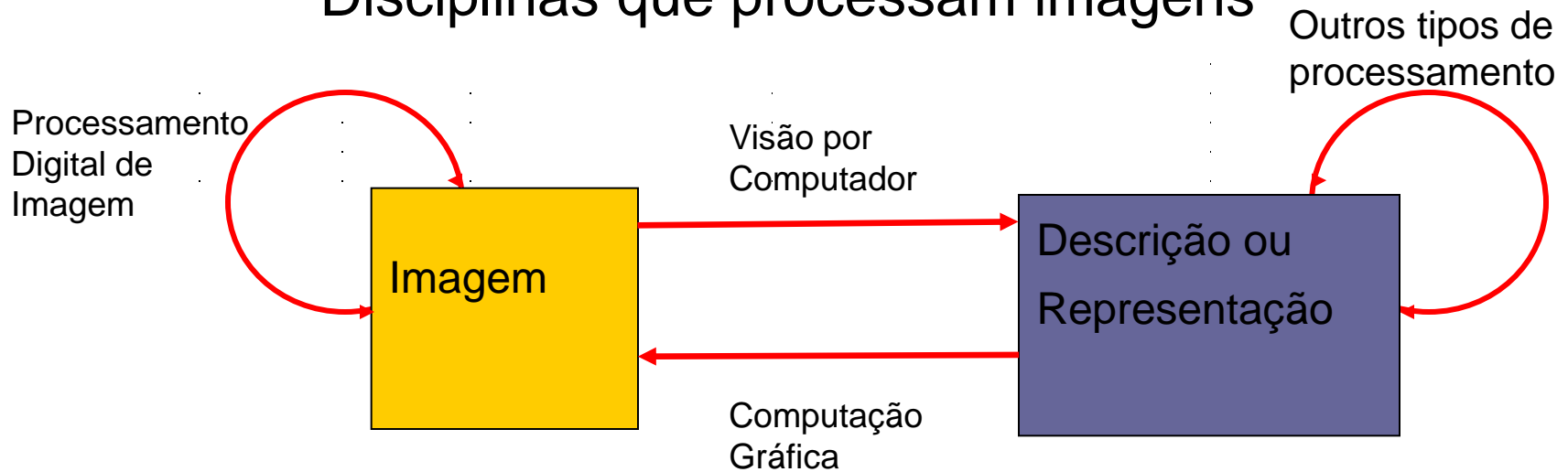


Disciplinas que processam imagens



SAÍDA

ENTRADA		Imagem	Descrição
	Imagem	Processamento Digital de Imagem	Visão por Computador
	Descrição	Computação Gráfica	Outros tipos de processamento

Relação Processamento de Imagem – Visão por Computador

Processamento de baixo nível

Processamento de Imagem

Representação
Compressão
Transmissão

Realce da imagem
Melhoramento da qualidade da imagem

Contornos da imagem
Segmentação em regiões
características

Visão por Computador

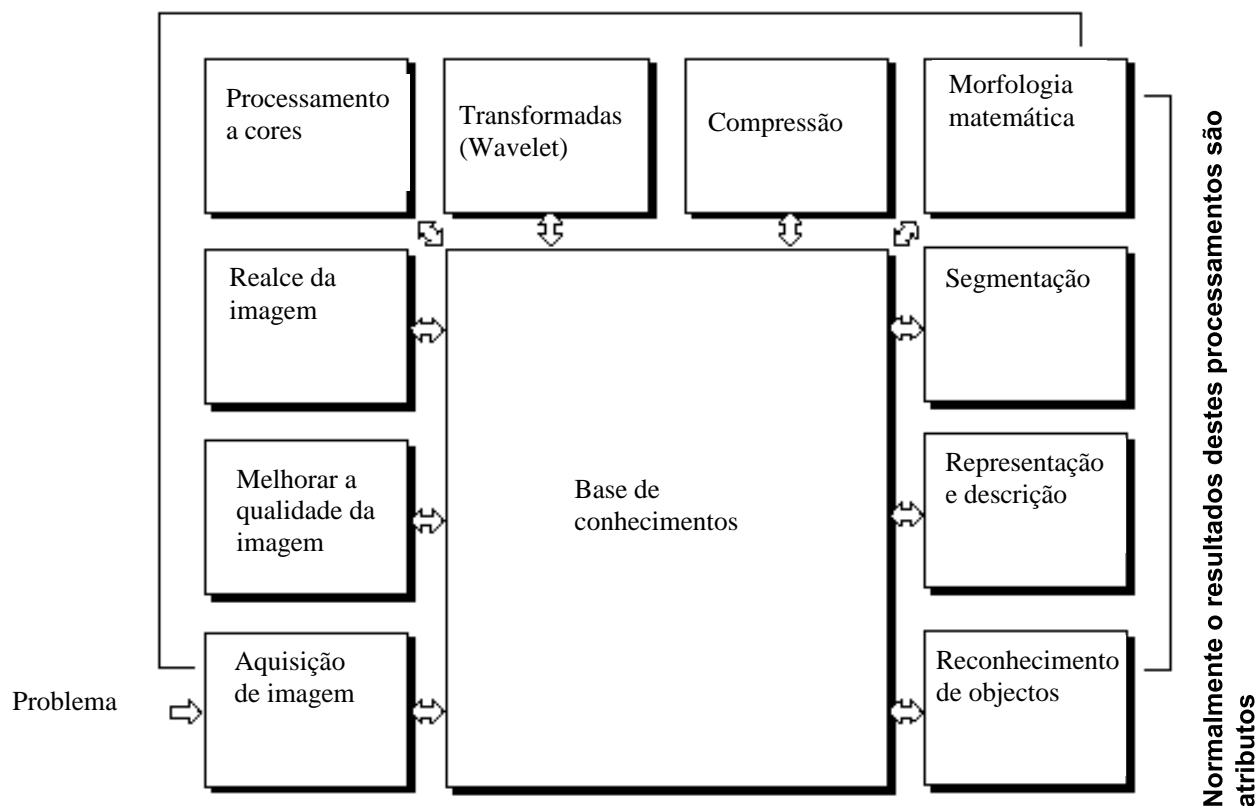
Descrição/Representação do
conteúdo da imagem

Reconhecimento de objectos

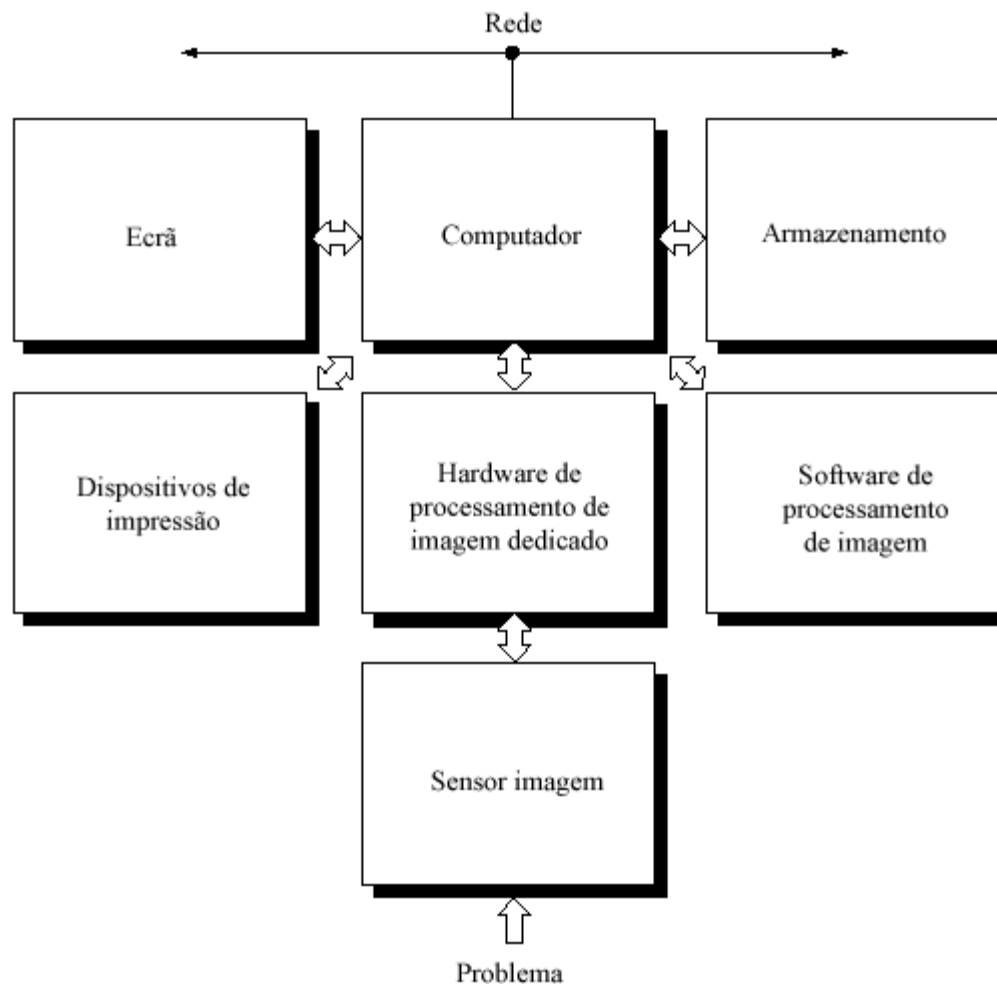
Processamento de alto nível

Técnicas de processamento digital de imagem e Visão por Computador

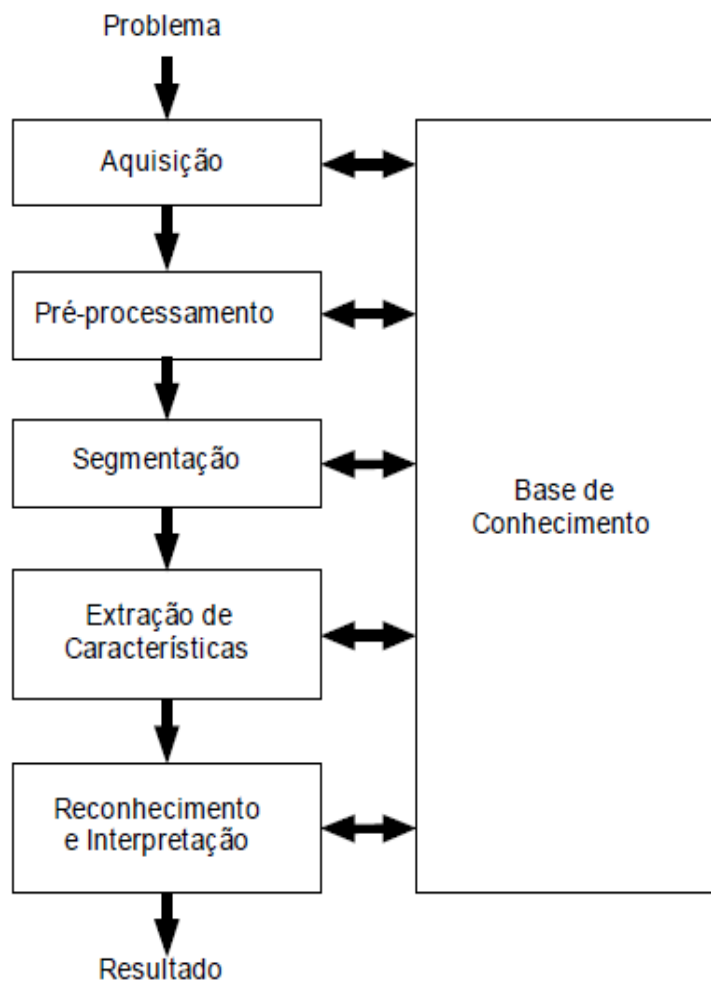
Normalmente o resultado destes processamentos são imagens



Componentes de um sistema de processamento de imagem



Principais etapas de um Sistema de Visão por Computador (SVC).



Exemplo da etapas de processamento

O problema da leitura automática nas matrículas dos automóveis que passam numa via de trânsito.

O resultado esperado do sistema de análise de imagem é uma sequência de caracteres que identifica a matrícula.



Saída do SVC:

E	2	7	4	K	T	C
---	---	---	---	---	---	---

Leitura automática de placas de matrícula automóvel.

Aquisição da imagem

Câmara (sensor e digitalizador) - Sensor converte a informação ótica em sinal elétrico e o digitalizador transforma a imagem analógica em imagem digital.

Aspetos a considerar:

- Posicionamento correto da câmara para captar a imagem na melhor perspetiva.
- Tipo de sensor,
- Lentes a utilizar,
- Condições de iluminação da cena e iluminação artificial
- Requisitos de velocidade de aquisição,
- Tempo de exposição do sensor
- Resolução espacial,
- Número de níveis de cinzento (NDC) da imagem digitalizada,
- Outros.

Pré-processamento

Corrigir imperfeições da imagem :

- Presença de pixels ruidosos,
- Contraste e/ou brilho inadequado,
- Caracteres quebrados ou indevidamente conectados,
- Carateres com distorção geométrica, etc.

A função da etapa de pré-processamento é aprimorar a qualidade da imagem para as etapas subsequentes.



Pré-processamento da imagem para melhorar o contraste da matrícula.

Segmentação

A tarefa básica da etapa de segmentação é a de dividir uma imagem em regiões significativas, ou seja, nos objetos de interesse que a compõem. É das mais difíceis de implementar e os seus resultados condicionam fortemente os resultados das etapas seguintes.



A – Imagem original.



B – Subimagem da matrícula.



C – Caracteres segmentados.

Extração de Características

Esta etapa procura extrair características das imagens resultantes da segmentação através de descritores que permitam caracterizar com precisão cada dígito e que apresentem bom poder de discriminação entre caracteres parecidos, como o 'O' e o 'D'.

Nesta etapa a entrada ainda é uma imagem, mas a saída é um conjunto de dados correspondentes àquela imagem.

Descritores utilizados para descrever um caractere sejam as coordenadas normalizadas x e y de seu centro de gravidade e a razão entre sua altura e largura.



100	120	0.9
-----	-----	-----

Imagem de um caractere e o correspondente vetor de característico extraído.

Reconhecimento e Interpretação

Reconhecimento - Consiste na atribuição de um rótulo, etiqueta, ou classificação a um objeto baseado nas suas características, traduzidas nos descritores obtidos.

Interpretação - consiste em atribuir significado a um conjunto de objetos reconhecidos.

Neste exemplo, uma forma simples de interpretação seria a verificação da matrícula numa base de dados da Direção Geral de Viação, para descobrir se o conjunto dos caracteres (cada qual reconhecido individualmente) faz sentido ou não.

