

# **Computação Visual**

## **Ciência da Computação**

Prof. André Kishimoto  
2024

# Referências

Este material foi baseado e adaptado a partir das seguintes referências:

- **Computação Gráfica: teoria e prática vol. 2**

AZEVEDO, E.; CONCI, A.; LETA, F.  
Alta Books, 2022.

- **Processamento digital de imagens, 3ª ed.**

GONZALES, R. C.; WOODS, R. C.  
Pearson Prentice Hall, 2010.

- **Fundamentos da Imagem Digital (slides de aula)**

CRUNIVEL, L., 2012.

# **Transformações de Intensidade**

# Fundamentos

- As transformações de intensidade e filtragem espacial são realizadas no **domínio espacial** (próprio plano da imagem).
- Os métodos de processamento de imagens no domínio espacial realizam a **manipulação direta** de pixels em uma imagem digital.

# Fundamentos

- **Transformações de intensidade:** operam individualmente nos pixels de uma imagem (manipulação de contraste, limiarização de imagens, etc.).
  - Processamento ponto a ponto (pixel por pixel).
- **Filtragem espacial:** operam na vizinhança de cada pixel de uma imagem (realce de imagens, detecção de bordas, etc.).
  - Processamento por vizinhança.

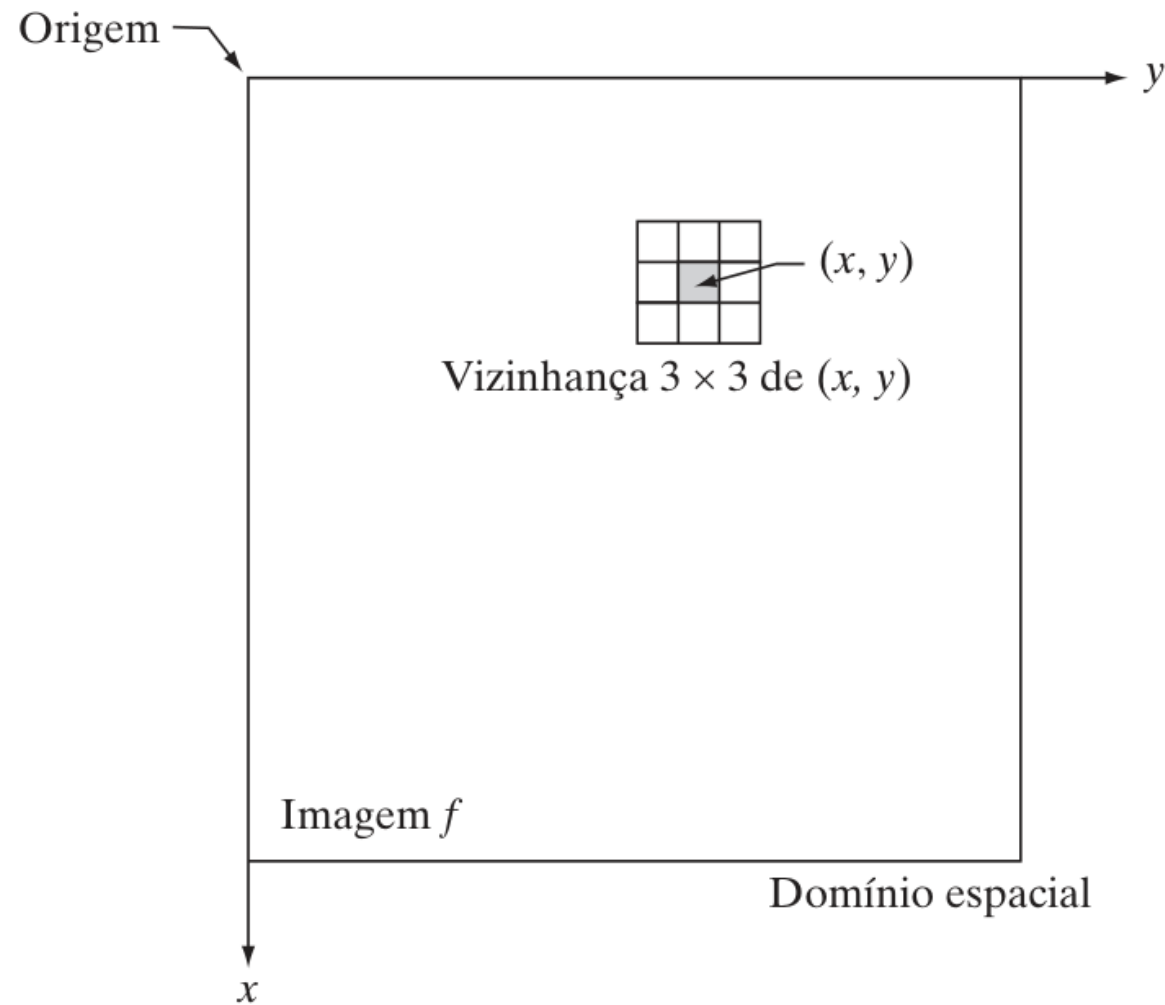
# Fundamentos

- Processos no domínio espacial podem ser expressos pela equação:

$$g(x, y) = T[f(x, y)]$$

Sendo:

- $f(x, y)$ : a imagem de entrada.
- $g(x, y)$ : a imagem de saída (entrada processada).
- $T$ : um operador em  $f$  definido em uma vizinhança do ponto  $(x, y)$ .



**Figura 3.1** Uma vizinhança  $3 \times 3$  ao redor de um ponto  $(x, y)$  em uma imagem no domínio espacial. A vizinhança é movida pixel a pixel na imagem para gerar uma imagem de saída.

# Transformação de Intensidade

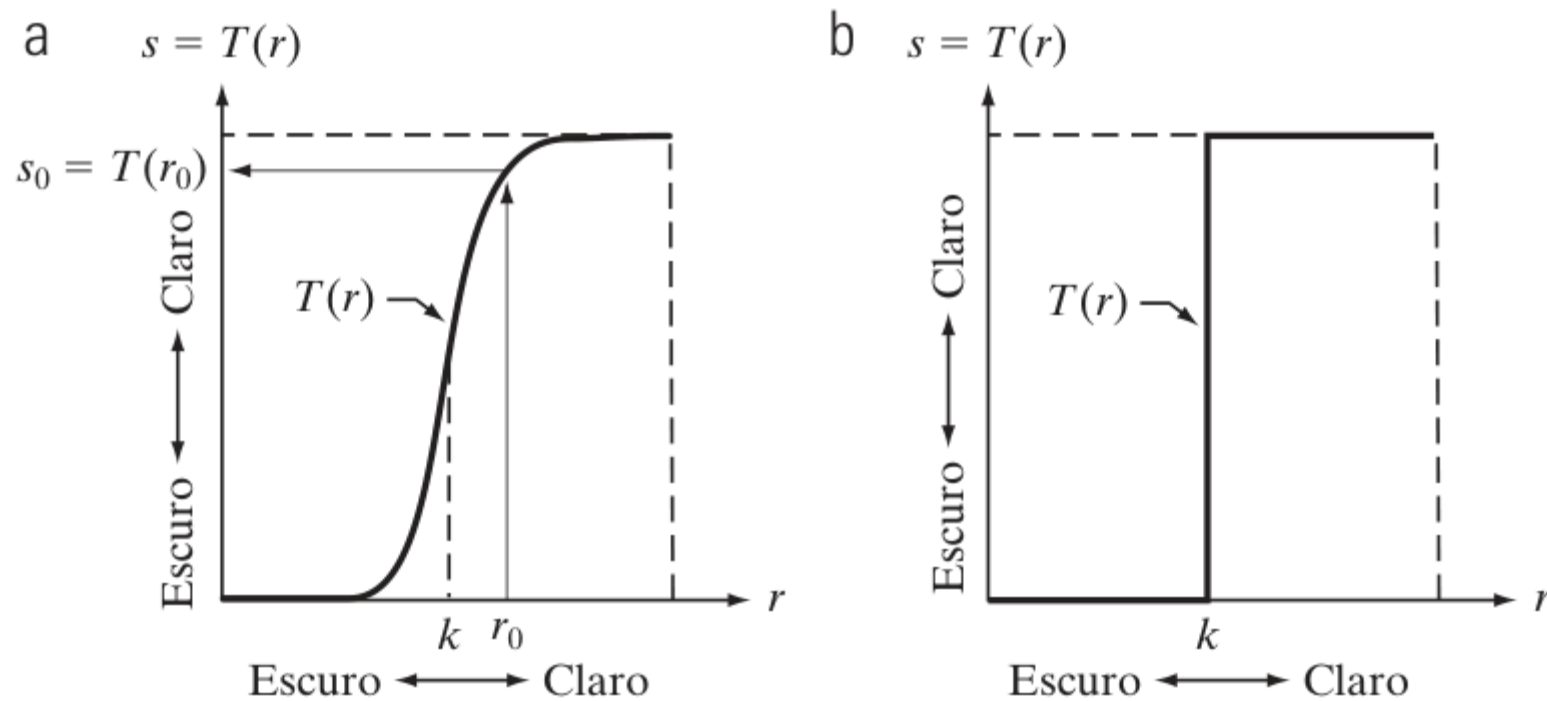
- A menor vizinhança é formada por uma máscara (filtro) de 1x1.
- Neste caso, a equação do domínio espacial se torna uma **função de transformação de intensidade**:

$$s = T(r)$$

Sendo:

- $s$ : intensidade de  $g$  em qualquer ponto  $(x, y)$ .
- $r$ : intensidade de  $f$  em qualquer ponto  $(x, y)$ .





**Figura 3.2** Funções de transformação de intensidade. (a) Função de alargamento de contraste. (b) Função de limiarização.

