

MEC2007 – Tópicos Especiais em Engenharia Mecânica

# Técnicas de Medição Baseadas em Imagens

*Pré-processamento de Imagens*

**Fabio J. W. A. Martins**

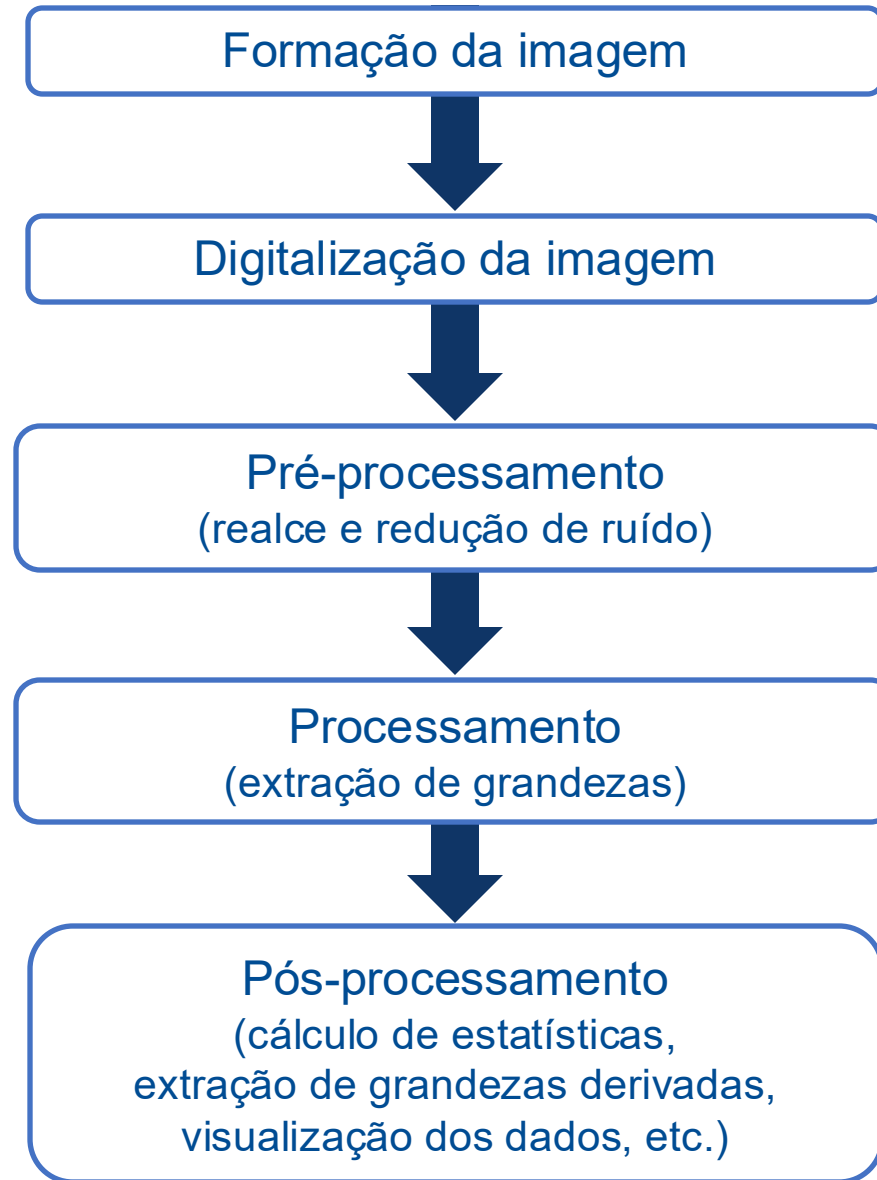
fabiomartins@puc-rio.com

Departamento de Engenharia Mecânica

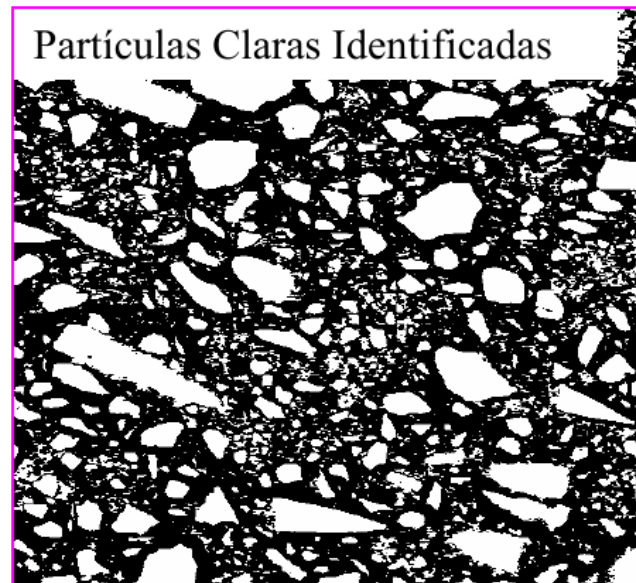
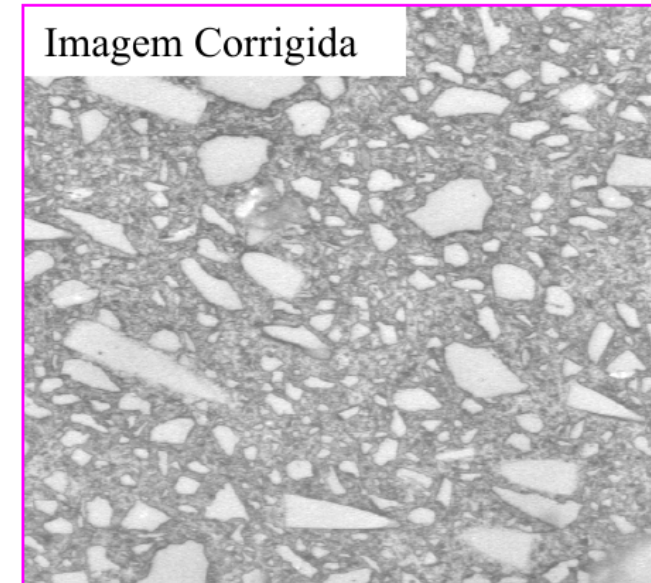
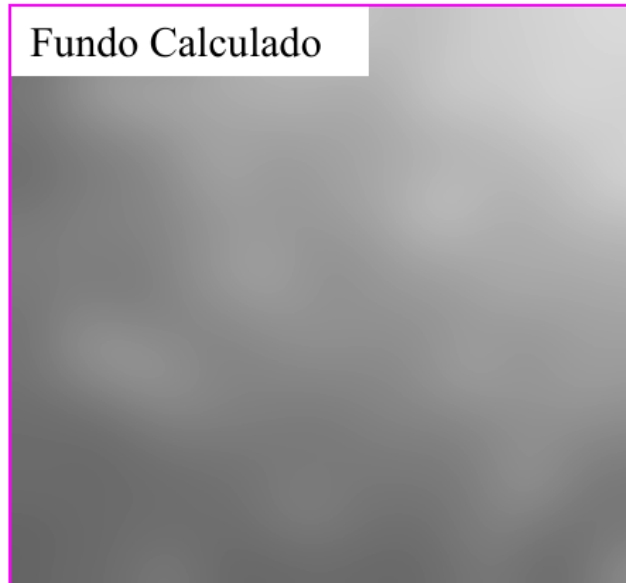
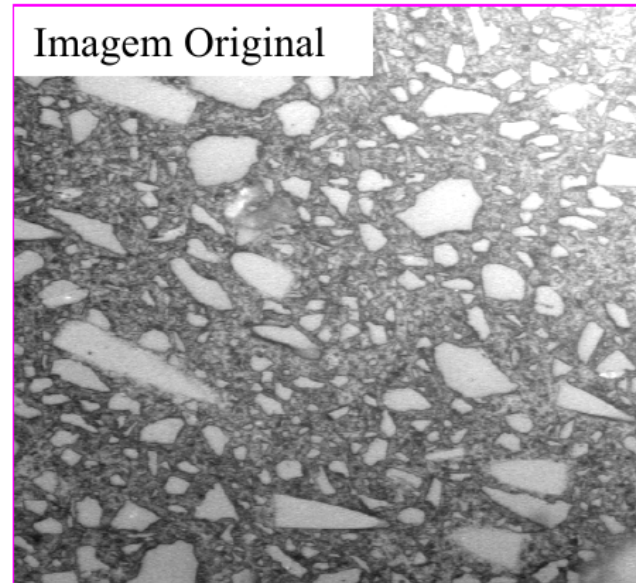


Pontifícia  
Universidade  
Católica do  
Rio de Janeiro

28/08/2025

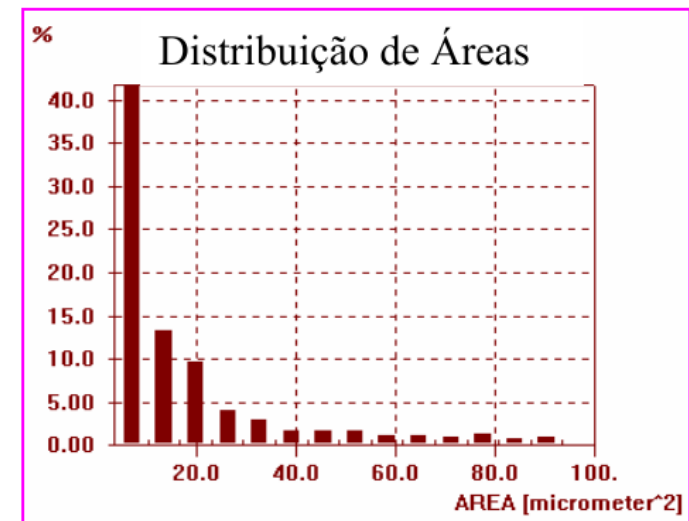


# Introdução



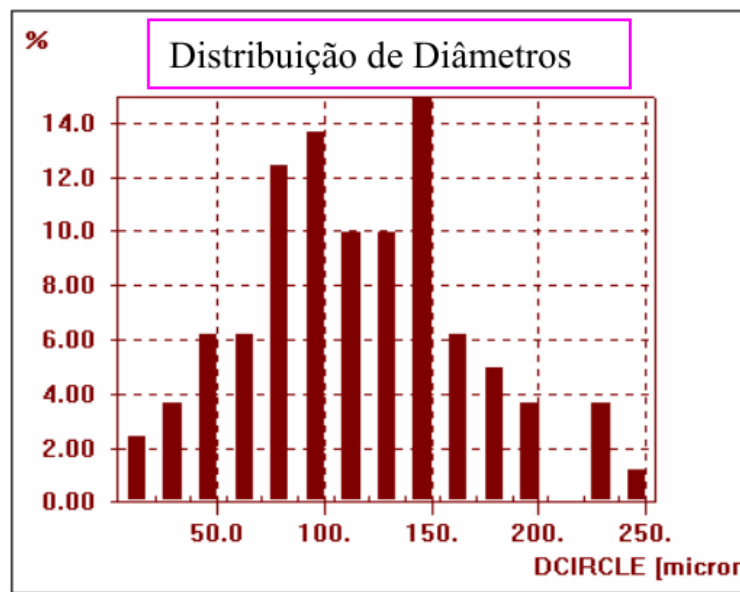
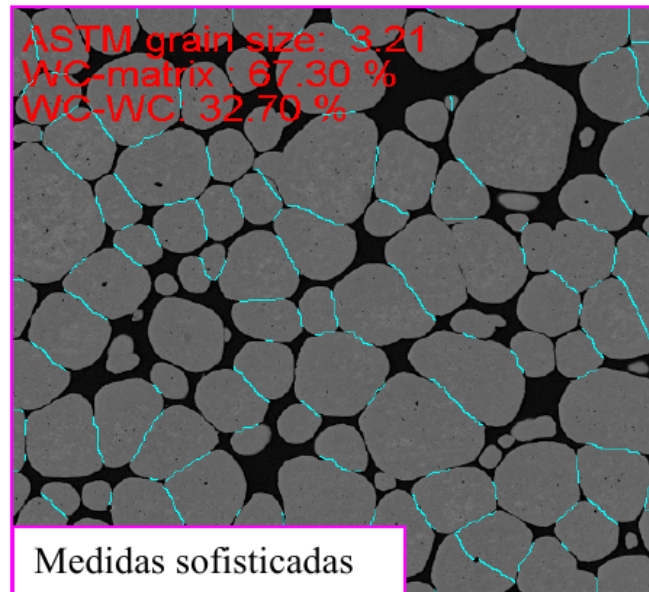
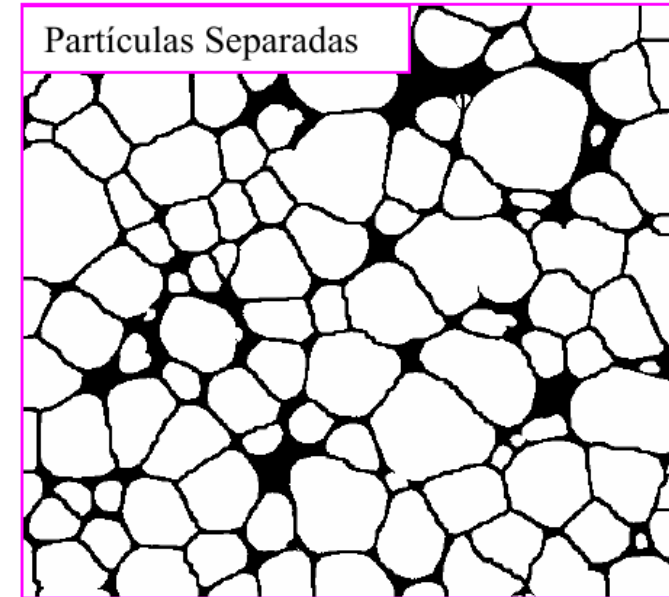
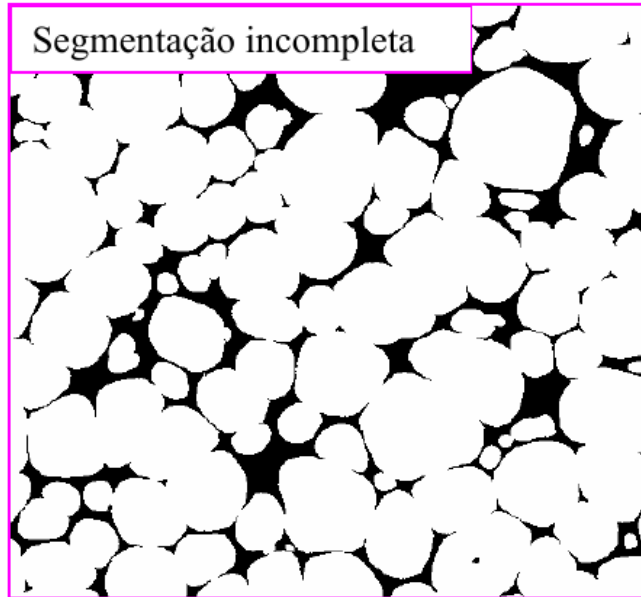
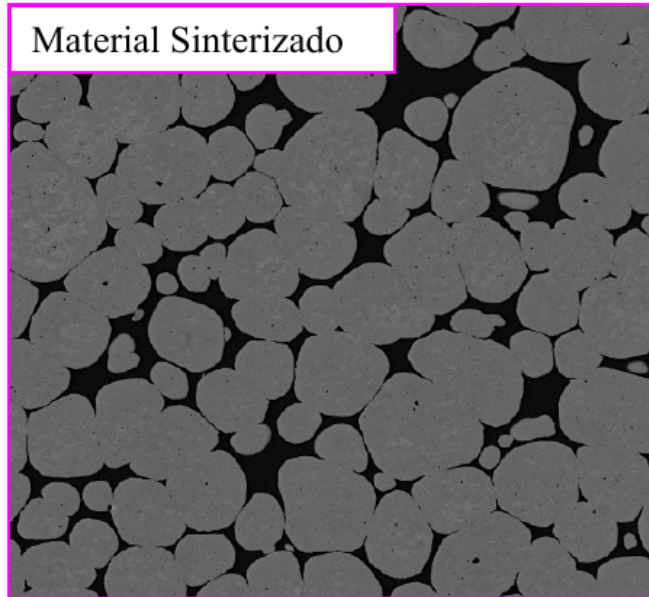
Base de Dados

| No    | FERETRATIO | AREA   |
|-------|------------|--------|
| 1     | 0,24       | 4,00   |
| 2     | 0,24       | 4,00   |
| 3     | 0,24       | 4,00   |
| 4     | 0,45       | 7,00   |
| 5     | 0,16       | 6,00   |
| 6     | 0,33       | 7,00   |
| 7     | 0,71       | 9,00   |
| ..... |            |        |
| 1273  | 0,30       | 110,00 |
| 1274  | 0,69       | 89,00  |
| 1275  | 0,37       | 7,00   |
| 1276  | 0,63       | 912,00 |