Base de Conhecimento

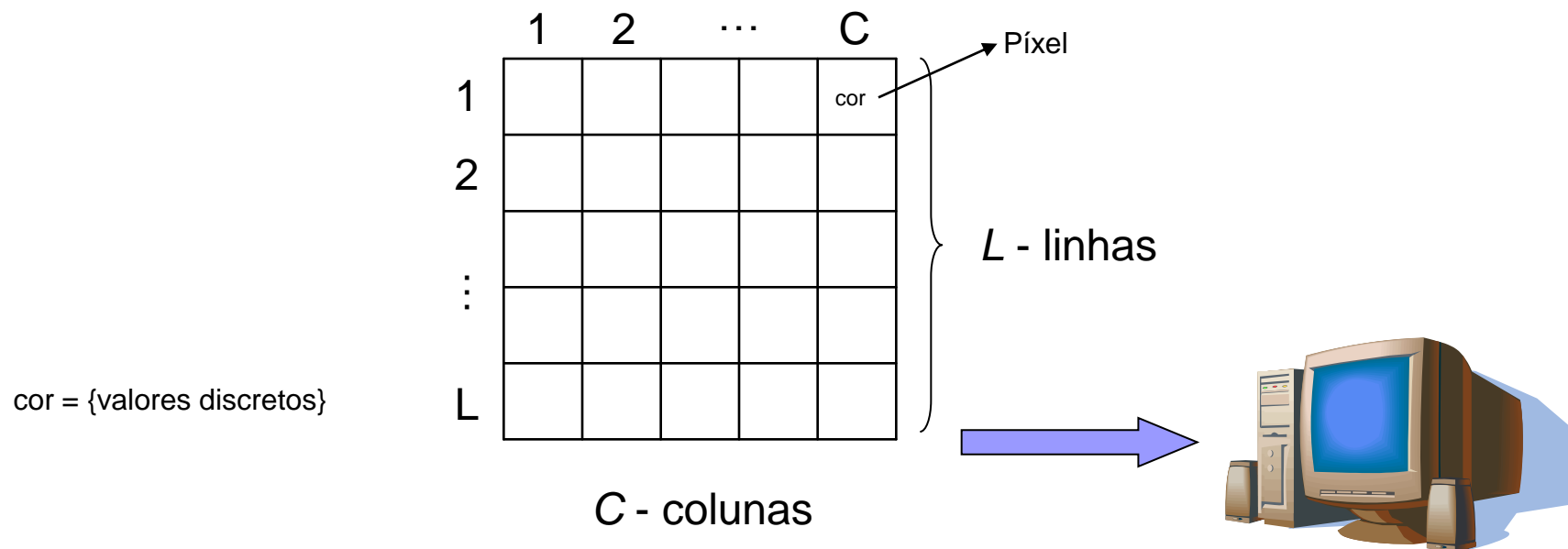
Todas as tarefas das etapas descritas acima pressupõem a existência de um **conhecimento** sobre o problema a ser resolvido, armazenado em uma base de conhecimento, cujo tamanho e complexidade podem variar bastante de problema para problema.

Por exemplo, se a etapa de representação e descrição recebesse 7 caracteres na análise de uma matrícula Portuguesa, em vez dos esperados 6, ela deveria ser capaz de realimentar a etapa de segmentação (provável responsável pela falha) para que esta procurasse segmentar novamente a subimagem para estabelecer a ligação entre duas regiões que possivelmente pertencem a um mesmo caractere que se encontra partido.

Imagem digital vs. Imagem analógica

Imagem analógica — Modelada por uma **função contínua**, $f(x,y)$, de duas variáveis que representam as coordenadas espaciais de um plano. Os **valores** tomados pela função são **contínuos** e correspondem ao brilho de cada localização espacial da imagem.

Imagem Digital — Modelada por uma **matriz bidimensional**, $I(c,l)$, de **valores discretos** que correspondem ao brilho dos pontos da imagem. Cada elemento da matriz é designado por **píxel** (de *picture element*).



Amostragem e Quantificação

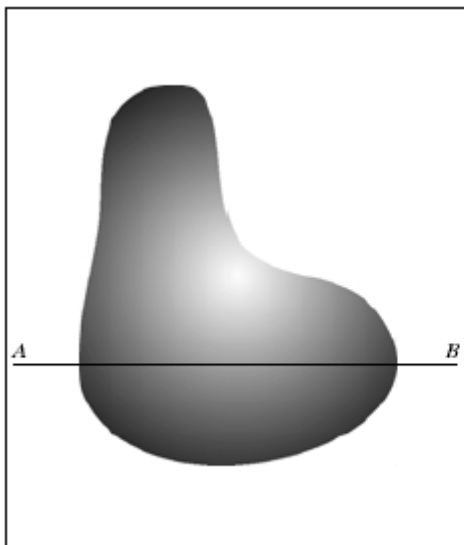
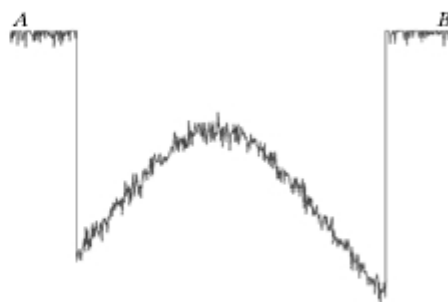
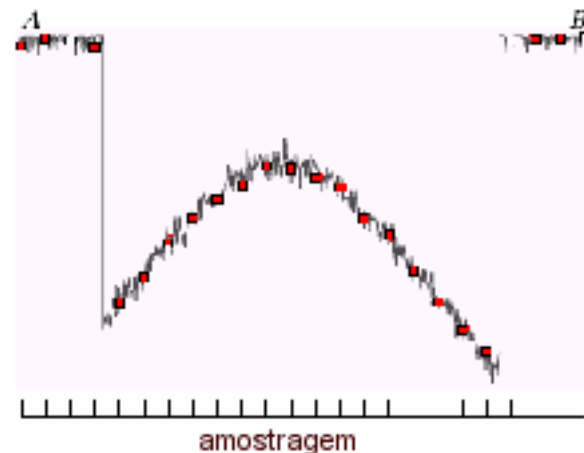


Imagem analógica, $f(x,y)$, contínua nas coordenadas espaciais e na amplitude (tons)



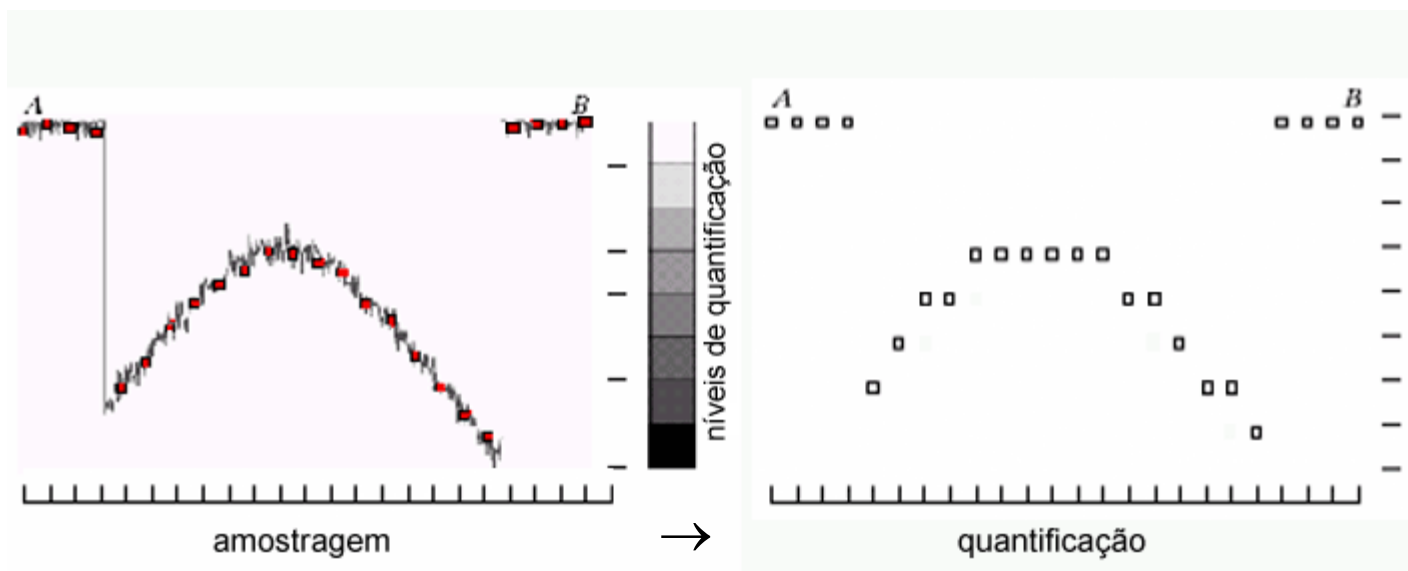
Intensidades ao longo da linha AB na imagem analógica



Amostragem ao longo da linha AB

Amostragem: aferição dos valores de $f(x,y)$ em pontos de coordenadas espaciais predeterminadas (valores discretos uniformemente espaçados) — a função contínua é aproximada a uma matriz de L linhas e C colunas, $F(x_c, y_l)$.

Amostragem e Quantificação



Amostragem ao longo da linha AB

Quantificação dos valores amostrados

Quantificação: os valores contínuos da matriz resultante da amostragem, $F(x_c, y_l)$, são aproximados a valores discretos inteiros, $I(c, l)$, pertencentes ao conjunto dos níveis de intensidade (tons) que a imagem digital pode assumir.

Amostragem e Quantificação

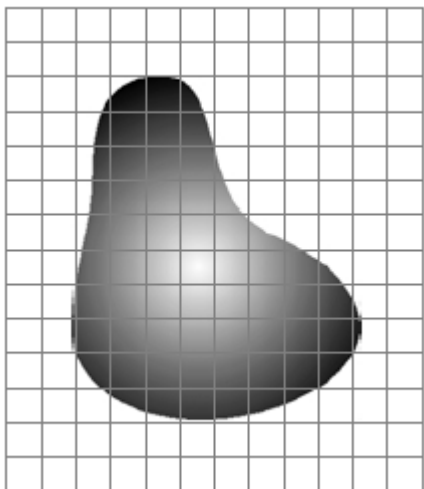


Imagem contínua projectada no plano de uma matriz de sensores

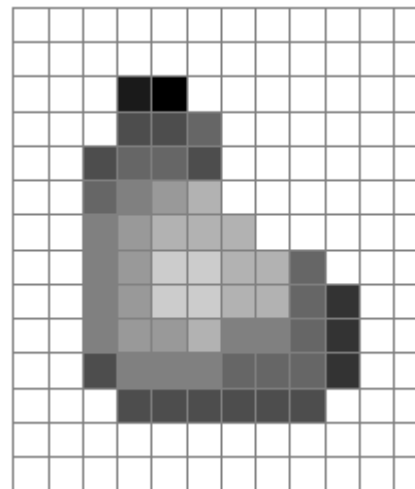


Imagem digital obtida após a amostragem e quantificação em níveis de cinzento (NDC).

A **taxa de amostragem** determina o número de amostras (píxeis) da imagem — **resolução** espacial, medida em pontos por polegada (**dpi** = *dots per inch*) ou em n.º de píxeis (megapíxeis) da imagem.

O número de **bits** (b) usados na representação da cor em cada píxel da imagem determina o número de **níveis de quantificação** ($N_{NDC} = 2^b$) — resolução em amplitude, medida em *bits* por píxel (bpp).

- 1 *bit* → 2 cores (geralmente, preto e branco)
- 4 *bits* → 16 cores ou níveis de cinzento
- 8 *bits* → 256 cores ou níveis de cinzento (*gray levels*)
- 24 *bits* → 16.777.216 cores (*true color*)

Amostragem e Quantificação

Imagem binária (1 bpp) — $N_{NDC} = 2$, pelo que todos os píxeis tomam o valor **0** (preto) ou **1** (branco).

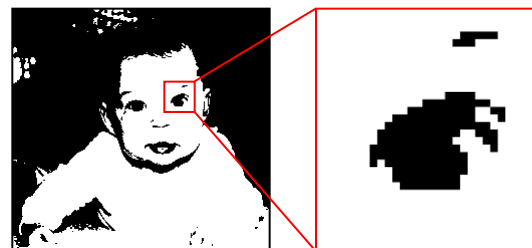
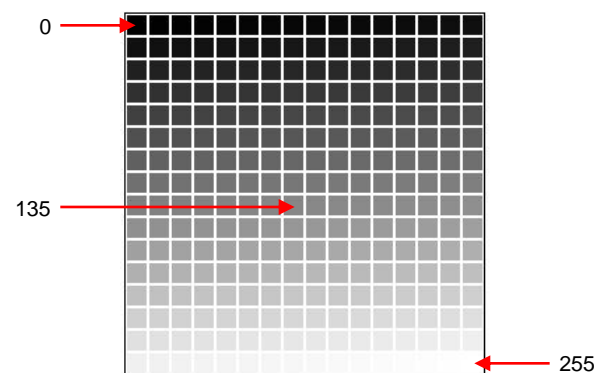
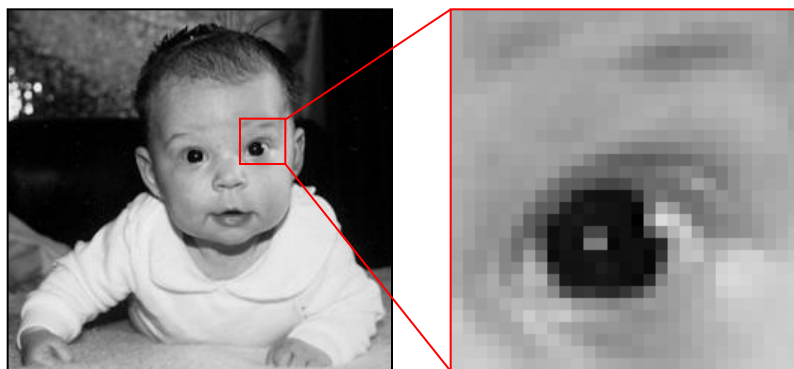


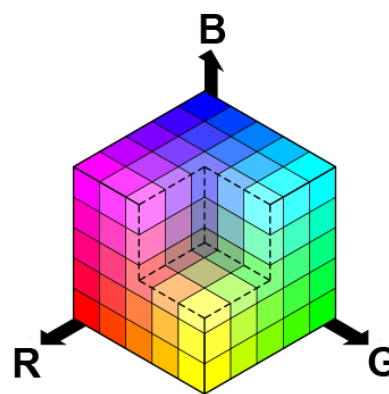
Imagem em escala de cinzentos (*gray levels*) — A imagem apresenta $N_{NDC} = 2^b$ níveis de cinzento diferentes; cada píxel tem um valor inteiro que representa o seu nível de cinzento, desde o preto (0) até ao branco ($W = N_{NDC} - 1$).



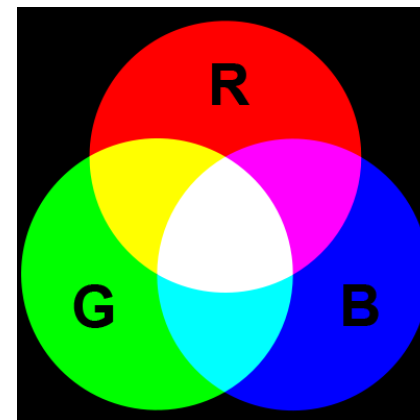
Palette de 256 NDC ($b = 8$)

Amostragem e Quantificação

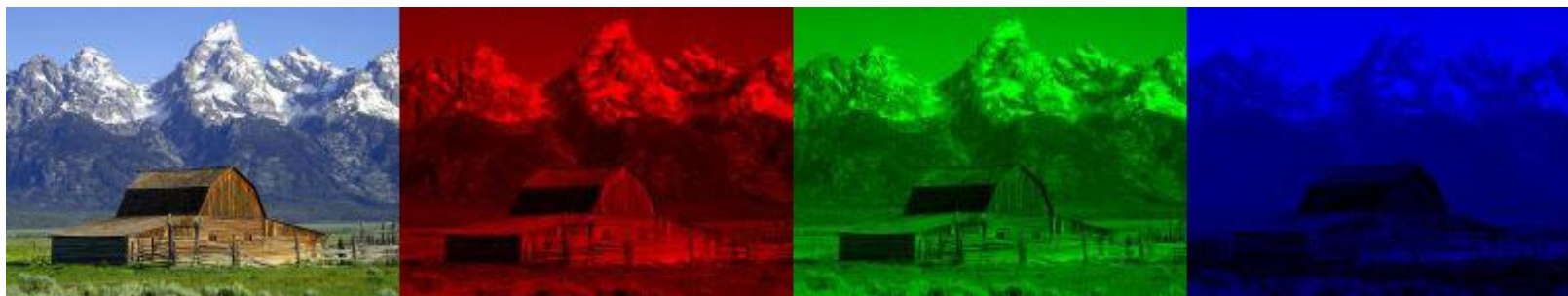
Imagem a cores — Uma imagem ou cena pode de facto ser constituída por várias imagens associadas. Por exemplo, quando se lida com cor, podemos ter três imagens — uma em tons de vermelho (R), outra de verde (G), outra de azul (B) —, cada uma das quais chamadas **bandas**, **canais** ou **planos**. Nesta situação, a cor de cada píxel é definida por um vector de 3 elementos, em que cada elemento corresponde ao valor em cada uma das bandas do **espaço RGB**.



Espaço RGB como sistema de coordenadas tridimensional.