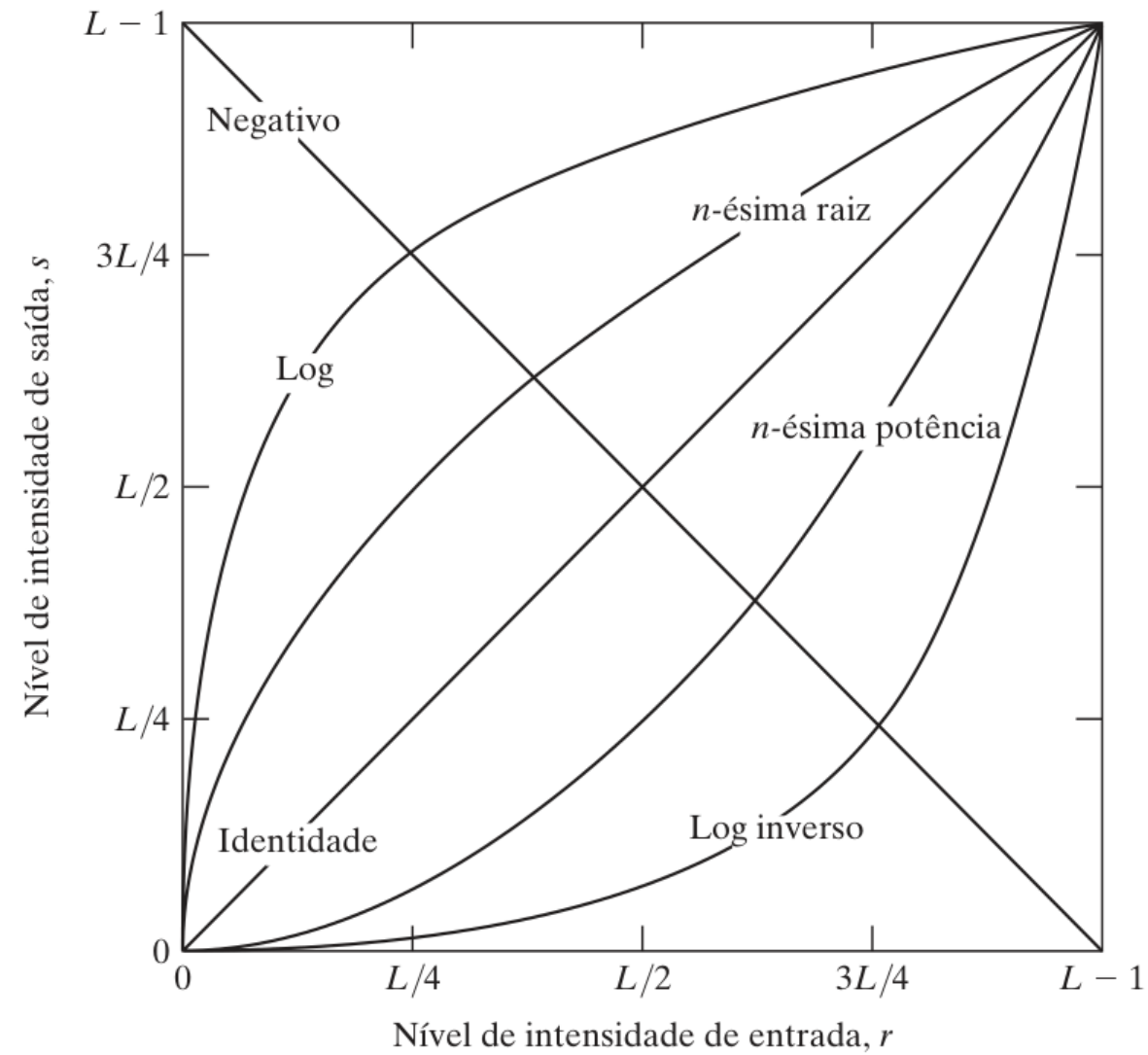
**Contraste:** Diferença entre os níveis superior e inferior de intensidade presentes em uma imagem.

**Limiarização** (*thresholding*): binarização de uma imagem.

# Transformação de Intensidade

As funções de transformação de intensidade são classificadas em três tipos básicos:

- **Transformações lineares:** transformações de negativo e de identidade.
- **Transformações logarítmicas:** transformações de log e log inverso.
- **Transformações de potência (gama):** transformações da  $n$ -ésima potência e  $n$ -ésima raiz.



**Figura 3.3** Algumas funções básicas de transformação de intensidade. Todas as curvas foram ajustadas para o intervalo mostrado.

# Transformação de Intensidade (Linear)

- **Identidade de imagem**

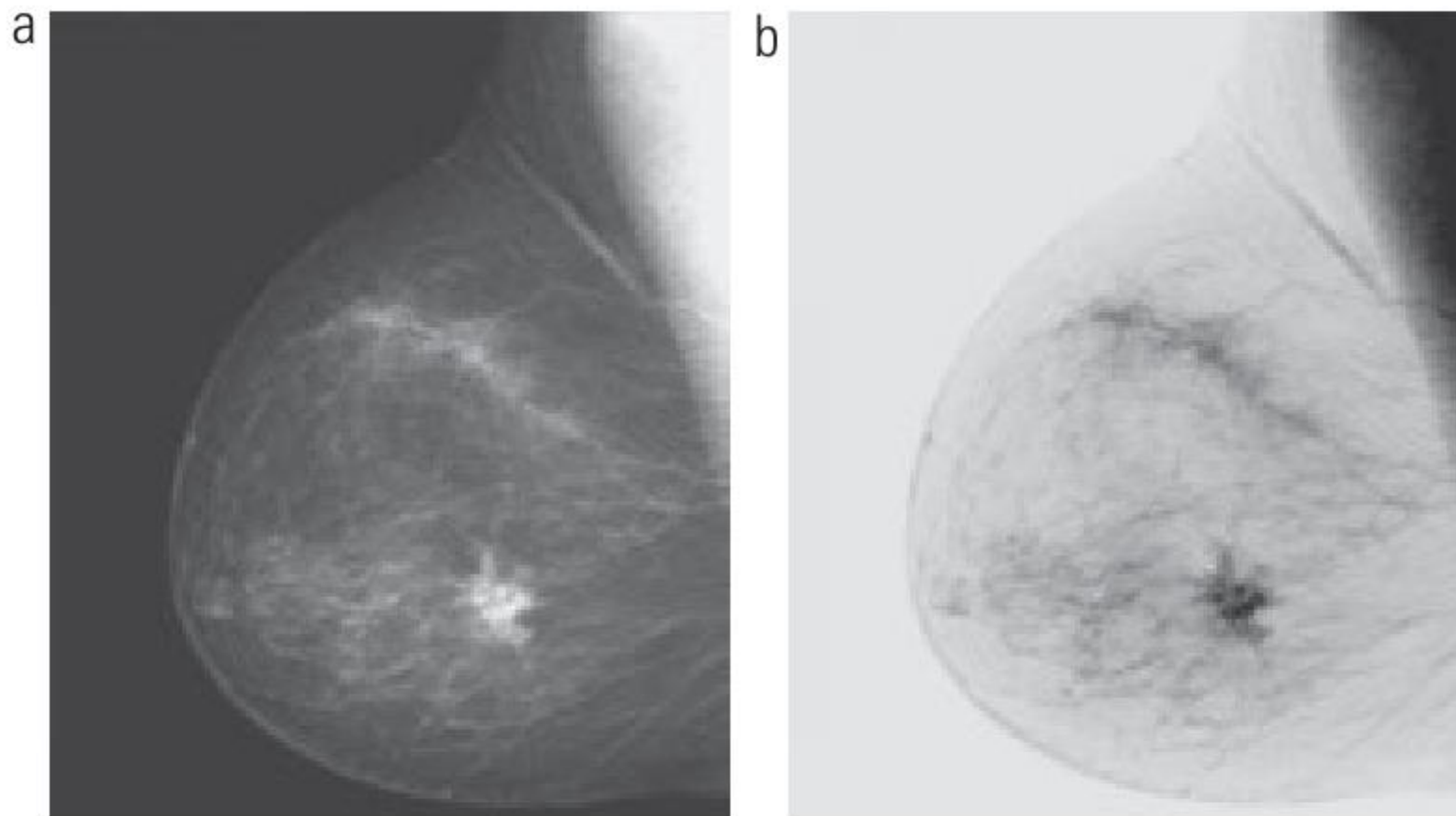
- As intensidades de saída são idênticas às intensidades de entrada.

- **Negativos de imagem**

- O negativo de uma imagem é obtido pela expressão:

$$s = L - 1 - r$$

- Reverte os níveis de intensidade de uma imagem (negativo fotográfico).
- Realça detalhes brancos ou cinza incorporados a regiões escuras de uma imagem, especialmente quando as áreas escuras são dominantes em termos de tamanho.



**Figura 3.4** (a) Mamografia digital original. (b) Negativo da imagem obtido utilizando a função de transformação da Equação 3.2-1. (Cortesia da G.E. Medical Systems.)

# Transformação de Intensidade (Log)

- As transformações logarítmicas são representadas pela equação:

$$s = c \log(1 + r)$$

Sendo:

- $s$  é a intensidade do pixel de saída após a transformação.
- $r$  é a intensidade do pixel de entrada original.
- $c$  é uma constante.
  - Fator de escala que controla a amplitude da transformação.