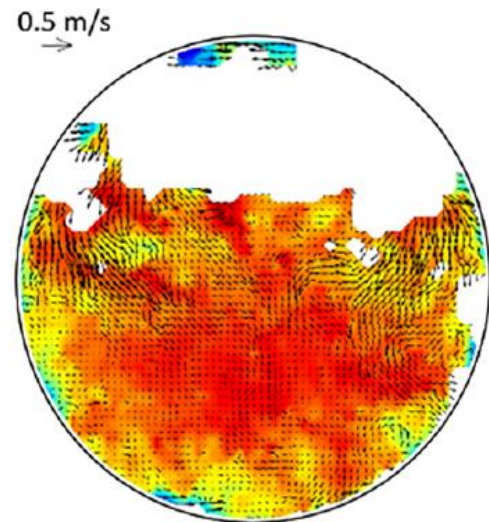
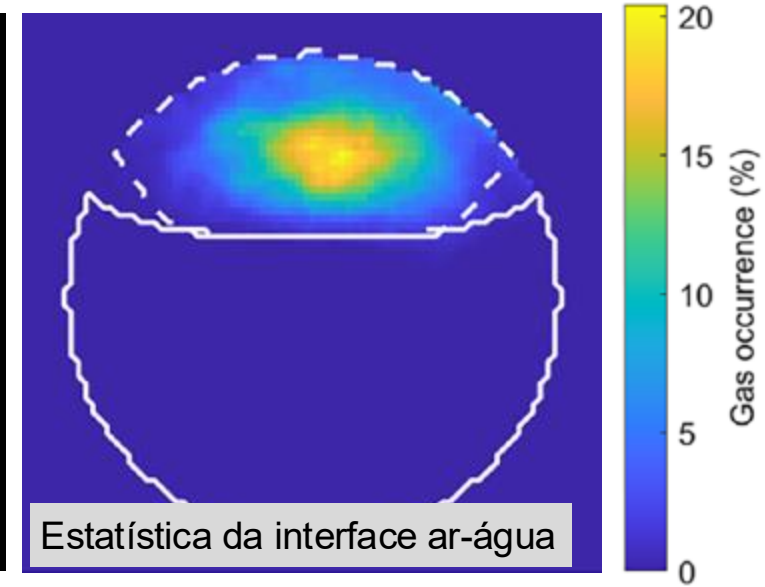
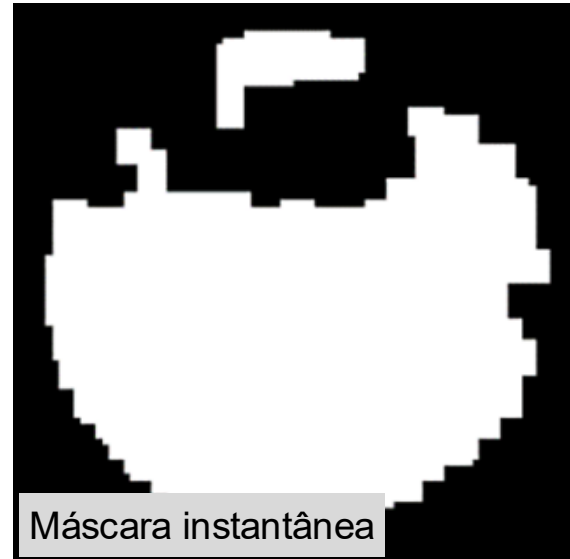
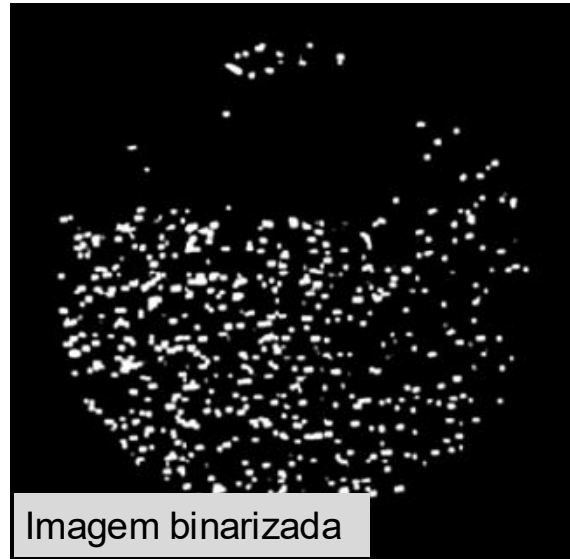
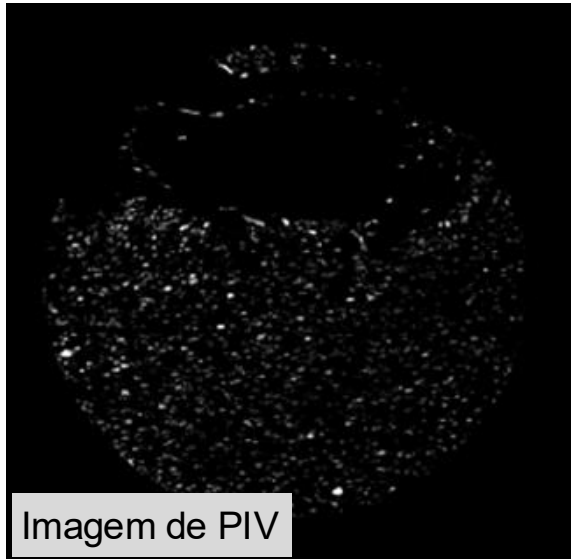
Paciornik, Notas de aula (2007)

# Introdução

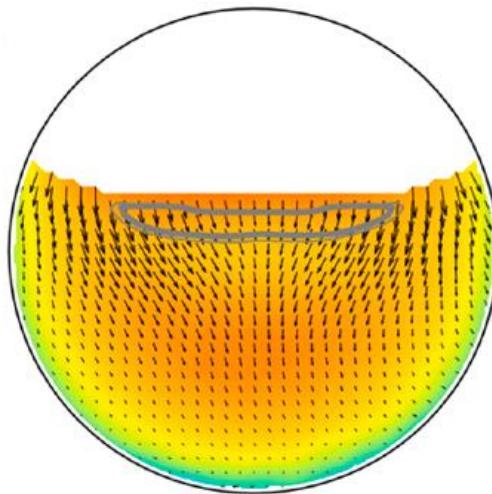


Paciornik, Notas de aula (2007)

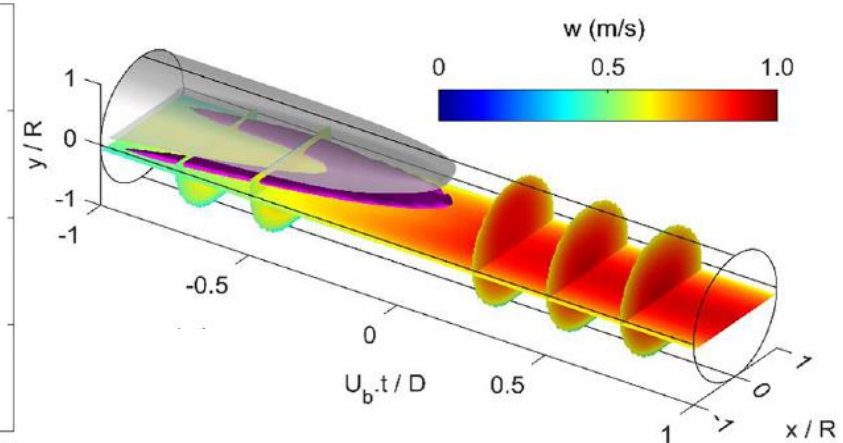
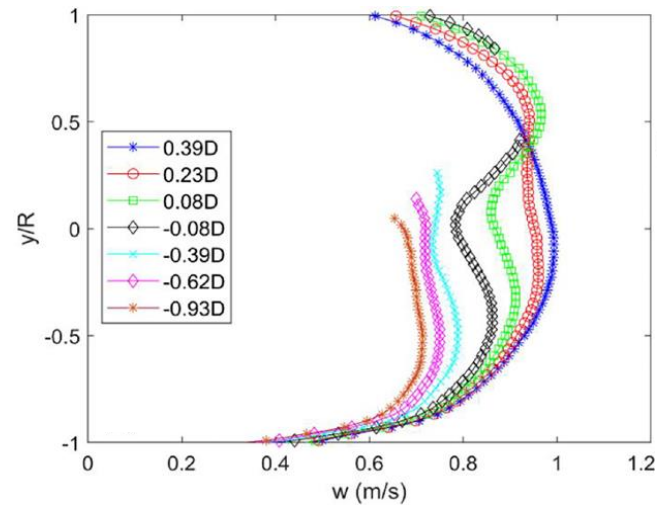
# Introdução



Campo instantâneo de velocidade



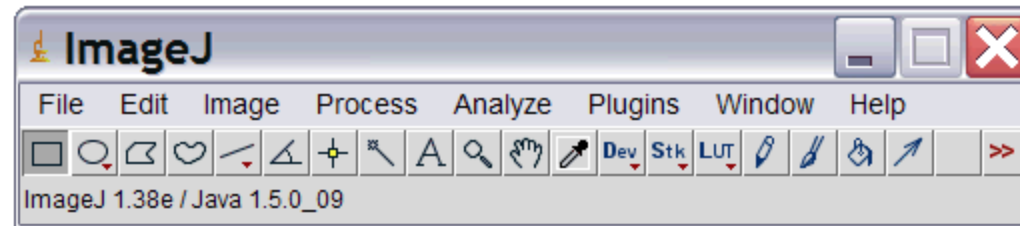
Campo médio de velocidade



Fernandes et al.,  
Int. J. Multiph. Flow  
(2023)

# Software de código aberto ImageJ Fiji

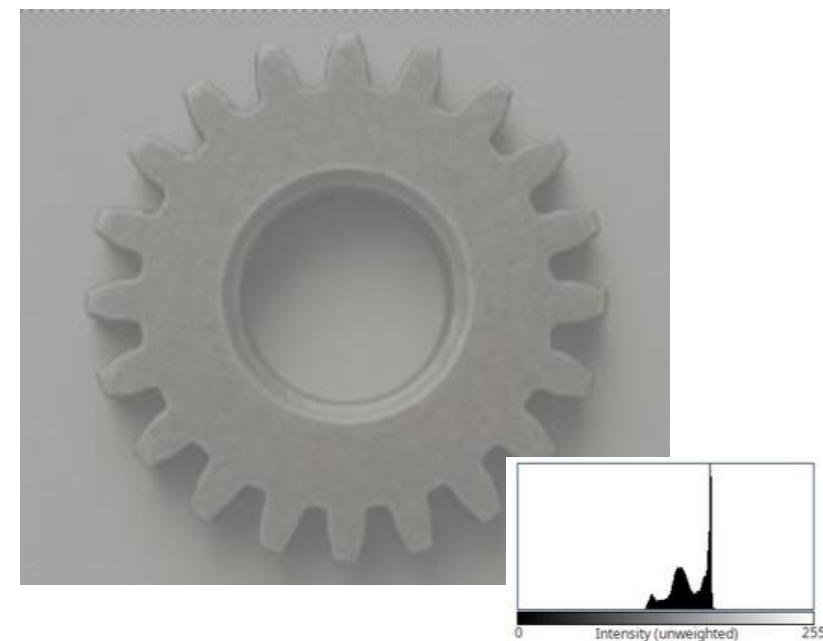
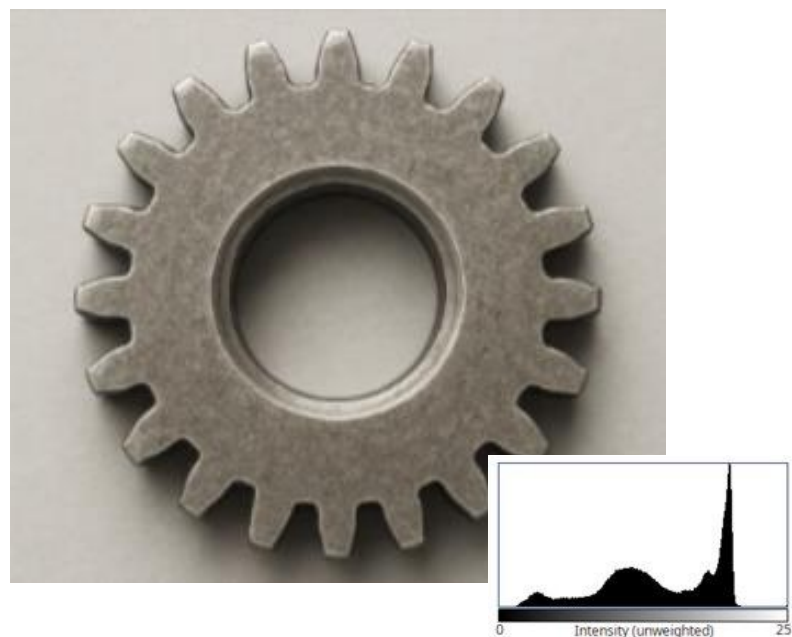
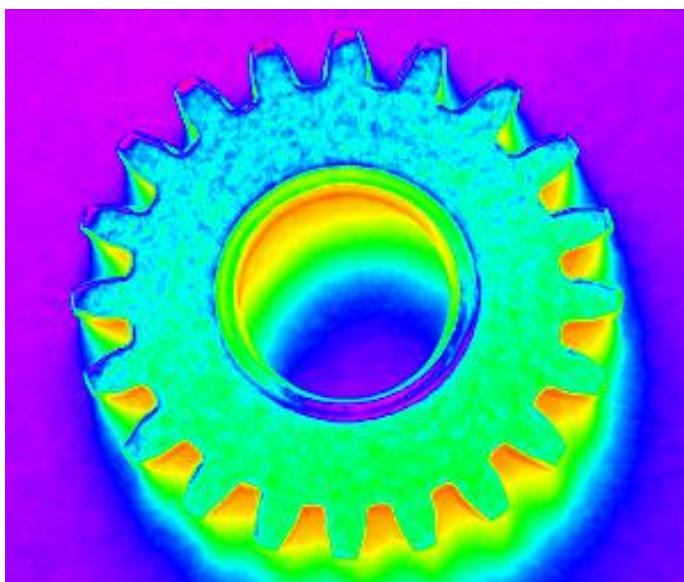
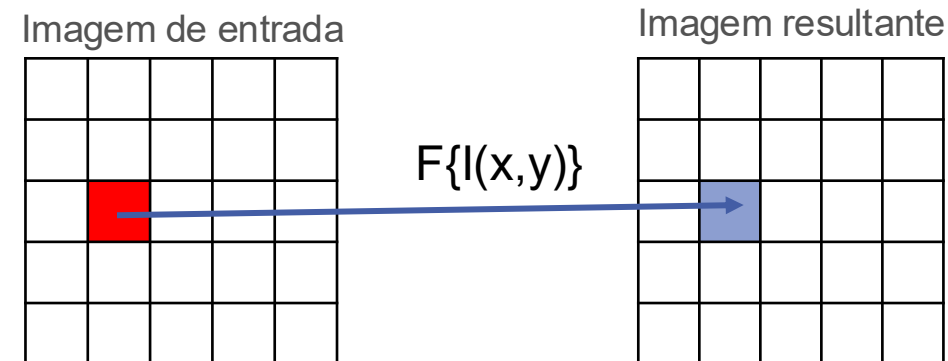
- Fiji (versão atual do ImageJ) é um software livre para processamento de imagens
- Inclui vários plugins que facilitam a análise científica de imagens
- Compatível com Linux, Mac e Windows, 32 bits e 64 bits
- Código fonte em Java disponível gratuitamente e de domínio público
- <https://imagej.net/software/fiji/downloads>



# Operações pontuais com uma imagem

A intensidade do pixel na posição  $(x,y)$  da imagem resultante é uma função apenas da intensidade do pixel correspondente na imagem de entrada

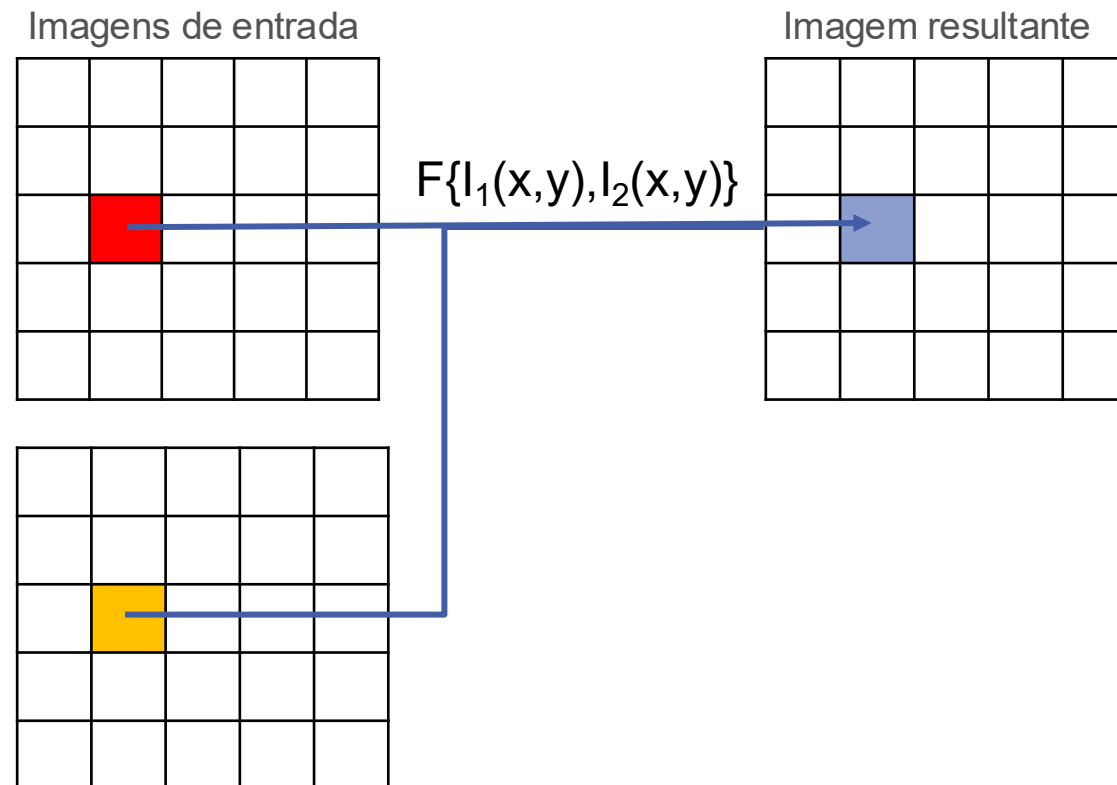
- Alteração do brilho
- Alteração do contraste
- Alteração da escala de cores  
(*look up table*, LUT)



# Operações pontuais com duas ou mais imagens

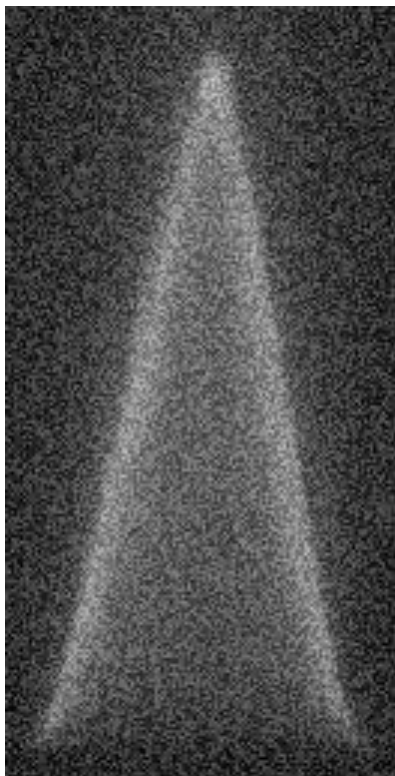
A intensidade do pixel da imagem resultante é uma função das intensidades dos pixels correspondentes das imagens de entrada

- Soma, subtração, multiplicação, divisão
- AND, OR, máximo, mínimo



# Operações pontuais com duas imagens: Adição

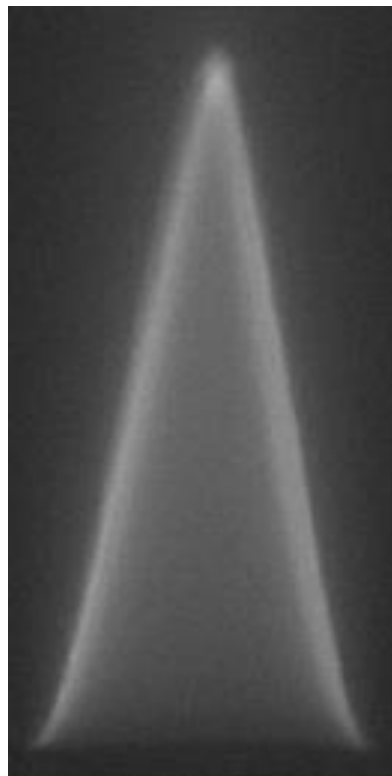
- A adição de imagens pode ser utilizada para melhoria da razão sinal/ruído em medições estáticas ou com sincronismo de fase/evento (*phase lock*), pois o ruído aleatório na imagem resultante é reduzido proporcionalmente a  $\sqrt{N}$ , onde  $N$  é o número de imagens
- Aplicações: microscopia, laser-induced fluorescence, Rayleigh scattering, chemiluminescence



