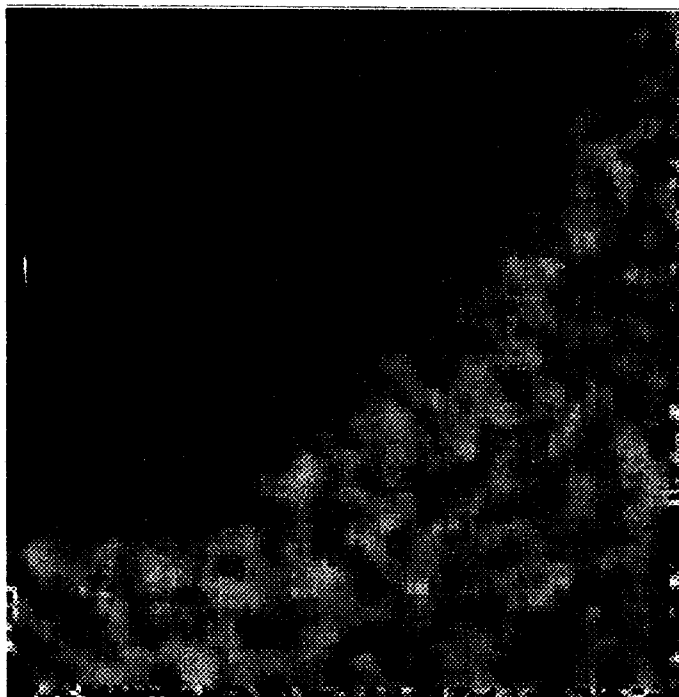


Figura 5. Imagem filtrada pelo algoritmo da mediana.



Figura 6: Imagem filtrada pela média.

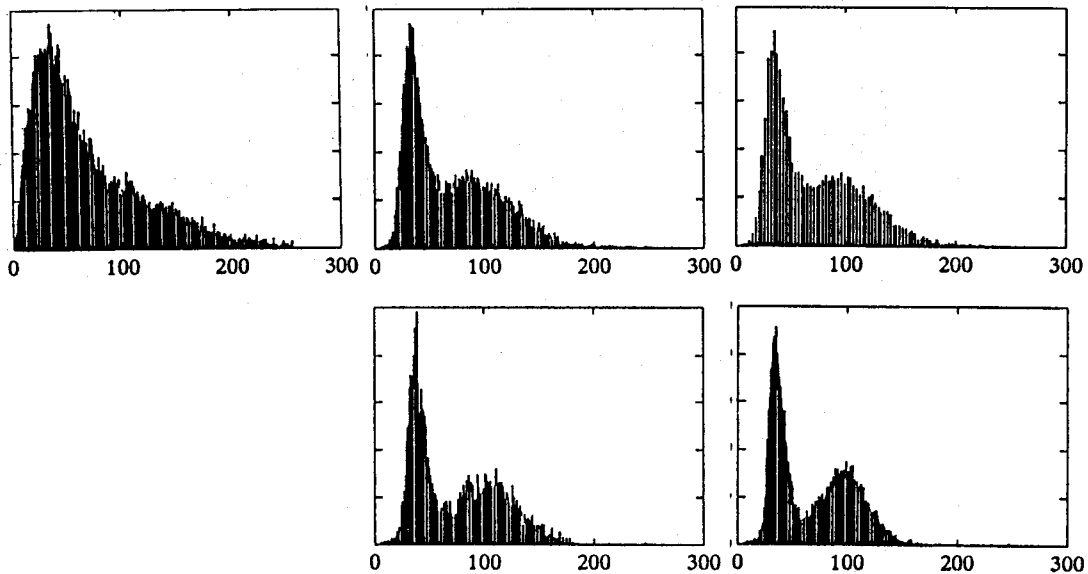


Figura 7: Histogramas, de cima para abaixo e de esquerda para direita, das imagens original e filtradas pelos algoritmos IQR, MAD, Mediana e média amostral sobre janelas de tamanho 5.