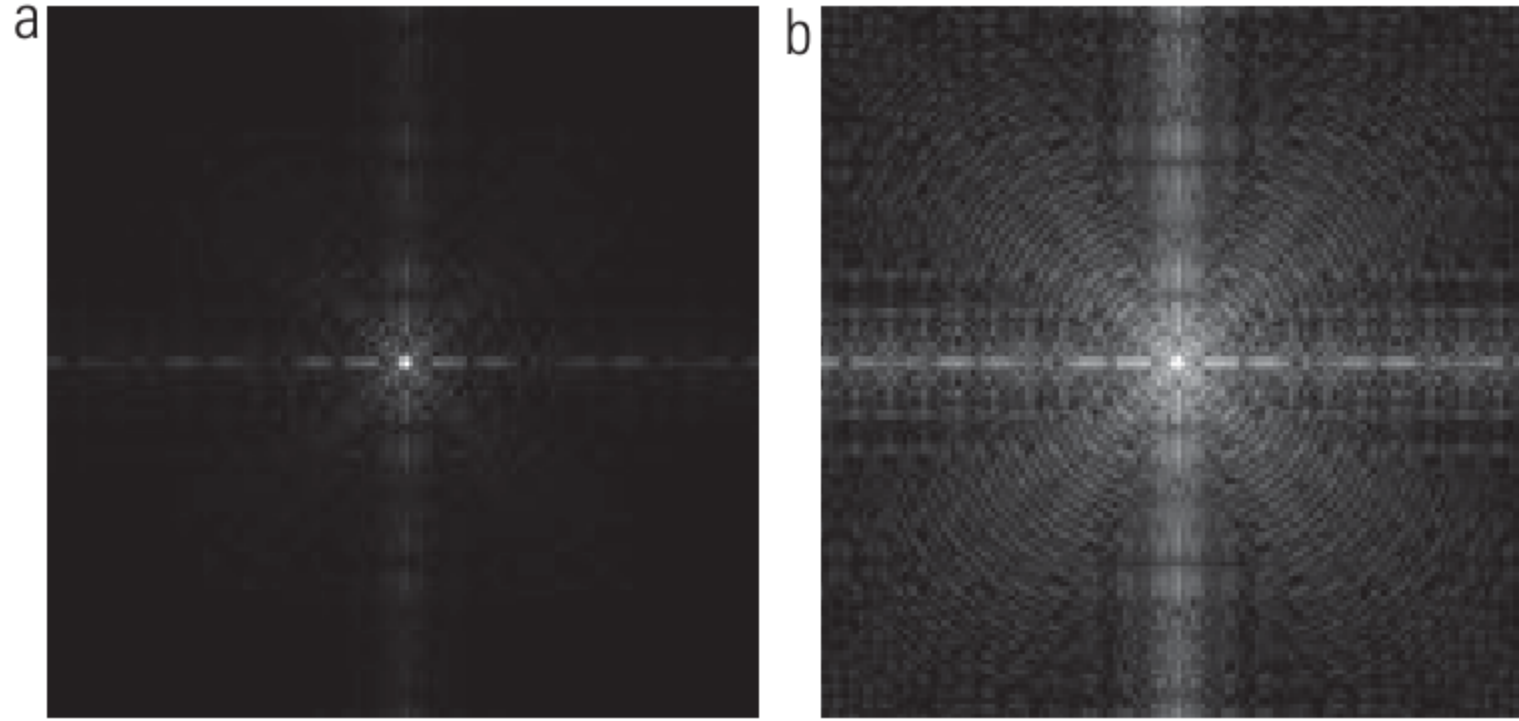
# Transformação de Intensidade (Log)

- Expande as baixas intensidades de uma imagem.
  - Regiões de baixo contraste são ampliadas.
  - Realça detalhes em baixo contraste (torna detalhes nessas regiões mais visíveis).
- Comprime as altas intensidades de uma imagem.
  - Regiões de alto contraste são comprimidas.
  - Evita a saturação de regiões de intensidades muito altas, mantendo os detalhes visíveis.

# Transformação de Intensidade (Log)

- Exemplo de aplicação: Espectro de Fourier (domínio da frequência)
  - É comum encontrarmos valores variando de 0 a  $10^6$  ou mais.
  - Essa ampla variedade de valores de intensidade podem não ser exibidas corretamente em tela; perde-se detalhes de intensidade.
  - Ajuste linear para um sistema de 8 bits: pixels mais claros dominam a exibição em detrimento dos valores mais baixos do espectro.
  - O ideal é ajustar o espectro com a transformação logarítmica.





**Figura 3.5** (a) Espectro de Fourier. (b) Resultado da aplicação da transformação logarítmica da Equação 3.2-2 com  $c = 1$ .

# Transformação de Intensidade (Potência)

- As transformações de potência (gama) são representadas pela equação:

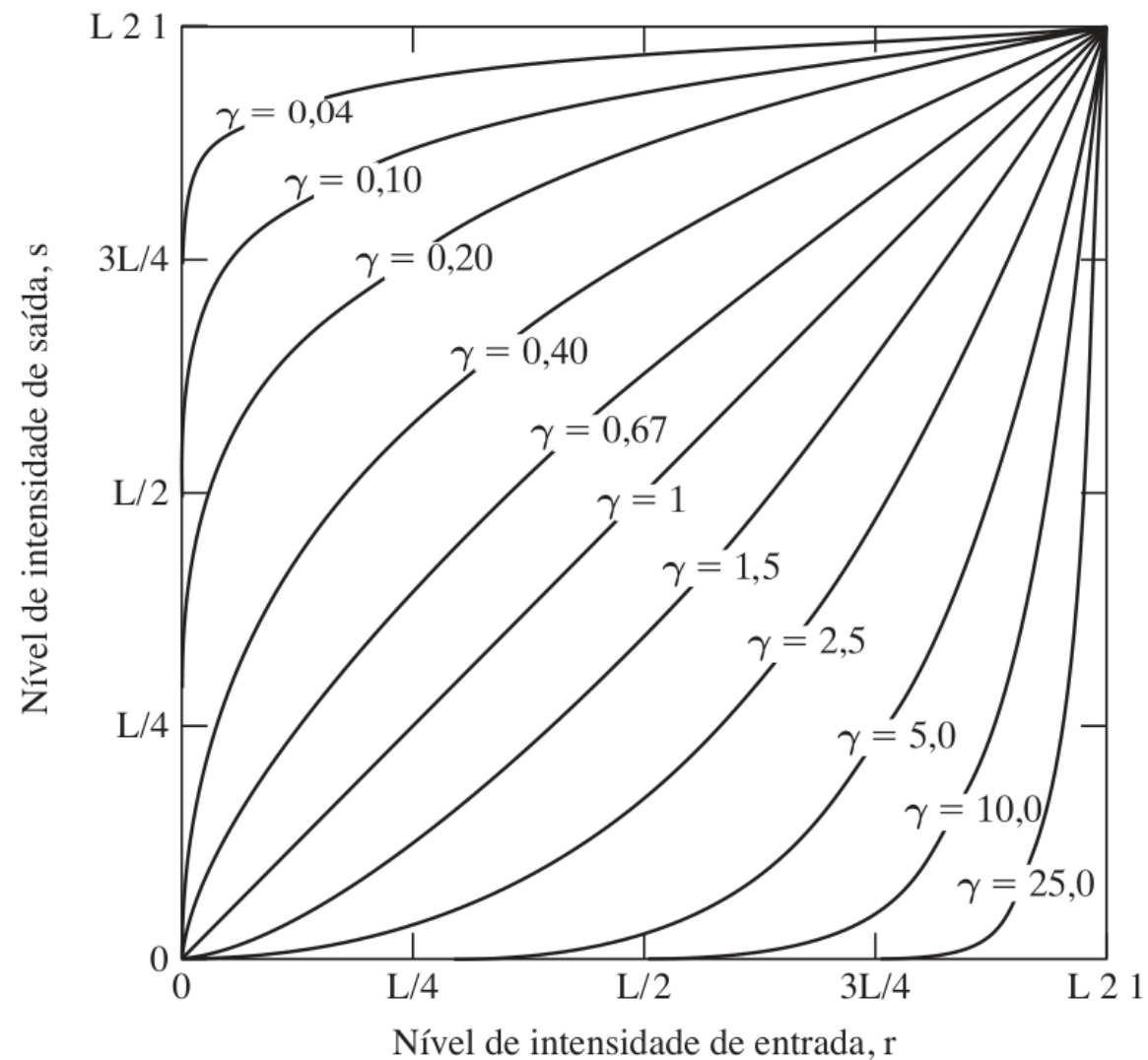
$$s = cr^\gamma$$

Sendo:

- $s$  é a intensidade do pixel de saída após a transformação.
- $r$  é a intensidade do pixel de entrada original.
- $c$  é uma constante.
  - Fator de escala que controla a amplitude da transformação.
- $\gamma$  é uma constante.
  - Parâmetro de potência que determina a forma da curva de transformação.