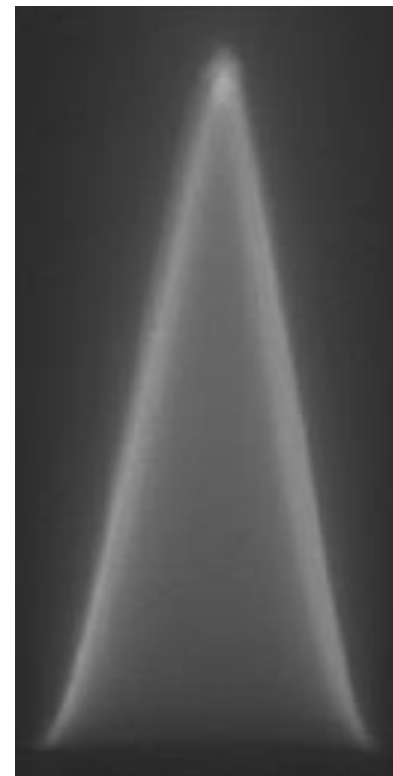
Original image with noise



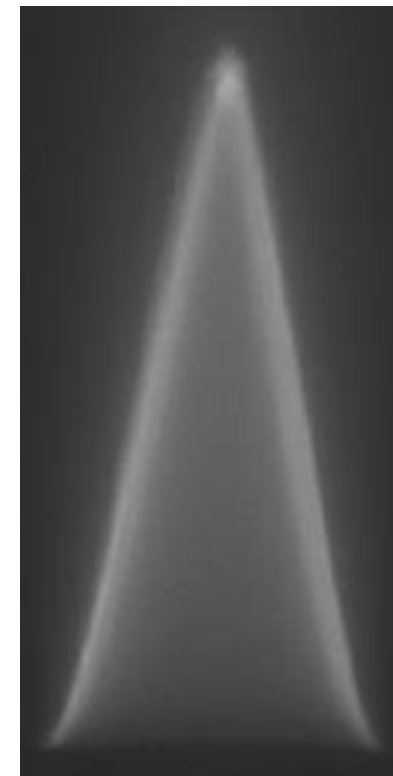
Mean of 10 images



Mean of 100 images



Mean of 1000 images



Mean of 10000 images

# Operações pontuais com duas imagens: Subtração

- Subtração de imagens em que parte da imagem se altera pode ser utilizado para detecção de movimento
- A subtração gera uma clara fronteira entre as regiões estáticas e as que se movem



Static image



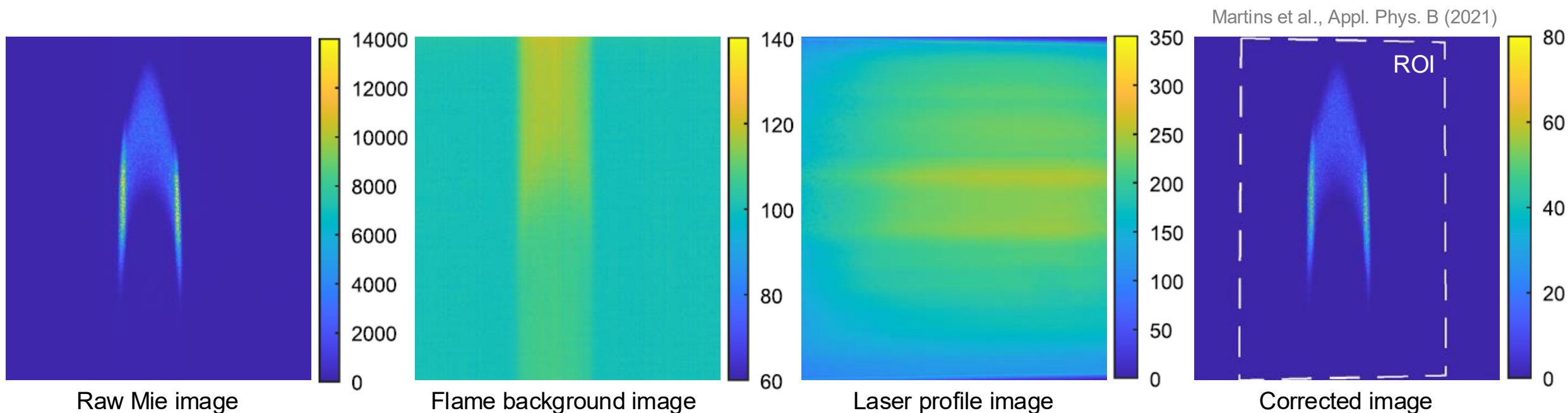
Image with a moving car



Subtracted image followed by binarization

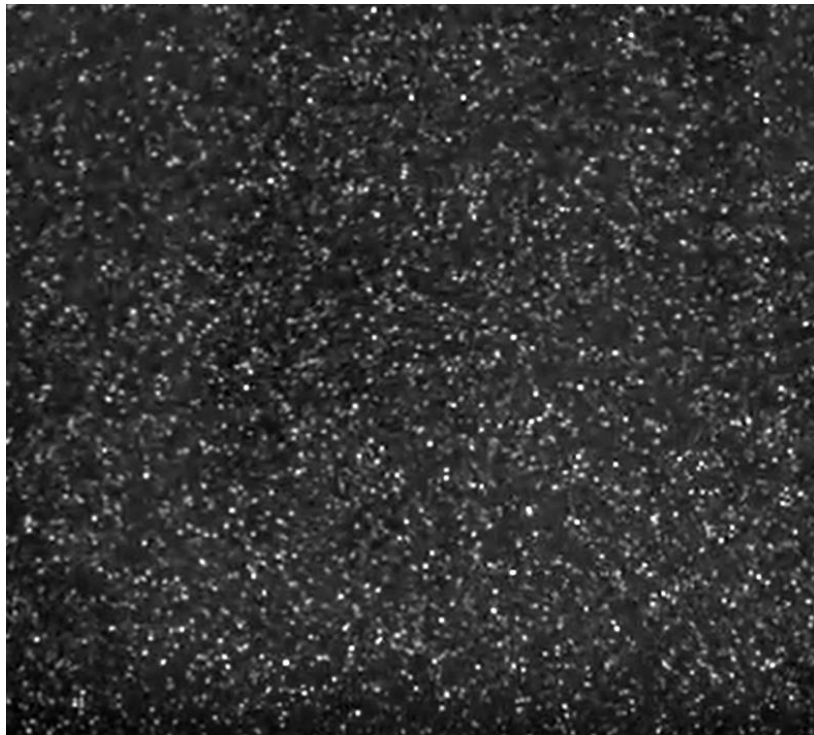
# Operações pontuais com duas imagens: Subtração/Divisão

- Subtração ou divisão para correção de iluminação não-homogênea ou diferenças devido ao setup óptico (sensibilidades do sensor, transmissividade das lentes, filtros, etc.)
- Obtenção de imagem de fundo experimental ou por software para subtração (sensores logarítmicos) ou divisão (sensores lineares), corrigindo a imagem de medição
  - Média ou mínimos históricos
  - Máximo ou mínimo local
  - Filtro passa-baixa largo
  - Algoritmo “Rolling-ball”

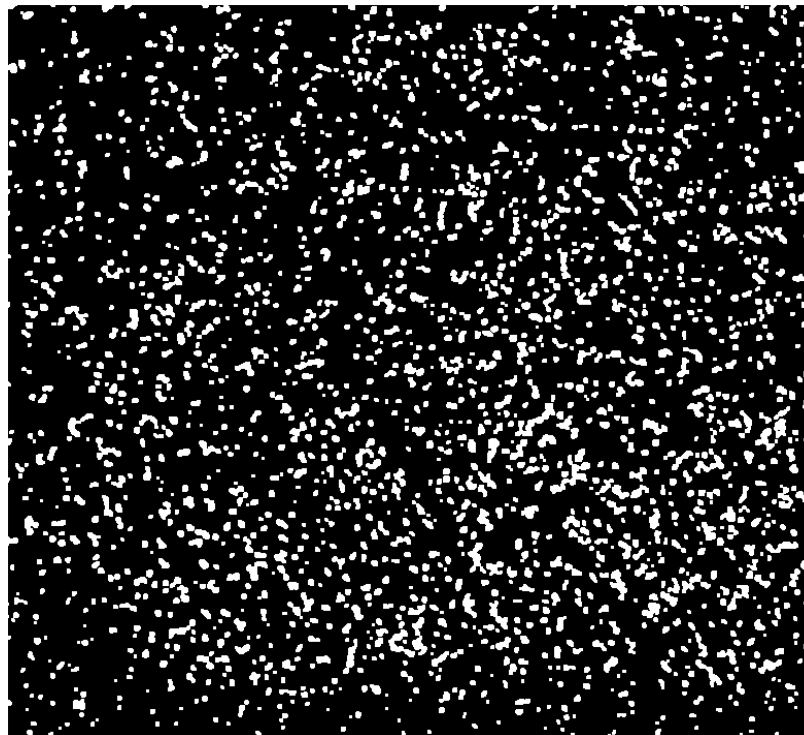


# Operações pontuais com duas imagens: Multiplicação

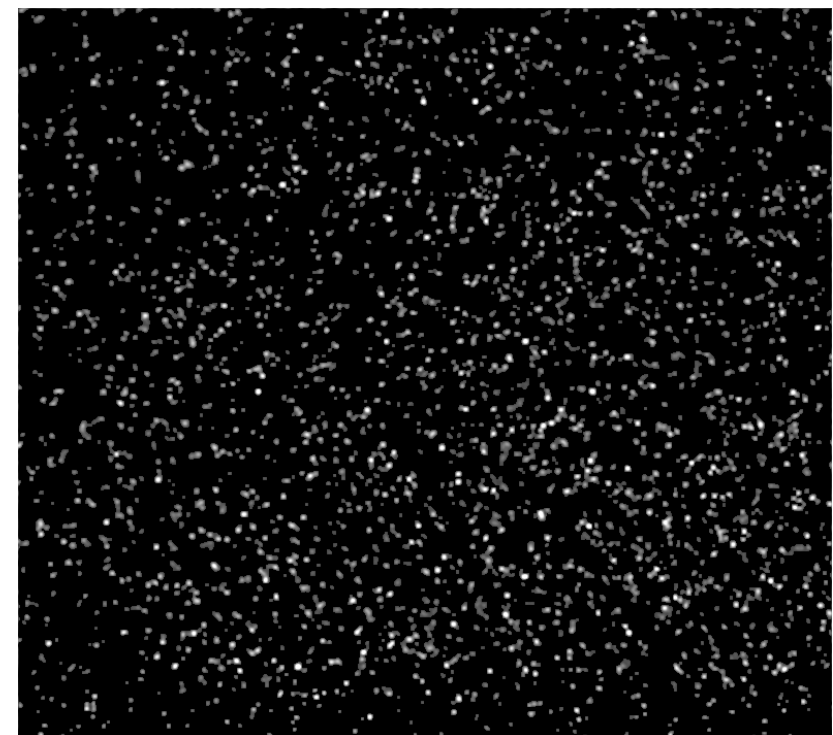
- Multiplicação na aplicação de máscaras ou filtragem
- A multiplicação da imagem por uma imagem binária  $[0,1]$  de geometria conhecida, zera as regiões fora da máscara



Raw image



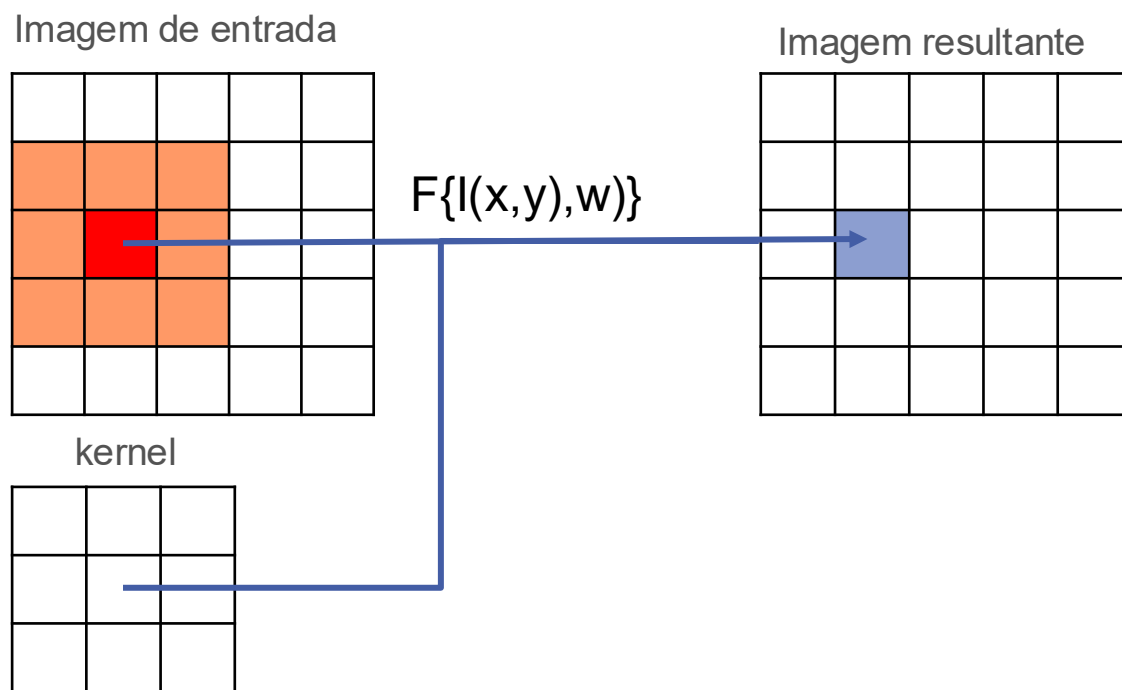
Binary image (mask)



Multiplied image

# Operações locais

- A intensidade do pixel da imagem resultante é uma função das intensidades dos pixels vizinhos da imagem de entrada
- Cada vizinho tem um peso associado definido por uma matriz (kernel)
- O kernel é aplicado a uma vizinhança e se desloca até varrer toda a imagem numa operação de convolução
- O valor ponderado da vizinhança substitui o pixel central da vizinhança



$$I_{final}(x, y) = \sum_{i=-n}^n \sum_{j=-m}^m w_{i,j} I(x + i, y + j)$$

# Filtro passa-baixa

Imagem de entrada

Imagem de resultante

Kernel

|   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|
| 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 8 |
| 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 8 |
| 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 8 |
| 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 8 |
| 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 8 |
| 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 8 |



|     |     |     |
|-----|-----|-----|
| 1/9 | 1/9 | 1/9 |
| 1/9 | 1/9 | 1/9 |
| 1/9 | 1/9 | 1/9 |



|  |   |  |  |  |  |
|--|---|--|--|--|--|
|  |   |  |  |  |  |
|  |   |  |  |  |  |
|  | 4 |  |  |  |  |
|  |   |  |  |  |  |
|  |   |  |  |  |  |
|  |   |  |  |  |  |

|   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|
| 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 8 |
| 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 8 |
| 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 8 |
| 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 8 |
| 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 8 |
| 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 8 |



|     |     |     |
|-----|-----|-----|
| 1/9 | 1/9 | 1/9 |
| 1/9 | 1/9 | 1/9 |
| 1/9 | 1/9 | 1/9 |



|  |   |   |   |  |  |
|--|---|---|---|--|--|
|  |   |   |   |  |  |
|  |   |   |   |  |  |
|  | 4 | 5 | 7 |  |  |
|  |   |   |   |  |  |
|  |   |   |   |  |  |
|  |   |   |   |  |  |

|   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|
| 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 8 |
| 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 8 |
| 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 8 |
| 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 8 |
| 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 8 |
| 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 8 |



|     |     |     |
|-----|-----|-----|
| 1/9 | 1/9 | 1/9 |
| 1/9 | 1/9 | 1/9 |
| 1/9 | 1/9 | 1/9 |



|  |   |   |  |  |  |
|--|---|---|--|--|--|
|  |   |   |  |  |  |
|  |   |   |  |  |  |
|  | 4 | 5 |  |  |  |
|  |   |   |  |  |  |
|  |   |   |  |  |  |
|  |   |   |  |  |  |

|   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|
| 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 8 |
| 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 8 |
| 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 8 |
| 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 8 |
| 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 8 |
| 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 8 |



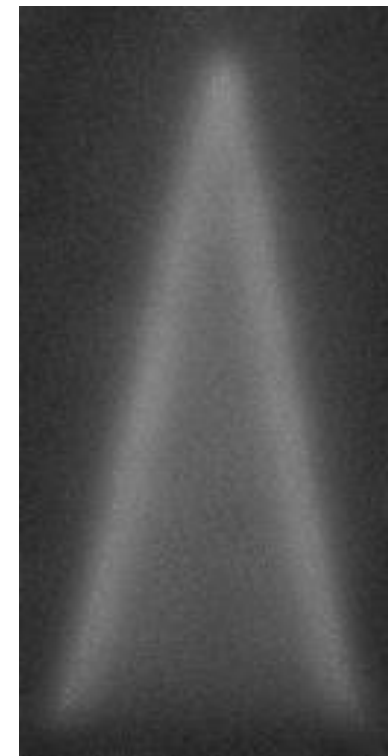
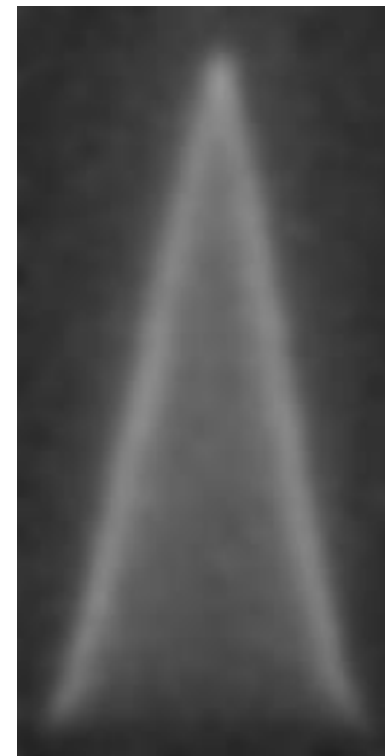
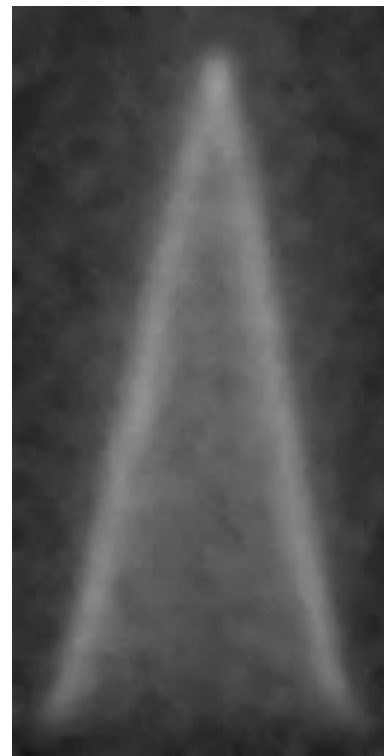
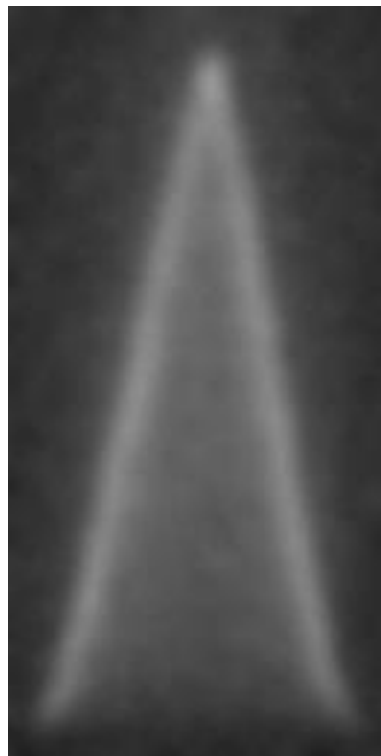
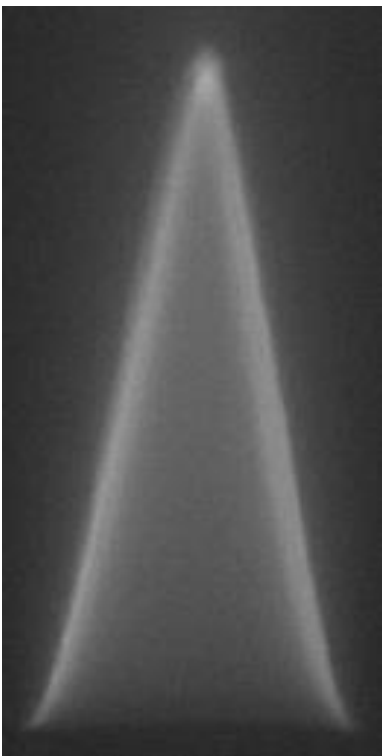
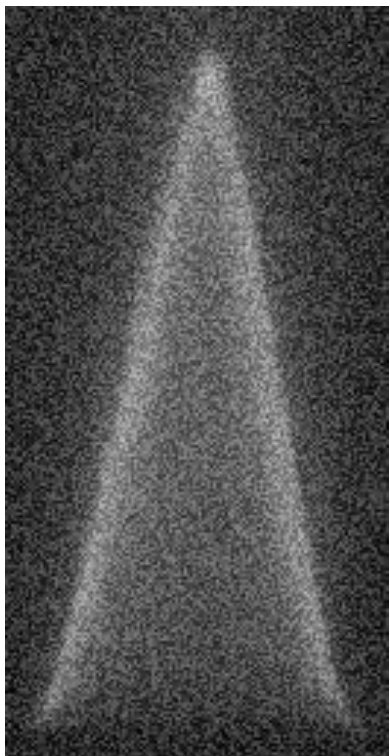
|     |     |     |
|-----|-----|-----|
| 1/9 | 1/9 | 1/9 |
| 1/9 | 1/9 | 1/9 |
| 1/9 | 1/9 | 1/9 |



|  |   |   |   |   |  |
|--|---|---|---|---|--|
|  |   |   |   |   |  |
|  |   |   |   |   |  |
|  | 4 | 5 | 7 | 8 |  |
|  |   |   |   |   |  |
|  |   |   |   |   |  |
|  |   |   |   |   |  |