Princípio do sistema aditivo RGB



Banda R

Banda G

Banda B

Decomposição da imagem em bandas

Amostragem e Quantificação

Resolução espacial — Número de linhas x Número de colunas da imagem; ou

— Número de pontos por polegada (dpi) gerados ao digitalizar uma imagem analógica.

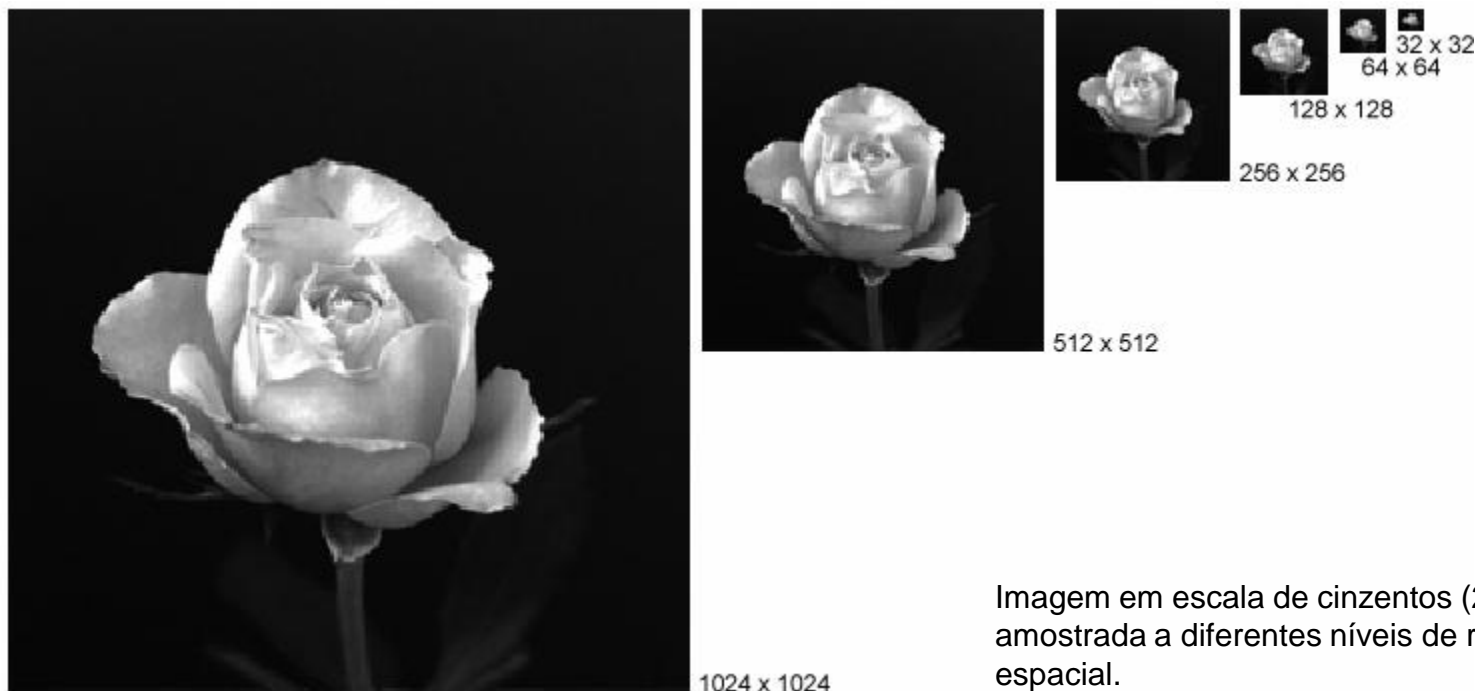


Imagem em escala de cinzentos (256 NDC) amostrada a diferentes níveis de resolução espacial.

Amostragem e Quantificação



(a) Imagem 1024 x 1024. **(b–f)** Imagens $N \times N$ re-amostradas em 1024 x 1024.
(b) $N = 512$ **(c)** $N = 256$. **(d)** $N = 128$. **(e)** $N = 64$. **(f)** $N = 32$.

Relações básicas entre píxeis

Vizinhança de um píxel

Vizinhos-4 (V_4): Um píxel p de coordenadas (x,y) tem dois vizinhos *horizontais* e dois vizinhos *verticais*, dados pelas coordenadas:

$$(x,y-1), (x,y+1), (x-1,y), (x+1,y)$$

Vizinhos diagonais (V_d): Um píxel p de coordenadas (x,y) tem quatro vizinhos diagonais, dados pelas coordenadas:

$$(x-1,y-1), (x+1,y+1), (x-1,y+1), (x+1,y-1)$$

Vizinhos-8 (V_8): $V_8 = V_4 \cup V_d$

$x-1,y-1$	$x,y-1$	$x+1,y-1$
$x-1,y$	x,y	$x+1,y$
$x-1,y+1$	$x,y+1$	$x+1,y+1$

Relações básicas entre píxeis

Adjacência

Adjacência: Dois píxeis p e q dizem-se *adjacentes* se pertencem à **vizinhança** mútua e se os seus níveis de cinzento respeitam um determinado **critério de semelhança** (por exemplo, são iguais ou diferem de um valor inferior a uma dada **tolerância**).

$$q \in V(p) \quad \wedge \quad |NDC(p) - NDC(q)| \leq \delta_{NDC}$$

Uma definição alternativa para o critério de semelhança é impor que os níveis de cinzento dos dois píxeis considerados pertençam a um determinado **conjunto de valores**:

$$[NDC(p), NDC(q)] \in C_{NDC}$$

Relações básicas entre píxeis

Adjacência-4: Dois píxeis p e q dizem-se adjacentes do tipo 4 se pertencerem à Vizinhança-4 um do outro e os seus níveis de cinzento pertencerem ao conjunto C de valores que respeitam o critério de semelhança imposto.

Adjacência-8: Idem, mas com Vizinhança-8.

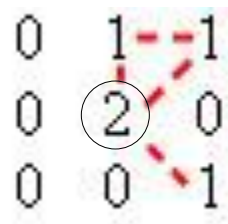
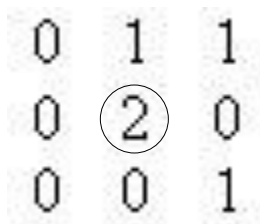
Adjacência-m: Dois píxeis p e q dizem-se adjacentes do tipo m se:

(mista)

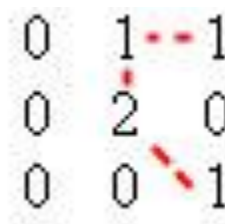
$$q \in V_4(p) \quad \vee \quad [q \in V_d(p) \quad \wedge \quad V_4(p) \cap V_4(q) = \emptyset]$$

Exemplo:

$C = \{1, 2\}$



Adjacência-8



Adjacência-m

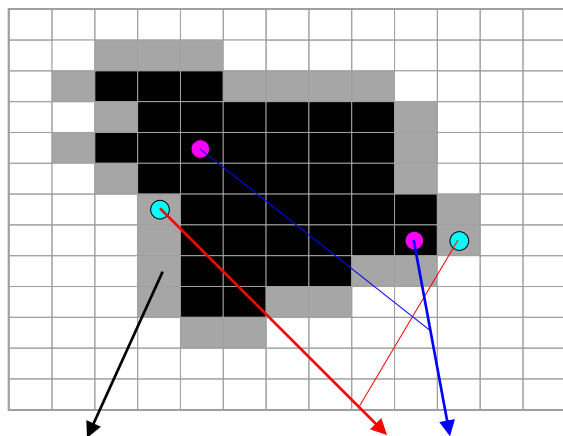
Relações básicas entre píxeis

Caminho e Conectividade

Um **caminho** (ou percurso) entre um ponto p de coordenadas (x_0, y_0) e um ponto q de coordenadas (x_n, y_n) é uma **sequência de píxeis** distintos com coordenadas $(x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$, em que os píxeis (x_i, y_i) e (x_{i-1}, y_{i-1}) são **adjacentes**, para $i = 1, \dots, n$, e n é o tamanho do caminho.

Podem definir-se caminhos-4, caminhos-8 ou caminhos-m, dependendo da adjacência adoptada.

Caso $(x_0, y_0) = (x_n, y_n)$, o caminho diz-se fechado.



Caminho fechado

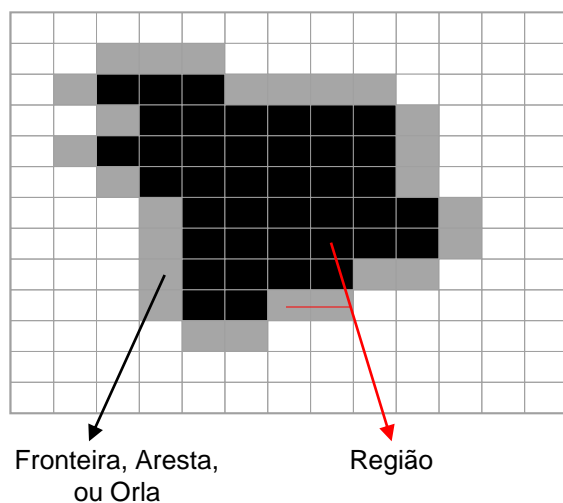
Dois exemplos de
dois píxeis conexos

Seja S um subconjunto de píxeis da imagem. Dois píxeis dizem-se **conexos em S** se entre os dois existe um caminho que passa apenas por pontos de S .

O conjunto dos píxeis que estão conexos a qualquer píxel p pertencente a S designa-se **componente conexo**.

Relações básicas entre píxeis

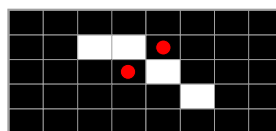
Região, Fronteira, Fundo e Buraco



Numa imagem, a um conjunto conexo chama-se **região**. A **fronteira** (ou **aresta**, ou **orla**) de uma região R é o conjunto de píxeis da região que possui um ou mais vizinhos que não pertencem a R .

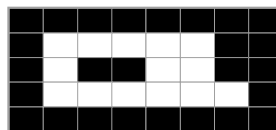
Seja S' o conjunto complementar de S . Todos os componentes de S' que são conexos aos pontos da periferia da imagem pertencem ao **fundo** da imagem. Todos os restantes componentes de S' , se existirem, designam-se **buracos** em S . Se S é conexo e não possui buracos, diz-se **simplesmente conexo**.

O **paradoxo da conectividade** é evitado usando-se a adjacência-4 para S e a adjacência-8 para S' , ou vice-versa.



Adjacência-4 para S : 3 componentes em S ($S = R_1 \cup R_2 \cup R_3$)
(Os píxeis de S' assinalados a vermelho são adjacentes-8.)

Adjacência-8 para S : 1 componente em S ($S \equiv R$)



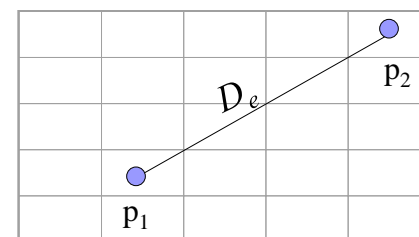
S é **multiplamente conexo**, apresentando um buraco

Relações básicas entre píxeis

Distâncias

Distância Euclidiana:

$$D_e(p_1, p_2) = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$$



		2		
	2	1	2	
2	1	0	1	2
	2	1	2	
		2		

Distância D_A ou D_4 (city-block distance):

$$D_A(p_1, p_2) \equiv D_4(p_1, p_2) = |x_1 - x_2| + |y_1 - y_2|$$

Distância D_M ou D_8 (distância de tabuleiro de xadrez):

$$D_M(p_1, p_2) \equiv D_8(p_1, p_2) = \max(|x_1 - x_2|, |y_1 - y_2|)$$

2	2	2	2	2
2	1	1	1	2
2	1	0	1	2
2	1	1	1	2
2	2	2	2	2

Níveis de processamento

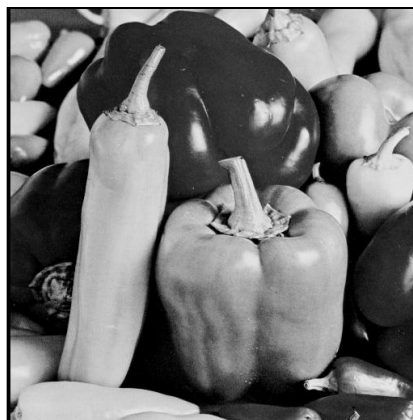
Ponto-a-ponto: Operações em que o valor de cada píxel da imagem de saída depende exclusivamente do correspondente píxel da imagem de entrada.

$$I_{out}(i, j) = O_{ponto}\{I_{in}(i, j)\}$$



Exemplo:

A operação de **binarização** produz um valor na imagem de saída que depende apenas do valor do pixel na imagem de entrada, para um determinado nível de binarização.

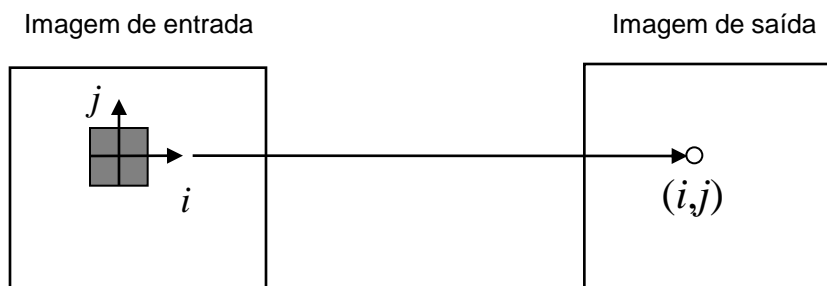


Nível de binarização: 128

Níveis de processamento

Local: Operações em que o valor de cada píxel da imagem de saída depende de uma determinada vizinhança do píxel correspondente da imagem de entrada.

$$I_{out}(i, j) = O_{local} \{ I_{in}(i_k, j_l) : (i_k, j_l) \in V(i, j) \}$$



Exemplo:

A **suavização** de uma imagem (por ex., para **redução de ruído**) utiliza operações locais para calcular a imagem de saída.



Níveis de processamento

Global: Operações em que o resultado de saída depende de todos os pontos da imagem de entrada. A saída destes operadores pode ser uma imagem ou uma representação simbólica.

$$P = O_{global}\{I_{in}\}$$

Exemplo: a Transformada de Fourier de uma imagem.

$$F(p, q) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f(m, n) \cdot e^{-j(2\pi/M)pm} \cdot e^{-j(2\pi/N)qn} \quad \begin{array}{l} p = 0, 1, \dots, M-1 \\ q = 0, 1, \dots, N-1 \end{array}$$

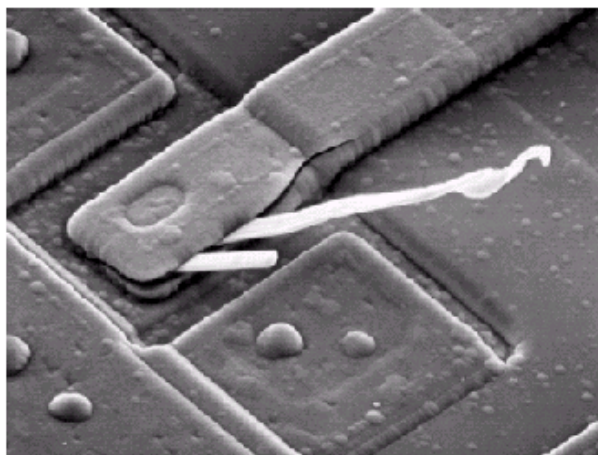
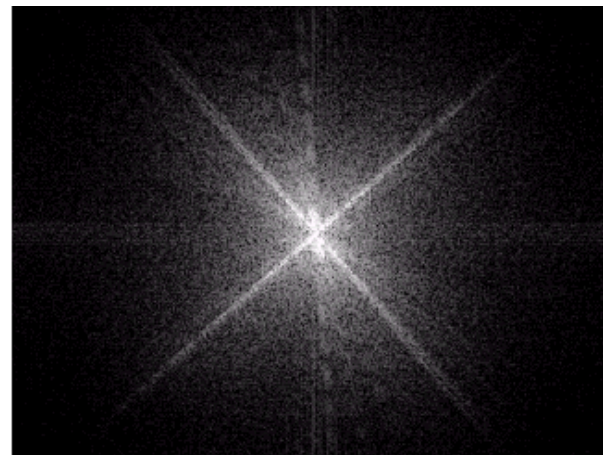


Imagem original



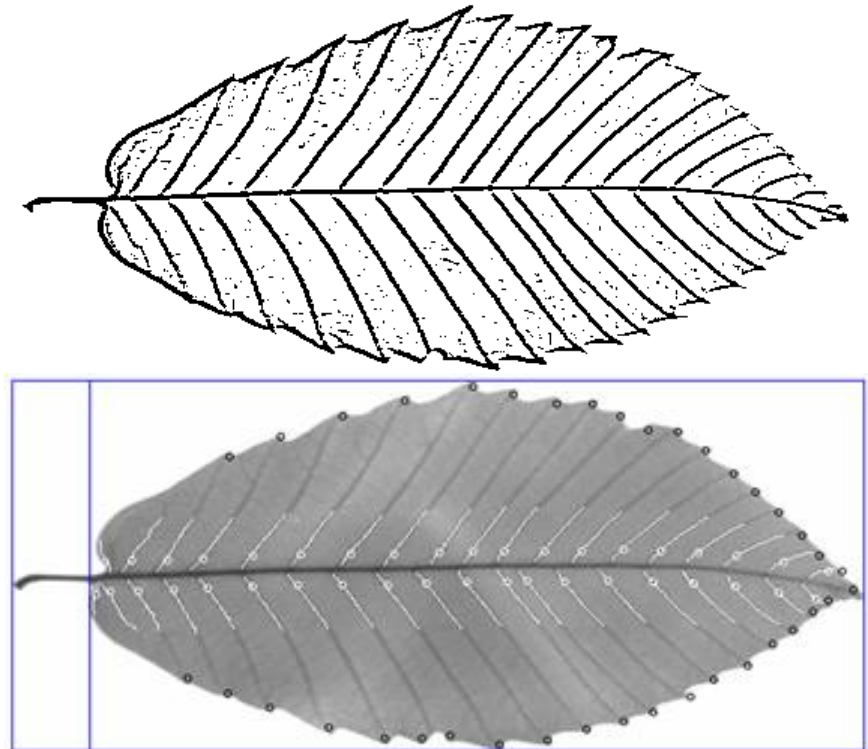
Transformada de Fourier da imagem

Níveis de processamento

Objecto: O processamento não é realizado sobre toda a imagem, mas sim sobre os píxeis que constituem o objecto que se pretende analisar.

Exemplo:

Análise biométrica de uma folha de árvore: medir área, comprimento e largura; contar dentes e nervuras.



Propriedades estatísticas da imagem

Permitem ter uma ideia da distribuição estatística dos NDC numa imagem. Esta informação pode ser relevante em subseqüentes operações de processamento.

Exemplos:

- Média
- Desvio padrão
- Histograma
- Histograma acumulado (ou cumulativo)
- Gama dinâmica

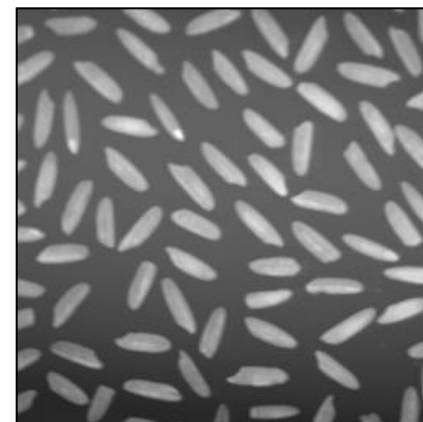
Média:

$$\mu = \frac{1}{L.C} \sum_{j=0}^{L-1} \sum_{i=0}^{C-1} I(i, j)$$

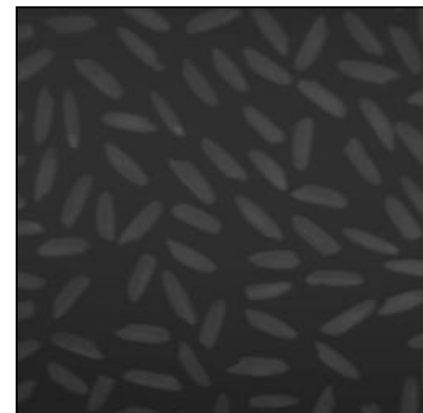
Desvio padrão:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{L.C} \sum_{j=0}^{L-1} \sum_{i=0}^{C-1} [I(i, j) - \mu]^2}$$

L : número de **linhas** da imagem C : número de **colunas** da imagem



$\mu = 108.7$ $\sigma = 41.8$



$\mu = 49.7$ $\sigma = 15.2$

Propriedades estatísticas da imagem

Histograma — h

Tabela que indica o **número de ocorrências** de cada NDC na imagem.

NDC (i)	N.º píxeis (n_i)
0	20
1	27
2	13
...	
254	287
255	242

$$h(i) = n_i \quad i = 0, 1, \dots, 255 \quad (255 = W = N_{NDC} - 1)$$

$$\sum_{i=0}^{255} h(i) = N \quad N: \text{Número total de píxeis da imagem (L.C)}$$

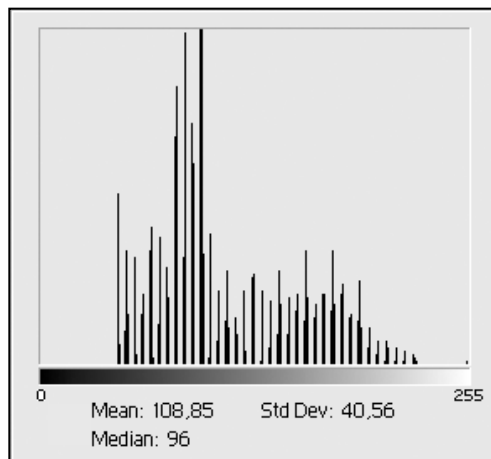
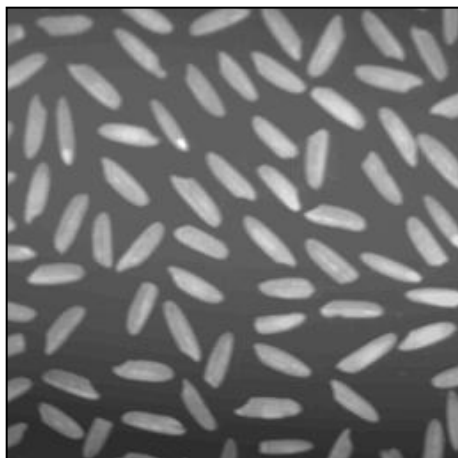
O **histograma normalizado**, h_n , obtém-se a partir do histograma, dividindo os valores de ocorrência por N :

Se o histograma de uma imagem já existir, o cálculo da **média** e do **desvio padrão** é computacionalmente menos exigente:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{255} h(i) \cdot i \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{255} h(i) \cdot [i - \mu]^2}$$

$$h_n(i) = \frac{h(i)}{N} \quad \sum_{i=0}^{255} h_n(i) = 1$$

Propriedades estatísticas da imagem



Mediana:

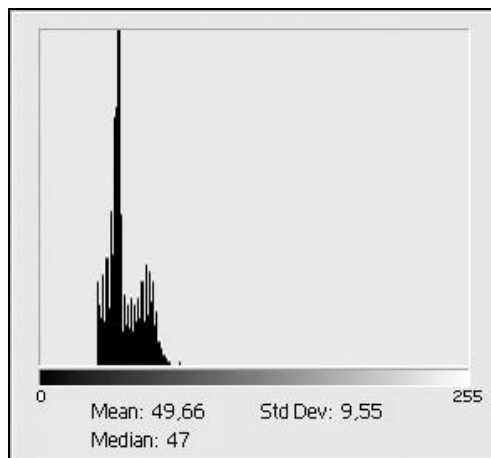
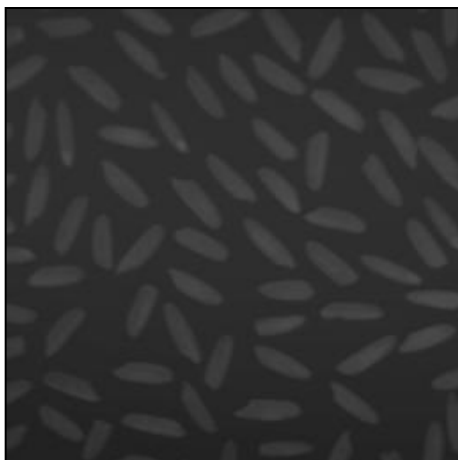
Ordenem-se todos os píxeis da imagem, do mais escuro para o mais claro, preservando as repetições:

$$I(i_0, j_0) \leq I(i_1, j_1) \leq \dots \leq I(i_{N-1}, j_{N-1})$$

A mediana é o valor do píxel que se encontra na **posição média** desta ordenação:

$$I(i_m, j_m) : m = \frac{N + 1}{2}$$

(Se m não for inteiro, pode-se optar pelo valor inteiro imediatamente inferior ou superior.)



Propriedades estatísticas da imagem

Histograma acumulado ou cumulativo — H

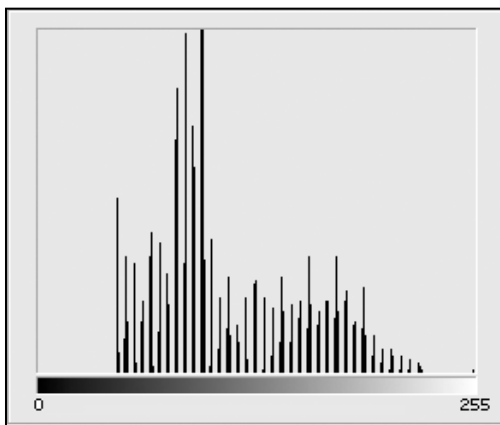
Obtido a partir do histograma, pela soma acumulada de todos os píxeis com NDC igual ou inferior ao NDC considerado a cada momento.

i	$h(i)$	$H(i)$
0	20	20
1	27	47
2	13	60
3	21	81
...		

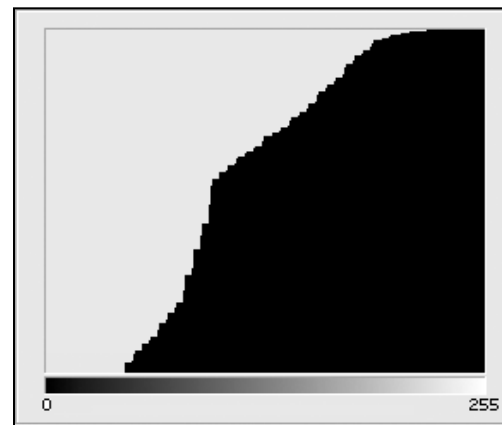
$i \equiv \text{NDC}$

$$H(i) = N_i = \sum_{j=0}^i h(j) = \begin{cases} h(0) & , \quad i = 0 \\ H(i-1) + h(i) & , \quad i = 1, 2, \dots, 255 \end{cases}$$

O **histograma acumulado normalizado**, H_n , obtém-se dividindo cada valor do histograma acumulado por N .



histograma

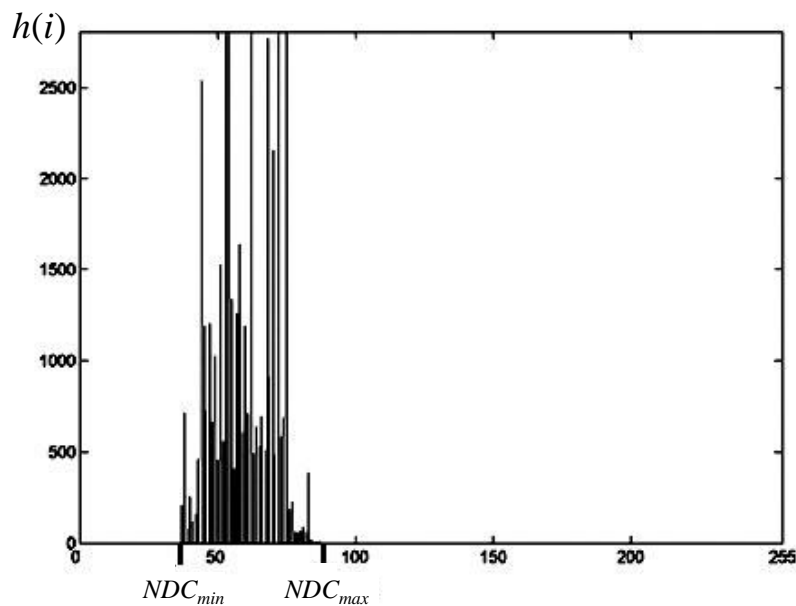


histograma acumulado

Propriedades estatísticas da imagem

Gama dinâmica

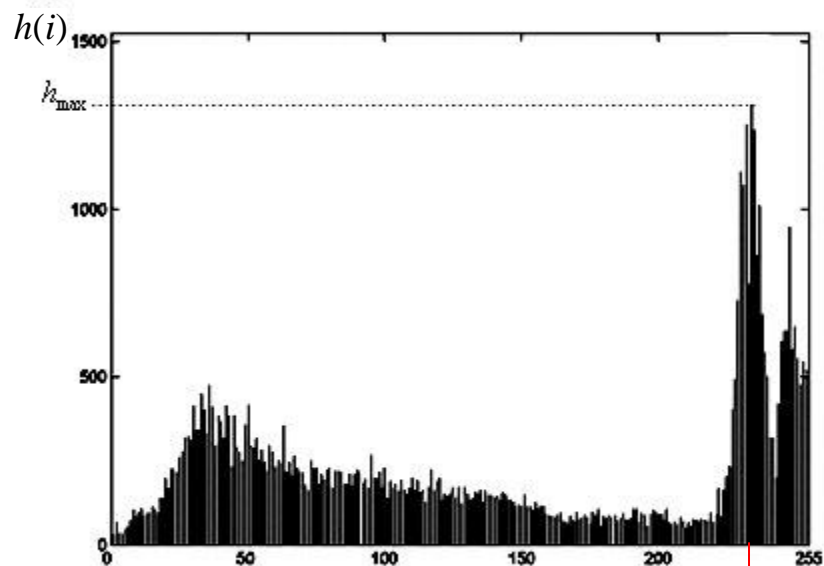
$$\Delta NDC = NDC_{\max} - NDC_{\min}$$



$$NDC_{\min} = \min\{i : h(i) \neq 0\}$$
$$NDC_{\max} = \max\{i : h(i) \neq 0\}$$