# Transformação de Intensidade (Potência)

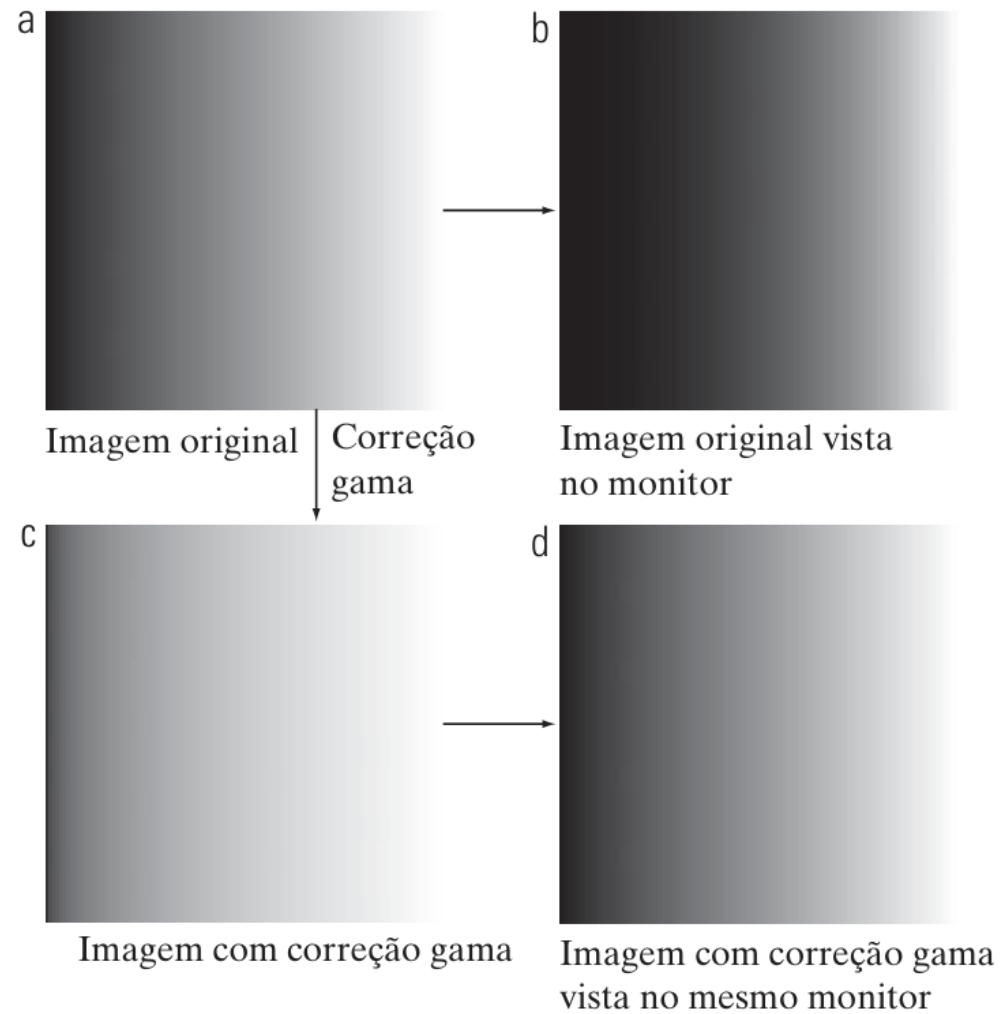
- Curvas de transformação de potência com valores  $\gamma < 1$  (fracionários):
  - Mapeiam uma faixa estreita de valores escuros de entradas em uma faixa mais ampla de valores de saída.
  - Realçam detalhes em regiões de baixa intensidade (aumentam o contraste em regiões escuras da imagem).
- Curvas de transformação de potência com valores  $\gamma > 1$ :
  - Tem um efeito exatamente oposto ao descrito acima.



**Figura 3.6** Plotagens da equação  $s = cr^\gamma$  para vários valores de  $\gamma$  ( $c = 1$  em todos os casos). Todas as curvas foram ajustadas para se adequar à faixa mostrada.

# Transformação de Intensidade (Potência)

- Vários dispositivos usados na captura e exibição de imagens funcionam de acordo com a lei de potência.
- Para **ajustar imperfeições** na exibição de uma imagem digital, aplica-se a **correção gama** (com expoentes entre 1.8 a 2.5).
- Esse tipo de correção é usada para exibir uma imagem digital na tela com exatidão.



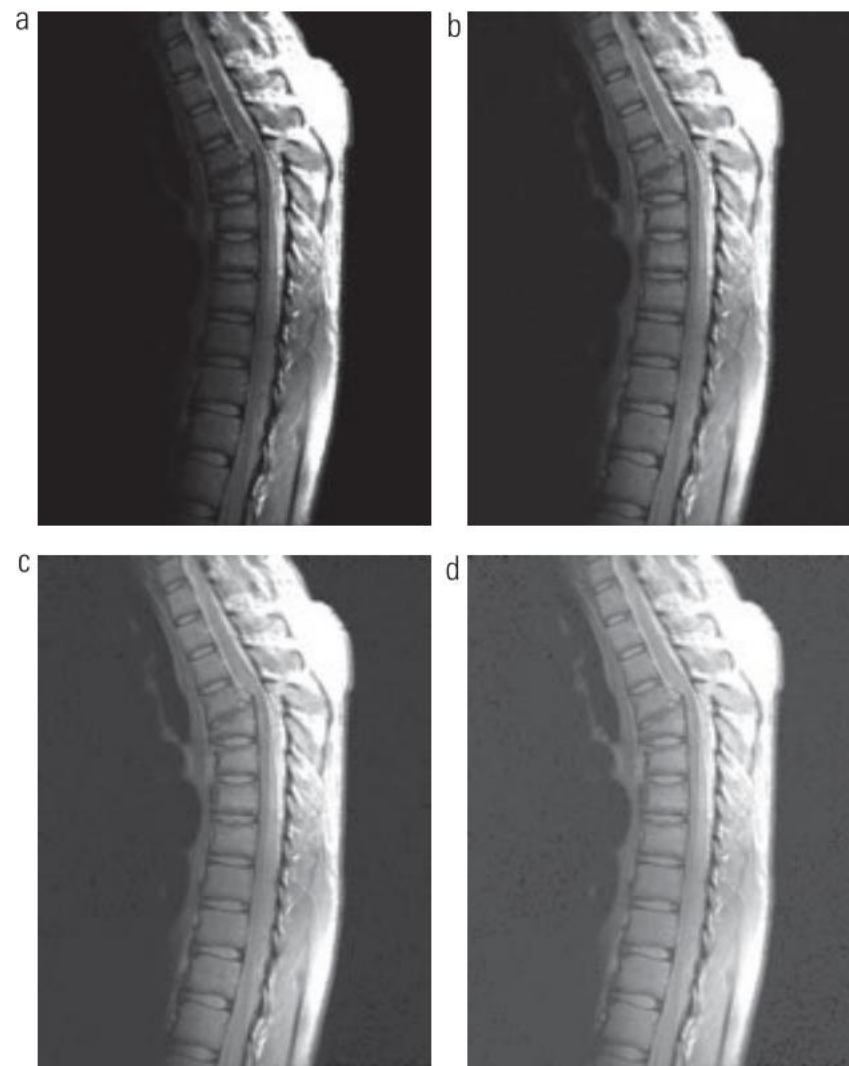
**Figura 3.7** (a) Imagem com variação gradativa de intensidade (gradiente). (b) Imagem vista em um monitor simulado com gama igual a 2,5. (c) Imagem com correção gama. (d) Imagem corrigida vista no mesmo monitor. Compare (d) e (a).

# Transformação de Intensidade (Potência)

Os próximos dois slides ilustram exemplos do uso das transformações de potência:

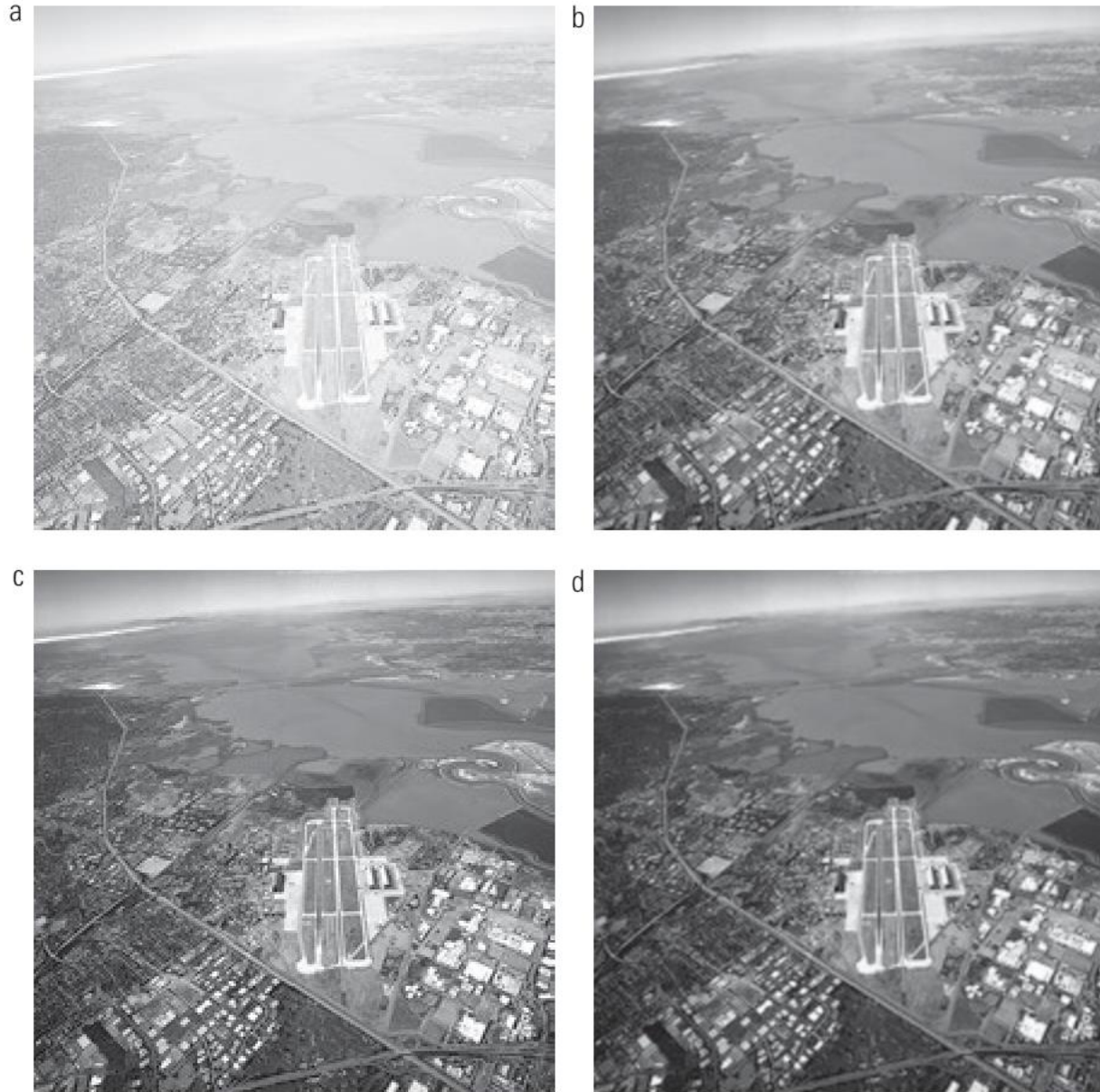
- Clareamento das intensidades mais escuras de uma imagem digital de entrada (expansão dos níveis de intensidade).
- Escurecimento das intensidades mais claras de uma imagem digital de entrada (compressão dos níveis de intensidade).