# Filtros passa-baixa

- A adição de imagens possui melhor performance que um filtro passa-baixa devido à maior quantidade de informação disponível
- Filtros passa-baixa: média, mediana, gaussiano, Sigma



Original image with noise    Mean of 100 images

Mean filter

Median filter

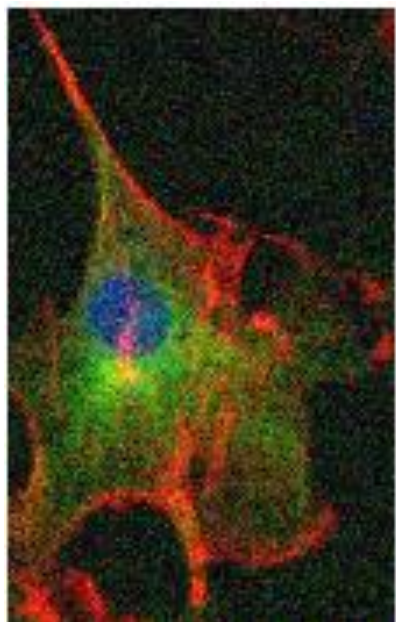
Gaussian filter

Sigma filter

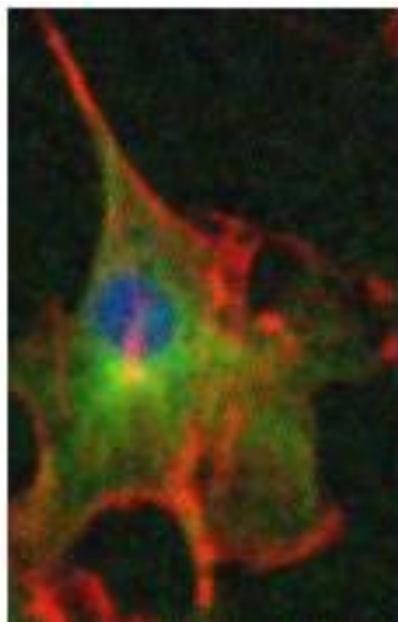
# Filtro Sigma

- Filtro robusto para redução de ruído preservando os detalhes
- Inclui no cálculo da média de uma dada vizinhança apenas os pixels cujas intensidades sejam próximas do valor médio da vizinhança
  - Regiões uniformes com ruído: todos os pixels são incluídos
  - Regiões de bordas com ruído: apenas os pixels de um lado ou outro da borda são incluídos

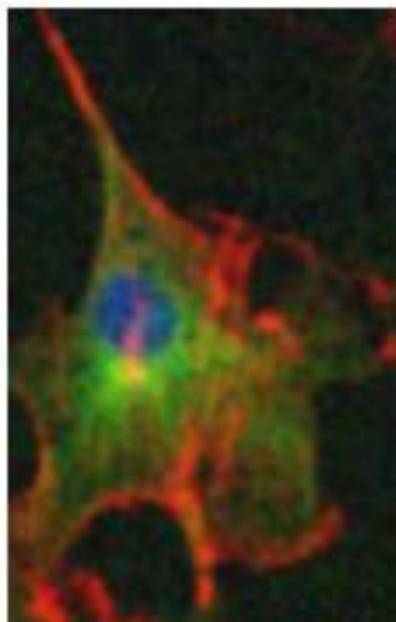
<https://imagej.net/ij/plugins/sigma-filter.html>



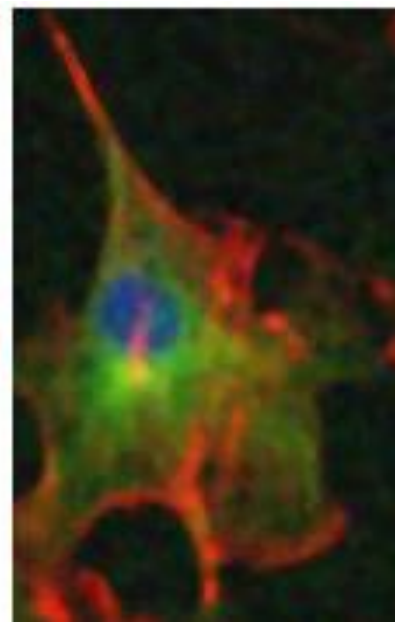
Original image with noise



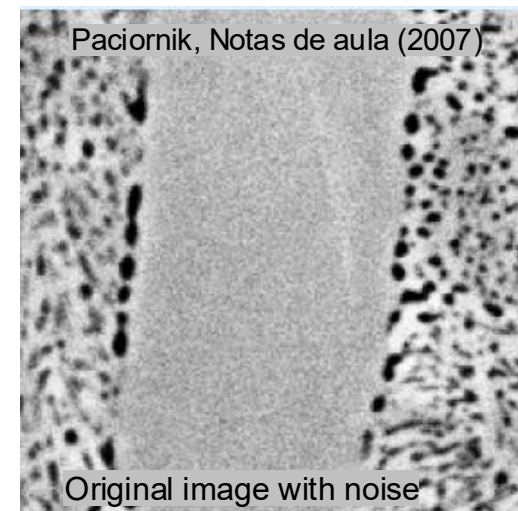
Sigma filter



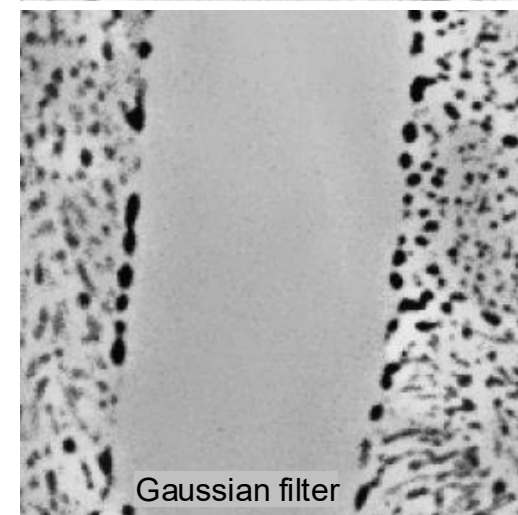
Gaussian filter



Median filter



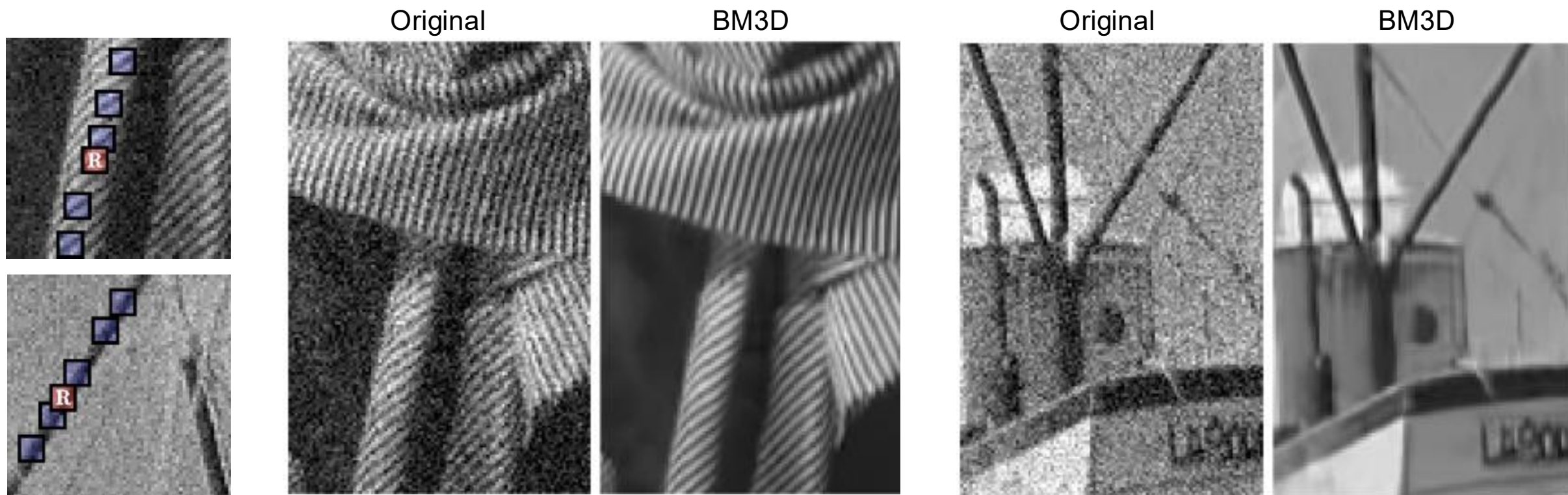
Original image with noise



Gaussian filter

# Block-matching and 3D filtering (BM3D)

- Filtro robusto para redução de ruído, com preservação de detalhes finos e características únicas de cada fragmento
- Fragmentos semelhantes da imagem são agrupadas em matrizes de dados 3D e filtradas colaborativamente, obtendo uma representação esparsa do sinal verdadeiro



Dabov et al., IEEE TIP (2007)

# Filtro passa-alta

Imagem de entrada

Imagem de resultante

Kernel

|   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|
| 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 8 |
| 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 8 |
| 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 8 |
| 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 8 |
| 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 8 |
| 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 8 |



|    |    |    |
|----|----|----|
| -1 | -1 | -1 |
| -1 | 8  | -1 |
| -1 | -1 | -1 |



|  |   |  |  |  |  |
|--|---|--|--|--|--|
|  |   |  |  |  |  |
|  |   |  |  |  |  |
|  | 0 |  |  |  |  |
|  |   |  |  |  |  |
|  |   |  |  |  |  |
|  |   |  |  |  |  |

|   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|
| 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 8 |
| 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 8 |
| 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 8 |
| 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 8 |
| 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 8 |
| 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 8 |



|    |    |    |
|----|----|----|
| -1 | -1 | -1 |
| -1 | 8  | -1 |
| -1 | -1 | -1 |



|  |   |     |    |  |  |
|--|---|-----|----|--|--|
|  |   |     |    |  |  |
|  |   |     |    |  |  |
|  | 0 | -12 | 12 |  |  |
|  |   |     |    |  |  |
|  |   |     |    |  |  |
|  |   |     |    |  |  |

|   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|
| 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 8 |
| 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 8 |
| 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 8 |
| 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 8 |
| 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 8 |
| 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 8 |



|    |    |    |
|----|----|----|
| -1 | -1 | -1 |
| -1 | 8  | -1 |
| -1 | -1 | -1 |



|  |   |     |  |  |  |
|--|---|-----|--|--|--|
|  |   |     |  |  |  |
|  |   |     |  |  |  |
|  | 0 | -12 |  |  |  |
|  |   |     |  |  |  |
|  |   |     |  |  |  |
|  |   |     |  |  |  |

|   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|
| 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 8 |
| 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 8 |
| 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 8 |
| 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 8 |
| 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 8 |
| 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 8 |



|    |    |    |
|----|----|----|
| -1 | -1 | -1 |
| -1 | 8  | -1 |
| -1 | -1 | -1 |



|  |   |     |    |   |  |
|--|---|-----|----|---|--|
|  |   |     |    |   |  |
|  |   |     |    |   |  |
|  | 0 | -12 | 12 | 0 |  |
|  |   |     |    |   |  |
|  |   |     |    |   |  |
|  |   |     |    |   |  |

# Filtros passa-alta

Initial image

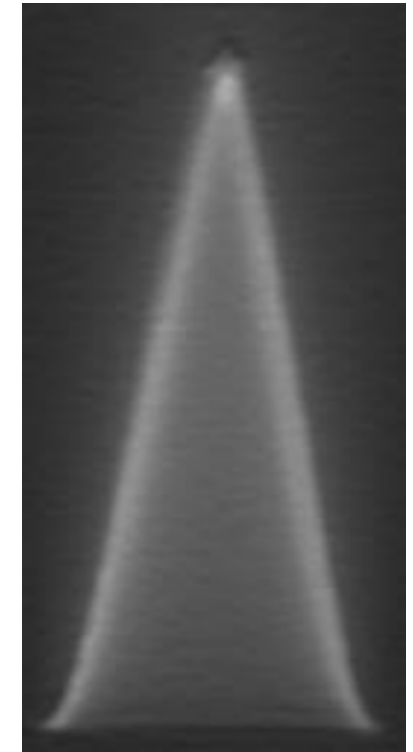
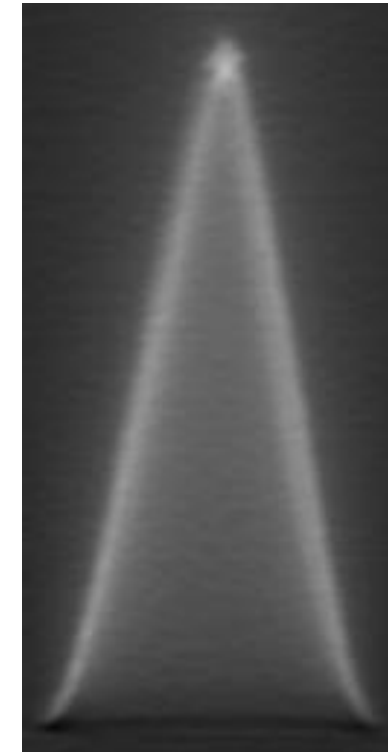
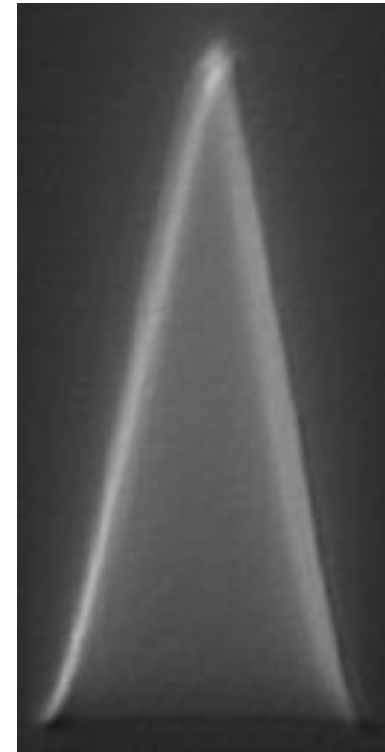
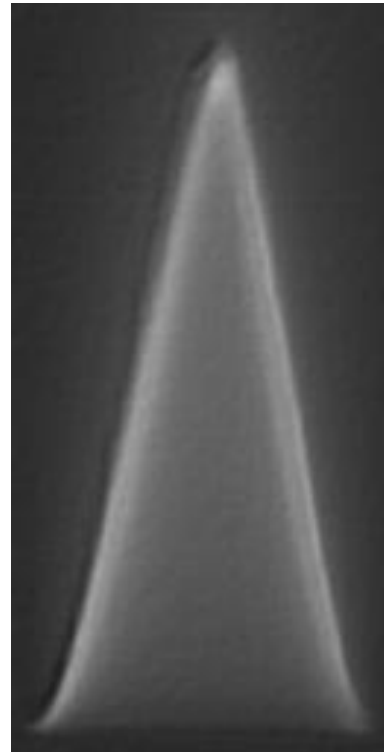
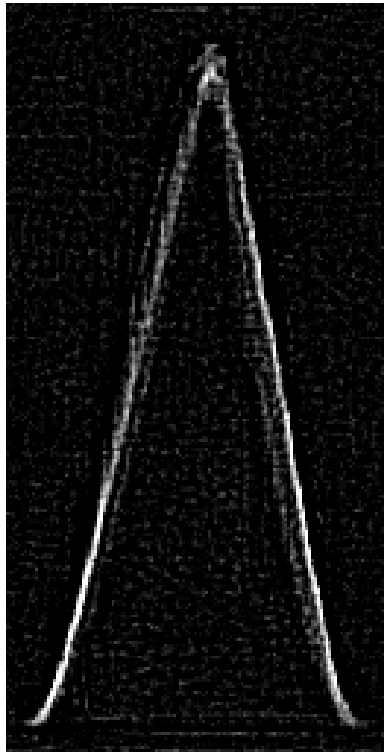
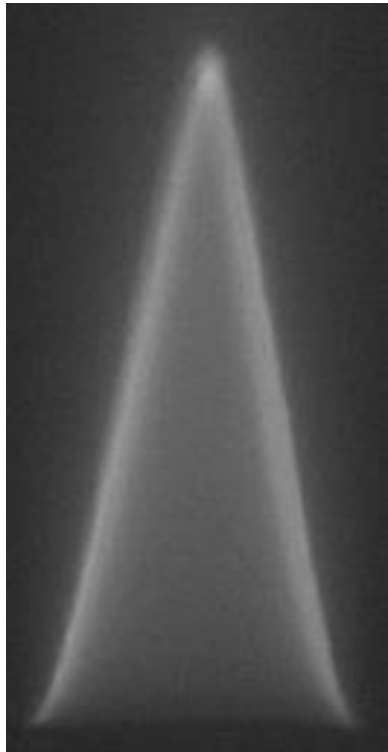
|    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|
| -1 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| -1 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| -1 | -1 | 24 | -1 | -1 |
| -1 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| -1 | -1 | -1 | -1 | -1 |

|   |   |    |    |    |
|---|---|----|----|----|
| 1 | 1 | 1  | 1  | 1  |
| 1 | 1 | 1  | 1  | 1  |
| 1 | 1 | -2 | -1 | -1 |
| 1 | 1 | -1 | -1 | -1 |
| 1 | 1 | -1 | -1 | -1 |

|    |    |    |   |   |
|----|----|----|---|---|
| -1 | -1 | -1 | 1 | 1 |
| -1 | -1 | -1 | 1 | 1 |
| -1 | -1 | -2 | 1 | 1 |
| 1  | 1  | 1  | 1 | 1 |
| 1  | 1  | 1  | 1 | 1 |

|    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|
| 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| -1 | -1 | -2 | -1 | -1 |
| -1 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| -1 | -1 | -1 | -1 | -1 |

|    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|
| -1 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| -1 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| -1 | -1 | -2 | -1 | -1 |
| 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |



# Detecção de bordas

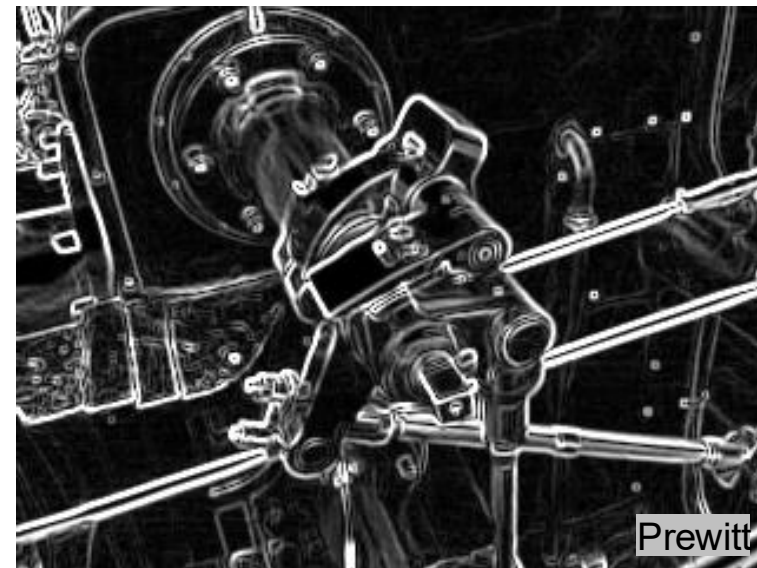
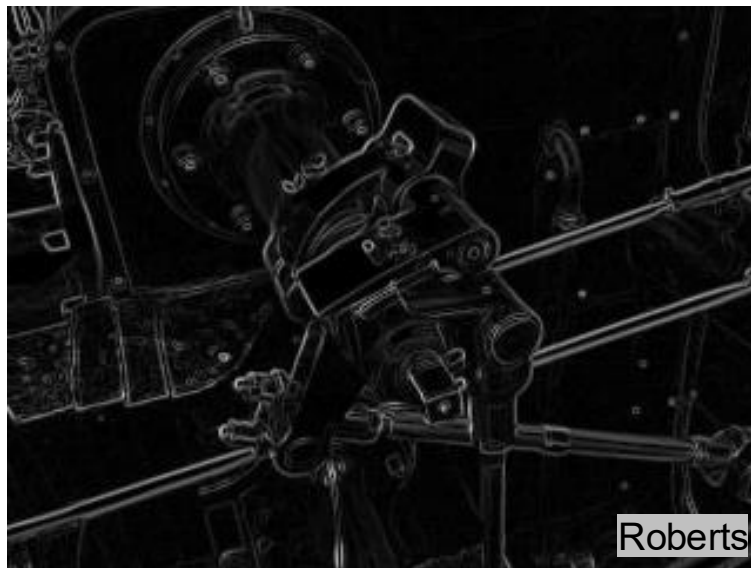
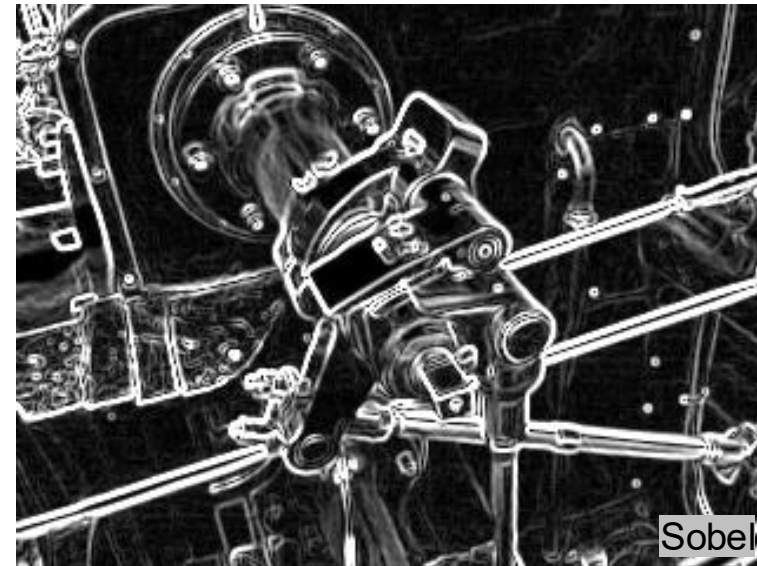
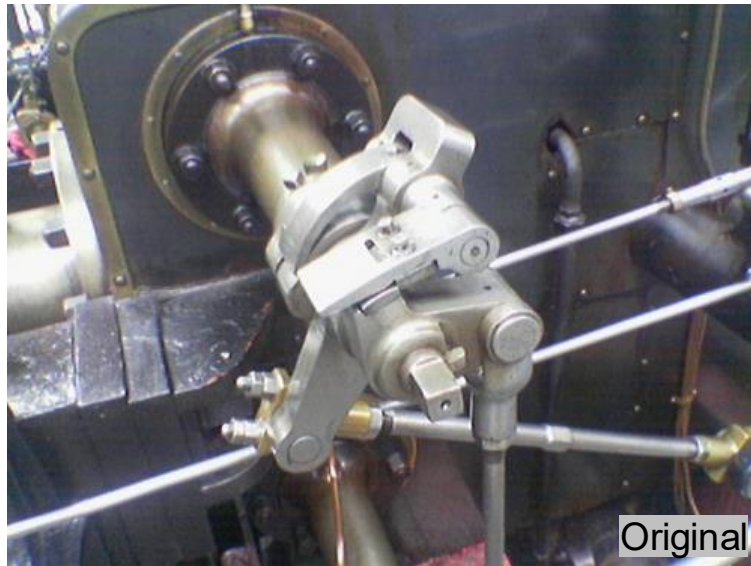
- As bordas são regiões onde ocorre uma mudança significativa de intensidade em um curto intervalo de espaço (alta derivada espacial)
- Filtros de detecção de bordas (Sobel, Canny, Prewitt, Roberts, lógica fuzzy, redes neurais convolucionais, etc.) geram imagens onde as regiões de borda aparecem com alta intensidade, enquanto as regiões restantes aparecem com baixa intensidade
- As bordas nem sempre são linhas fechadas: borda (*edge*) vs. contorno (*boundary*)
- Filtros clássicos de detecção de borda reproduzem o gradiente da imagem gerando duas imagens de saída: o módulo do gradiente e o ângulo do gradiente

|                               | Sobel                                                                                                                                   | Prewitt |   |    |   |   |    |    |    |    |                                                                                                                                         |   |   |    |   |   |    |    |    |    |
|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|---|----|---|---|----|----|----|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|---|----|---|---|----|----|----|----|
| $\frac{\partial}{\partial x}$ | <table><tr><td>1</td><td>0</td><td>-1</td></tr><tr><td>2</td><td>0</td><td>-2</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>-1</td></tr></table> | 1       | 0 | -1 | 2 | 0 | -2 | 1  | 0  | -1 | <table><tr><td>1</td><td>0</td><td>-1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>-1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>-1</td></tr></table> | 1 | 0 | -1 | 1 | 0 | -1 | 1  | 0  | -1 |
| 1                             | 0                                                                                                                                       | -1      |   |    |   |   |    |    |    |    |                                                                                                                                         |   |   |    |   |   |    |    |    |    |
| 2                             | 0                                                                                                                                       | -2      |   |    |   |   |    |    |    |    |                                                                                                                                         |   |   |    |   |   |    |    |    |    |
| 1                             | 0                                                                                                                                       | -1      |   |    |   |   |    |    |    |    |                                                                                                                                         |   |   |    |   |   |    |    |    |    |
| 1                             | 0                                                                                                                                       | -1      |   |    |   |   |    |    |    |    |                                                                                                                                         |   |   |    |   |   |    |    |    |    |
| 1                             | 0                                                                                                                                       | -1      |   |    |   |   |    |    |    |    |                                                                                                                                         |   |   |    |   |   |    |    |    |    |
| 1                             | 0                                                                                                                                       | -1      |   |    |   |   |    |    |    |    |                                                                                                                                         |   |   |    |   |   |    |    |    |    |
| $\frac{\partial}{\partial y}$ | <table><tr><td>1</td><td>2</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>-1</td><td>-2</td><td>-1</td></tr></table> | 1       | 2 | 1  | 0 | 0 | 0  | -1 | -2 | -1 | <table><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td></tr></table> | 1 | 1 | 1  | 0 | 0 | 0  | -1 | -1 | -1 |
| 1                             | 2                                                                                                                                       | 1       |   |    |   |   |    |    |    |    |                                                                                                                                         |   |   |    |   |   |    |    |    |    |
| 0                             | 0                                                                                                                                       | 0       |   |    |   |   |    |    |    |    |                                                                                                                                         |   |   |    |   |   |    |    |    |    |
| -1                            | -2                                                                                                                                      | -1      |   |    |   |   |    |    |    |    |                                                                                                                                         |   |   |    |   |   |    |    |    |    |
| 1                             | 1                                                                                                                                       | 1       |   |    |   |   |    |    |    |    |                                                                                                                                         |   |   |    |   |   |    |    |    |    |
| 0                             | 0                                                                                                                                       | 0       |   |    |   |   |    |    |    |    |                                                                                                                                         |   |   |    |   |   |    |    |    |    |
| -1                            | -1                                                                                                                                      | -1      |   |    |   |   |    |    |    |    |                                                                                                                                         |   |   |    |   |   |    |    |    |    |

$$\|\nabla I(x, y)\| = \sqrt{\left(\frac{\partial}{\partial x} I(x, y)\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial y} I(x, y)\right)^2}$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\frac{\partial}{\partial y} I(x, y)}{\frac{\partial}{\partial x} I(x, y)}\right)$$

# Detecção de bordas



# Convolução e correlação cruzada

- Operações matemáticas que medem o grau de similaridade entre duas funções  $f$  e  $g$  como uma função do deslocamento de uma em relação à outra
- **Convolução**: integral do produto de duas funções após uma delas ser refletida e deslocada

$$(f * g)[n] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} f[m]g[n-m] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} f[n-m]g[m]$$

- **Correlação cruzada**: integral do produto de duas funções após uma delas ser deslocada

$$(f \star g)[n] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} f[m]g[m+n] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} f[m-n]g[m]$$

- A correlação cruzada difere da convolução apenas na reflexão da função na convolução

$$f[n] \star g[n] = f[-n] * g[n]$$

# Convolução e correlação cruzada

Propriedades da convolução:

- Comutatividade

$$f * g = g * f$$

- Associatividade

$$f * (g * h) = (f * g) * h$$

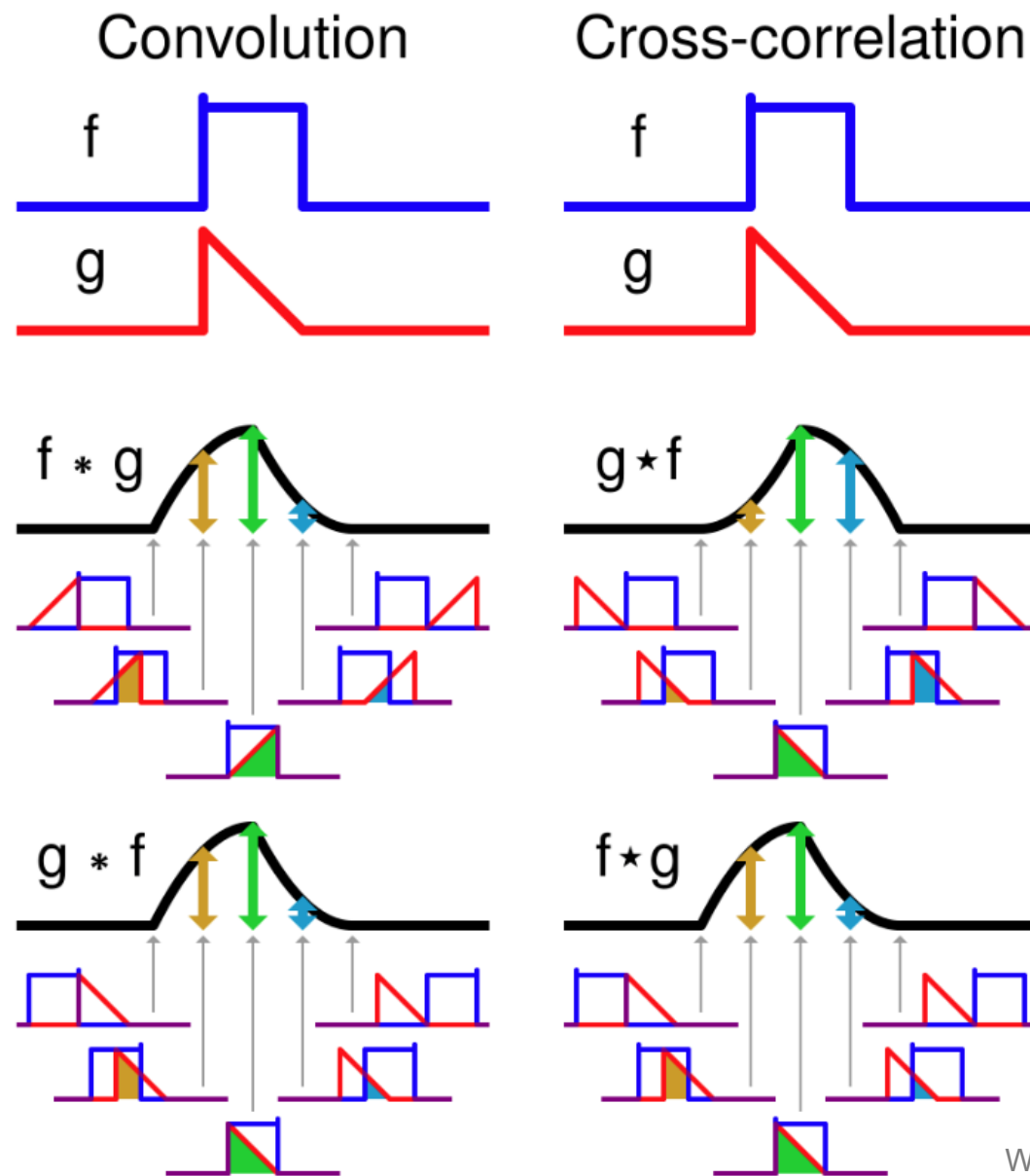
$$a(f * g) = (af) * g$$

- Distributividade

$$f * (g + h) = (f * g) + (f * h)$$

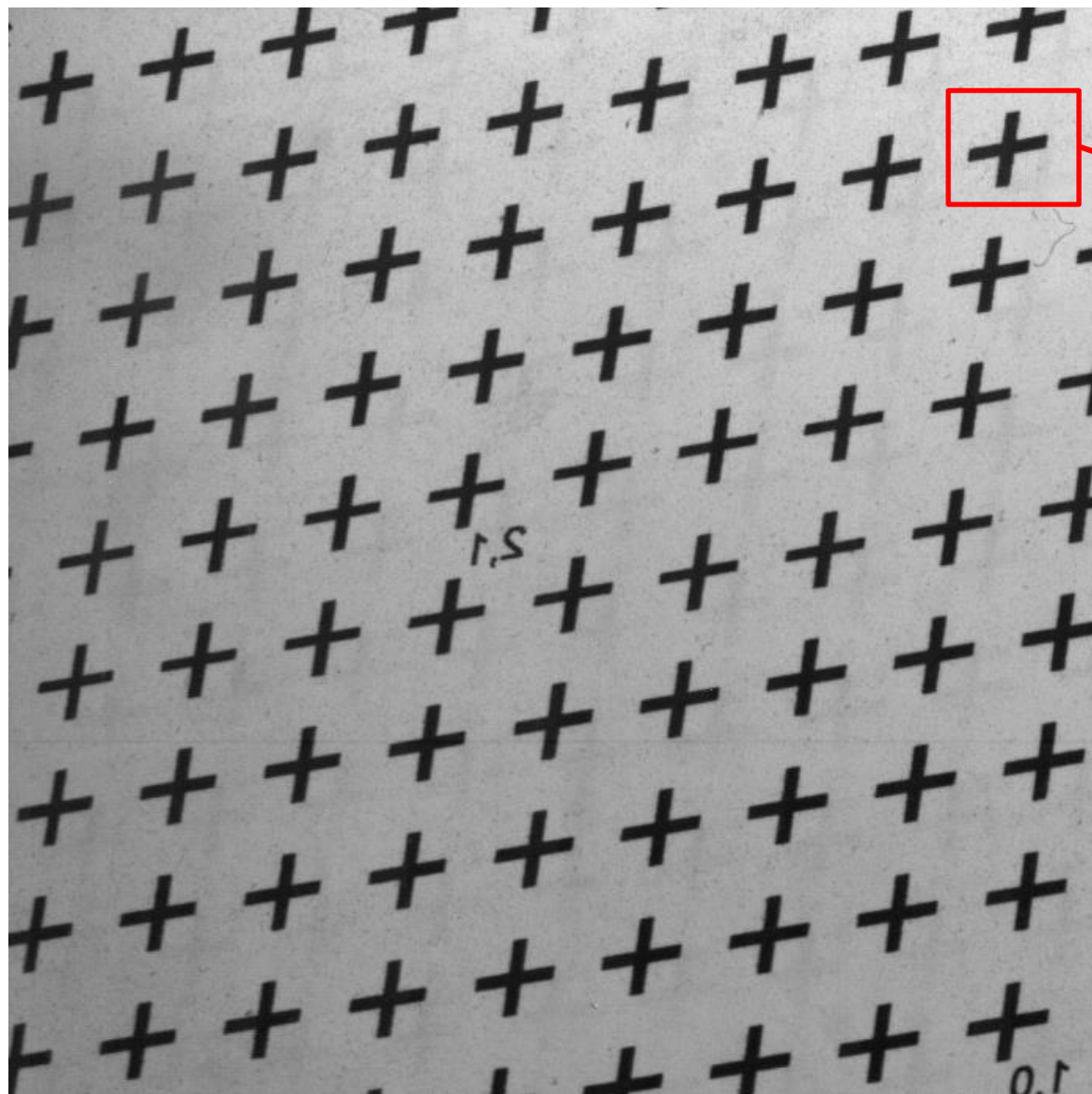
- Teorema da convolução

$$\mathcal{F}\{f * g\} = \overline{\mathcal{F}\{f\}} \cdot \mathcal{F}\{g\}$$

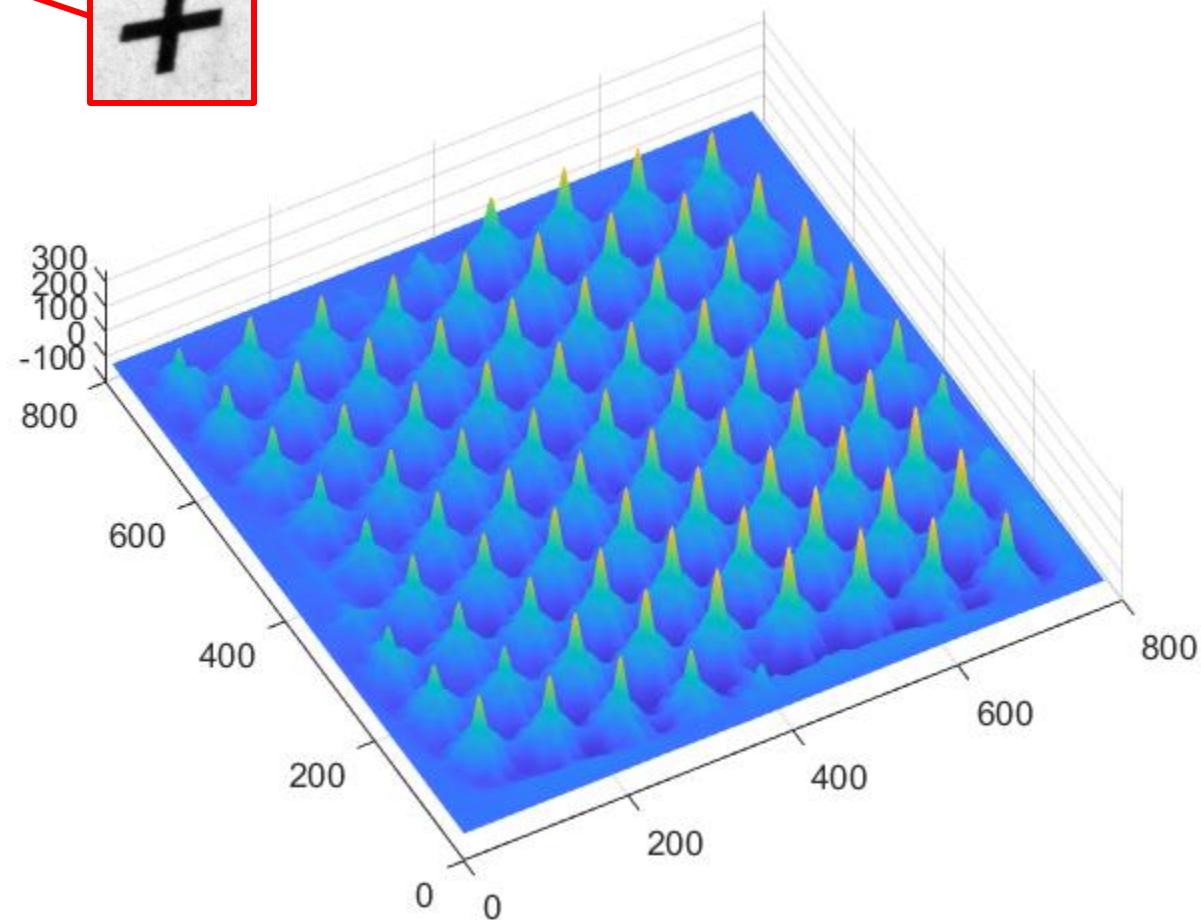
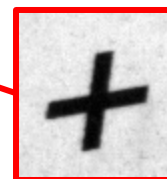