Máximo do histograma

$$h_{\max} = \max\{h(i)\}$$

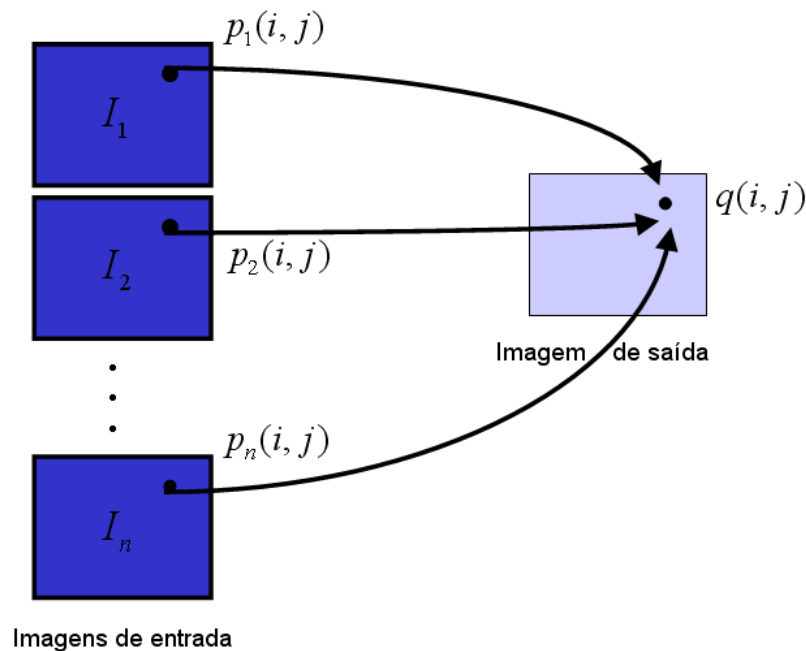


Moda: $i : h(i) = h_{\max}$

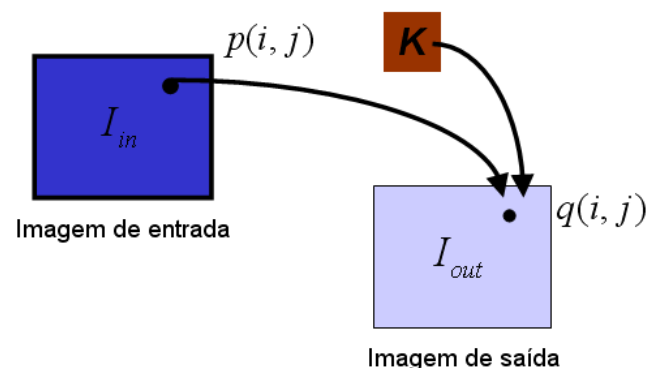
Operações aritméticas em imagens

- Operações **simples e rápidas**;
- Realizadas **píxel-a-píxel**;
- Realizadas entre **duas ou mais imagens** de entrada, ou entre uma **imagem** e uma **constante**.

$$q(i, j) = f[p_1(i, j), p_2(i, j), \dots, p_n(i, j)]$$



$$q(i, j) = f[k, p(i, j)]$$



Operações aritméticas:

- Adição (Soma)
- Subtração (Diferença)
- Multiplicação
- Divisão

Operações aritméticas em imagens

Adição de imagens

$$q(i, j) = \begin{cases} p_1(i, j) + p_2(i, j) & , \quad p_1(i, j) + p_2(i, j) \leq 255 \\ 255 & , \quad p_1(i, j) + p_2(i, j) > 255 \end{cases}$$

Imagens de entrada

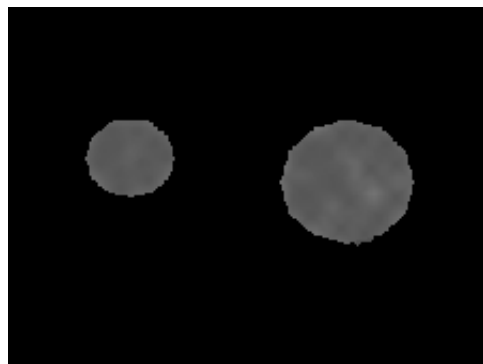


Imagem original

+

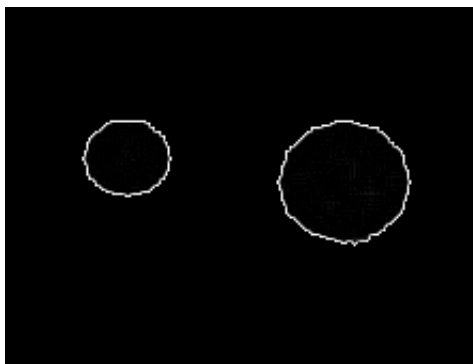
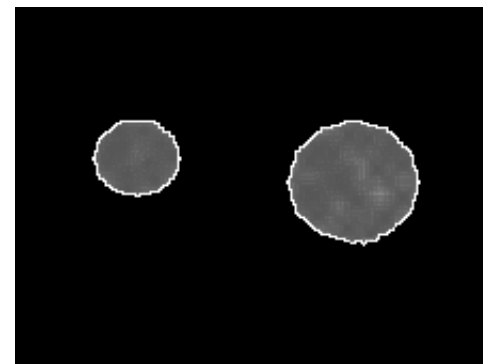


Imagem obtida após aplicação
de um detector de orlas

=

Imagem de saída



Soma das duas imagens

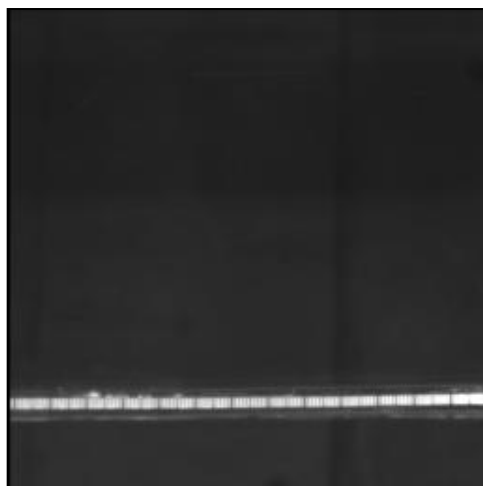
Operações aritméticas em imagens

Soma ponderada (*Blending*)

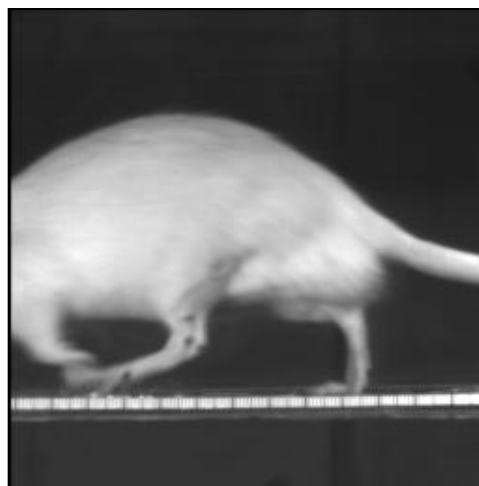
$$q(i, j) = k.p_1(i, j) + (1-k).p_2(i, j)$$

$$0 < k < 1$$

Imagens de entrada

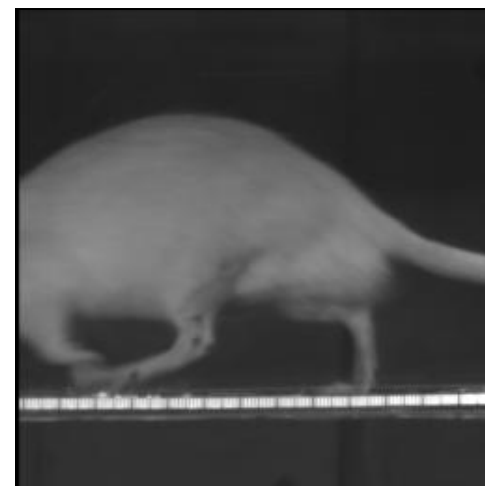


+



=

Imagem de saída



Soma ponderada ($k = 0.5$)

Operações aritméticas em imagens

Subtracção de imagens

$$q(i, j) = \begin{cases} p_1(i, j) - p_2(i, j) & , \quad p_1(i, j) - p_2(i, j) \geq 0 \\ 0 & , \quad p_1(i, j) - p_2(i, j) < 0 \end{cases}$$

$$q(i, j) = |p_1(i, j) - p_2(i, j)|$$

Imagens de entrada

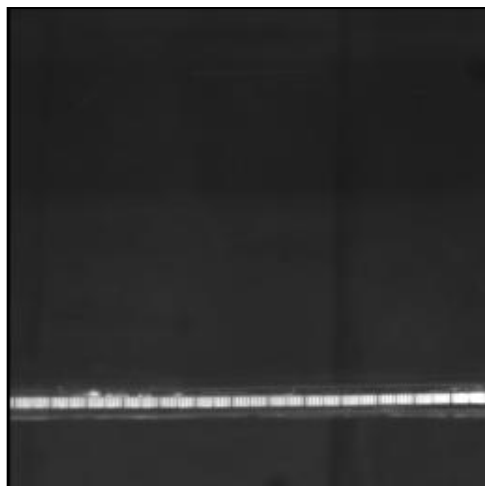


Imagem de fundo

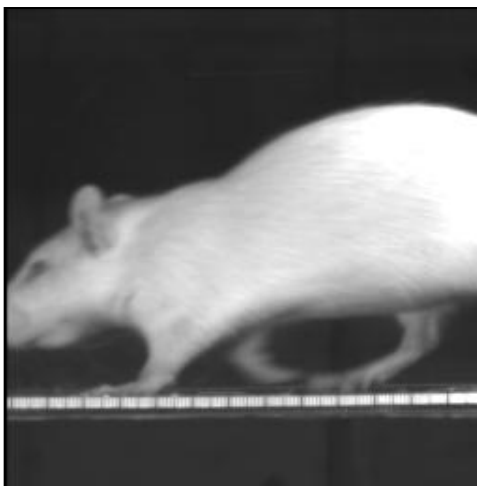


Imagem com um rato
em movimento

—

=

Imagem de saída



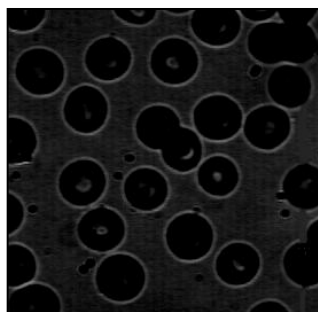
Diferença absoluta entre
as duas imagens

Operações aritméticas em imagens

Adição de uma constante

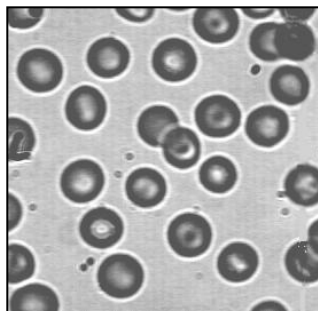
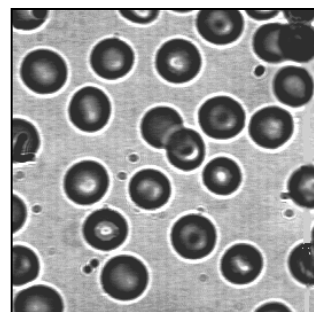
$$q(i, j) = \begin{cases} p(i, j) + k & , \quad 0 \leq p(i, j) + k \leq 255 \\ 0 & , \quad p(i, j) + k < 0 \\ 255 & , \quad p(i, j) + k > 255 \end{cases}$$

Imagem de entrada

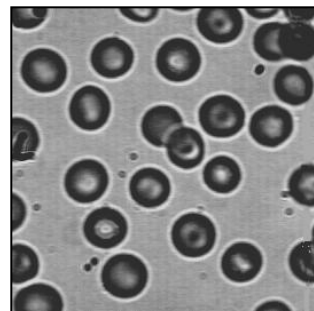


+ 135 =

Imagem de saída



- 40 =



Operações aritméticas em imagens

Multiplicação

$$q(i, j) = \begin{cases} p_1(i, j) \times p_2(i, j) & , \quad p_1(i, j) \times p_2(i, j) \leq 255 \\ 255 & , \quad p_1(i, j) \times p_2(i, j) > 255 \end{cases}$$

$$q(i, j) = \begin{cases} k.p(i, j) & , \quad k.p(i, j) \leq 255 \\ 255 & , \quad k.p(i, j) > 255 \end{cases}$$

Imagem de entrada



$\times 3 =$

Imagem de saída



Operações aritméticas em imagens

Divisão

$$q(i, j) = p_1(i, j) \div p_2(i, j)$$

$$q(i, j) = p(i, j) \div k$$

Imagens de entrada



\div



$=$

Imagem de saída

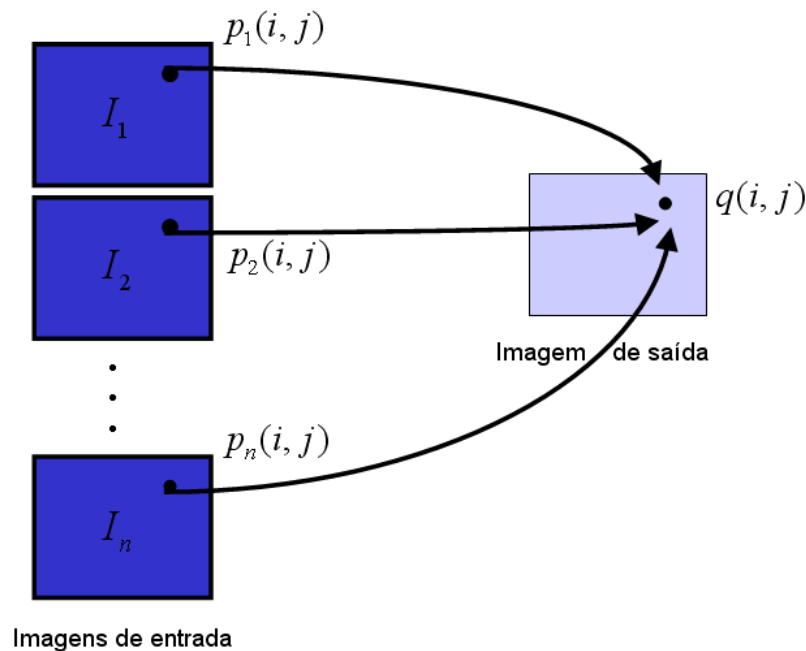


(resultado após remapeamento dos valores obtidos)

Operações lógicas em imagens

- Operações **simples e rápidas**;
- Realizadas **píxel-a-píxel**;
- Realizadas **numa imagem**, ou entre **duas ou mais imagens** de entrada, geralmente **binárias**.

$$q(i, j) = f[p_1(i, j), p_2(i, j), \dots, p_n(i, j)]$$



Operações lógicas:

- Complemento (Negação ou Inversão Lógica)
- Conjunção ou Multiplicação Lógica (E)
- Disjunção ou Adição Lógica (OU)
- Disjunção Exclusiva (OU Exclusivo)

Operações lógicas em imagens

Complemento

Entrada	0	1
Saída	1	0

Imagem de entrada

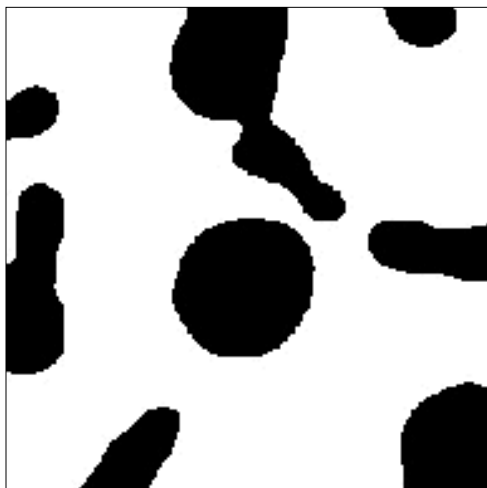


Imagem original



Imagem de saída



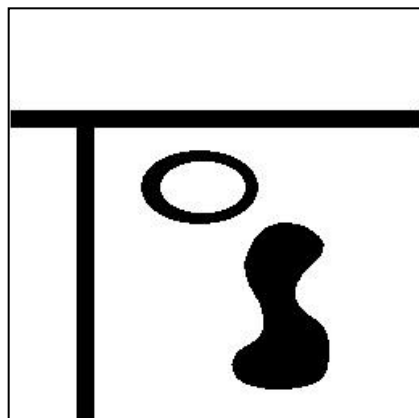
Negação da imagem original

Operações lógicas em imagens

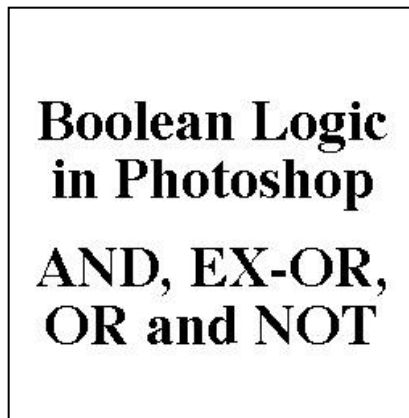
Conjunção ou Multiplicação Lógica (E)

	0	1
0	0	0
1	0	1

Imagens de entrada

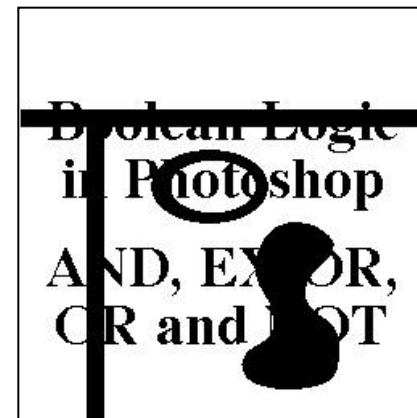


\wedge



=

Imagem de saída

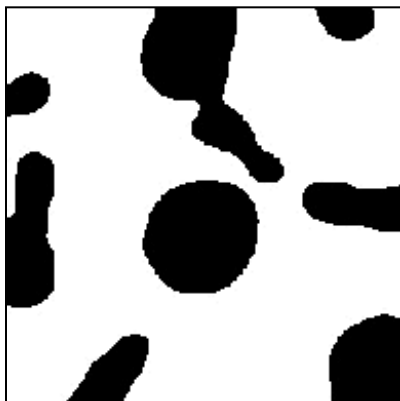


Operações lógicas em imagens

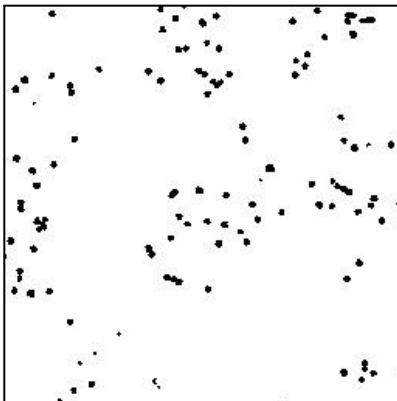
Disjunção ou Adição Lógica (OU)

	0	1
0	0	1
1	1	1

Imagens de entrada

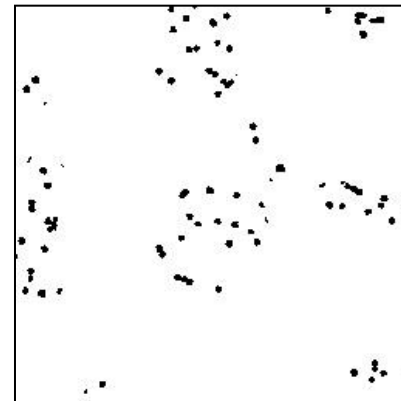


∨



=

Imagem de saída

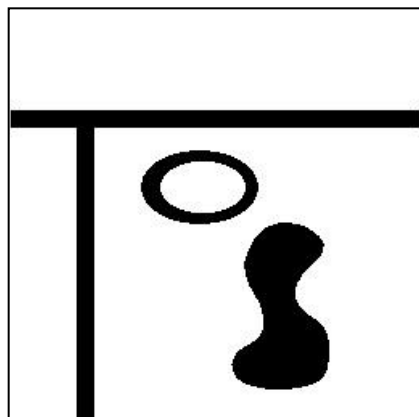


Operações lógicas em imagens

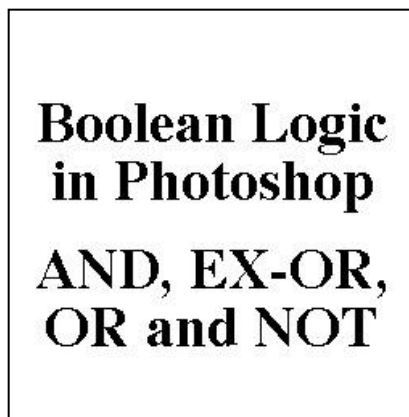
Disjunção Exclusiva (OU Exclusivo)

	0	1
0	0	1
1	1	0

Imagens de entrada

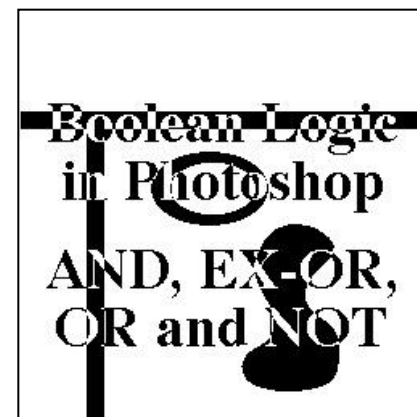


$\dot{\vee}$



=

Imagem de saída

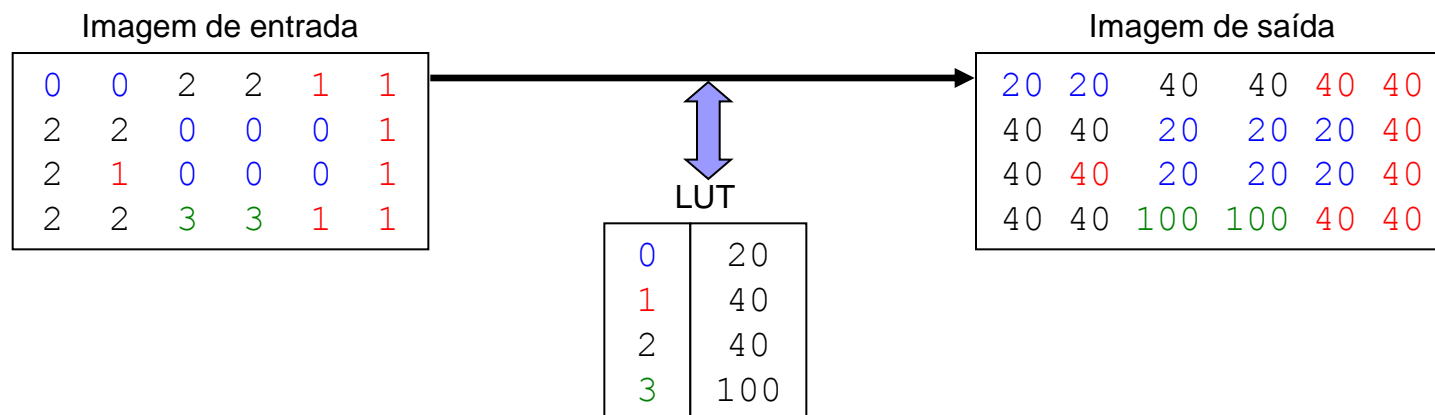


Transformações da escala de NDC

Realizadas através de uma função que mapeia cada nível de cinzento de entrada num novo valor de saída.

Usadas sobretudo quando as imagens são para ser visualizadas por um observador humano, sendo mais facilmente interpretadas se o contraste delas for realçado.

Por uma questão de eficiência computacional, muitas destas transformações são geralmente implementadas através de uma **LUT** (*look-up table*): em vez de se refazerem os cálculos para cada um dos $L.C$ píxeis da imagem, é computada uma tabela com 2 colunas e 2^b linhas, onde a cada NDC original corresponde o valor após a transformação; depois, para cada píxel da imagem, a tabela é simplesmente consultada e os valores originais substituídos pelos novos.



Transformação logarítmica

$$v_{out} = \frac{255}{M} \ln[1 + k \cdot v_{in}]$$

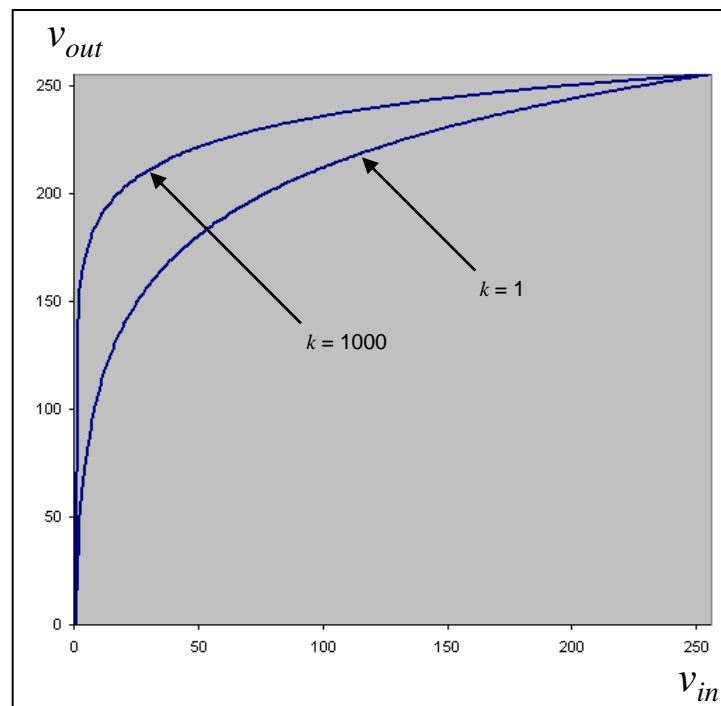
$$M = \ln[1 + 255 \cdot k]$$

Esta transformação “espalha” os NDC mais baixos e “concentra” os NDC mais altos, tornando mais visíveis os **detalhes em zonas mais escuras** à custa dos detalhes nas zonas mais claras.

Imagem de entrada



Imagem de saída



Transformação exponencial

$$v_{out} = \frac{255}{M} \left[(1 + k)^{v_{in}} - 1 \right]$$

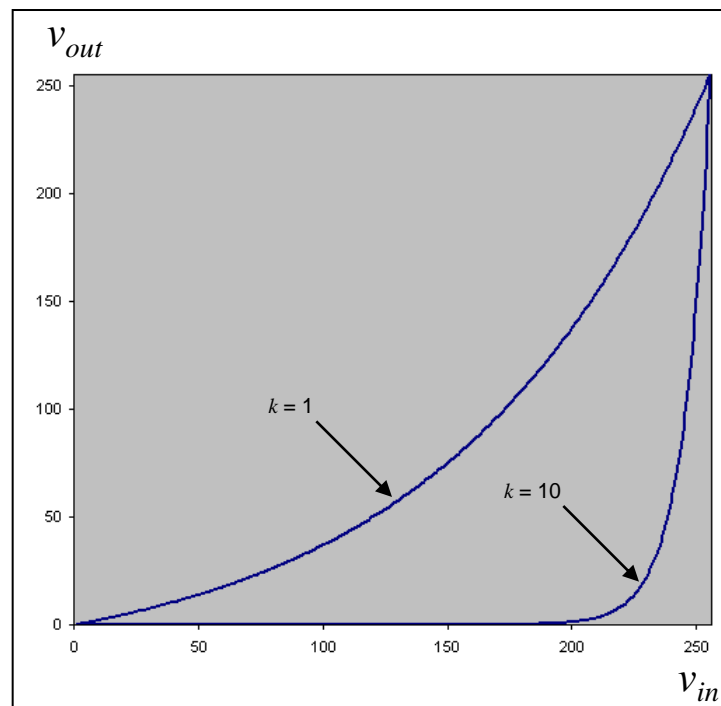
$$M = (1 + k)^{255} - 1$$

Esta transformação “espalha” os NDC mais altos e “concentra” os NDC mais baixos, tornando mais visíveis os **detalhes em zonas mais claras** à custa dos detalhes nas zonas mais escuras.

Imagem de entrada



Imagem de saída



Alteração da gama dinâmica

$$v_{out} = (v_{in} - V_{min}) \frac{255}{V_{max} - V_{min}}$$

$$V_{min} = \min[v : h_{in}(v) \neq 0] \quad V_{max} = \max[v : h_{in}(v) \neq 0]$$

Gama dinâmica da imagem de entrada: $[V_{min}; V_{max}]$

Gama dinâmica da imagem de saída: $[0; 255]$

Imagem de entrada

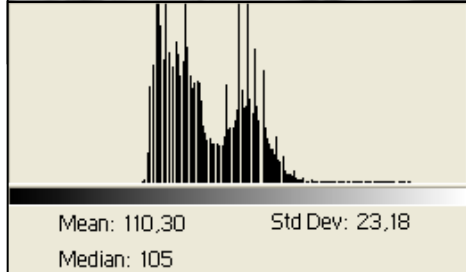
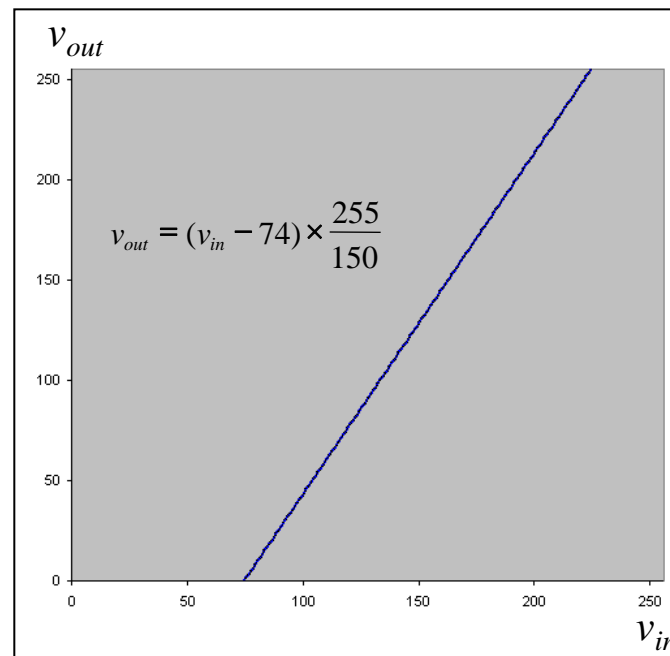
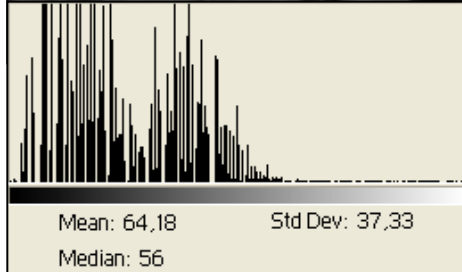


Imagem de saída

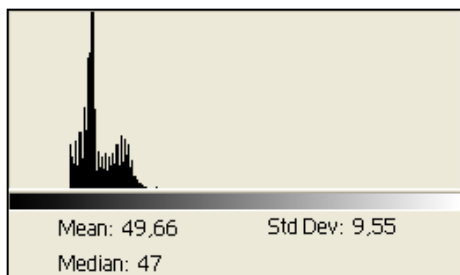
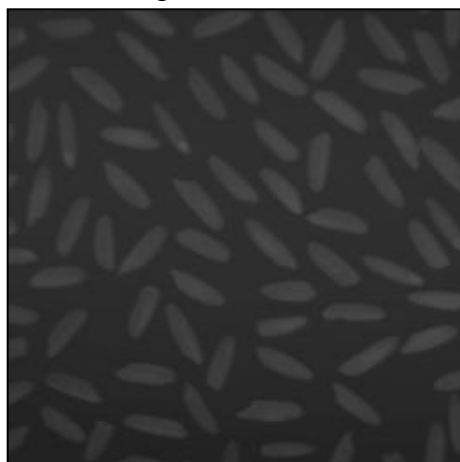


Fórmula genérica:
$$v_{out} = (v_{in} - V_{min}^{in}) \frac{V_{max}^{out} - V_{min}^{out}}{V_{max}^{in} - V_{min}^{in}} + V_{min}^{out}$$

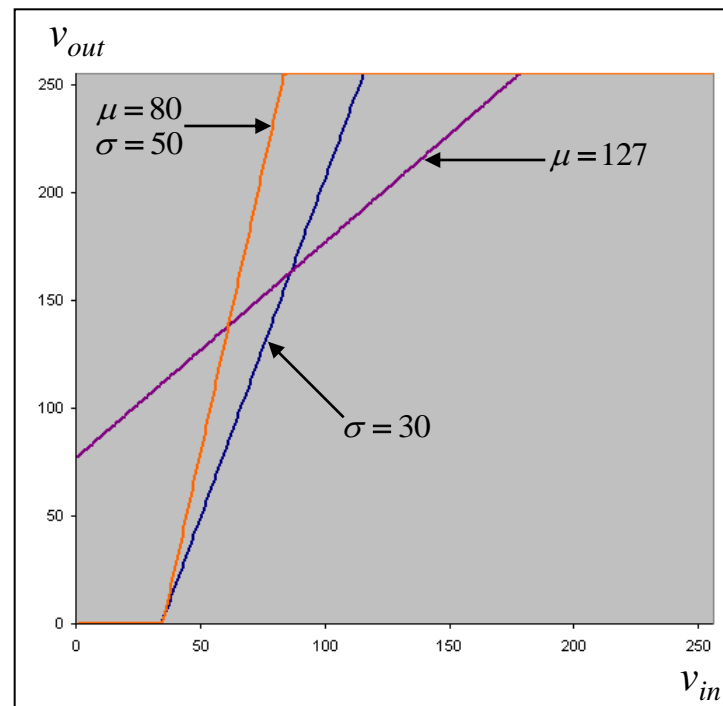
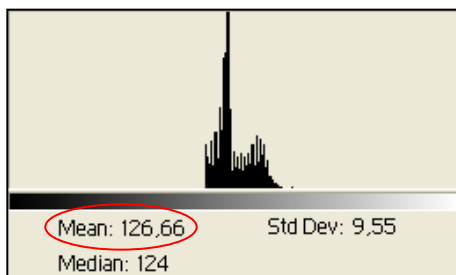
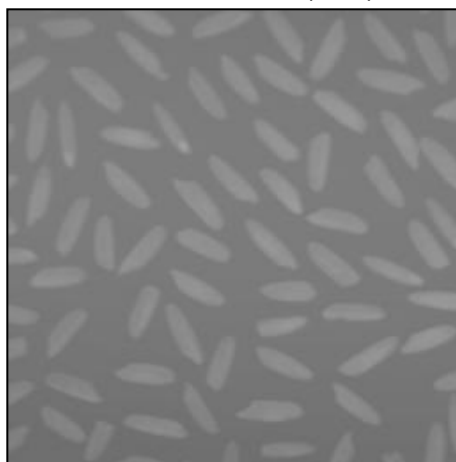
Alteração de média e desvio padrão

$$v_{out} = k_1 \cdot v_{in} + k_2 \quad k_1 = \frac{\sigma_{out}}{\sigma_{in}} \quad k_2 = \mu_{out} - k_1 \cdot \mu_{in}$$

Imagem de entrada

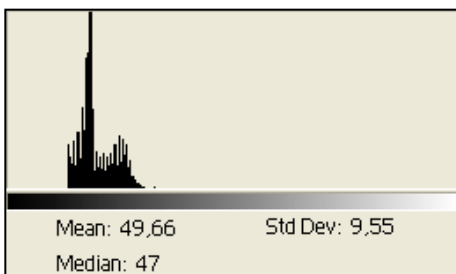
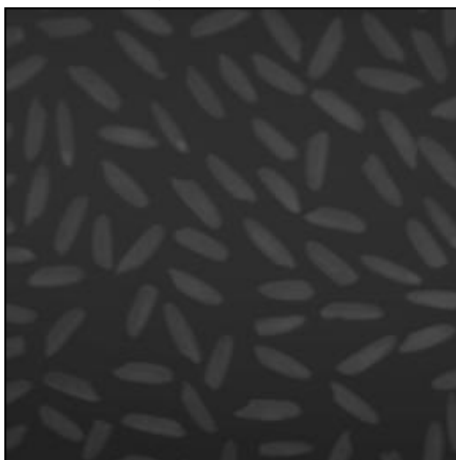


Alterar **média** (127)

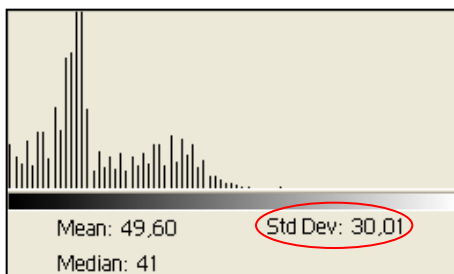
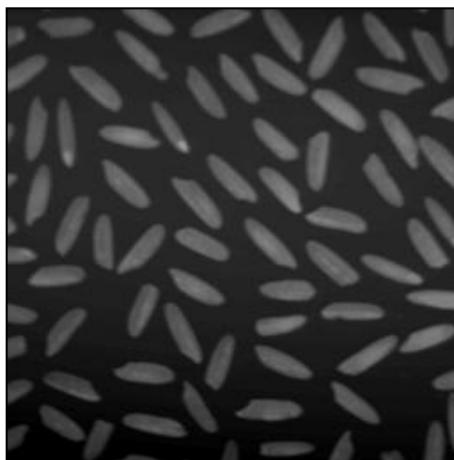


Alteração de média e desvio padrão

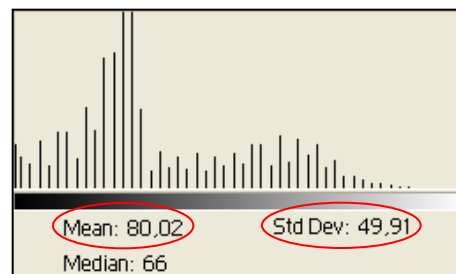
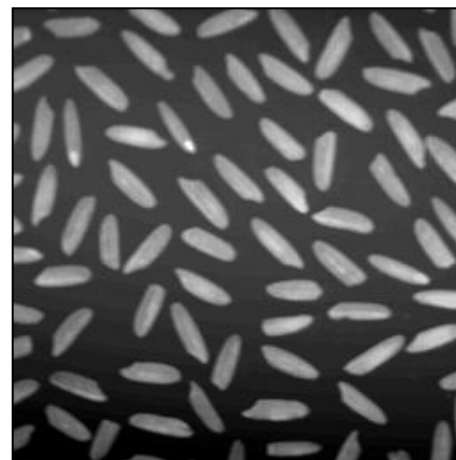
Imagem de entrada



Alterar **desvio padrão** (30)



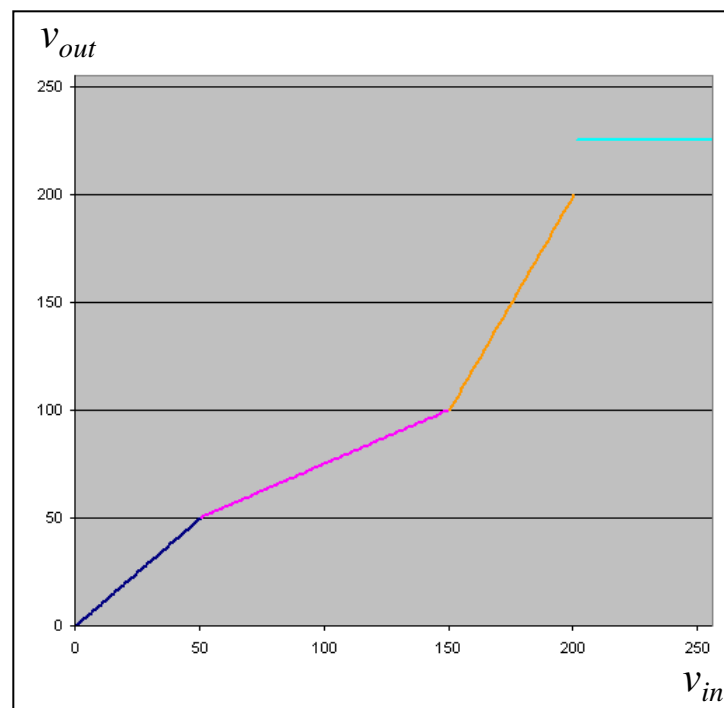
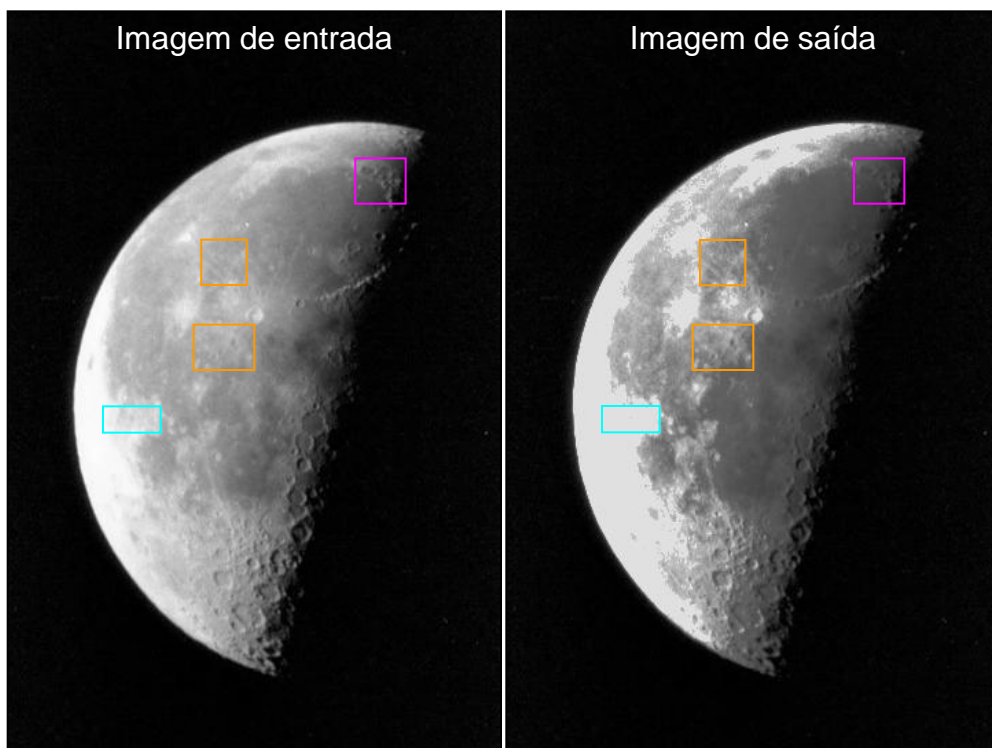
Alterar **média** (80)
e **desvio padrão** (50)



Transformações lineares parcelares

O princípio das transformações lineares anteriores pode ser estendido a transformações lineares parcelares, em que **diferentes ganhos** (constantes multiplicativas) e **desvios** (constantes aditivas) são válidos para **diferentes valores de entrada**.

$$v_{out} = \begin{cases} v_{in} & , \quad 0 \leq v_{in} \leq 50 \\ 0,5 \cdot v_{in} + 25 & , \quad 51 \leq v_{in} \leq 150 \\ 2 \cdot v_{in} - 200 & , \quad 151 \leq v_{in} \leq 200 \\ 225 & , \quad 201 \leq v_{in} \leq 255 \end{cases}$$



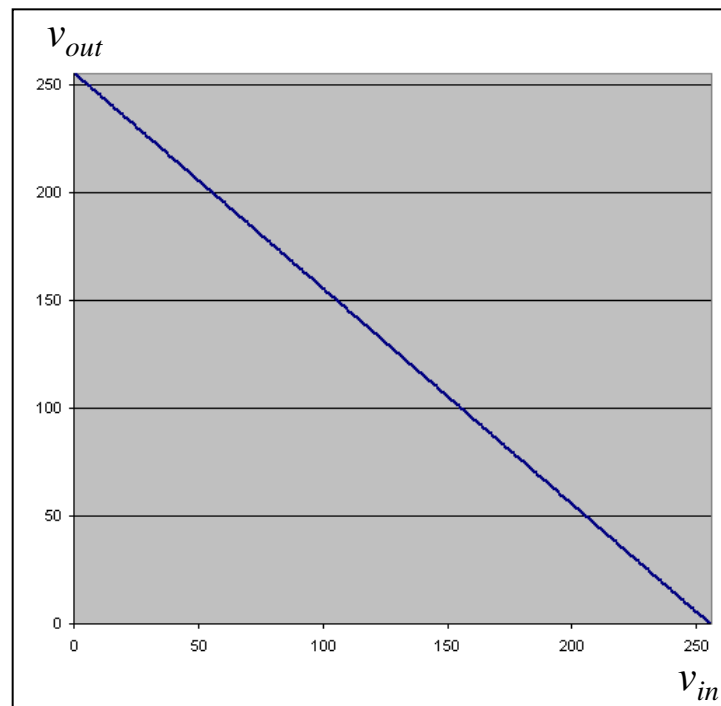
Negativo

$$q(i, j) = 255 - p(i, j)$$

Imagem de entrada



Imagem de saída



Binarização global

$$q(i, j) = \begin{cases} 0 & , \quad p(i, j) < T \\ 255 & , \quad p(i, j) \geq T \end{cases}$$

Imagem de entrada

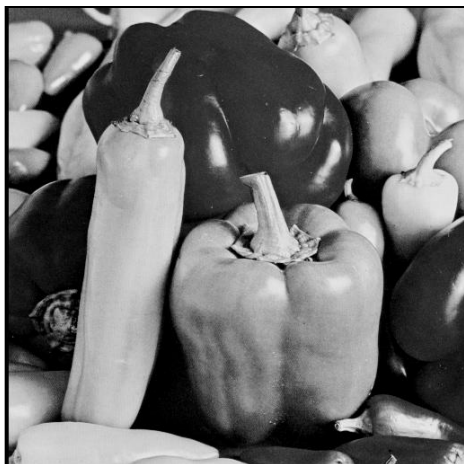
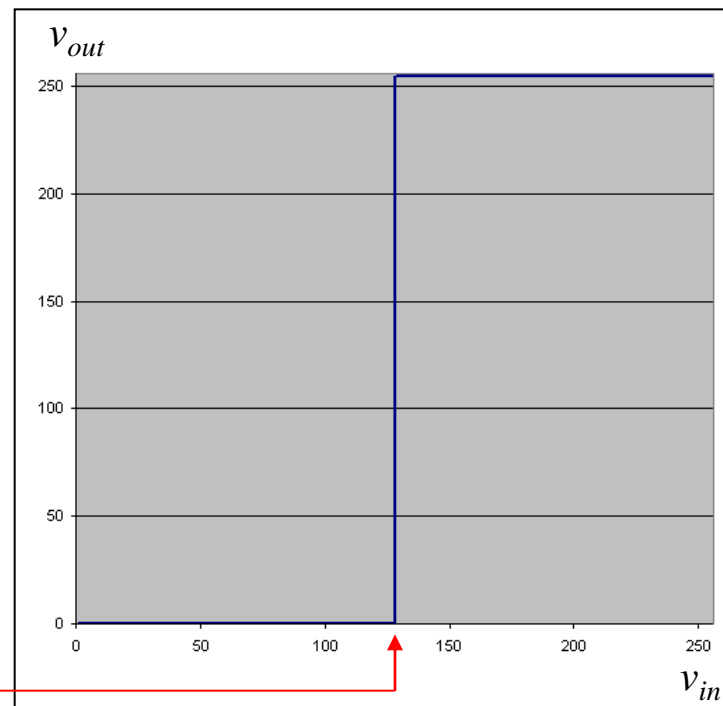


Imagem binarizada ($T = 128$)



Nível de binarização (T)

Limiarização com vários níveis

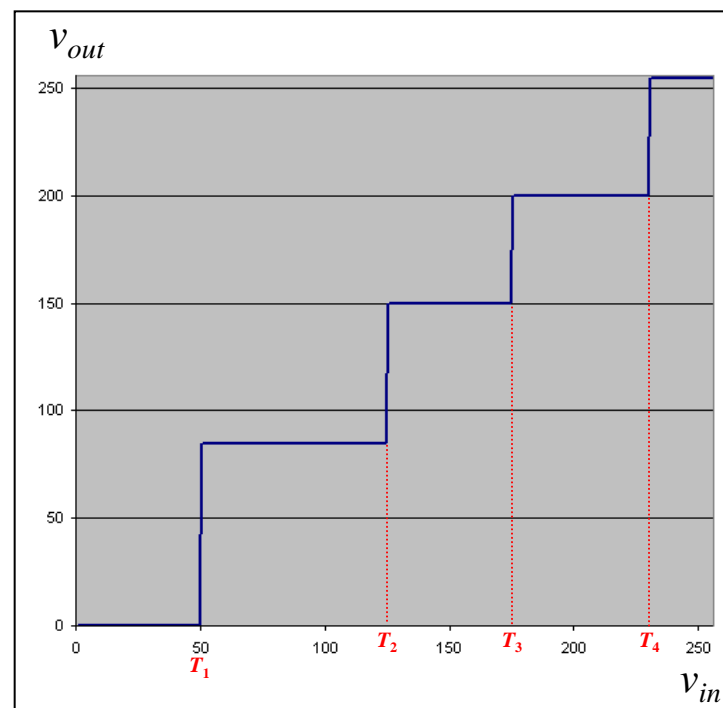
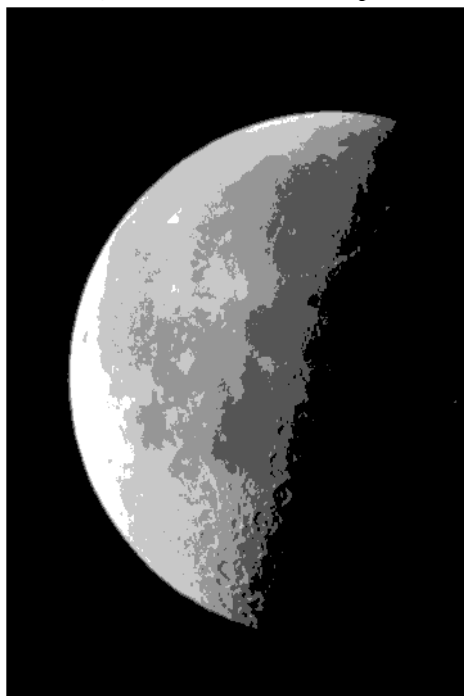
Se existir mais do que um nível de binarização, deveremos em todo o rigor falar de **limiarização**: N_T níveis de limiarização resultam numa imagem limiarizada com $N_T + 1$ níveis de cinzento diferentes.

$$q(i, j) = \begin{cases} 0 & , \quad 0 \leq p(i, j) < 50 \\ 85 & , \quad 50 \leq p(i, j) < 125 \\ 150 & , \quad 125 \leq p(i, j) < 175 \\ 200 & , \quad 175 \leq p(i, j) < 230 \\ 255 & , \quad 230 \leq p(i, j) \leq 255 \end{cases}$$

Imagem de entrada

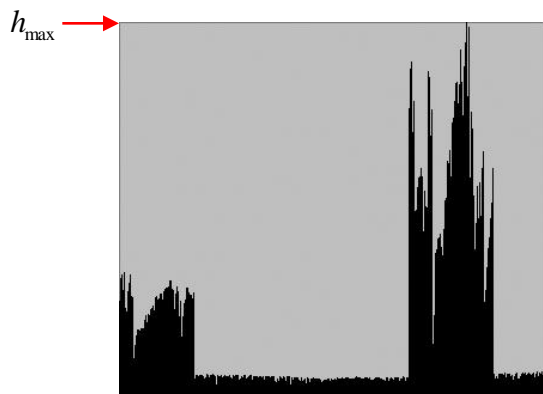


Imagem limiarizada ($N_T = 4$)

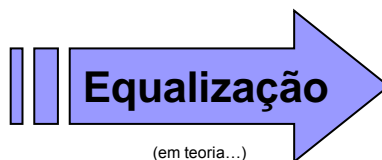


Equalização do histograma

Uma importante transformação da escala de NDC, usada na melhoria do **contraste** da imagem, é a equalização, técnica pela qual se tenta tornar $h(i)$ **constante** e — consequentemente, numa função *contínua* — $H(i)$ **linear** (com um declive positivo constante), com uma **gama dinâmica** $[0; N_{NDC}-1]$.



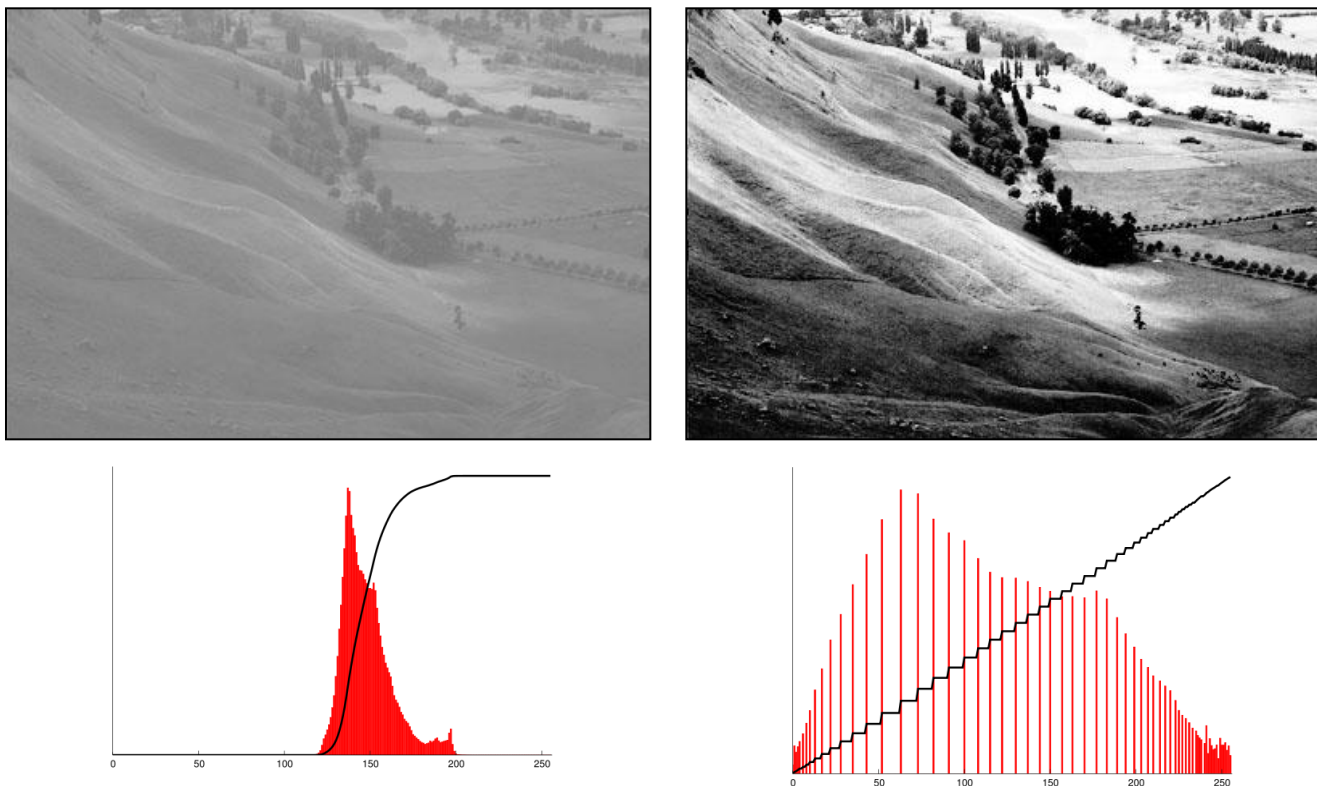
Histograma e histograma
cumulativo normalizado originais



Histograma e histograma
cumulativo normalizado equalizados

Equalização do histograma

Na prática, **porque os NDC da imagem estão quantificados em valores discretos** (donde os histogramas são funções discretas, e não contínuas), **a equalização total nunca é alcançada:**



A **solução de compromisso** é procurar uma **aproximação** de um $H(i)$ linear.

Equalização do histograma

Dependendo do **método específico** de aproximação adoptado, o resultado será uma “equalização” ligeiramente diferente.

Exemplos:

- Garantir a **menor diferença absoluta** entre o $H_{out}(i)$ e o $H_{eq}(i)$ ideal, ainda que a gama dinâmica não seja total. → Alguns píxeis ficarão mais claros do que o ideal, outros mais escuros, e outros iguais ao ideal.
- Idem, mas com a **menor diferença não negativa** → Todos os píxeis mais escuros do que o ideal (ou iguais).
- Idem, mas com a **menor diferença não positiva** → Todos os píxeis mais claros do que o ideal (ou iguais).
- Garantir que a **gama dinâmica é $[0; N_{NDC}-1]$** , ainda que a linearização não seja a melhor.

Nos próximos *slides* veremos em detalhe algumas destas aproximações.

Equalização do histograma

■ Aproximação 1: Menor diferença absoluta

1. Construir o histograma da imagem original, h_{in} , e, a partir deste, o respectivo histograma acumulado, H_{in} .
2. Construir o histograma acumulado desejado (equalização ideal), H_{eq} , segundo a fórmula:

$$H_{eq}(i) = N \frac{i+1}{N_{NDC}} \quad i = 0, 1, \dots, N_{NDC} - 1$$

3. Construir o histograma acumulado da imagem equalizada, H_{out} , escolhendo cada $H_{out}(i)$ por comparação de $H_{eq}(i)$ com os valores de H_{in} , segundo o princípio:

$$\Delta_{\min}(i) = \left| H_{eq}(i) - H_{in}(j) \right|_{\min}$$
$$H_{out}(i) = \begin{cases} 0 & , \quad \Delta_{\min}(i) > H_{eq}(i) \\ H_{in}(j) : \Delta_{\min}(i) & , \quad \dots \end{cases}$$

4. Construir o histograma da imagem equalizada, h_{out} , a partir de H_{out} .
5. A partir de h_{out} , construir a *look-up table* (LUT) da equalização:

$$\text{LUT:} \begin{cases} h_{out}(i) = 0 \Leftrightarrow \text{ignorar (passar ao valor seguinte do histograma de saída)} \\ h_{out}(i) = h_{in}(j) \Leftrightarrow \text{LUT}(j) = i \\ h_{out}(i) = h_{in}(j_1) + h_{in}(j_2) + \dots \Leftrightarrow \text{LUT}(j_1) = \text{LUT}(j_2) = \dots = i \\ h_{in}(j) = 0 \Leftrightarrow \text{ignorar (passar ao valor seguinte da LUT)} \end{cases}$$

Equalização do histograma

Exemplo 1.1: Imagem de 64×64 píxeis ($N = 4096$), 3 bpp ($N_{NDC} = 8$), com o seguinte histograma:

$i \equiv \mathbf{NDC}$	0	1	2	3	4	5	6	7
$h_{in}(i)$	790	1023	850	656	329	245	122	81
$H_{in}(i)$	790	1813	2663	3319	3648	3893	4015	4096

Histograma ideal (equalização perfeita):

$H_{eq}(i)$	512	1024	1536	2048	2560	3072	3584	4096
-------------	-----	------	------	------	------	------	------	------

Cálculos para a aproximação pela **menor diferença absoluta**:

$\Delta_{min}(i)$	278	234	277	235	103	247	64	0
$H_{out}(i)$	790	790	1813	1813	2663	3319	3648	4096
$h_{out}(i)$	790	0	1023	0	850	656	329	448

Look-up table resultante:

i	0	1	2	3	4	5	6	7
$LUT(i)$	0	2	4	5	6	7	7	7

Equalização do histograma

Exemplo 1.2: Idem, com um histograma diferente:

$i \equiv \mathbf{NDC}$	0	1	2	3	4	5	6	7
$h_{in}(i)$	1813	850	656	0	17	335	350	75
$H_{in}(i)$	1813	2663	3319	3319	3336	3671	4021	4096

Histograma ideal (equalização perfeita):

$H_{eq}(i)$	512	1024	1536	2048	2560	3072	3584	4096
-------------	-----	------	------	------	------	------	------	------

Cálculos para a aproximação pela **menor diferença absoluta**:

$\Delta_{\min}(i)$	1301	789	277	235	103	247	87	0
$H_{out}(i)$	0	1813	1813	1813	2663	3319	3671	4096
$h_{out}(i)$	0	1813	0	0	850	656	352	425

Look-up table resultante:

i	0	1	2	3	4	5	6	7
$LUT(i)$	1	4	5	—	6	6	7	7

Equalização do histograma

■ Aproximação 2: Menor diferença não negativa

Todos os passos iguais ao do Algoritmo 1, excepto:

3. Construir o histograma acumulado da imagem equalizada, H_{out} , segundo o princípio:

$$\Delta_{\min}(i) = (H_{eq}(i) - H_{in}(j))_{\min} : \Delta_{\min}(i) \geq 0$$
$$H_{out}(i) = \begin{cases} 0 & , \quad \exists \Delta_{\min}(i) : \Delta_{\min}(i) \geq 0 \\ H_{in}(j) : \Delta_{\min}(i) < 0 & , \quad \dots \end{cases}$$

■ Aproximação 3: Gama dinâmica máxima

Construir a LUT da equalização segundo a fórmula:

$$LUT(i) = \left\langle \frac{H(i) - H_{\min}}{N - H_{\min}} (N_{NDC} - 1) \right\rangle$$

em que $H_{\min} = \min\{H(i) : H(i) \neq 0\}$ e $\langle \rangle$ representa a operação de arredondamento.

i	LUT(i)	
	Ex. 3.1	Ex. 3.2
0	0	0
1	2	3
2	4	5
3	5	5
4	6	5
5	7	6
6	7	7
7	7	7

Equalização do histograma

Exemplo 2.1: Imagem igual à do Exemplo 1.1:

$i \equiv \mathbf{NDC}$	0	1	2	3	4	5	6	7
$h_{in}(i)$	790	1023	850	656	329	245	122	81
$H_{in}(i)$	790	1813	2663	3319	3648	3893	4015	4096

Histograma ideal (equalização perfeita):

$H_{eq}(i)$	512	1024	1536	2048	2560	3072	3584	4096
-------------	-----	------	------	------	------	------	------	------

Cálculos para a aproximação pela **menor diferença não negativa**:

$\Delta_{min}(i)$	—	234	746	235	747	409	265	0
$H_{out}(i)$	0	790	790	1813	1813	2663	3319	4096
$h_{out}(i)$	0	790	0	1023	0	850	656	777

Look-up table resultante:

i	0	1	2	3	4	5	6	7
$LUT(i)$	1	3	5	6	7	7	7	7

Equalização do histograma

Exemplo 2.2: Imagem igual à do Exemplo 1.2:

$i \equiv \mathbf{NDC}$	0	1	2	3	4	5	6	7
$h_{in}(i)$	1813	850	656	0	17	335	350	75
$H_{in}(i)$	1813	2663	3319	3319	3336	3671	4021	4096

Histograma ideal (equalização perfeita):

$H_{eq}(i)$	512	1024	1536	2048	2560	3072	3584	4096
-------------	-----	------	------	------	------	------	------	------

Cálculos para a aproximação pela **menor diferença não negativa**:

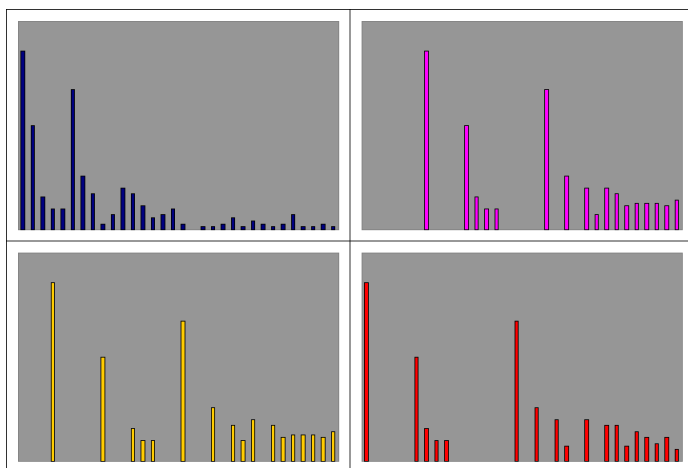
$\Delta_{\min}(i)$	—	—	—	235	747	409	248	0
$H_{out}(i)$	0	0	0	1813	1813	2663	3336	4096
$h_{out}(i)$	0	0	0	1813	0	850	673	760

Look-up table resultante:

i	0	1	2	3	4	5	6	7
LUT(i)	3	5	6	—	6	7	7	7

Equalização do histograma

Comparação dos três métodos de equalização numa imagem com 32 NDC (um exemplo):



Em cima: histogramas.

Da esquerda para a direita e de cima para baixo:
original, mínima diferença não negativa, mínima diferença absoluta,
fórmula da gama dinâmica máxima.

Ao lado: histograma acumulados (original, mínima diferença não
negativa, mínima diferença absoluta, fórmula da gama dinâmica
máxima, equalização ideal).