Maior realce de contraste e  
detalhes discerníveis com  
 $\gamma = 0.4$ .



**Figura 3.8** (a) Imagem de ressonância magnética (MRI) de uma coluna vertebral humana fraturada. (b) a (d) Resultados da aplicação da transformação na Equação 3.2-3 com  $c = 1$  e  $\gamma = 0,6, 0,4$  e  $0,3$ , respectivamente. (Imagem original: cortesia do Dr. David R. Pickens, Departamento de Radiologia e Ciências Radiológicas, Centro Médico da Universidade de Vanderbilt.)





Melhor contraste com  
 $\gamma = 3.0$  e  $\gamma = 4.0$ ;  
 perda de detalhes com  
 $\gamma = 5.0$ .

**Figura 3.9** (a) Imagem aérea. (b) a (d) Resultados da aplicação da transformação na Equação 3.2-3 com  $c = 1$  e  $\gamma = 3,0$ ,  $4,0$  e  $5,0$ , respectivamente. (Imagem original: cortesia da Nasa.)

# Transformação de Intensidade

## Transformações lineares definidas por partes

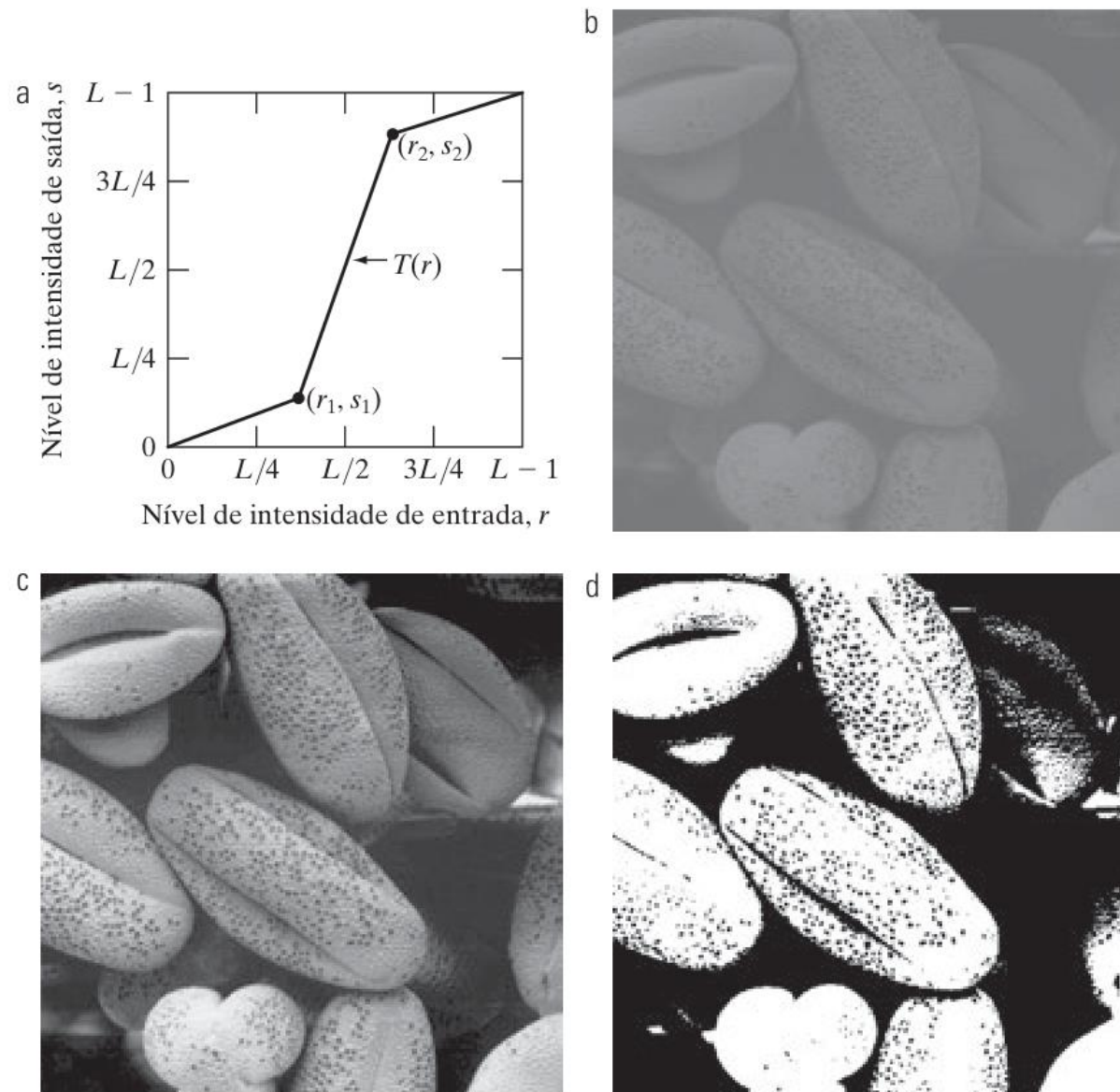
- Abordagem complementar aos métodos anteriores.
- Vantagem: uso de funções arbitrariamente complexas.
- Desvantagem: requer um número maior de dados de entrada por parte do usuário.

# Transformação de Intensidade

## Transformações lineares definidas por partes

### Alargamento de contraste

- Imagens de baixo contraste podem ser resultantes de uma imagem com iluminação ruim.
  - Ou faixa dinâmica insuficiente no sensor de imagem ou até mesmo configuração errada da abertura da lente no momento da captura da imagem.
- O **alargamento de contraste expande a faixa de níveis de intensidade** de uma imagem de modo a incluir todo o intervalo de intensidade do meio de gravação ou do dispositivo de exibição.



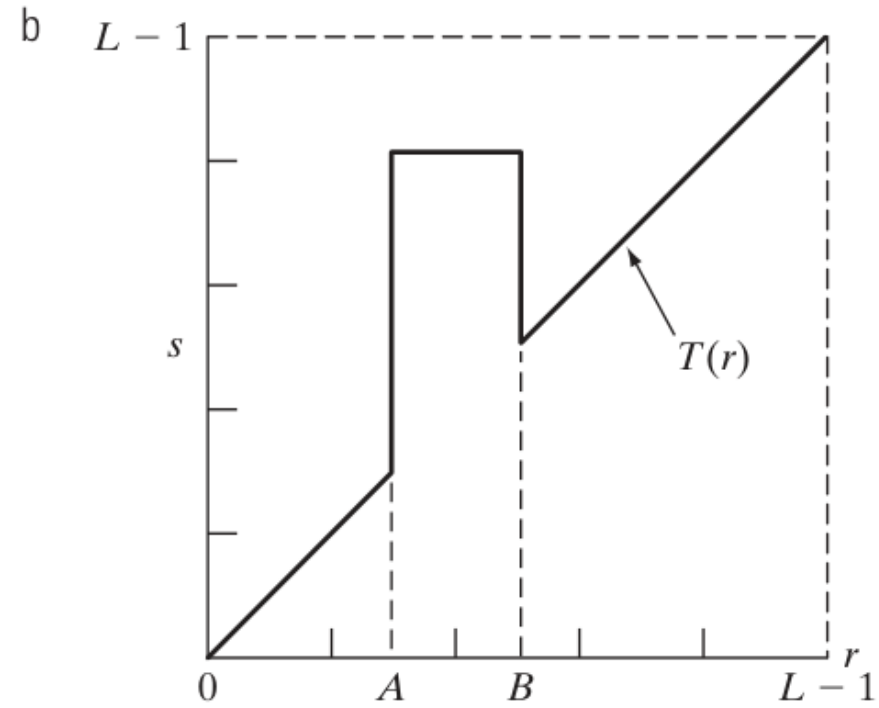
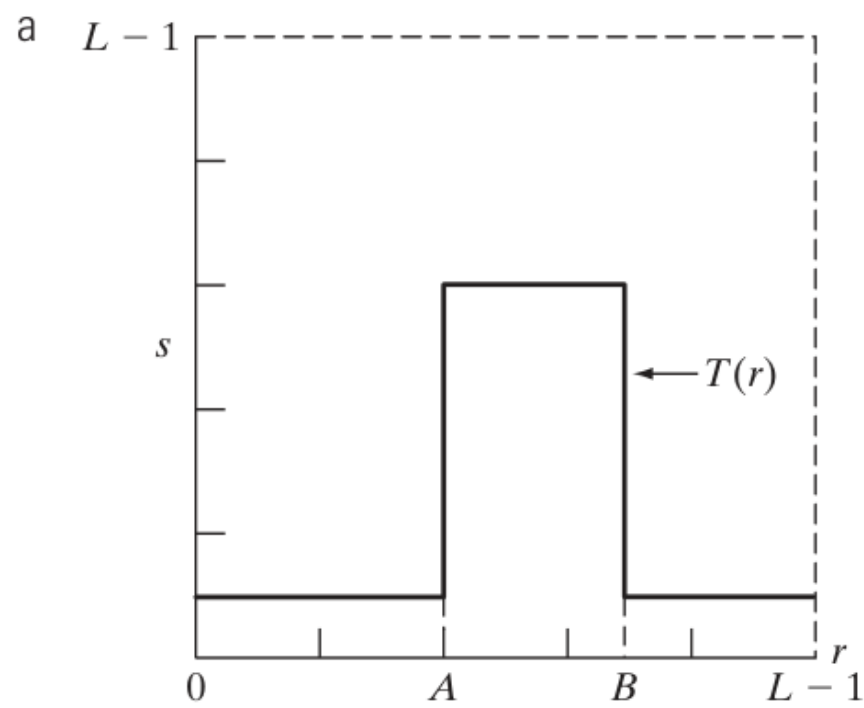
**Figura 3.10** Alargamento de contraste. (a) Forma da função de transformação. (b) Uma imagem de baixo contraste. (c) Resultado do alargamento de contraste. (d) Resultado da limiarização. (Imagem original: cortesia do Dr. Roger Heady, Faculdade de Pesquisas em Ciências Biológicas, Universidade Nacional Australiana, Camberra, Austrália.)