Wiki

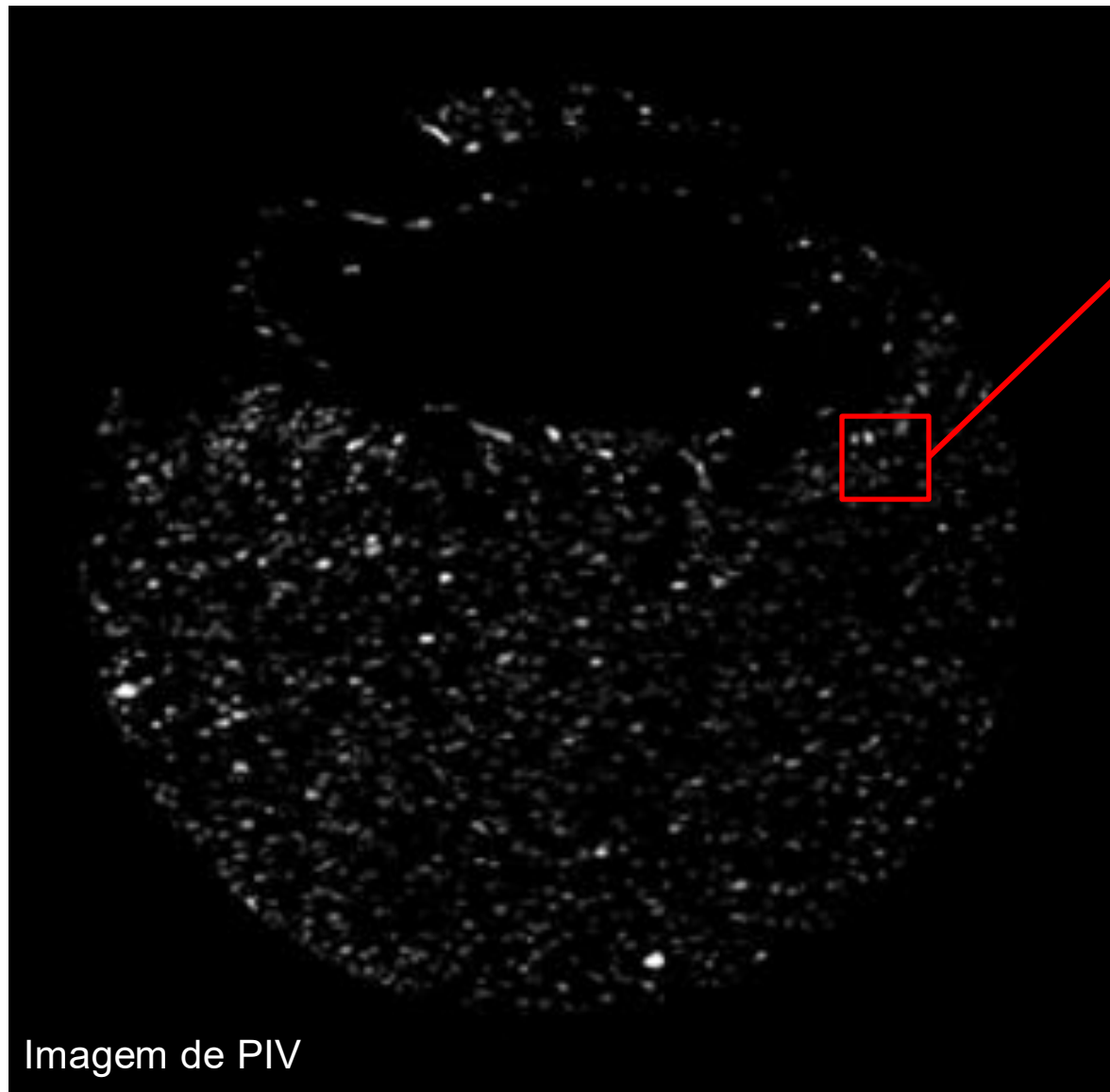
# Convolução e correlação cruzada



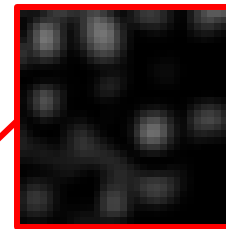
Template



# Convolução e correlação cruzada



Janelas de interrogação

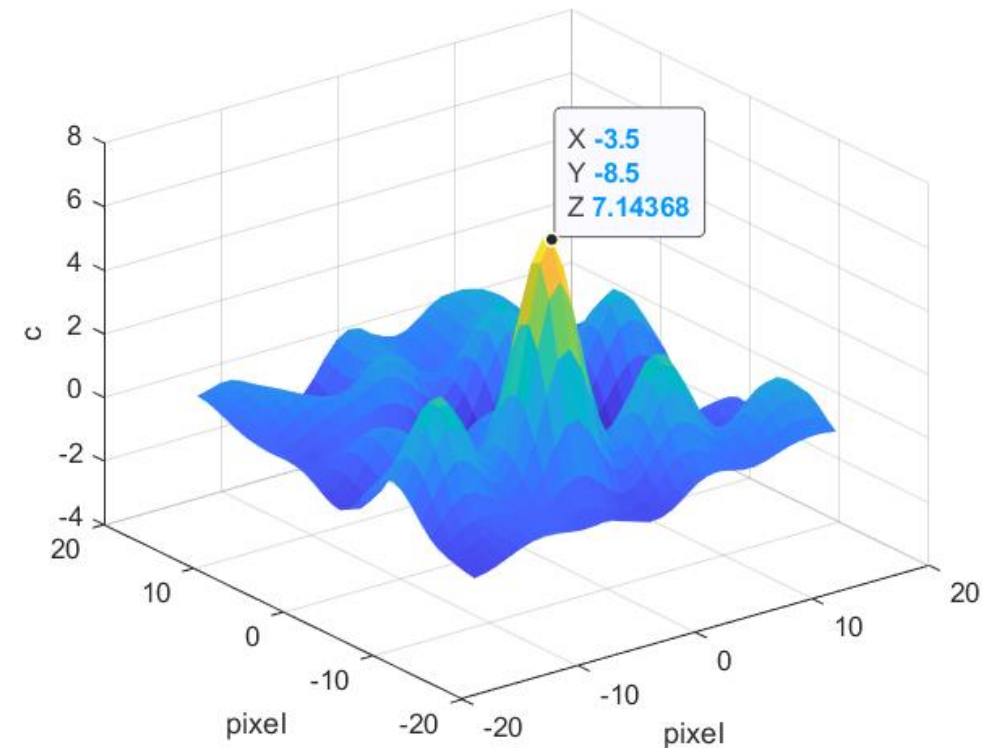


$t_1$

\*



$t_2$



# Filtragem espectral

- Qualquer função periódica pode ser expressa como uma soma ponderada de senos e cossenos de diferentes frequências
- Transformada de Fourier:** operação matemática que converte uma função (sinal) no domínio do tempo ou espaço para uma função complexa no domínio da frequência (notação de Euler)

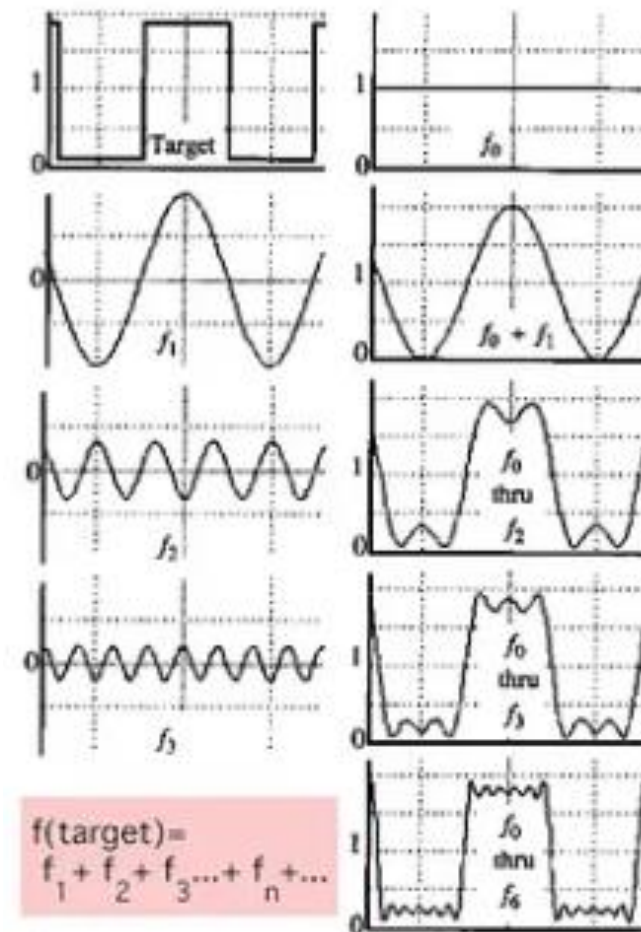
$$G(k_x) = \int_{-\infty}^{\infty} g(x) \exp(-j2\pi k_x x) dx = \int_{-\infty}^{\infty} g(x) \cos(2\pi k_x x) dx - j \int_{-\infty}^{\infty} g(x) \sin(2\pi k_x x) dx$$

- Transformada de Fourier inversa:**

$$g(x) = \int_{-\infty}^{\infty} G(k_x) e^{j2\pi k_x x} dk_x$$

Eq. 9.13 Fourier Transform

- Utilizado para analisar o conteúdo espectral do sinal



# Filtragem espectral

- **Transformada de Fourier discreta** (*discrete Fourier transform*, DFT): tratamento de funções discretas, em particular imagens

$$F(u, v) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \exp \left[ -i2\pi \left( \frac{ux + vy}{N} \right) \right] \quad u, v = 0, 1, 2, \dots, N-1$$

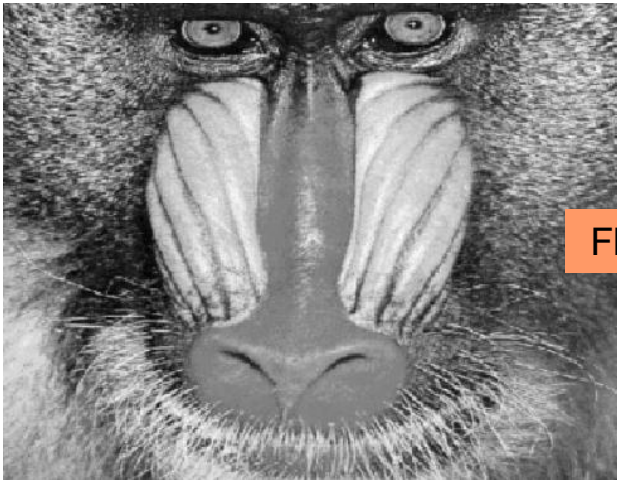
$$f(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u, v) \exp \left[ i2\pi \left( \frac{ux + vy}{N} \right) \right] \quad x, y = 0, 1, 2, \dots, N-1$$

$$\Delta u = \frac{1}{N\Delta x} \quad \Delta v = \frac{1}{N\Delta y}$$

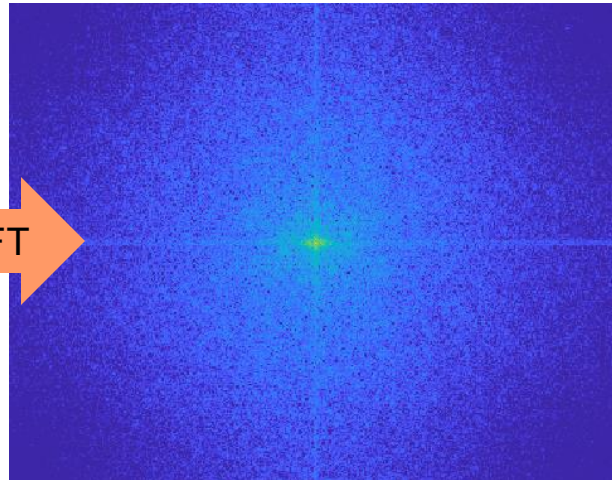
- A DFT de imagens tem simetria por inversão em relação à origem
- A DFT assume que a função é periódica, portanto impõe-se condições periódicas de contorno para o cálculo, repetindo a imagem em x e y
- A DFT pode ser representada com sua origem no canto superior esquerdo ou centro

# Filtragem espectral

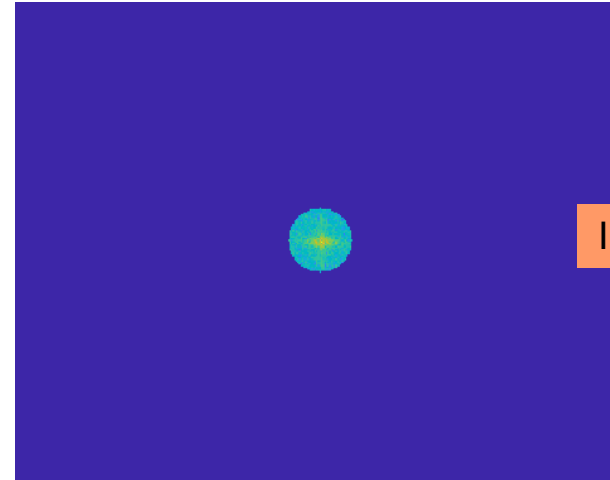
Original image



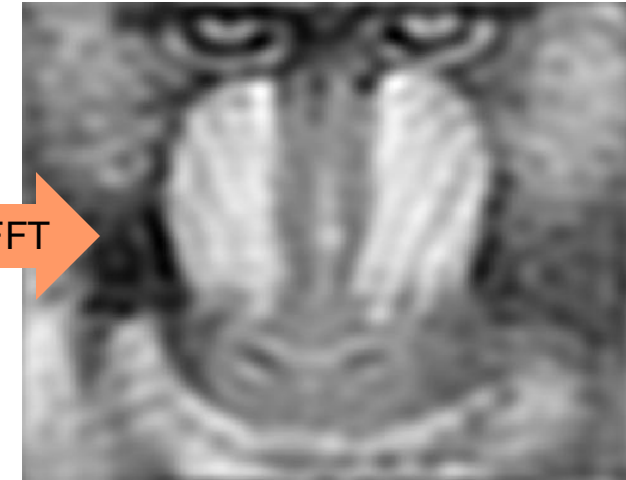
Frequency domain



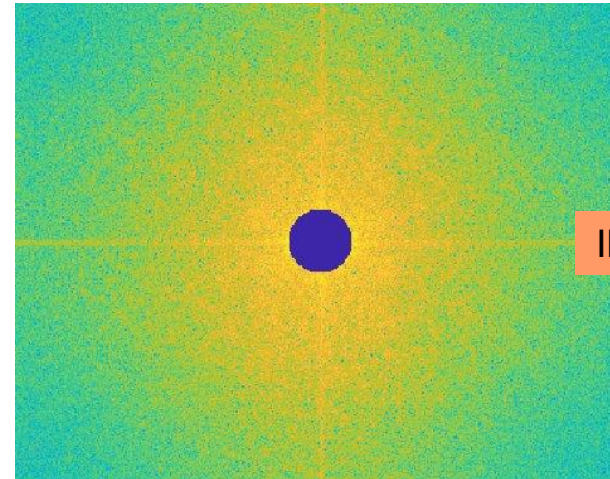
Circular pass (  $r = 20$  )



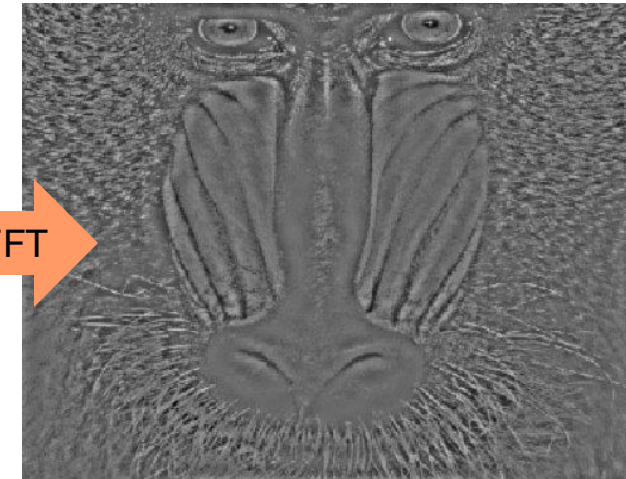
Space domain (low-pass)



Circular cut (  $r = 20$  )

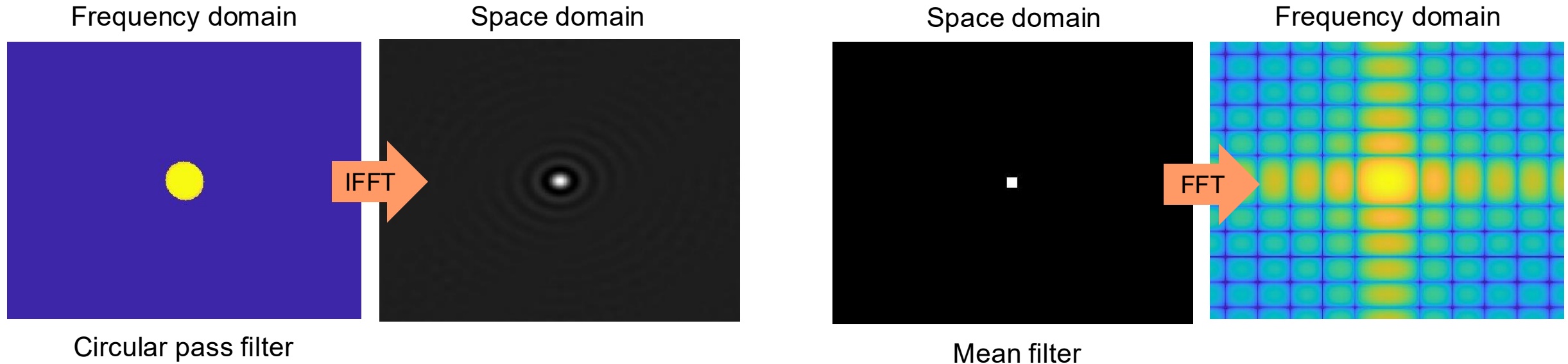


Space domain (high-pass)

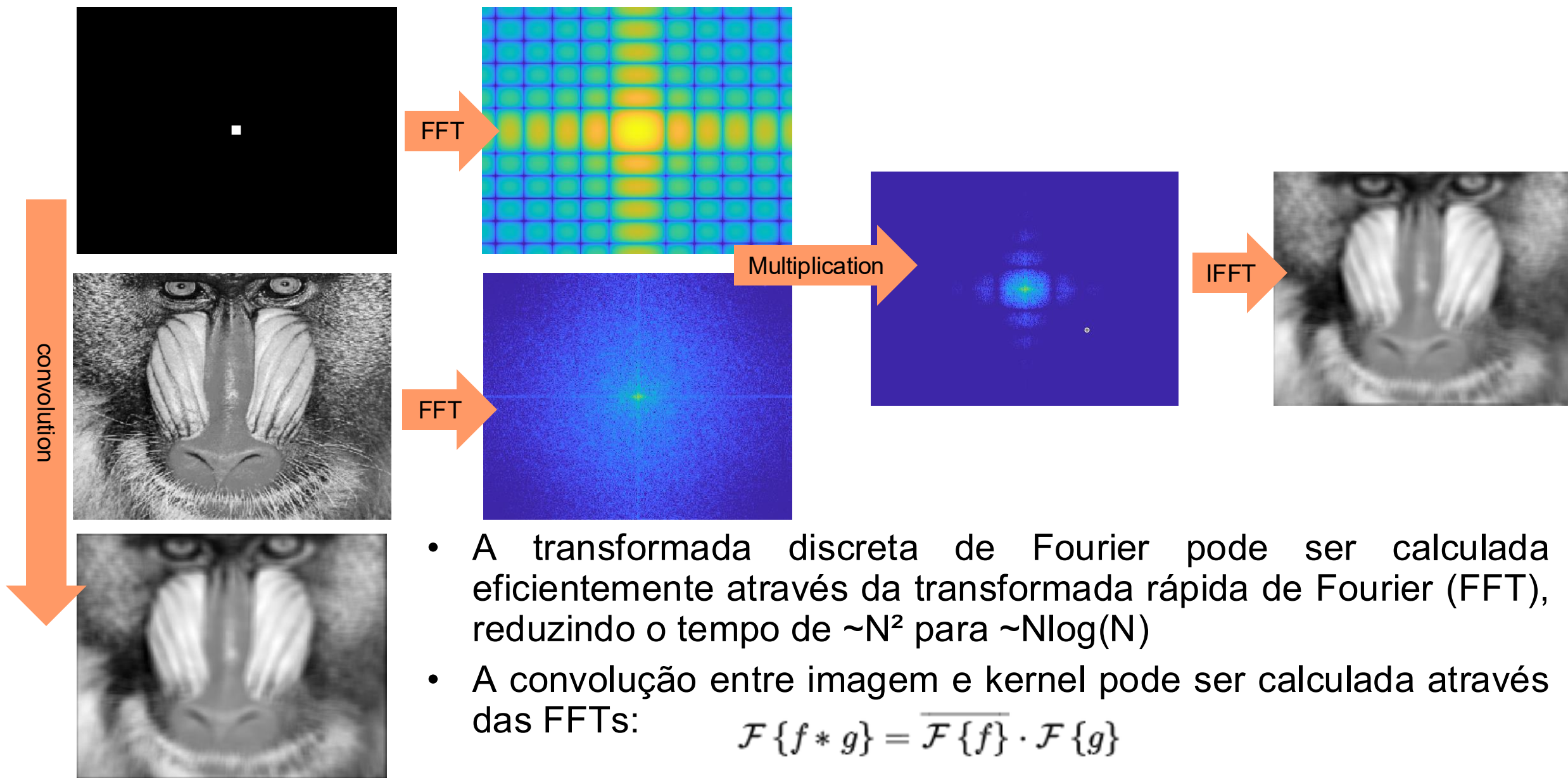


# Filtragem espectral

Filtro baseado em bandas do espectro de frequência (janelamento através de máscara binária com borda abrupta) gera artefatos no domínio espacial



# Análise e filtragem espectral



# Transformações espaciais

- Transformações lineares: translação, escala, rotação, reflexão
- Transformações não lineares: homográfica (perspectiva), polinomial de 2ª e 3ª ordem (correção de distorções ópticas)
- Interpolação: vizinho mais próximo, bi-linear, bi-cúbica, spline, etc.

Imagem original com distorções ópticas

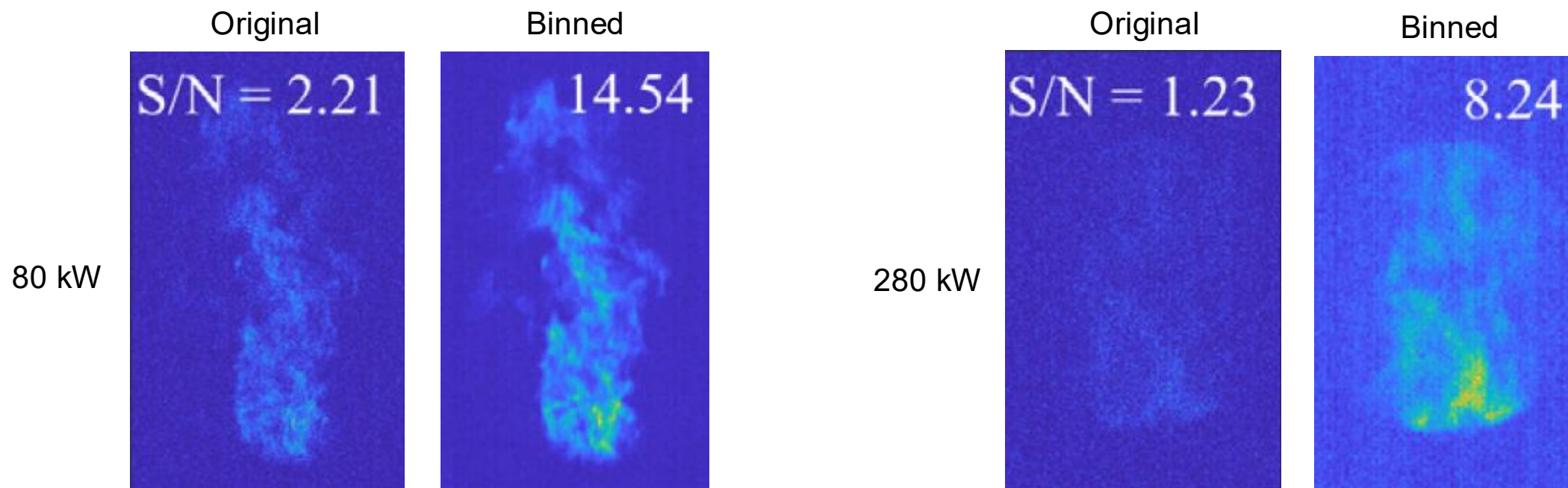


Imagem corrigida



# Binning

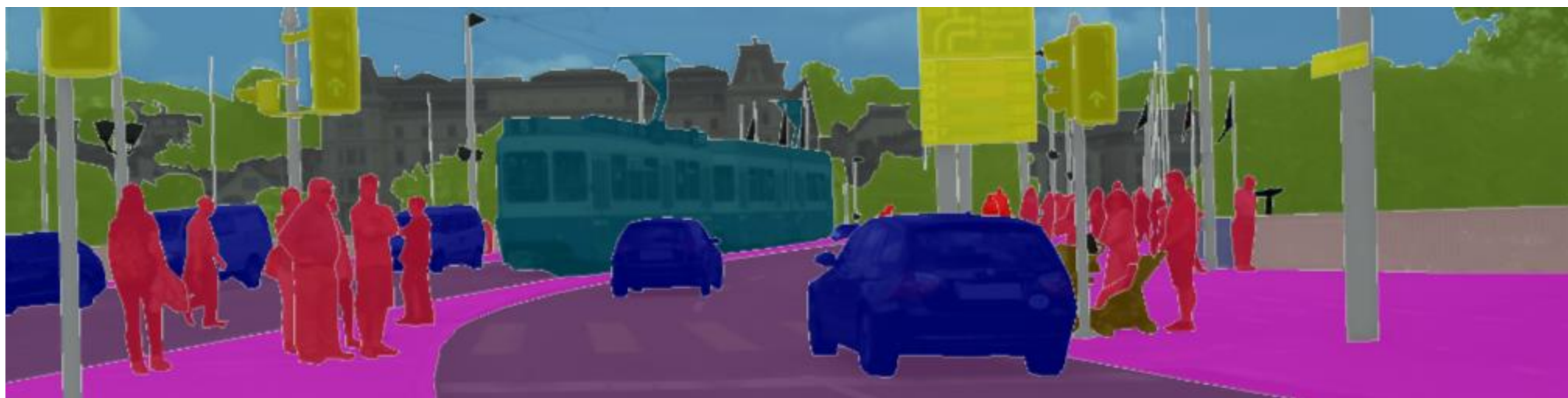
- Combina os dados de pixels adjacentes para criar um "superpixel" maior
- Melhoria na razão sinal/ruído em detrimento da resolução
- Hardware binning: combinação física das cargas elétricas dos pixels vizinhos antes de sua conversão digital durante a aquisição de imagens, eficiente na redução de ruído de leitura (sensores CCD)
- Software binning: processo digital após as imagens serem capturadas



Martins et al., Appl. Therm. Eng. (2025)

# Segmentação

- Distinção entre diferentes regiões contínuas (objetos) e o fundo
- Etapa crítica pois influencia as medidas sobre as regiões identificadas
- Processo empírico extremamente relacionado à imagem analisada
  - Limiarização (binarização): análise do histograma de intensidades local ou global da imagem para a escolha manual ou automática de um limiar (*threshold*)
  - Contornos: contornos são construídos baseado na detecção de bordas
  - Método de Marr-Hildreth (*Laplacian of Gaussian*, LOG)



# Segmentação: Limiarização

- Limiarização manual
- Limiarização automática: média, mínimo, Otsu (maximiza uma medida de variância entre modos do histograma), entropia máxima, etc.

Imagem original

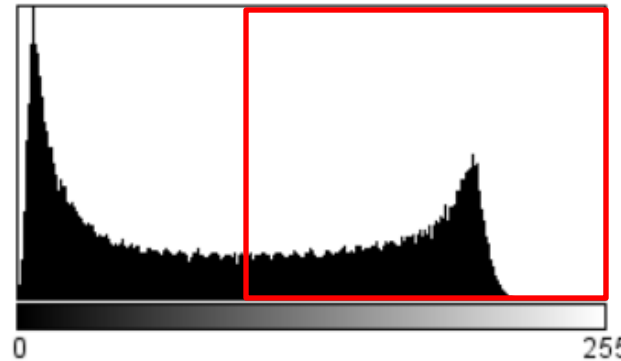


Imagem binarizada



# Segmentação: Contornos

- Detecção de bordas (Sobel, Canny, Prewitt, Roberts, etc.) e construção de contornos
- Localização de fronteiras dos objetos através de perseguição de bordas (*edge tracking*)
- Desvantagens: sensível ao ruído e nem sempre é possível fechar as fronteiras

Imagem original



Detecção de bordas



Bordas binarizadas



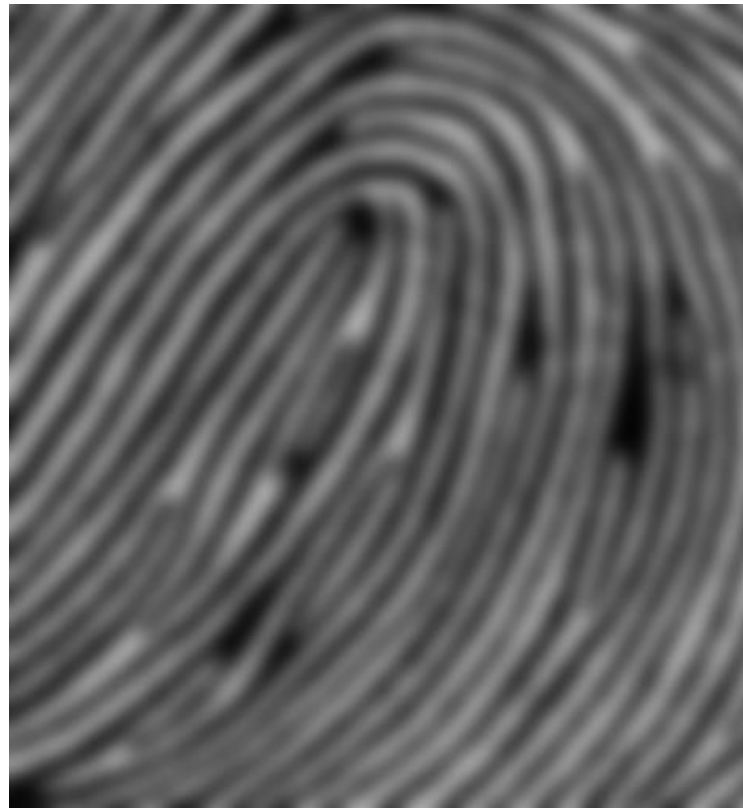
# Segmentação: Método de Marr-Hildreth

- Filtro gaussiano da imagem original
- Laplaciano da imagem borrada
- Cruzamento por zero do Laplaciano

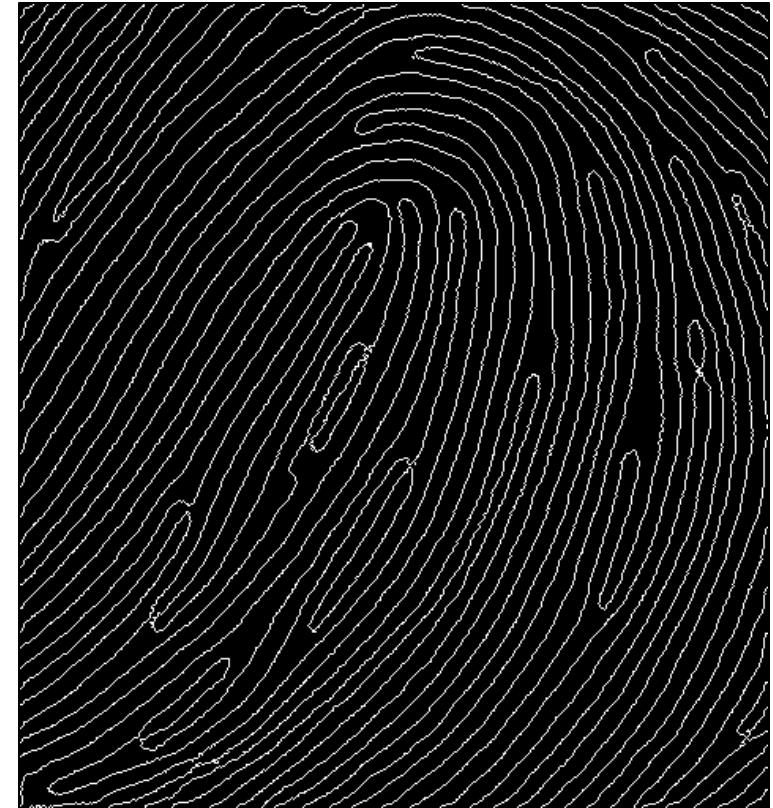
Imagem original



Filtro Gaussiano (raio 8 pixels)



Cruzamento por zero do Laplaciano

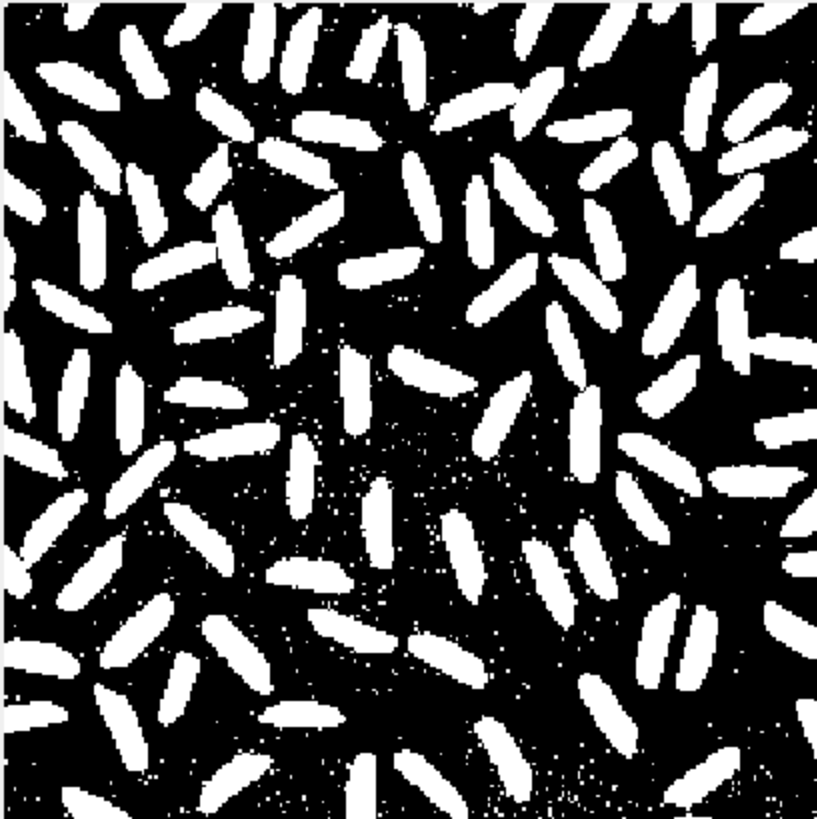


# Operadores morfológicos

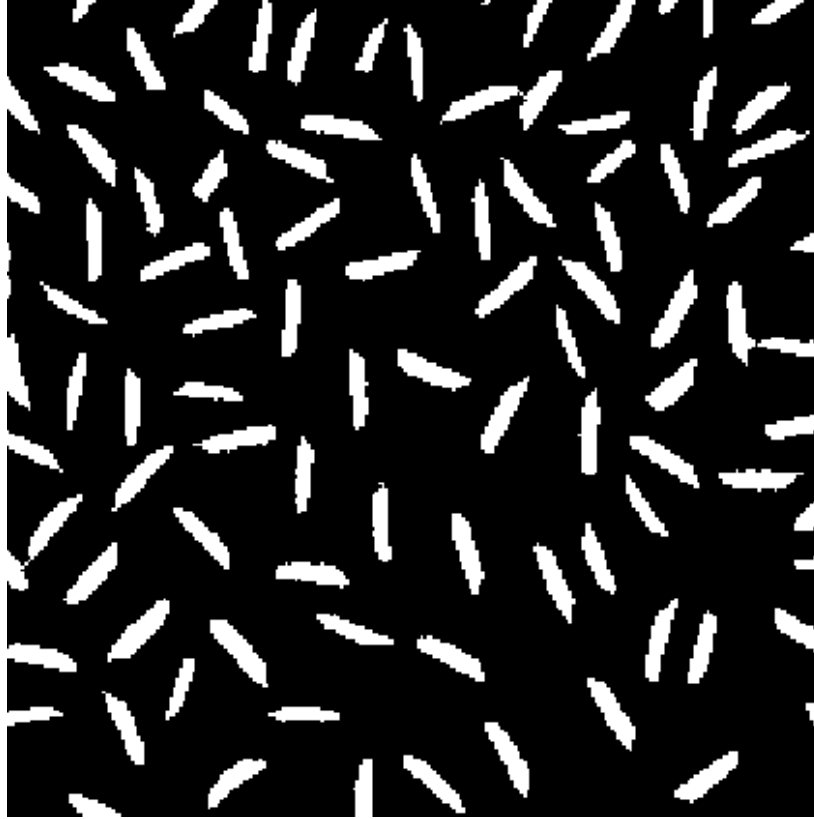
- Operadores matemáticos locais que alteram o valor do pixel de acordo com os vizinhos delimitados pelo elemento estruturante (máscara ou kernel)
- **Erosão (*erosion*)**: retoma o mínimo dos vizinhos (em imagens binárias, a área dos objetos reduz com possível eliminação de objetos pequenos e detalhes)
- **Dilatação (*dilate*)**: retorna o valor máximo dos vizinhos (em imagens binárias, a área dos objetos aumenta com possível conexão de objetos e eliminação de buracos pequenos)
- **Abertura (*open*)**: N ciclos de erosão seguidos de N ciclos de dilatação (em imagens binárias, objetos pequenos desaparecem, enquanto objetos maiores conservam sua área)
- **Fechamento (*close*)**: N ciclos de dilatação seguidos de N ciclos de erosão (em imagens binárias, buracos pequenos são eliminados e objetos são conectados, enquanto objetos maiores preservam sua área)
- Operações morfológicas podem causar distorções nas áreas dos objetos e medições

# Operadores morfológicos: abertura

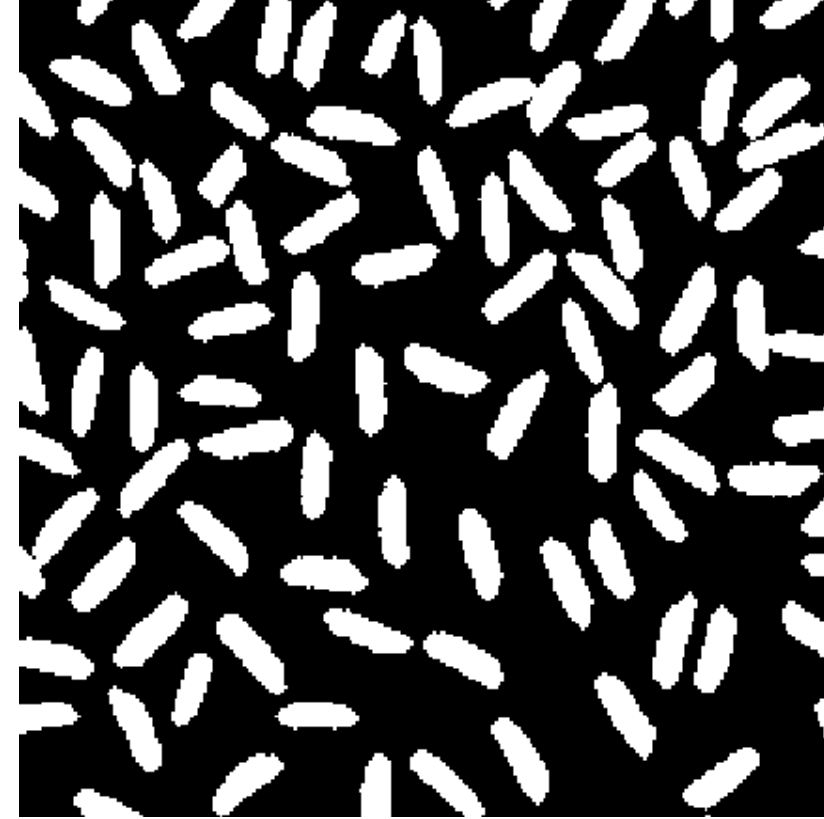
Imagem binarizada (limiar baixo)



Erosão

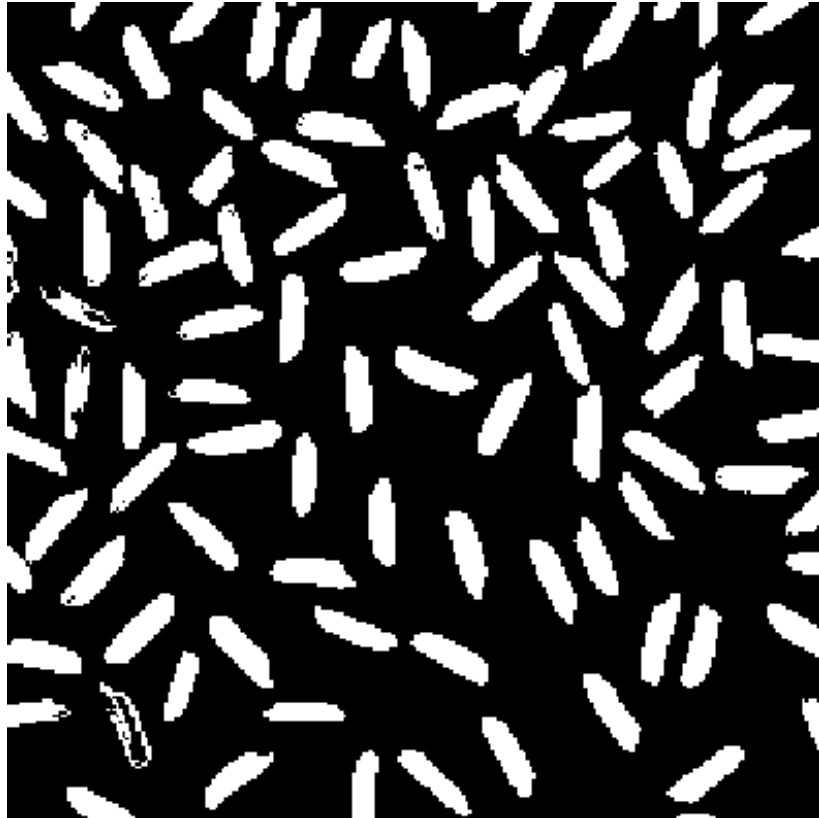


Erosão seguida de dilatação

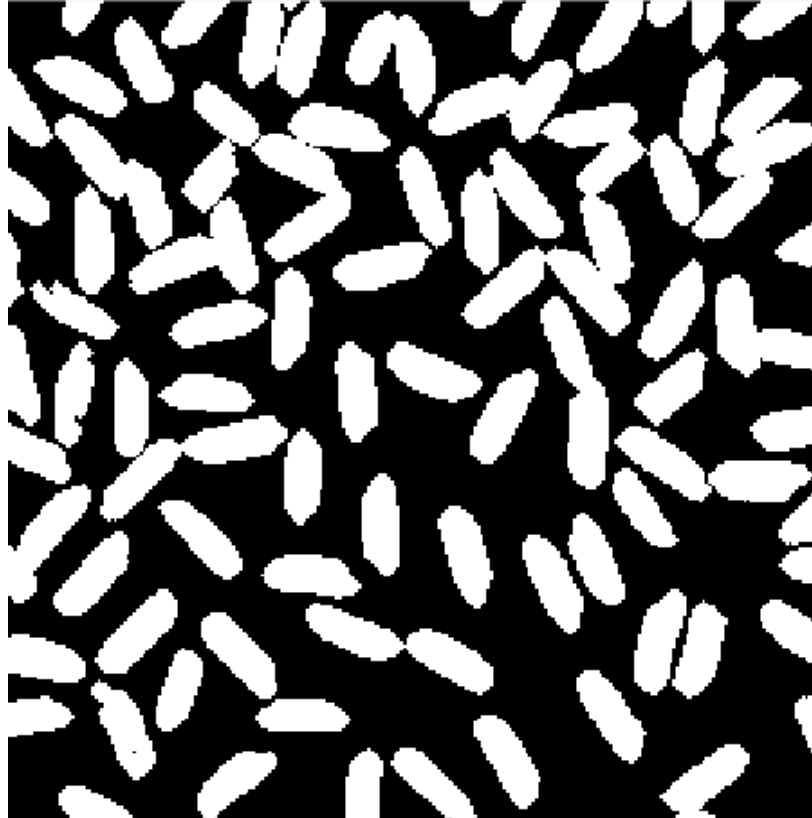


# Operadores morfológicos: fechamento

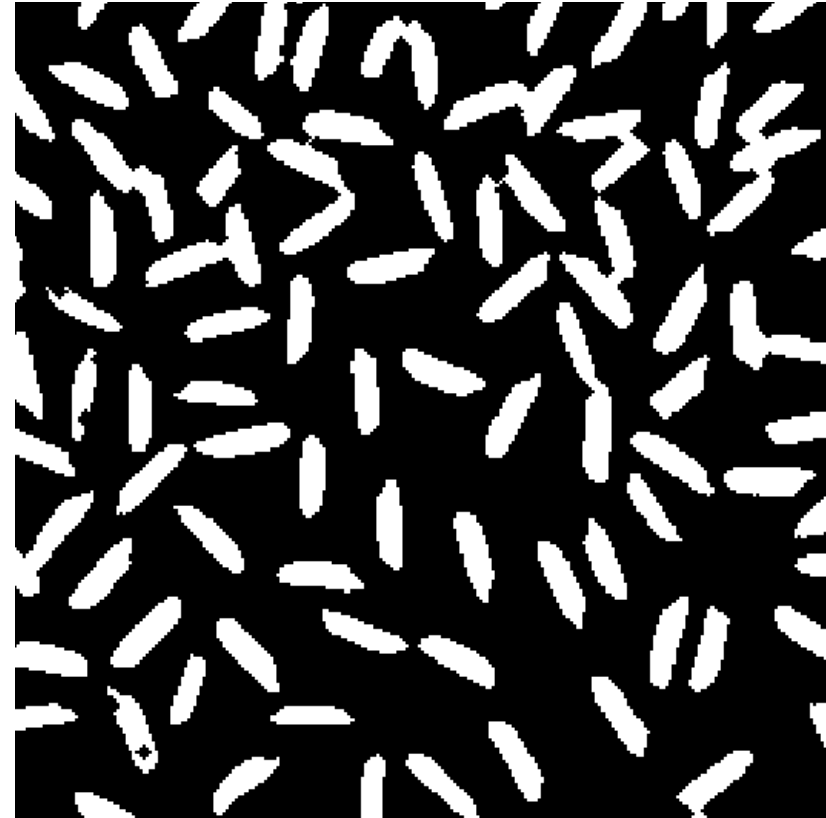
Imagem binarizada (limiar alto)



Dilatação



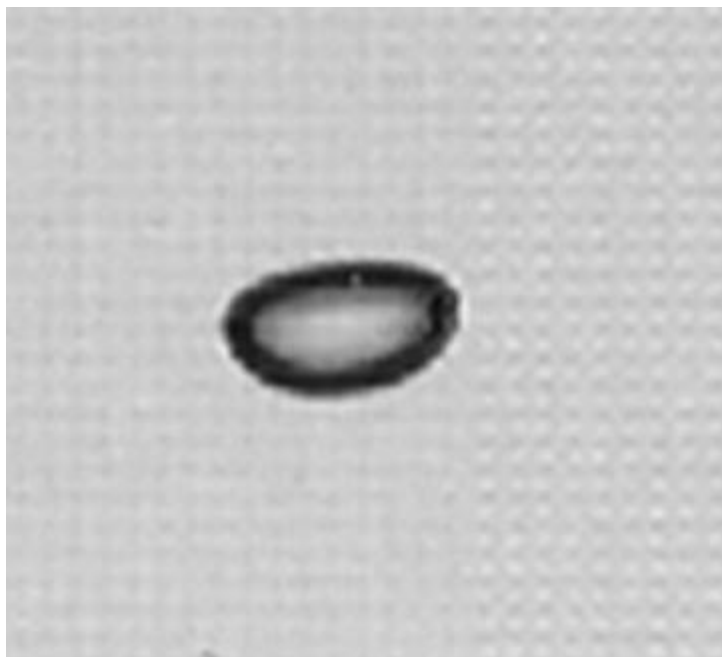
Dilatação seguida de erosão



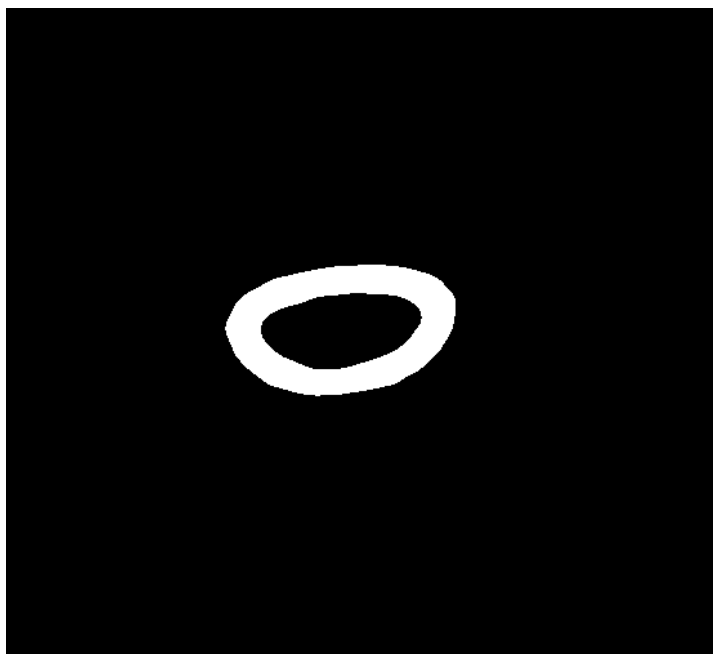
# Operador preenchimento (*fill*)

- Buracos internos a objetos com fronteiras fechadas podem ser removidos através
- Dependendo da imagem, pode ser conveniente inverter a imagem ( $1 \rightarrow 0$  e  $0 \rightarrow 1$ ) antes de aplicar o operador preenchimento

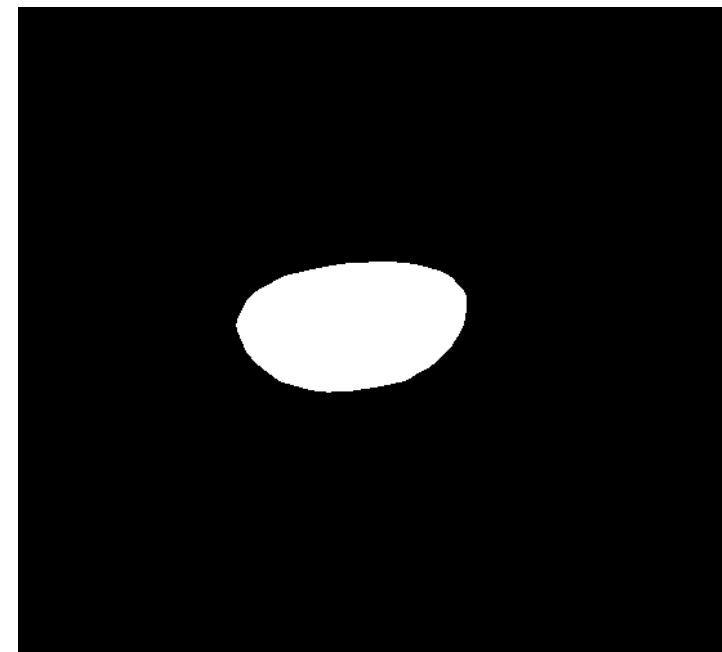
Imagem original



Binarização após filtro gaussiano



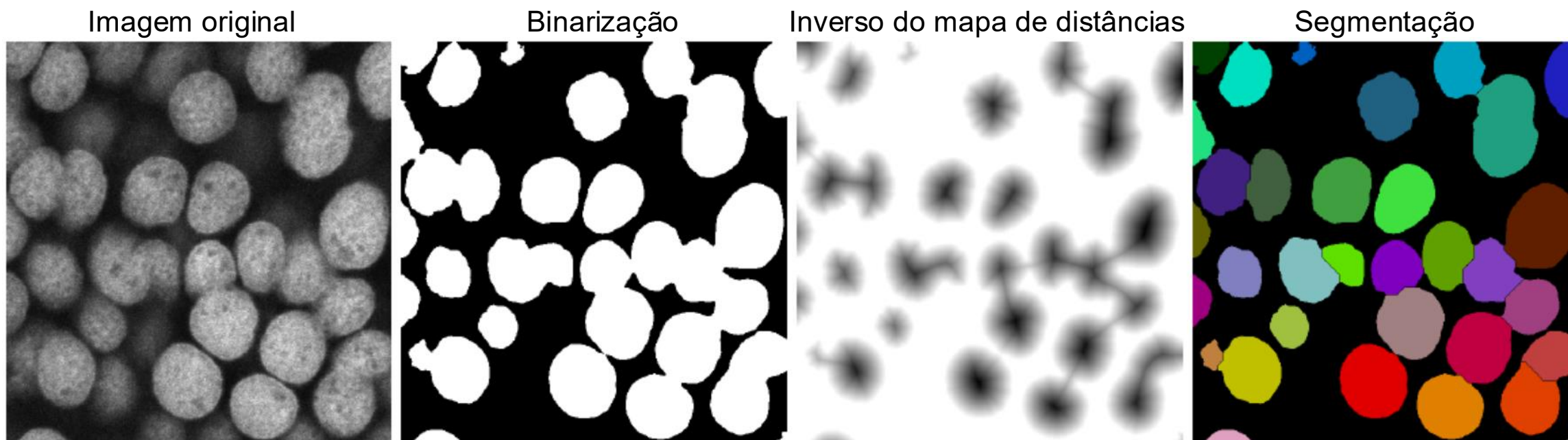
Preenchimento



# Método divisor de águas (*watershed*)

Método avançado para separar objetos em regiões binárias conectadas

- Limiarização da imagem
- Mapa de distâncias euclidianas (cada pixel de um objeto tem uma intensidade proporcional à sua menor distância até a fronteira do objeto)
- Divisores de águas separando os objetos (crescimento dos objetos a partir dos máximos locais do mapa de distâncias euclidianas, evitando que os objetos se unam novamente)



<https://imagej.net/plugins/distance-transform-watershed>

# Referências bibliográficas

- Gonzalez, R.C., and Woods, R. (1993). Digital Image Processing. Addison-Wesley.
- Paciornik, S. (2007). Notas de aula: Processamento digital de imagens. DCMM PUC-Rio.