# Transformação de Intensidade

## Transformações lineares definidas por partes

### Fatiamiento de níveis de intensidade

- Tipo de fatiamento usado para **enfatizar** um determinado **intervalo** de intensidades na imagem.
- Usada em aplicações que incluem realce de características como:
  - Massas de água em imagens de satélite.
  - Realce de falhas em raio X.
  - Realce de regiões de interesse em imagens médicas.



**Figura 3.11** (a) Essa transformação enfatiza a faixa de intensidades  $[A, B]$  e reduz todas as outras intensidades a um nível mais baixo. (b) Essa transformação enfatiza a faixa  $[A, B]$  e preserva todos os outros níveis de intensidade.



**Figura 3.12** (a) Angiograma da aorta. (b) Resultado da utilização da transformação de fatiamento do tipo ilustrado na Figura 3.11(a) com a faixa de intensidades de interesse selecionada no extremo superior da escala de cinza. (c) Resultado da utilização da transformação na Figura 3.11(b) com a área selecionada ajustada para o preto, de forma que os níveis de cinza na área dos vasos sanguíneos e rins foram preservados. (Imagem original: cortesia do Dr. Thomas R. Gest, Faculdade de Medicina da Universidade de Michigan.)





**Figura 3.12** (a) Angiograma da aorta. (b) Resultado da aplicação de intensidades de interesse selecionada no extremo superior da imagem com a área selecionada ajustada para o preto, de forma que o fundo seja preto. (c) Imagem original: cortesia do Dr. Thomas R. Gest, Faculdade de Medicina da Universidade de Michigan.

Imagem binária, enfatizando os principais vasos sanguíneos (...), útil para estudar a *forma* do fluxo da substância de contraste (para detectar, por exemplo, pontos de obstrução).

Valores reais de intensidade da região de interesse (...), útil quando o interesse é medir o fluxo real da substância de contraste em função do tempo em uma série de imagens.

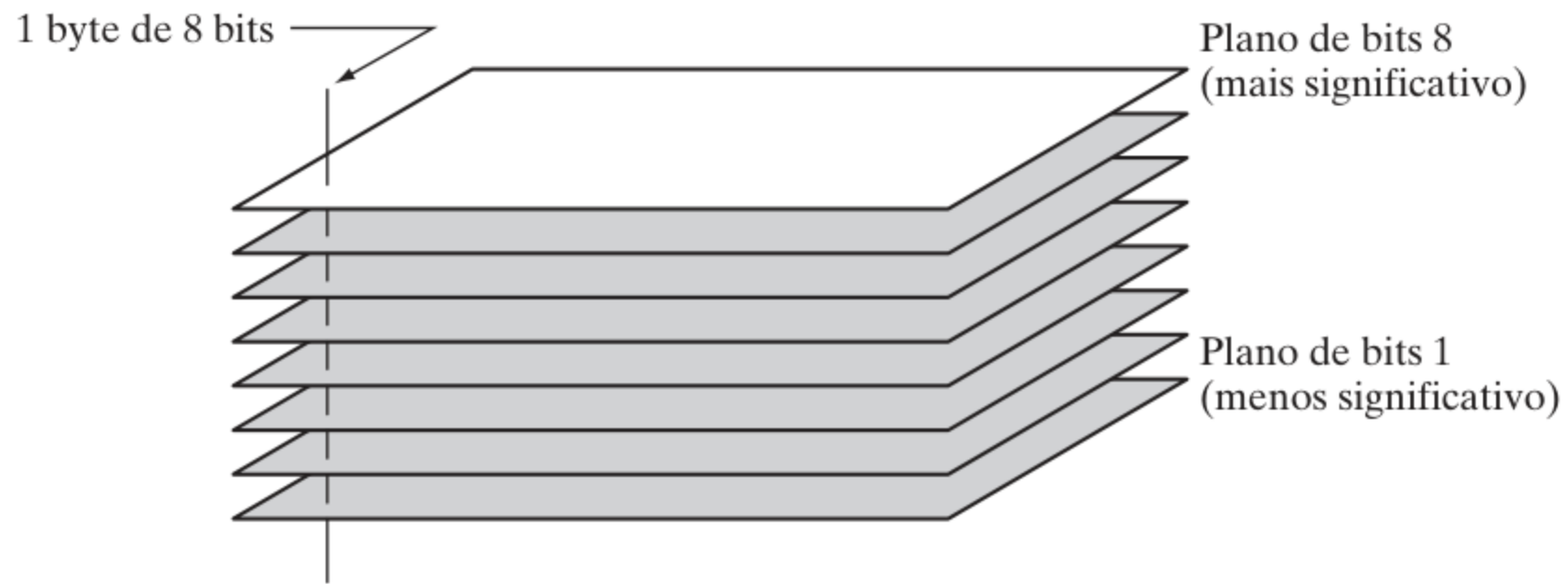


# Transformação de Intensidade

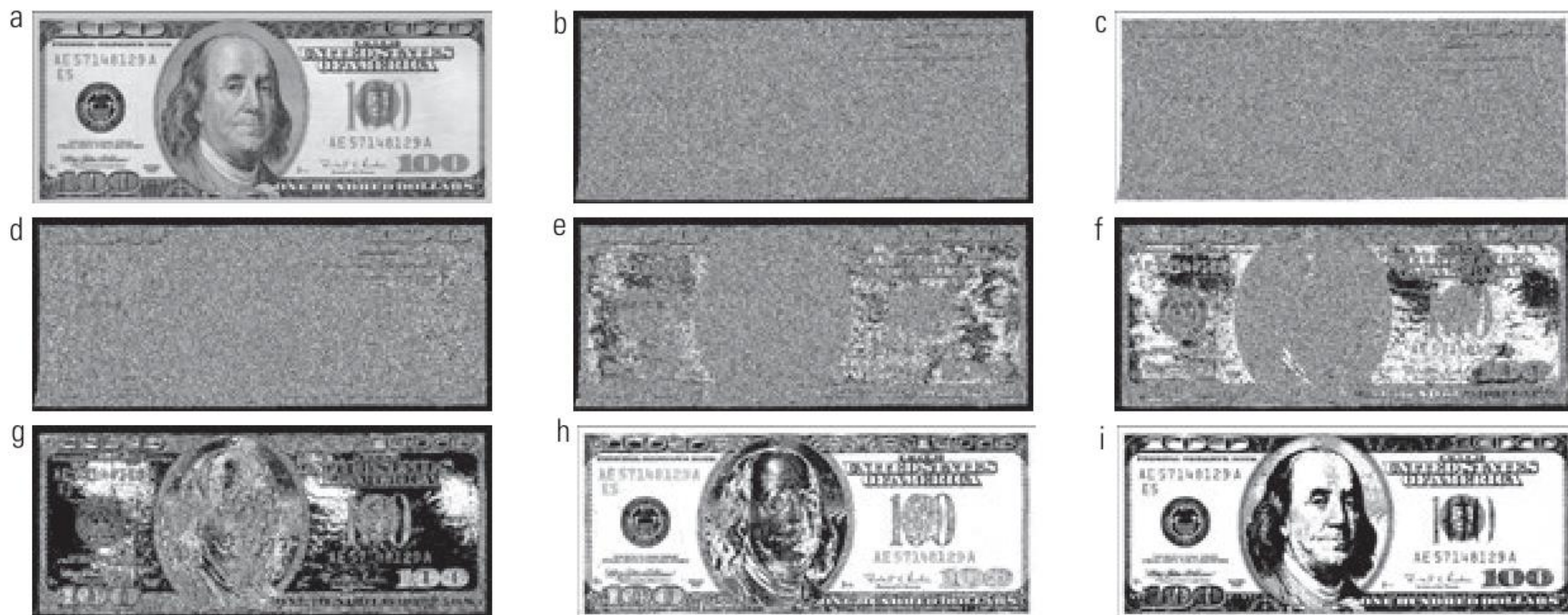
## Transformações lineares definidas por partes

### Fatiamento por planos de bits

- As intensidades dos pixels são formadas por bits.
- Ao invés de enfatizar faixas de intensidade, é possível **enfatizar a contribuição** feita à aparência final da imagem por bits específicos.
- Uma imagem de 8 bits (256 tons de cinza) é composta por oito planos de 1 bit, sendo:
  - Plano 1: contém os bits menos significativos.
  - Plano 8: contém os bits mais significativos.
  - Exemplo: tom de cinza 194 = 1 1 0 0 0 0 1 0



**Figura 3.13** Representação em planos de bits de uma imagem de 8 bits.



**Figura 3.14** (a) Uma imagem em escala de cinza de 8 bits com dimensões  $500 \times 1.192$  pixels. (b) a (i) Planos de bits 1 a 8, com o plano de bits 1 correspondendo ao bit menos significativo. Cada plano de bits é uma imagem binária.

# Transformação de Intensidade

## Fatiamento por planos de bits

- Pode ser usado para compressão de imagens.
  - Imagem é reconstruída usando alguns planos de bits.
  - Reconstrução = pixels do  $n$ -ésimo plano \*  $2^{n-1}$  (conversão do  $n$ -ésimo bit em um decimal) e soma dos planos usados para obter a imagem em escala de cinza.
- Figura 3.15(a): plano de bits 8 \* 128 + plano de bits 7 \* 64.



**Figura 3.15** Imagens reconstruídas utilizando (a) planos de bits 8 e 7; (b) planos de bits 8, 7 e 6; e (c) planos de bits 8, 7, 6 e 5. Compare (c) com a Figura 3.14(a).

# **Processamento de Histograma**

# Processamento de Histograma

- O **histograma** de uma imagem digital é uma função discreta que representa cada valor de intensidade e o número de pixels da imagem com essa intensidade.
  - Distribuição de intensidades em uma imagem.
- A manipulação de histogramas é usada para:
  - Realçar imagens digitais.
  - Fornecer estatísticas úteis da imagem digital.
  - Dar suporte aos processos de compressão e segmentação.

# Processamento de Histograma

- O intervalo dos níveis de intensidade de cinza é representado por:  
 $[0, L - 1]$

- E a função discreta do histograma por:  
$$h(r_k) = n_k$$

Sendo:

- $r_k$ :  $k$ -ésimo valor de intensidade
- $n_k$ : número de pixels da imagem com intensidade  $r_k$ .

# Normalização do Histograma

- Costuma-se normalizar um histograma dividindo cada um dos componentes de intensidade ( $\mathbf{r}_k$ ) pelo número total de pixels de imagem ( $M \times N$ ).
- Um histograma normalizado é dado por:

$$p(\mathbf{r}_k) = \frac{n_k}{M \times N}$$

- O  $p(\mathbf{r}_k)$  é uma estimativa de probabilidade de ocorrência do nível de intensidade  $\mathbf{r}_k$  em uma imagem.
- A soma de todos os componentes de um histograma normalizado é igual a 1.



# Processamento de Histograma

- Ao analisar um histograma, é possível visualizar **quatro características básicas** em relação à intensidade de uma imagem digital:
  - Características de uma imagem escura.
  - Características de uma imagem clara.
  - Características de uma imagem de baixo contraste.
  - Características de uma imagem de alto contraste.

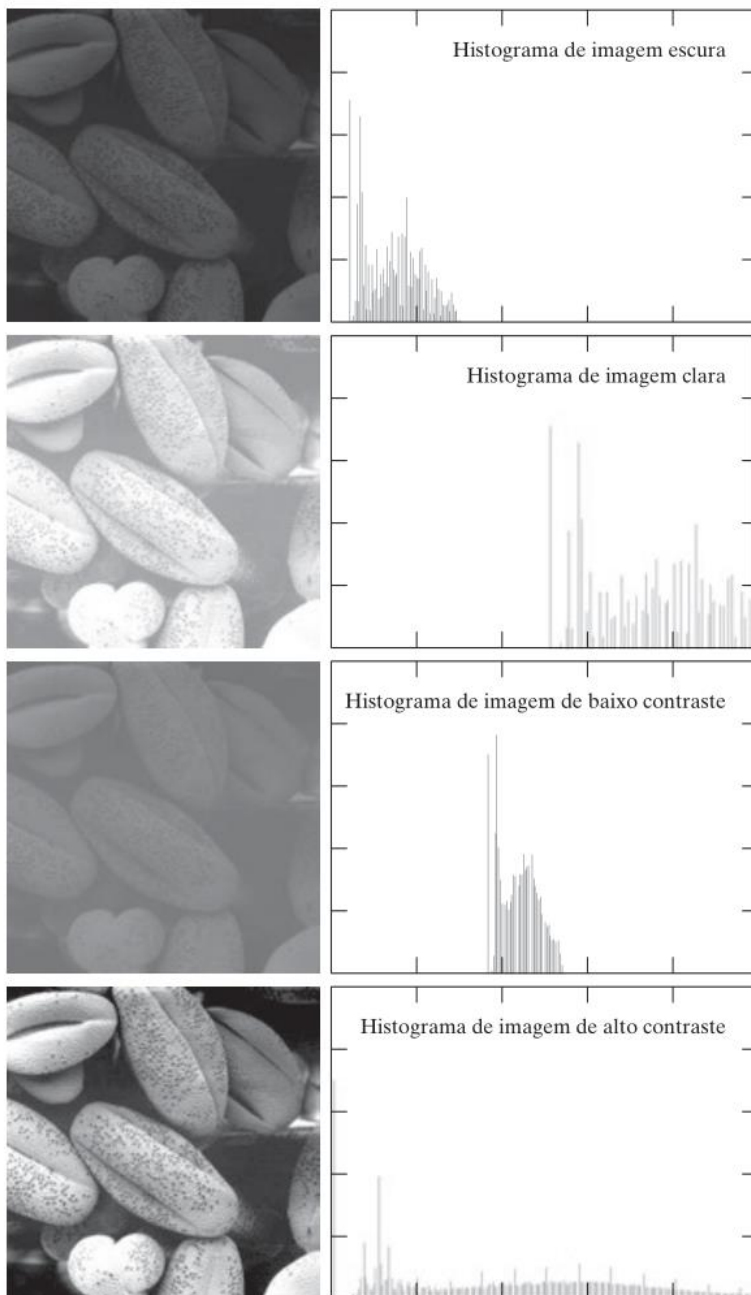


Figura 3.16 Quatro tipos básicos de imagem: escura, clara, baixo contraste, alto contraste e seus histogramas correspondentes.

## Eixo horizontal

Intensidade  $r_k$  no intervalo  $[0, L - 1]$ .

## Eixo vertical

Quantidade de pixels com intensidade  $r_k$  na imagem:

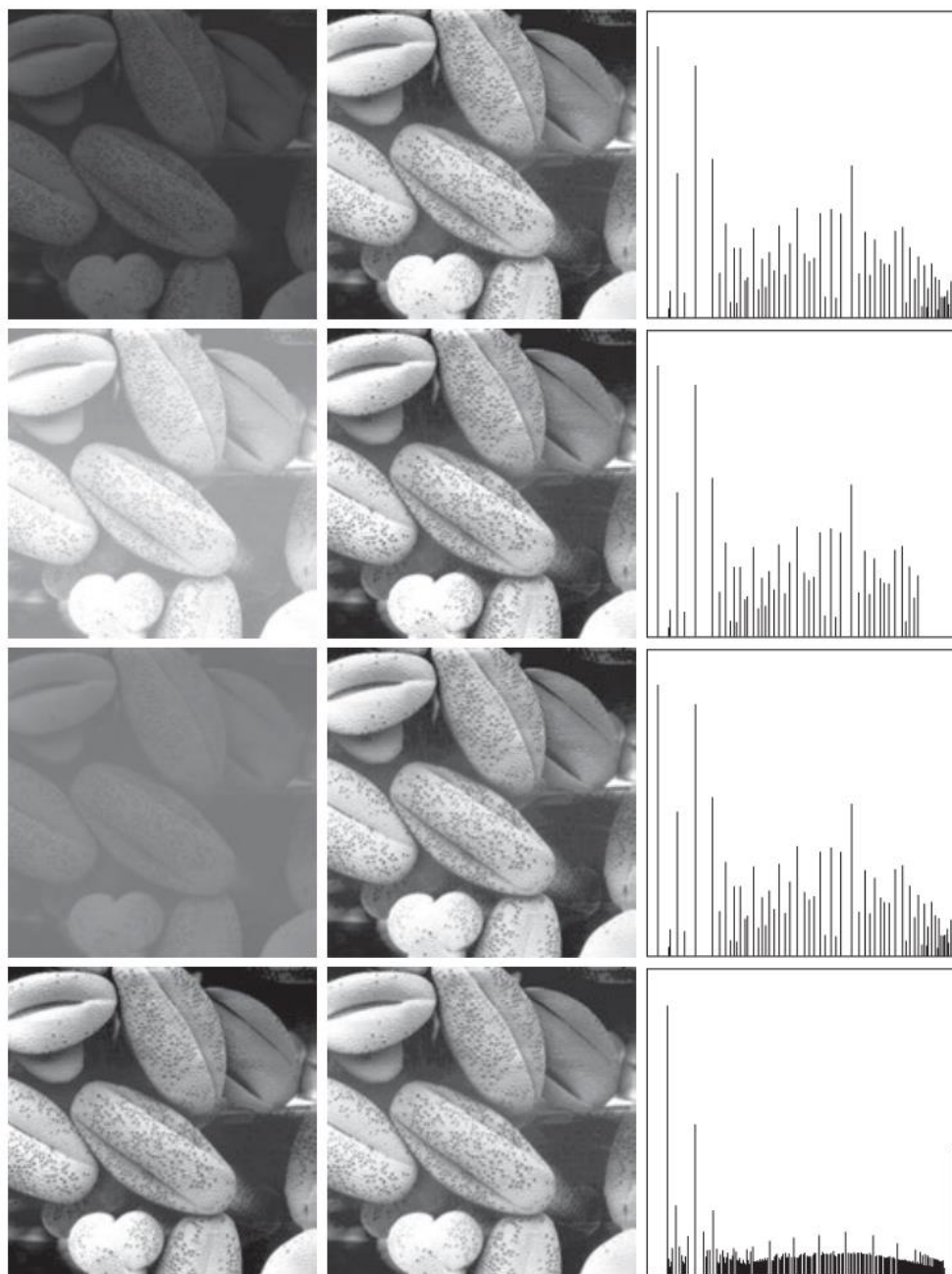
$$h(r_k) = n_k \text{ (não-normalizado)}$$

ou

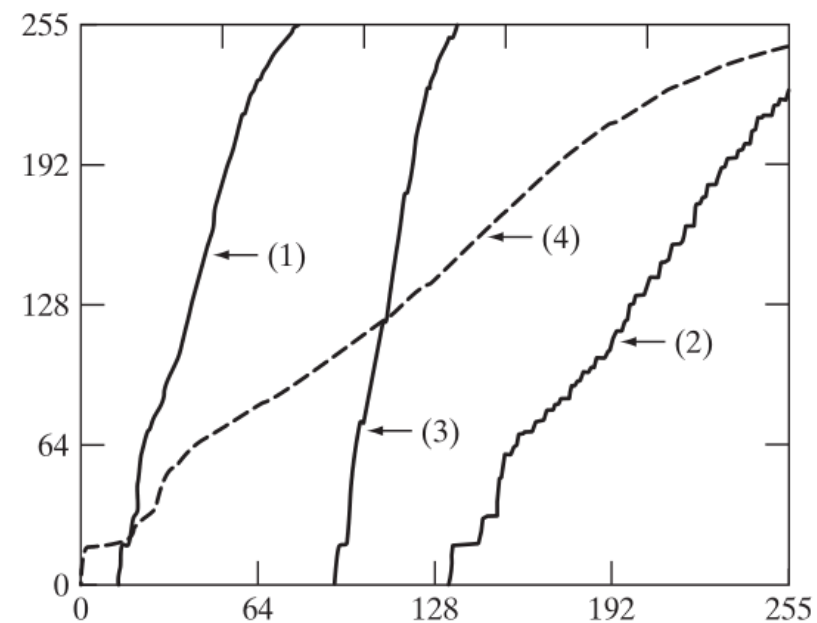
$$p(r_k) = \frac{n_k}{M \times N} \text{ (normalizado)}$$

# Equalização de Histograma

- O objetivo do processo de equalização de um histograma é **redistribuir os níveis de cinza** com uma **função de distribuição acumulada** (CDF).
  - Produzir uma imagem de saída que tenha um **histograma uniforme**.
- A CDF é calculada a partir da distribuição de probabilidades  $p(r_k)$  da imagem de entrada.



**Figura 3.20** Coluna da esquerda: imagens da Figura 3.16. Coluna central: imagens que correspondem aos histogramas equalizados. Coluna da direita: histogramas das imagens da coluna central.



**Figura 3.21** Funções de transformação para a equalização de histograma. As transformações de (1) a (4) foram obtidas a partir dos histogramas das imagens (de cima para baixo) na coluna esquerda da Figura 3.20 utilizando a Equação 3.3-8.

# Equalização de Histograma

- A **probabilidade de ocorrência** do nível de intensidade  $r_k$  em uma imagem digital é:

$$p_r(r_k) = \frac{n_k}{M \times N} \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots, L - 1$$

Sendo:

- $M \times N$ : número total de pixels da imagem de entrada.
- $n_k$ : número de pixels com intensidade  $r_k$ .
- $L$ : número de níveis de intensidade possíveis na imagem de entrada.

# Equalização de Histograma

- A **forma discreta** da equalização de histograma de uma imagem digital é:

$$S_k = T(r_k) = (L - 1) * \sum_{j=0}^k p_r(r_j) = \frac{(L - 1)}{M \times N} * \sum_{j=0}^k n_j$$

- A transformação  $T(r_k)$  nessa equação é chamada de **equalização de histograma** ou **linearização de histograma**.

# Equalização de Histograma

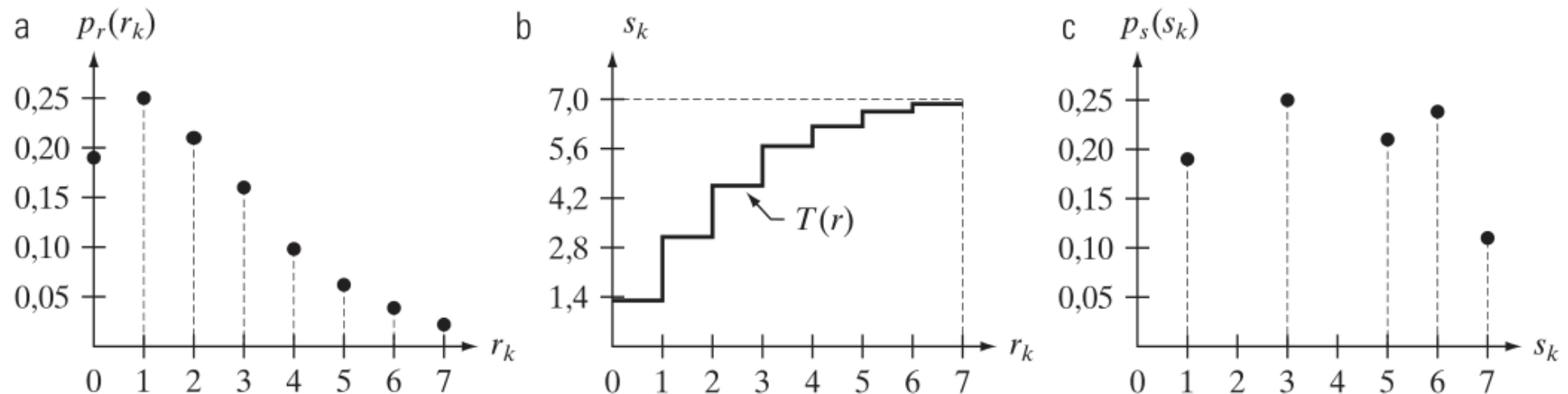
**Exemplo:** Uma imagem hipotética de 3 bits ( $L = 8$ ) de dimensão 64x64 pixels ( $M \times N = 4096$ ), com distribuição de intensidade mostrada na tabela a seguir (níveis de intensidade são números inteiros no intervalo  $[0, L - 1] = [0, 7]$ ).

**Tabela 3.1** Distribuição de intensidades e valores de histograma para uma imagem digital de 3 bits,  $64 \times 64$  pixels.

$r_k$	$n_k$	$p_r(r_k) = n_k/MN$
$r_0 = 0$	790	0,19
$r_1 = 1$	1.023	0,25
$r_2 = 2$	850	0,21
$r_3 = 3$	656	0,16
$r_4 = 4$	329	0,08
$r_5 = 5$	245	0,06
$r_6 = 6$	122	0,03
$r_7 = 7$	81	0,02

# Equalização de Histograma

O histograma da imagem hipotética é esboçado na figura abaixo.



**Figura 3.19** Ilustração da equalização de histograma de uma imagem de 3 bits (8 níveis de intensidade). (a) Histograma original. (b) Função de transformação. (c) Histograma equalizado.



# Equalização de Histograma

Os valores da função de transformação de equalização de histograma são obtidos usando a equação:

$$S_k = T(r_k) = (L - 1) * \sum_{j=0}^k p_r(r_j) = \frac{(L - 1)}{M \times N} * \sum_{j=0}^k n_j$$

$$S_0 = T(r_0) = 7 * \sum_{j=0}^0 p_r(r_j) = 7 * p_r(r_0) = 7 * 0,19 = 1,33$$

$$S_1 = T(r_1) = 7 * \sum_{j=0}^1 p_r(r_j) = 7 * p_r(r_0) + 7 * p_r(r_1) = 1,33 + 1,75 = 3,08$$

$$S_2 = 4,55; S_3 = 5,67; S_4 = 6,23; S_5 = 6,65; S_6 = 6,86; S_7 = 7,00$$

# Equalização de Histograma

Tabela 1. Distribuição de intensidades e valores de histograma para uma imagem digital de 3 bits e 64x64 pixels

$r_k$	$n_k$	$p_r(r_k) = n_k / MN$	$s_k = T(r_k) = (L - 1) \sum_{j=0}^k p_r(r_j) = \frac{(L - 1)}{MN} \sum_{j=0}^k n_j$	$s_k$ <b>Arredondado</b>
$r_0 = 0$	790	0,19	1,33	1
$r_1 = 1$	1.023	0,25	3,08	3
$r_2 = 2$	850	0,21	4,55	5
$r_3 = 3$	656	0,16	5,67	6
$r_4 = 4$	329	0,08	6,23	6
$r_5 = 5$	245	0,06	6,65	7
$r_6 = 6$	122	0,03	6,86	7
$r_7 = 7$	81	0,02	7,00	7

Fonte: Adaptação de Gonzalez e Woods<sup>[1]</sup>



# CC BY-SA 4.0 DEED

Atribuição-Compartilhagual 4.0 Internacional

Canonical URL : <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

[See the legal code](#)


## Você tem o direito de:


**Compartilhar** — copiar e redistribuir o material em qualquer suporte ou formato para qualquer fim, mesmo que comercial.

**Adaptar** — remixar, transformar, e criar a partir do material para qualquer fim, mesmo que comercial.

O licenciante não pode revogar estes direitos desde que você respeite os termos da licença.

## De acordo com os termos seguintes:

 **Atribuição** — Você deve dar o [crédito apropriado](#), prover um link para a licença e [indicar se mudanças foram feitas](#). Você deve fazê-lo em qualquer circunstância razoável, mas de nenhuma maneira que sugira que o licenciante apoia você ou o seu uso.

 **Compartilhagual** — Se você remixar, transformar, ou criar a partir do material, tem de distribuir as suas contribuições sob a [mesma licença](#) que o original.

**Sem restrições adicionais** — Você não pode aplicar termos jurídicos ou [medidas de caráter tecnológico](#) que restrinjam legalmente outros de fazerem algo que a licença permita.



# CC BY-SA 4.0 DEED

Attribution-ShareAlike 4.0 International

Canonical URL : <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

[See the legal code](#)


## You are free to:


**Share** — copy and redistribute the material in any medium or format for any purpose, even commercially.

**Adapt** — remix, transform, and build upon the material for any purpose, even commercially.

The licensor cannot revoke these freedoms as long as you follow the license terms.

## Under the following terms:

 **Attribution** — You must give [appropriate credit](#), provide a link to the license, and [indicate if changes were made](#). You may do so in any reasonable manner, but not in any way that suggests the licensor endorses you or your use.

 **ShareAlike** — If you remix, transform, or build upon the material, you must distribute your contributions under the [same license](#) as the original.

**No additional restrictions** — You may not apply legal terms or [technological measures](#) that legally restrict others from doing anything the license permits.

## Notices: