THALES WALTENIOR TRIGO JÚNIOR

**MEDIDA DA QUALIDADE DE IMAGENS DE CÂMERAS DIGITAIS
USANDO ENTROPIA INFORMACIONAL**

**São Paulo
2007**

THALES WALTENIOR TRIGO JÚNIOR

**MEDIDA DA QUALIDADE DE IMAGENS DE CÂMERAS DIGITAIS
USANDO ENTROPIA INFORMACIONAL**

Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade
de São Paulo para obtenção
do título de Doutor em
Engenharia

Área de Concentração:
Sistemas Eletrônicos

Orientador:
Prof. Dr. José Roberto
Castilho Piqueira

**São Paulo
2007**

Trigo Junior, Thales Waltenior

**Medida da qualidade de imagens em câmeras digitais
usando entropia informacional / T. W. Trigo Junior -- São Paulo,
2007.**

140 p.

**Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia de
Telecomunicações e Controle**

**1. Processamento de imagens 2. Entropia (Matemática
aplicada) 3. Imagem digital 4. Câmeras fotográficas I.
Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento
de Engenharia de Engenharia de Telecomunicações e Controle
II.t**

Dedico este trabalho a Cíntia, pelo carinho, paciência, inteligência, e cuidado para com nosso quatro meninos e, por mais uma vez, entender a importância deste trabalho para mim.

Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço ao meu orientador, colega e amigo, Prof. Dr. José Roberto Castilho Piqueira, que soube me incentivar e dar rumo ao trabalho, com sua grande experiência acadêmica e bom humor.

Ao Prof. Dr. João Eduardo Kogler Júnior, que muito me ajudou no início do projeto de doutorado indicando leituras, sugestões de cursos, incontáveis discussões e valiosas sugestões no exame de qualificação.

Ao Prof. Dr. Ricardo Paulino Marques, convidado para a banca de qualificação, sua reconhecida precisão e cuidado.

Ao jovem doutor e estimado colega Fernando Moya Orsatti agradeço a dedicação, paciência, amizade e grande competência com que me ajudou no desenvolvimento da parte computacional do trabalho.

Aos fotógrafos e amigos Cleudon Alves de Sousa Júnior, José Ribeiro do Nascimento Filho e Maurício Delmont de Andrade, agradeço a inestimável ajuda na montagem dos sistemas de aquisição de imagens e a preparação das imagens para análise.

Aos amigos Irit Chernizon Tommasini, Marcelo Mazon Malaquias e Ivan Sanches devo agradecer o empréstimo generoso de equipamentos fotográficos usados em nossos testes. Sem eles, parte do nosso trabalho não poderia ser realizado.

A Dra. Elisabeth Adriana Dudziak da Biblioteca Luiz de Queiroz Orsini da Escola Politécnica pela excelente análise dos originais e referências bibliográficas.

A Flavio Trigo, meu querido irmão, agradeço o estímulo que vem de sua proverbial objetividade.

Quando o Prof. Piqueira, o Prof. Kogler e eu éramos jovens estudantes ou professores inexperientes, tivemos a oportunidade de conviver e aprender com o Prof. Lúcio Carlos Ayres Fragoso. Brilhante, contraditório, polemista e principalmente generoso, o Fragoso foi um marco na nossa formação.

Dentre as inúmeras histórias contadas pelo Fragoso, uma foi e continua sendo emblemática.

Em 1932, foi corrido no hipódromo da Gávea no Rio de Janeiro, o Primeiro Grande Prêmio Brasil, um acontecimento memorável – atraindo a elite nacional e mobilizando a população. Para espanto geral, um cavalo brasileiro, tordilho e sem graça chamado Mossoró ganhou a corrida. Os favoritos eram argentinos e chilenos, tradicionais forças do turfe sul-americano. A imprensa, como de hábito, procurou logo personalidades para entrevistas – mais um grande triunfo brasileiro etc. Um dos entrevistados foi o diplomata e ministro Oswaldo Aranha, homem experiente em coisas do Brasil. --- Dr. Oswaldo, o que o senhor achou da vitória do “nosso” cavalo? A resposta não poderia ser mais atual: --- “Neste deserto de homens e idéias surge o cavalo Mossoró”.

Resumo

Este é um trabalho de caráter experimental que usa o conceito de entropia informacional para análise de imagens digitais. A literatura pesquisada mostra que o conceito de entropia informacional é utilizado para análise de imagens mas, equipamentos fotográficos disponíveis no mercado não são discutidos. O objetivo do trabalho é oferecer, principalmente, ao fotógrafo, um método experimental prático para análise da qualidade de sistemas fotográficos digitais. Dois sistemas digitais de alta resolução, 22 e 33 megapixels, foram usados e as imagens comparadas com imagens obtidas em filme fotográfico e escaneadas. Os valores encontrados para a entropia informacional indicam, na maioria das situações de teste, que melhores resultados são obtidos pelos sistemas digitais em comparação ao filme. Câmeras digitais reflex com 6, 10 e 14 megapixels também foram utilizadas nas análises. Nestas comparações, diferentes objetivas fotográficas foram testadas e os resultados indicam que objetivas mais modernas, produzem resultados melhores quando utilizadas com câmeras digitais mais modernas. Câmeras digitais mais antigas, como a Kodak 14n (14 megapixels) produzem imagens cuja qualidade depende menos das objetivas usadas. O trabalho propõe também uma definição para a determinação da entropia informacional em RGB de uma forma não encontrada na literatura. O conceito de entropia informacional em RGB é testado para imagens sintéticas, e também para imagens fotográficas. Finalmente, propõe-se que a entropia informacional possa ser usada como parâmetro de controle no tratamento de imagens digitais, principalmente no uso dos filtros de nitidez.

Palavras-chave: entropia informacional, processamento de imagens, câmeras fotográficas, imagem digital

Abstract

This is an experimental work which uses the concept of informational entropy for digital image analysis. The researched literature shows that the informational entropy concept is used for image analysis, but the photographic equipment available in the market is not discussed. The aim of this work is to offer ,for photographers mainly, an experimental functional method for analyzing the quality of digital photographic systems. Two high resolution digital systems, 22 and 23 megapixels, were used and their images were compared to scanned photographic images. The obtained values for informational entropy indicate that, in the majority of the test situations, best results are obtained by digital systems in comparison to film based ones. Digital reflex cameras, with 6,10,14 megapixels were also used in the analysis. Different objective lenses were tested and the results indicate that more modern objectives give better results when used with more modern digital cameras. Older digital cameras, such as Kodak 14n (14 megapixels) produce images which quality depend less on the objective lenses used. The work also proposes the determination of the informational entropy in RGB in a way which is not found in the bibliography: informational entropy is tested in synthetic and photographic images. Finally, it is proposed that informational entropy should be used as a control parameter in digital image treatment, mainly for the use of sharpening filters.

Keywords: informational entropy, image processing, photographic equipment, digital image

Lista de Figuras

Figura 1.1 -	Imagem produzida em 1921, a partir de uma fita codificada impressa por impressora telegráfica com tipos especiais	22
Figura 1.2 -	Imagem digital feita em 1922, a partir de uma fita perfurada após os sinais terem cruzado o Atlântico duas vezes	22
Figura 1.3 -	Imagem sem retoques dos Generais Pershing e Foch, transmitida por cabo em 1929, de Londres a Nova York, por um equipamento de 15 tonalidades	23
Figura 2.1 -	Sistema de coordenadas de uma imagem digital	29
Figura 2.2 -	Imagem em escala e cinzas com 256 x 256 pixels	31
Figura 2.3 -	Representação do nível de alguns pixels da Fig. 2.2	32
Figura 2.4 -	Imagem em JPG com 108 kB	37
Figura 2.5 -	Imagem em JPG com 164 kB	38
Figura 2.6 -	Imagem em TIFF com 1000 x 500 pixel e 1,43MB no disco	38
Figura 2.7 -	Imagem em TIFF com 1000 x 500 pixels e 1,43MB no disco	38
Figura 2.8 -	Arquivo RAW original da câmera	39
Figura 2.9 -	Arquivo RAW com ajuste de brilho	40
Figura 2.10 -	Arquivo RAW ampliado mostrando as estruturas da imagem	40
Figura 3.1 -	Estrutura física de um CCD	43
Figura 3.2 -	CCD montados em placas de circuitos com 16 MP e 14 MP.....	44
Figura 3.3 -	Sensores tipo CCD com 22 MP, 10,5MP e 4 MP.....	44
Figura 3.4 -	Ilustração que mostra a leitura de cada um dos pixels do CCD	45
Figura 3.5 -	Transformação de medidas analógicas (volts) em números do sistema binário	46
Figura 3.6.a -	Imagem produzida no Photoshop da Adobe com cores geradas a partir dos valores RGB	47
Figura 3.6.b -	Imagem produzida no Photoshop da Adobe com cores geradas a partir dos valores RGB	47
Figura 3.7 -	CCD com filtros em RGB	48
Figura 3.8 -	Método de obtenção dos filtros RGB no CCD	49
Figura 3.9 -	CCD com a nova filtragem em CMY	49
Figura 3.10 -	Sensibilidade espectral de um sensor CCD	54
Figura 3.11 -	Câmera Hasselblad de médio formato com Sinarback 2	62
Figura 4.1 -	Imagem com 1000 x 500 pixels; H=0.....	73
Figura 4.2 -	Histograma da figura 4.1.	73
Figura 4.3 -	Imagem com 1000 x 500 pixels; H=0	74
Figura 4.4 -	Histograma da figura 4.3.	74
Figura 4.5 -	Imagem com 1000 x 500 pixels; H=0.....	75
Figura 4.6 -	Histograma da figura 4.5.....	75
Figura 4.7 -	Imagem com 1000 x 500 pixels; H=1	76

Figura 4.8 -	Histograma da figura 4.7.	76
Figura 4.9 -	Imagem com 1000 x 500 pixels; H=1.....	77
Figura 4.10 -	Histograma da figura 4.9.....	77
Figura 4.11 -	Imagem com 500 x 250 pixels; H=1	78
Figura 4.12 -	Histograma da figura 4.11.	78
Figura 4.13 -	Imagem com 1000 x 500 pixels; H=1,0935.....	79
Figura 4.14 -	Histograma da figura 4.13.	79
Figura 4.15 -	Imagem com 1000 x 500 pixels; H=2,2767, Gaussian Blur =10 pixels	80
Figura 4.16 -	Histograma da figura 4.15.	80
Figura 4.17 -	Imagem com 1000 x 500 pixels; H=3,2503, Gaussian Blur =20 pixels	81
Figura 4.18 -	Histograma da figura 4.17.	81
Figura 4.19 -	Imagem com 1000 x 500 pixels; H=4,0653, Gaussian Blur =30 pixels	82
Figura 4.20 -	Histograma da figura 4.19.	82
Figura 4.21 -	Imagem com 1000 x 500 pixels; H = 7,9503	83
Figura 4.22 -	Histograma da figura 4.21.	83
Figura 4.23 -	Imagem com 200 x 100 pixels; H = 7,9305	84
Figura 4.24 -	Histograma da figura 4.23.	84
Figura 4.25 -	Imagem com 3000 x 2000 pixels ; H=7,9155	85
Figura 4.26 -	Histograma da figura 4.25.	85
Figura 4.27 -	Sistema digital Sinar 54M (22 MP) e Leaf Aptus (33 MP)	86
Figura 4.28 -	Controle na temperatura de cor do flash eletrônico, 5270 K e exposição.....	87
Figura 4.29 -	Controle de nível dos objetos alvos	88
Figura 4.30 -	Imagem com Diagonal - sistema Leaf	89
Figura 4.31 -	Histograma da figura 4.30.	89
Figura 4.32 -	Imagem com Listas - sistema Leaf.....	90
Figura 4.33 -	Histograma da figura 4.32.	90
Figura 4.34 -	Imagem com Quadriculado - sistema Leaf	91
Figura 4.35 -	Histograma da figura 4.34.	91
Figura 4.36 -	Imagem com Diagonal - sistema Sinar	92
Figura 4.37 -	Histograma da figura 4.36.	92
Figura 4.38 -	Imagem com Listas - sistema Sinar	93
Figura 4.39 -	Histograma da figura 4.38.	93
Figura 4.40 -	Imagem com Quadriculado - sistema Sinar	94
Figura 4.41 -	Histograma da figura 4.40.	94
Figura 4.42 -	Imagem com Diagonal - sistema Provia 100	95
Figura 4.43 -	Histograma da figura 4.42.	95
Figura 4.44 -	Imagem com Listas - filme Provia 100	96
Figura 4.45 -	Histograma da figura 4.44.	96
Figura 4.46 -	Imagem com Quadriculado - filme Provia 100	97
Figura 4.47 -	Histograma da figura 4.46.	97
Figura 4.48 -	Imagem com Quadriculado menor - filme Provia 100.....	98
Figura 4.49 -	Histograma da figura 4.48.	98
Figura 4.50 -	Kodak 14n com 14 MP e sensor CMOS	100
Figura 4.51 -	Nikon D-80 com 10 MP e sensor CCD	101
Figura 4.52 -	Nikon D-70 com 6 MP e sensor CCD	101
Figura 4.53 -	Imagem com Diagonal - sistema reflex	102
Figura 4.54 -	Imagem com Listas - sistema reflex	102
Figura 4.55 -	Imagem com Quadriculado - sistema reflex	102
Figura 4.56 -	Imagem RGB-a.....	106
Figura 4.57 -	Imagem RGB-b.....	107
Figura 4.58 -	Imagem RGB-c.....	107

Figura 4.59 -	Imagem RGB-d.....	107
Figura 4.60 -	Imagem RGB-e.....	108
Figura 4.61 -	Imagem RGB-f.....	108
Figura 4.62 -	Imagem RGB-g.....	108
Figura 4.63 -	Imagem com entropia máxima: $H=8$	109
Figura 4.64 -	Imagem feita com sistema Leaf	111
Figura 4.65 -	Histograma da figura 4.64.	111
Figura 4.66 -	Histograma da figura 4.64.	112
Figura 4.67 -	Histograma da figura 4.64.	112
Figura 4.68 -	Imagem feita com Sistema Sinar	113
Figura 4.69 -	Histograma da figura 4.68.	113
Figura 4.70 -	Histograma da figura 4.68.	114
Figura 4.71 -	Histograma da figura 4.68.	114
Figura 4.72 -	Imagem feita com filme Fuji Provia 100	115
Figura 4.73 -	Histograma da figura 4.72.	115
Figura 4.74 -	Histograma da figura 4.72.	116
Figura 4.75 -	Histograma da figura 4.72.	116
Figura 4.76 -	Filme 500x500 pixels	117
Figura 4.77 -	Histograma da figura 4.76.	117
Figura 4.78 -	Imagem feita com filme Provia ISO 100	118
Figura 4.79 -	Histograma da figura 4.78.	118
Figura 4.80 -	Imagem inclinada feita com filme	119
Figura 4.81 -	Histograma da figura 4.80.	119
Figura 4.82 -	Texto com 1 000 x 500 pixels em JPG usado para a comparação das objetivas	121
Figura 4.83 -	Pequeno animal marinho corado	125
Figura 4.84 -	Variação da entropia por canal em função do filtro de nitidez aplicado	126
Figura 5.1 -	Conjunto de linhas de alto contraste, 500 x 100 pixels	128
Figura 5.2 -	Conjunto de linhas de baixo contraste, 500 x 100 pixels	128
Figura 5.3 -	Histograma da figura 5.1 de alto contraste local	129
Figura 5.4 -	Histograma da figura 5.2 de baixo contraste local.....	129
Figura 5.5 -	A mesma cena fotografada com a Nikon D-70 e Nikon D-80	133
Figura 5.6 -	Imagem com 500x500 pixels; os valores em verde indicam a intensidade dos canais RGB em cada posição.....	136
Figura 5.7 -	Variação da entropia por canal para a imagem com máscara de nitidez 100-20	137

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 -	Tamanho de arquivos com diferentes compactações em JPEG.....	39
Tabela 3.1 -	Resolução de monitores	51
Tabela 3.2 -	Resolução de câmeras digitais.....	51
Tabela 3.3 -	Faixa dinâmica de algumas câmeras	57
Tabela 4.1 -	Resultados da entropia informacional para os sistemas Leaf, Sinar e Provia.....	99
Tabela 4.2 -	Resultados do cálculo da entropia para a câmera e objetivas Kodak-T.....	103
Tabela 4.3 -	Resultados do cálculo da entropia para a câmera e objetivas Kodak-M.....	103
Tabela 4.4 -	Resultados do cálculo da entropia para a câmera e objetivas Nikon D-80	104
Tabela 4.5 -	Resultados do cálculo da entropia para a câmera e objetivas Nikon D-70	104
Tabela 4.6 -	Resultados da entropia informacional total para os sistemas Leaf, Sinar e Provia.....	120
Tabela 4.7 -	Resultados da determinação da Entropia Informacional para uma câmera Kodak 14n e diferentes objetivas	122
Tabela 4.8 -	Valores da entropia informacional em função do tempo de exposição para uma mesma abertura . VE=5 para ISO 80	123
Tabela 5.1 -	Valores de Entropia Informacional.....	130
Tabela 5.2 -	Valores de Entropia Informacional para a Kodak T.....	131
Tabela 5.3 -	Valores de Entropia Informacional para a Kodak M.....	131
Tabela 5.4 -	Valores de Entropia Informacional Nikon D-80	132
Tabela 5.5 -	Valores de Entropia Informacional Nikon D-70.....	132
Tabela 5.6 -	Valores de Entropia Informacional para imagens obtidas com diferentes câmeras e a mesma objetiva.....	133
Tabela 5.7 -	Valores de Entropia Informacional	134
Tabela 5.8 -	Valores de Entropia Informacional RGB	135
Tabela 5.9 -	Valores da entropia informacional em função do tempo de exposição para uma mesma abertura . VE=5 para ISO 80	135
Tabela 5.10 -	Valores de Entropia Informacional	137

Sumário

INTRODUÇÃO	15
1 HISTÓRICO.....	20
2 IMAGENS DIGITAIS.....	28
2.1 Estrutura das imagens digitais.....	28
2.2 Cores nas imagens digitais.....	32
2.3 Formatos de arquivos digitais	34
3 CÂMERAS DIGITAIS	41
3.1 A fotografia digital	42
3.2 Os sensores digitais	43
3.2.1 Características dos sensores	49
3.3 Câmeras digitais e seu funcionamento	59
4 METODOLOGIA E APLICAÇÕES.....	63
4.1 Teoria da informação	63
4.2 Objetivos da teoria da comunicação	66
4.3 A entropia informacional	68
4.4 Aplicações do método para imagens sintéticas.....	72
4.4.1 Imagens sintéticas e a entropia	72
4.5 Aplicações do método para imagens fotográficas em sistemas digitais de alta resolução.....	86
4.5.1 Resultados de cálculo da entropia informacional.....	88
4.6 Aplicações do método para imagens fotográficas em sistemas digitais reflex.....	99
4.7 Aplicações do método para imagens sintéticas em RGB	105
4.7.1 Entropia informacional de imagens sintéticas em RGB.....	106
4.8 Aplicações do método para imagens fotográficas em RGB.....	110
4.9 Determinação da entropia informacional em uma situação específica e prática com mudanças de objetivas	120
4.10 Determinação da entropia informacional em uma situação específica e prática com mudanças no tempo de exposição	122
4.11 O uso dos filtros de nitidez e a entropia informacional	123

5 CONCLUSÕES	127
Conclusão I	128
Conclusão II.....	130
Conclusão III	131
Conclusão IV.....	132
Conclusão V	133
Conclusão VI	134
Conclusão VII.....	134
Conclusão VIII.....	135
Conclusão IX.....	136
 REFERÊNCIAS	 138

Introdução

Desde a popularização das câmeras fotográficas digitais nos meados da década de 1990, a preocupação com a qualidade das imagens digitais tem sido uma constante.

Durante o longo período em que os filmes foram utilizados na fotografia, a qualidade das imagens fotográficas era analisada a partir da observação direta do filme com o uso de microscópios e também através da observação das cópias fotográficas em papel.

A partir dessas práticas, alguns parâmetros foram sendo estabelecidos como, por exemplo, a determinação da função de transferência de modulação – valores elaborados por técnicos em situações controladas de laboratórios de testes e que muitas vezes representavam pouco para o fotógrafo [1] [2].

A modulação de um padrão senoidal pode ser definida como:

$$M = \frac{M_i}{M_o} \quad \text{Intro. - 1}$$

$$M_o = \frac{E_{o \max} - E_{o \min}}{E_{o \max} + E_{o \min}} \quad \text{Intro. - 2}$$

$$M_i = \frac{E_{i \max} - E_{i \min}}{E_{i \max} + E_{i \min}} \quad \text{Intro. - 3}$$

Sendo E , a intensidade, E_o , a intensidade do objeto e E_i , a da imagem. Os valores $E_{\min}$ e $E_{\max}$ representam os valores mínimo e máximo das intensidades.

A intensidade é definida como :

$$E = \left(\frac{2J_1(Z)}{Z} \right)^2 \quad \text{Intro. - 4}$$

sendo J_1 , uma função de Bessel de ordem 1 e

$Z = \frac{2\pi}{\lambda r f}$, sendo λ o comprimento de onda, r a distância radial e f a abertura.

A função de transferência de modulação em fotografia é determinada a partir das medidas de M , Introd. - 1, de um padrão senoidal com frequência (ν) variável. O gráfico de M em função de ν é o que se denomina função de transferência de modulação.

Para o fotógrafo, a escolha de uma objetiva fotográfica era feita a partir da tradição na construção de aparelhos ópticos. Tradicionais fabricantes ópticos alemães eram preferidos aos americanos, franceses e japoneses.

Com o desenvolvimento das câmeras digitais, o problema da análise da qualidade das imagens se agravou. Frequentemente as imagens são avaliadas a partir dos monitores dos computadores; monitores que têm características diferentes, calibrações absolutamente díspares e tempos de uso não controlados.

Esse tipo de análise tem, até hoje, sido feito ou de maneira subjetiva, pela simples observação das imagens por parte do fotógrafo, ou seguindo parâmetros definidos matematicamente [3][4][5]. Embora permitam análises sofisticadas, estão longe do dia-a-dia do profissional de fotografia. Atualmente a entropia é usada em conjunto com outros parâmetros para avaliação de imagens ópticas [6].

O objetivo deste trabalho é apresentar uma proposta numérica para avaliação da qualidade das imagens digitais, independente dos monitores e que permita ao fotógrafo o uso de interfaces amigáveis com programas de cálculo. Para isso, usaremos o conceito de entropia informacional como uma medida de complexidade e organização da imagem.

Essas idéias já foram aplicadas com sucesso na resolução de problemas de interpretação de dados e imagens em estudos biológicos. Piqueira, Serboncini e Monteiro [7] descreveram as tentativas de se estabelecer medidas de complexidade em sistemas biológicos a partir da teoria da informação. De acordo com estes autores [7], os primeiros estudos apareceram na literatura na década de 1950, a partir dos trabalhos de Dancoff e Questler, em 1953 e foram seguidos por Apter e Wolpert, 1965, Sauders e Ho, 1976, Papetin, 1980, Hopfield, 1994, Piqueira, 1994, 2004, e Rojdestvenski e Cottam, 2000, que procuraram estabelecer uma estrutura geral para essa abordagem.

Ainda de acordo com Piqueira, Serboncini e Monteiro [7], esses conceitos foram aplicados em diversas áreas de conhecimento: na genética por Conrad e Liberman (1982), e Schmitt e Herzel (1977); na teoria da evolução por Wallace e Wallace (1998); na psicologia por Thomas (1991); na ecologia por Torres (1990);

nas neurociências por Rieke *et al* (1997), e Mazza *et al* (2004); e no comportamento animal por Mc Cowan *et al* (1999), e Silva *et al* (2000).

Nossa proposta é de avaliação da entropia informacional de uma imagem digital feita dentro de determinados critérios e sua associação com a qualidade das imagens digitais produzidas por um sistema, isto é, uma objetiva fotográfica, um sensor digital do tipo CCD (*charge-coupled device*) ou CMOS (*complementary metal-oxide semiconductor*), o sistema de processamento de sinal e também o programa para a formação da imagem em determinado formato de arquivo.

A determinação da entropia informacional de uma imagem digital pode ser um critério válido e importante na determinação da qualidade dos sistemas fotográficos digitais, uma vez que os experimentos podem ser padronizados e os resultados experimentais são significativos.

Usando a definição de entropia informacional de Shannon [8] e uma proposta para a definição de entropia em RGB, o presente trabalho pretende analisar os seguintes itens:

- 1- Determinação da entropia informacional para imagens sintéticas, isto é, imagens digitais criadas a partir do Photoshop da Adobe, a partir de imagens que foram salvas no formato TIFF e posteriormente convertidas para o formato JPEG.
- 2- Comparação entre a entropia informacional de um conjunto de imagens feitas com backs digitais de alta resolução e filme positivo escaneado em alta resolução.
- 3- Comparação entre a entropia informacional de imagens obtidas com câmeras reflex e diferentes objetivas.
- 4- Determinação da entropia informacional em RGB de imagens sintéticas.
- 5- Determinação da entropia informacional em RGB de imagens feitas com backs digitais de alta resolução e filme fotográfico.

- 6- Determinação da entropia informacional de uma imagem de alto contraste realizadas com uma mesma câmera digital e diferentes objetivas.
- 7- Determinação da entropia informacional de uma imagem com a mesma luminância, mesma câmera, mesma objetiva, mesma abertura variando-se o tempo de exposição.
- 8- Analisa-se a influência dos filtros de nitidez aplicados a uma imagem e os valores da entropia informacional em RGB.

O objetivo final é que o programa para determinação da entropia informacional e os critérios para a realização dos testes sejam tornados públicos e, dessa forma, as avaliações dos sistemas digitais possam, em certa medida, tornar-se de domínio público.

A fim de alcançar os objetivos apresentados, a presente tese foi organizada de acordo com a seguinte estrutura:

- Após a Introdução aqui apresentada, segue-se o Capítulo 1 onde se apresenta o histórico dos avanços do conhecimento relativos à fotografia digital.
- No Capítulo 2, são descritas as características das imagens e arquivos digitais.
- O Capítulo 3 descreve as características das câmeras digitais e seu funcionamento.
- No Capítulo 4 são descritos os procedimentos metodológicos e apresentados os resultados obtidos nos experimentos realizados.
- No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões do presente estudo.
- As Referências utilizadas são listadas ao final.

Capítulo 1

Histórico

Em 1980, o lendário fotógrafo americano Ansel Adams, que desenvolveu um complexo e bem estruturado método de exposição para imagens fotográficas - o Sistemas de Zonas - já se preocupava com a análise de imagens digitais. De acordo com Mikkel Aaland [9], Adams, sempre muito bem informado, já considerava o dia em que “estudantes sérios” iriam interpretar seus negativos fotográficos usando métodos eletrônicos, como scanners e computadores de acordo com o mesmo espírito que um músico moderno interpreta Bach ou Vivaldi com um instrumento contemporâneo.

Desde a invenção da fotografia em 1839, o aparecimento da fotografia digital (uma associação entre câmera e computador) representou uma revolução sem precedentes. Naturalmente, o aparecimento das emulsões secas, dos filmes com bases flexíveis, do formato 35 mm e dos filmes coloridos para uso amador foram importantes, mas nada comparável às novas tecnologias digitais. Em poucos anos, duas tecnologias aparentemente distantes, representadas pelo computador e pelas câmeras fotográficas somaram-se e revolucionaram o mundo das imagens. Isso se constituiu não apenas em uma revolução técnica, mas também uma mudança

perceptiva, cultural e ética, cujas conseqüências ainda estão sendo analisadas [10]. A fotografia digital permite, sem os limites do uso dos filmes, que imagens possam ser produzidas, processadas, transmitidas e visualizadas de forma quase instantânea e sem que disso derivem problemas ambientais, essencialmente causados pelo uso dos materiais fotográficos: filmes, papéis e química empregada.

É provável que o filme fotográfico sobreviva como um processo alternativo para poucos, assim como hoje o são o calótipo, o albúmen, o daguerreótipo e muitos outros interessantes processos fotográficos que eram populares no século XIX. Na realidade, o futuro do filme, um produto típico da Revolução Industrial, será determinado pelo mercado, e não por seus importantes aspectos históricos e artísticos. Enquanto existirem interessados em número razoável, o filme será produzido; depois, apenas pequenos fabricantes o produzirão para um mercado restrito e elitizado, único capaz de arcar com custos altos [11].

No início da década de 1920, as primeiras imagens digitais já eram transmitidas através do cabo submarino Bartlane, entre Londres e Nova York [12]. Essas imagens, naturalmente de qualidade precária, representaram um grande avanço em termos de comunicação, transmitidas entre os dois lados do Atlântico Norte em aproximadamente três horas, um feito notável para a época, uma vez que os próprios navios que cruzavam o Atlântico levavam cerca de uma semana na viagem. Um equipamento especializado de impressão codificava as imagens para a transmissão a cabo, e estas eram reconstruídas no terminal receptor. O primeiro sistema Bartlane era capaz de identificar imagens em cinco níveis de brilho distintos. Em 1929 a capacidade foi aumentada para quinze níveis.

A seguir são apresentados alguns exemplos de fotografias geradas com a utilização dos recursos mencionados acima.

Fig. 1.1. Imagem produzida em 1921, a partir de uma fita codificada impressa por impressora telegráfica com tipos especiais [13]

Fig. 1.2. Imagem digital feita em 1922, a partir de uma fita perfurada após os sinais terem cruzado o Atlântico duas vezes [13]

Fig. 1.3. Imagem sem retoques dos Generais Pershing e Foch, transmitida por cabo em 1929 de Londres a Nova York, por um equipamento de 15 tonalidades [13]

Em 1957, Russel A. Kirsch, pesquisador do National Bureau of Standards escançou uma imagem de forma que pudesse ser visualizada e processada em um computador. Antes disso, computadores processavam equações guardando informações em cartões perfurados. A possibilidade de associar um monitor ao computador, que foi um dos mais significativos desenvolvimentos da computação gráfica não havia ocorrido até 1955 [9]. Apesar do pioneirismo de Kirsch, um grande desenvolvimento nas imagens digitais foi patrocinado pela NASA (National Aeronautics and Space Administration) e, em Julho de 1964, pesquisadores do Jet Propulsion Lab (JPL) começaram a receber sinais na *Mariner 7* em sua viagem à Lua. À medida que as viagens tornavam-se mais ambiciosas, as técnicas de captura e processamento de imagens foram se sofisticando. As primeiras câmeras usavam sensores orthicon e necessitavam muita energia, a transmissão era analógica e os sinais muito problemáticos. Nas câmeras mais novas, sensores vidicom, desenvolvidos pela NASA e RCA (Radio Corporation of America) foram utilizados.

Quando os sinais passaram a serem digitalizados, a qualidade das imagens melhorou muito graças também a novos algoritmos para análise. As novas tecnologias desenvolvidas pela NASA e RCA foram usadas nas ciências médicas, segurança, aplicações militares, microscopia. Foram inclusive utilizadas na localização do navio transatlântico Titanic, através de câmeras digitais colocadas no Argos, veículo submarino de grande profundidade. Em função da iluminação deficiente, espalhamento da luz, e ruído no cabo, as imagens que chegavam ao navio-base eram precárias. O processamento digital recuperou o sinal e permitiu que os destroços fossem localizados.

Em 1979 , a Scitex, uma companhia israelense que produzia equipamentos para desenhos e pinturas na área têxtil, voltou-se para o mercado editorial e passou a produzir o Responce 300 System, um equipamento para a área de pré-impressão que permitia ao operador modificar detalhes de uma imagem em quatro cores e também combinar imagens diferentes. O sistema desenvolvido pela Scitex usava grande parte das técnicas de processamento desenvolvidas pela NASA na década anterior mas era acessível apenas às grandes empresas, pois seus custos eram de centenas de milhares de dólares. Com o desenvolvimento dos micro chips e dos processos de miniaturização, os preços foram sendo reduzidos. Fruto desse barateamento, na década de 1980 a tecnologia das imagens digitais já estava acessível ao grande público.

Entre os passos mais importantes no desenvolvimento da tecnologia digital empreendidos a partir da década de 1980 pode-se destacar:

- Em 1981 a Sony apresenta ao mercado a Mavica, primeira câmera digital destinada ao consumidor final. A Mavica usava um sensor de estado sólido no lugar do filme e era praticamente um protótipo. Em 1988, modelos mais elaborados encontraram receptividade em algumas empresas de foto jornalismo e agências de segurança.

- Em Agosto de 1981, a IBM (International Bussines Machines), usando um sistema operacional desenvolvido pela Microsoft chamado MS-DOS (Microsoft Disk Operating System) ou PC-DOS (Personal Computer Operating System), lançou no mercado os primeiros computadores pessoais de arquitetura aberta. Isso propiciou a outras companhias o uso do mesmo sistema operacional e a produção de computadores pessoais em larga escala.
- Em 1984, a Apple lançou no mercado o Macintosh, que vinha sendo desenvolvido desde de a década de 1970 e apresentava uma interface amigável ao operador. Como a arquitetura usada pela Apple era fechada, os desenvolvedores de software deveriam produzir programas específicos para essa plataforma, o que tornava os programas usados pela Apple mais caros do que os programas usados pelo sistema MS-DOS. Por outro lado, a facilidade na operação dos sistemas Apple teve grande influência no seu uso pela indústria gráfica e no aparecimento do *desktop publishing*.
- Em 1985, duas empresas americanas, a Thunderscan e MacVision, lançaram no mercado scanners a preços inferiores a US\$ 200 especialmente para a plataforma Macintosh. Esses sistemas de baixa resolução permitiram que fotografias pudessem ser usadas em computadores domésticos.
- No ano de 1986, a placa Targa produzida pela AT&T (American Telephone & Telegraph), foi lançada, permitindo que imagens coloridas fossem visualizadas em computadores pessoais, através do uso de um programa especial.

- A próxima revolução patrocinada pela Apple foi o lançamento dos Macintosh II, com monitores coloridos de 8 bits por canal e 16,7 milhões de cores, lançados em 1987.
- Em 1988, diversos periféricos foram apresentados ao mercado: um *slide printer*, dispositivo que, usando luz, sensibilizava um filme fotográfico positivo ou negativo a partir de um arquivo digital tratado em computador, o primeiro scanner para transparências 35mm que convertia informações analógicas de um filme em arquivo digital; uma impressora digital de tom contínuo, produzida pela Kodak, que imprimia imagens de 10 x 12 cm, a partir de arquivos digitais. Também em 1988, diversos programas para tratamento de imagens foram lançados: o ImageStudio, para computadores Apple, processava imagens de 8 bits em um canal, o PhotoMac que foi o primeiro programa a processar imagens de 24 bits (8 bits por canal). Ambos funcionavam como um laboratório digital em que controles de exposição, contraste, correção de cores e corte eram possíveis. Algumas funções importantes para retoques como corte e cola também eram realizadas.
- Em 1989, o primeiro padrão JPEG (Joint Photographic Experts Group) foi estabelecido como um padrão para compressão de imagens, uma vez que os arquivos eram muito grandes para a capacidade de processamento dos equipamentos da época. Ainda em 1989, a Microsoft inicia os trabalhos com o sistema operacional Windows, para computadores que funcionavam com DOS. O novo sistema contribuiu muito para que os PC se tornassem, também, equipamentos apropriados para tratamento digital de imagens [9].

A década de 1990 e os primeiros anos deste século foram de evolução muito rápida; as primeiras câmeras digitais profissionais lançadas entre 1994 e 1995 tinham resolução da ordem de quatro megapixel e custavam aproximadamente 40

mil dólares. Atualmente uma câmera amadora compacta tem resolução de 10 megapixel e custa menos do que seiscientos dólares. Da mesma forma, a capacidade de processamento dos computadores e a quantidade de recursos dos programas de tratamento vêm aumentando de forma muito rápida.

Capítulo 2

Imagens digitais

2.1 A estrutura das imagens digitais

Todas as imagens digitais, geradas através do uso de uma câmera digital, resultados do escaneamento de um original analógico ou geradas por um computador apresentam a mesma estrutura. São todas formadas por pixels (*picture elements*). Esses elementos formadores da imagem digital contêm todas as informações necessárias para que essas imagens possam ser analisadas, tratadas, visualizadas em um monitor e, eventualmente, impressas em um suporte físico como papel.

Pixels são estruturas pequenas cujas dimensões estão relacionadas com o sistema digitalizador – câmera ou scanner - e o número de pixels formadores de uma imagem digital está relacionado com a qualidade da imagem e com o tamanho físico de sua visualização. Quanto maior o número de pixels presentes na imagem digital, maior será sua qualidade quando ampliada.

Nas imagens digitais, cada pixel ocupa uma posição que é determinada numericamente a partir de um par de eixos cartesianos orientados, como mostra a figura 2.1.

Fig. 2.1. Sistema de coordenadas de uma imagem digital

Na figura acima, o pixel indicado pela seta à direita tem coordenadas $x=2$ e $y=4$, os valores $R=152$, $G=233$, $B=239$ são valores numéricos associados a uma imagem de 24 bits para cada canal R (red), G (green), B (blue), que são utilizados na formação dessa imagem.

Em uma imagem digital, cada pixel que a constitui tem apenas uma cor, isto é, um pixel não pode apresentar uma subdivisão. Essa cor pode ser obtida a partir de níveis de cinza ou ser o resultado da composição de níveis de intensidade de três canais, como ocorre em uma imagem RGB, o sistema mais comum usado pelas câmeras digitais. O modelo de cor RGB, usado na captura pelas câmeras digitais e o sistema CMYK (ciano, magenta, amarelo e preto) usado nas impressões off-set

dependem do sistema digital empregado enquanto o modelo de cor Lab é independente do sistema utilizado.

Sob o ponto de vista matemático, uma imagem digital pode ser entendida como uma função de intensidade luminosa bidimensional $f(x,y)$, em que o valor ou amplitude de f nas coordenadas espaciais (x,y) dá a intensidade da imagem naquele ponto ou pixel [14].

Como a luz é uma forma de energia, $f(x,y)$ deve ser positiva e finita, isto é:

$$0 < f(x,y) < \infty$$

Uma imagem digital pode ser representada como uma matriz $N \times M$ em que cada pixel é uma quantidade discreta.

$$f(x,y) = \begin{matrix} f(0,0) & f(0,1) & \dots & \dots & f(0,M-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & \dots & \dots & f(1,M-1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ f(N-1,0) & f(N-1,1) & \dots & \dots & f(N-1,M-1) \end{matrix} .$$

ou ainda , dependendo da origem do sistema cartesiano utilizado:

$$f(x,y) = \begin{matrix} f(1,1) & f(1,2) & \dots & \dots & f(1,M) \\ f(2,1) & f(2,2) & \dots & \dots & f(2,M) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ f(N,1) & f(N,2) & \dots & \dots & f(N,M) \end{matrix}$$

Quando imagens digitais são analisadas em programas como o MatLab ou MathCad é importante que a origem do sistema esteja claramente identificada.

Apesar da independência existente entre cada um dos pixels, é possível se estabelecer uma série de relacionamentos entre eles. Esses relacionamentos são utilizados nos programas de tratamento de imagens.

Um pixel p de coordenadas (x,y) , que não esteja na periferia de uma imagem digital, possui quatro vizinhos horizontais e verticais, cujas coordenadas são dadas por:

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

A figura 2.2 mostra uma imagem digital com 256 x 256 pixels criada no programa Photoshop da Adobe onde dois círculos pretos foram construídos.

A figura 2.3 mostra uma parte da matriz de intensidade dos pixels da mesma imagem. A região em que os valores são 255 correspondem à área branca da imagem, os valores zero, correspondem aos círculos pretos e os valores intermediários como 144, 216, etc. correspondem às regiões de transição entre as duas áreas, pois nesses locais os pixels assumem valores intermediários.

Fig. 2.2. Imagem em escala e cinzas com 256 x 256 pixels

	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176
119	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255
120	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255
121	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255
122	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255
123	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255
124	60	102	144	180	216	255	255	255	255	255
125	0	0	0	0	0	6	66	123	186	252
126	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12
127	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
128	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
129	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
130	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
131	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fig. 2.3. Representação do nível de alguns pixels da Fig. 2.2.

2.2 Cores nas imagens digitais

Imagens digitais podem ser coloridas ou monocromáticas, nas imagens monocromáticas os pixels podem apresentar variações em brilho dentro de determinados valores. O número de tons que uma imagem digital pode apresentar depende da profundidade de cor e o número de tons da imagem por canal é dado por:

2^n = número de tons, onde n representa a profundidade de cor.

Usualmente, imagens fotográficas *grayscale* são imagens em 8 bits. Isto significa que os pixels podem apresentar 256 valores tonais – valores entre 0 (preto) e 255 (branco).

Dessa forma, uma imagem digital de profundidade de cor $n=1$, é formada por apenas dois tons, se $n=2$ a imagem é formada por 4 tons de cinza e assim sucessivamente.

A escolha de $n=8$ para imagens fotográficas monocromáticas não é arbitrária ou econômica, é na verdade, associada a percepção visual [15].

De acordo com Ctein [15], o olho humano pode diferenciar aproximadamente 650 diferentes variações tonais contínuas dentro de uma escala de cinzas, o que corresponde a aproximadamente 2% de variação na luminância entre duas regiões diferentes e contíguas. Para a grande maioria das cenas fotográficas, a variação tonal é inferior a 200 passos, o que significa que uma imagem com profundidade de cor de 8 bits é suficiente para a grande maioria das situações fotográficas. Em algumas situações fotográficas em que uma variação tonal é muito suave, o intervalo entre dois tons contíguos pode ser mal representado digitalmente em 8 bits e, assim, a imagem pode apresentar um problema denominado *banding*. Nas situações de *banding* a imagem digital apresenta variações tonais mais bruscas do que as existentes na cena fotografada. Por essa razão, câmeras profissionais usam 16 bits para a representação das imagens digitais. Esse processamento produz arquivos duas vezes maiores mas com qualidade muito superior em diversas situações.

Nas situações em que imagens coloridas são necessárias, as imagens digitais são produzidas a partir de três canais de cores, o sistema RGB.

Da mesma forma que nas imagens *grayscale*, as imagens RGB podem ser capturadas em 8 ou 16 bits. Naturalmente, melhores resultados são obtidos quando a captura se processa em 16 bits por canal de cor.

2.3 Formatos de arquivos digitais

Um formato de arquivo é um método através do qual informações são lidas, escritas e guardadas em computadores. Existem diferentes formatos de arquivos, alguns tornaram-se obsoletos e outros têm uso muito específico, como os arquivos DICOM(Digital Imaging and Communication in Medicine), usados em imagens médicas.

Na fotografia digital, atualmente três formatos de arquivos são usados: arquivos JPEG (Joint Photographic Experts Group – formado em 1986), arquivos TIFF (Tagged Image File Format) e arquivos RAW, que são arquivos “proprietários”, isto é, desenvolvidos por fabricantes de sistemas digitais com características próprias e muitas vezes “não abertas”.

Arquivos JPEG ou JPG são arquivos compactados de uso muito geral. Usados em todas as câmeras amadoras, seu “tamanho” depende fortemente da cena fotografada.

O formato JPEG ou JPG é "lossy," o que significa que uma imagem depois de compactada através desse sistema e novamente aberta torna-se “diferente”. Existem algoritmos de compressão que são denominados “lossless” mas, nesses casos, a compressão é bem menor, isto é, os arquivos ocupam maior quantidade de memória. É conveniente notar que um arquivo JPEG, ao ser “salvo”, pode ser compactado com diferentes índices de qualidade: quanto maior a qualidade, maior imagem, tanto maior será o uso de memória.

O formato JPEG foi desenvolvido a partir das limitações perceptivas do olho humano, notadamente porque percebemos melhor pequenas variações de brilho do que pequenas variações de cor. Dessa forma, o formato JPEG é apropriado para imagens que serão visualizados por humanos. Quando arquivos JPEG são analisados por máquina, problemas podem surgir mesmo que

imperceptíveis para os olhos [16]. Arquivos JPEG são os arquivos usados em minilabs digitais e também produzem bons resultados quando usados em impressoras jatos de tinta.

Os arquivos RAW, proprietários ou abertos, são arquivos “crus”, isto é arquivos digitais provenientes dos sistemas de captura, sem nenhum tipo de conversão. Arquivos RAW são arquivos em preto e branco, que não têm informações de cores e, por isso, são bastante compactos quando comparados com arquivos TIFF. A formação das cores ocorre através de um processo denominado quantização. Nesse processo, blocos com quatro pixels são usados para a determinação das cores formadoras da imagem.

Arquivos RAW permitem que programas de tratamento de imagem como o Photoshop da Adobe, realizem algumas modificações de caráter geral na imagem, mas não permitem o uso de seleções, isto é, a imagem não pode ser modificada localmente. Por essa razão, arquivos RAW devem se tornar muito importantes, e já são chamados “negativos digitais”. No futuro, terão valor legal, o que significa que poderão ter o mesmo caráter testemunhal que a fotografia analógica teve durante muito tempo.

Arquivos TIFF são arquivos pouco compactados, que podem ser usados para imagens digitais monocromáticas ou coloridas em 8 ou 16 bits. São considerados arquivos “profissionais”, isto é, são usados por fotógrafos profissionais, designers, e impressores.

O tamanho de um arquivo digital TIFF é definido em função do número de pixels presentes na imagem e da profundidade de cor, isto é, o número de bits usados por canal. Ao contrário do formato JPEG, possíveis variações da cena fotografada não modificam o tamanho de um arquivo TIFF. O tamanho ou peso de um arquivo TIFF em 8 bits por canal pode ser calculado da seguinte forma:

$$A_{\text{TIFF},8} = \frac{\text{Altura}(\text{pix}) \times \text{Largura}(\text{px}) \times 8 \times 3}{8 \times 1024 \times 1024} [\text{MB}] \quad 2.3.1$$

Como o produto da altura da imagem pela sua largura é a resolução do sistema digital, pode - se escrever :

$$A_{\text{TIFF},8} = \frac{\text{Resolução} \times 3}{1024^2} [\text{MB}] \quad 2.3.2$$

Sendo o denominador da fração o fator de conversão de bit para Mbyte.

Uma imagem em RGB, com três canais de 16 bits por canal tem seu tamanho de arquivo determinado pela equação:

$$A_{\text{TIFF},16} = \frac{\text{Altura}(\text{pix}) \times \text{Largura}(\text{pix}) \times 16 \times 3}{8 \times 1024 \times 1024} [\text{MB}] \quad 2.3.4$$

$$A_{\text{TIFF},16} = \frac{\text{Resolução} \times 6}{1024^2} [\text{MB}] \quad 2.3.5$$

É freqüente o argumento que o número 3 no numerador da equação 2.3.1 diz respeito ao número de canais usados para a representação de imagem, mas, conforme mostrado, isso não é correto. Imagens capturadas em 16 bits por canal, são também imagens em três canais RGB e na equação 2.3.5 o numerador é 6.

O arquivo em 16 bits por canal tem o dobro do tamanho que o arquivo correspondente à mesma resolução em 8 bits por canal. Como em câmeras digitais a resolução do sensor é da ordem de milhões de pixels (megapixels), o arquivo em TIFF em 8 bits pode ser determinado de forma aproximada pela relação:

$$A_{\text{TIFF},8} \cong 3 \times \text{Resolução}$$

uma vez que 1024^2 é praticamente igual a um milhão.

Como os arquivos RAW são monocromáticos, o tamanho do arquivo é:

$$A_{\text{RAW},8} \cong 1 \times \text{Resolução para 8 bits}$$

$$A_{\text{RAW},16} \cong 2 \times \text{Resolução para 16 bits}$$

Como já foi mencionado, o tamanho de um arquivo JPEG, quando compactado, depende das dimensões da imagem em pixel da profundidade de cor e também da cena fotografada. Quanto maior o número de cores presentes na imagem, maior o arquivo.

As duas imagens JPG apresentadas nas figuras abaixo (Fig. 2.4 e Fig. 2.5), criadas no Photoshop, têm o mesmo número de pixels: 1000 pixels na horizontal e 500 pixels na vertical e abertas tem o mesmo tamanho: 1,43MB. Quando compactadas e gravadas em um disco, entretanto, apresentam tamanhos diversos.

Fig. 2.4. Imagem em JPG com 108 kB

Fig. 2.5. Imagem em JPG com 164 kB

As duas imagens mostradas a seguir (Fig. 2.6 e Fig. 2.7) têm praticamente o mesmo tamanho, abertas ou fechadas, quando gravadas em TIFF.

Fig. 2.6. Imagem em TIFF com 1000 x 500 pixel e 1,43MB no disco

Fig. 2.7. Imagem em TIFF com 1000 x 500 pixels e 1,43 MB no disco

A tabela comparativa apresentada a seguir mostra de que forma um arquivo de 4 MB, produzido no Photoshop, assume diferentes tamanhos quando

“salvo” em diversos formatos. Os itens JPEG (12), JPEG (6), JPEG (1) indicam a compactação usada pelo Photoshop.

Tabela 2.1 - Tamanho de arquivos com diferentes compactações em JPEG

Arquivo de 4 MB produzido no Photoshop 6.0	
TIFF com compressão LZW	2,84 MB
JPEG (12).....	286 kB
JPEG (6)	59 kB
JPEG (1)	46 kB

Fonte: o autor

As figuras 2.8, 2.9 e 2.10 mostradas a seguir, são de um arquivo RAW antes da sua conversão em cores. Como os arquivos RAW são arquivos em tons de cinza, isto é, cada pixel da imagem é representado por níveis de intensidade que variam entre zero e 255, as imagens “RAW” que são mostradas nos monitores são, na verdade, arquivos convertidos para JPEG ou TIFF . Apenas programas específicos podem mostrar imagens RAW na sua forma original. São programas que medem a intensidade luminosa incidente em cada fotodiodo do sistema e geram uma imagem preto e branco.

Fig. 2.8. Arquivo RAW original da câmera

Fig. 2.9. Arquivo RAW com ajuste de brilho

Fig.2.10. Arquivo RAW ampliado mostrando as estruturas da imagem

Capítulo 3

Câmeras Digitais

O surgimento da fotografia digital foi uma grande revolução, superior às revoluções anteriores ocorridas na fotografia, como por exemplo o advento das emulsões secas, o aparecimento dos filmes em bases flexíveis, das câmeras de pequeno porte e dos filmes coloridos.

Sem dúvida, a qualidade das câmeras digitais tem, nos últimos anos, melhorado exponencialmente e seus preços são cada vez mais interessantes, de forma que o mercado fotográfico, inicialmente o profissional e em poucos anos o amador, deve se voltar totalmente para a imagem digital.

O filme fotográfico, um notável método para armazenamento de informações, deve sobreviver por algum tempo, provavelmente como um processo alternativo e de custos elevados. Em comparação com métodos digitais, o filme fotográfico tem duas características importantes: pode ser observado sem o uso de qualquer tipo de interface (computadores, monitores, etc.) e possui longa durabilidade. Filmes e papéis fotográficos bem processados quimicamente e armazenados de forma conveniente podem durar centenas de anos.

Um problema típico das imagens digitais é a sua durabilidade, isto é, a dificuldade de se preservar os processos de recuperação de arquivos digitais. As mídias em que as imagens digitais são gravadas podem também resistir ao tempo, bem guardadas devem resistir à deterioração por dezenas de anos. O problema maior é a preservação dos sistemas de leitura, isto é, o sistema que funciona como interface homem / máquina.

3.1 A fotografia digital

A fotografia digital, isto é, a imagem digital obtida através de uma câmera fotográfica digital, é produzida quando um sensor eletrônico é colocado no plano focal, isto é, o plano onde as imagens são formadas. Nas câmeras convencionais esse é o chamado plano do filme. Atualmente, os sensores disponíveis no mercado para câmeras digitais são de dois tipos: os CCD – *“Charge Coupled Devices”*, mais usados e, por enquanto, oferecendo maior qualidade, e os do tipo CMOS – *“Complementary Metal Oxide Semiconductor”*, de tecnologia mais simples, e custos de produção menores.

Estudos sobre sensores eletrônicos foram iniciados na década de 30. Inicialmente usados para televisão, em 1969, George Smith e Willard Boyle, engenheiros trabalhando nos laboratórios Bell, inventaram o CCD. Desde então, a tecnologia avançou e, em agosto 1981, a Sony apresentou ao mercado mundial a Mavica, (Magnetic Video Camera), nome que ainda hoje é usado em alguns modelos dessa companhia. Na realidade a Mavica desse período era uma sistema analógico. A imagem, ainda analógica, era guardada em um disco magnético chamado Mavipack e depois era digitalizada em um sistema conversor analógico – digital. O CCD da Mavica original tinha apenas 280 000 pixels e as imagens eram precárias.

Em 1991, a Kodak apresentou ao mercado a primeira câmera realmente digital, a DCS 100, um sistema essencialmente digital que operava em um corpo de Nikon F3 com um CCD de 1,5 milhões de pixels. As imagens, que podiam ser vistas em um monitor LCD, eram gravadas em um sistema auxiliar grande e pesado chamado Digital Storage Unit [11].

3.2 Os sensores digitais

O CCD ou o CMOS, seu sucedâneo, funcionam de maneira similar, mas aqui descrevemos o CCD, que ainda é usado em muitas câmeras atualmente.

A estrutura do CCD, de fabricação muito complexa (de 15 a 20 passos industriais), é feita em três diferentes camadas, cujo funcionamento é explicado a seguir.

Fig. 3.1. Estrutura física de um CCD

Fig.3.2. CCD montados em placas de circuitos com 16 MP e 14 MP

Fig.3.3. Sensores tipo CCD com 22 MP, 10,5MP e 4 MP

O princípio de funcionamento do CCD é a conversão de luz em cargas elétricas, similar ao que acontece em um fotômetro convencional. Um CCD é formado por um grande número de elementos sensíveis à luz chamados genericamente

“*photosites*” ou fotodiodos . Cada “*photosite*” corresponde inicialmente a um pixel da imagem. Assim, o número de pixels do CCD corresponde exatamente ao número de “*photosites*” presentes. Nas câmeras fotográficas digitais os “*photosites*” têm dimensões que variam de 3 a 15 micron (10^{-6} m), dependendo do fabricante e das aplicações a que se destinam. Quando a luz incide sobre um “*photosite*” ou pixel, um determinado número de cargas elétricas (elétrons) é liberado da banda de valência da camada de polisilicato, conduzido pela banda condutora da camada de dióxido de silício e armazenado no substrato inferior de silício [17] [18].

O número de cargas elétricas armazenadas é uma função linear da quantidade de luz incidente sobre o pixel, isto, é o número de cargas é diretamente proporcional ao fluxo de luz incidente sobre o pixel.

Fig.3.4. Ilustração que mostra a leitura de cada um dos pixels do CCD [19]

Conforme ilustrado na Fig. 3.4. acima, as linhas são “lidas” de cima para baixo e os sinais enviados para os circuitos auxiliares, amplificador e conversor A/D – analógico – digital [19].

A Figura 3.4 mostra que os milhares de pixels que formam um CCD são analisados por linhas, isto é, os pixels das linhas inferiores transferem suas cargas elétricas (elétrons) para um sistema que “conta” quantas são essas cargas e associa um número a cada pixel da imagem. Sucessivamente, todos os pixels formadores da imagem são analisados, contados e, após uma amplificação do sinal, um

conversor analógico-digital transforma as informações analógicas (número de cargas ou voltagem) em seqüências de dígitos binários.

Fig.3.5. Transformação de medidas analógicas (volts) em números do sistema binário

A Fig. 3.5 mostra como o conversor analógico–digital transforma medidas analógicas (volts) em números do sistema binário [18].

O conversor analógico-digital é um sistema eletrônico que analisa o número de cargas que cada pixel envia e associa um número no sistema binário. Na Figura 3.5, o conversor associa o número zero a uma voltagem zero e o número 255 a uma voltagem de 10 volts. Se um pixel recebe uma quantidade de luz que corresponde a 6,0 volts, através de uma simples regra de três, o valor associado a essa voltagem é 153 ou em notação binária, 1001 1001.

Dessa forma, os usuários de programas como o Photoshop da Adobe podem entender o que significam os valores associados às cores em RGB ou CMYK como, por exemplo, R= 234, G =123, B = 052. Esses números, transformados na notação binária indicam a voltagem para cada pixel ou grupos de pixel em cada canal de cor.

Quanto maior é o número associado a uma determinada cor, mais intensa ela é como indicam as Figuras 3.6a e 3.6b.

Note que na Figura 3.6b a intensidade de azul é superior e, assim, essa tonalidade predomina na imagem.

Fig.3.6a. Imagem produzida no Photoshop da Adobe com cores geradas a partir dos valores RGB [11]

Fig.3.6b. Imagem produzida no Photoshop da Adobe com cores geradas a partir dos valores RGB [11]

Para que uma câmera digital possa produzir uma imagem em cores, os pixels de seu CCD devem ter algum tipo de filtragem, o que significa selecionar a luz proveniente da cena fotografada e atribuir valores maiores às cores mais intensas presentes.

O sistema mais empregado é o CCD de matriz RGB, isto é, os pixels apresentam filtros nas cores vermelho(R), verde(G) e azul(B), e atuam de forma seletiva para essas cores.

Fig. 3.7. CCD com filtros em RGB

A Figura 3.7 mostra um CCD construído no padrão Bayer em que número de pixels com filtro verde é o dobro dos pixels com filtros vermelhos e azuis. O propósito dessa filtragem é aproximar a sensibilidade do CCD à do olho humano, que é mais sensível ao verde. A produção dos filtros para cada um dos pixels é feita a partir de camadas de corantes orgânicos; o filtro vermelho é produzido pela superposição de corantes magenta e amarelo, o filtro verde por corantes ciano e amarelo e o filtro azul por corantes ciano e magenta [11].

Fig. 3.8. Método de obtenção dos filtros RGB no CCD

Fig. 3.9. CCD com a nova filtragem em CMY

3.2.1 Características dos sensores

Cada sensor digital, CCD ou CMOS, apresenta algumas características que são próprias da sua construção e dos sistemas eletrônicos periféricos a ele associados. Essas características são extremamente importantes no que diz respeito à qualidade da imagem produzida e dos custos do sistema.

Cada uma das principais propriedades dos CCDs será apresentada a seguir:

- **Resolução do sensor ou resolução digital**

A resolução é uma das mais importantes características de um CCD ou CMOS, determina o número de fotodiodos que o formam. Está intimamente ligada à qualidade da imagem produzida pela câmera digital.

É importante que se observe que a palavra resolução pode ter diferentes significados. Na fotografia tradicional, a resolução de um sistema determina quantos pares de linha por milímetro um sistema óptico pode “resolver” ou separar. Na análise dos monitores de computadores ou televisões, a resolução determina o número de pixels que são representados na “tela”.

Na fotografia digital o conceito de resolução óptica também existe e é importante mas, infelizmente, por descuido conceitual, resolução acabou tendo um sentido diverso. No mundo digital, resolução (R) é, por definição, o produto do número de pixels na horizontal pelo número de pixels na vertical de uma imagem digital.

Como o número de fotodiodos presente em um sensor digital é grande, é cada vez mais comum que a resolução seja expressa em megapixels, com o prefixo mega representando milhões de pixels formados na imagem.

É oportuno ressaltarmos que freqüentemente usa-se de forma indistinta o número de fotodiodos do sensor ou o número de pixels da imagem – ambos significando resolução digital.

As tabelas 3.1 e 3.2 apresentam alguns valores de resolução para monitores e câmeras digitais:

Tabela 3.1 - Resolução de monitores

Resolução de monitores	
QVGA	320 x 240 pixels
VGA	640 x 480 pixels
SVGA	800 x 600 pixels
XGA	800 x 600 pixels
	1800 x 1440 pixels

Fonte: [11]

Tabela 3.2 - Resolução de algumas câmeras digitais

Resolução de câmeras digitais
480 x 640 pixels $\Rightarrow$ 0,3 Megapixel
768 x 1024 pixels $\Rightarrow$ 0,8 Megapixel
1538 x 2048 pixels $\Rightarrow$ 3,1 Megapixel
2048 x 2048 pixels $\Rightarrow$ 4,1 Megapixel
1920 x 2560 pixels $\Rightarrow$ 4,9 Megapixel
2048 x 3072 pixels $\Rightarrow$ 6,3 Megapixel
4000 x 4000 pixels $\Rightarrow$ 16 Megapixel
4080 x 5440 pixels $\Rightarrow$ 22 Megapixel

Fonte: [11]

Os valores apresentados para a resolução dos monitores correspondem ao número total de pixels representados na “tela” completa do monitor. Quando se reduz a resolução do monitor, todas as imagens tornam-se maiores.

Também é importante que se entenda que os monitores são capazes de representar um determinado número máximo de pixels por unidade de comprimento. De forma geral, essa “resolução” é da ordem de 72 a 79 pixels por polegada [11].

A grande maioria das câmeras digitais tem resolução variável e os valores apresentados pelos fabricantes em seus catálogos ou materiais de informação

dizem respeito à maior resolução possível. O fotógrafo pode modificar a resolução e, dessa forma, preparar sua imagem para determinados fins, além do que pode economizar espaço de memória. Pode ainda determinar as proporções da imagem, isto é, a relação entre o comprimento e a largura da imagem. É muito comum sensores com uma relação de $4/3$, ou seja: comprimento da imagem / largura da imagem = $4/3$, como por exemplo, 2560 x 1920 pixels.

Outros sensores com resolução de 2048 x 1538 pixels produzem imagens na proporção de $3/2$, como acontece com um filme 35 mm.

- **Sensibilidade dos sensores**

Da mesma forma que para um filme ou qualquer emulsão fotográfica se associa uma sensibilidade ISO (International Standart Organization), o mesmo acontece com um CCD ou CMOS.

A sensibilidade do sensor digital do tipo CCD ou CMOS pode variar de um fabricante para outro mas, de uma forma muito geral, a sensibilidade real do sensor varia entre ISO 50 e ISO 100. A relação entre as sensibilidades ISO é linear, isto é, um sensor ou filme fotográfico de ISO 100 é duas vezes mais sensível à luz que um sensor ou filme ISO 50. Nas câmeras de pequeno porte, isto é, câmeras compactas e câmeras digitais que usam corpos de 35 mm tradicionais e mais recentemente em backs digitais, a sensibilidade do sensor pode ser alterada de acordo com as necessidades do fotógrafo. Esse procedimento pode “salvar” uma foto, ou seja, permitir que a imagem seja útil mesmo em situações críticas de luz. Essa possibilidade de se modificar a sensibilidade do sensor em apenas uma imagem é uma grande vantagem em comparação ao filme tradicional.

É claro que a sensibilidade do filme pode ser alterada no processo de revelação mas, quando isso é feito, todas as imagens do filme são também alteradas.

Para o fotógrafo deve ficar claro que um aumento na sensibilidade do sensor é um procedimento eletrônico e, da mesma forma que acontece com filmes, o aumento da sensibilidade provoca o aumento do ruído e a qualidade da imagem tende a piorar, principalmente nas regiões escuras, ou seja, na baixa luz.

Conforme dados da Kodak [20], a sensibilidade ISO de um sensor do tipo CCD pode ser determinada pela relação:

$$\text{ISO} = 15,4 f^2 / L \cdot t \quad 3.4.1$$

O valor 15,4 é uma constante, f representa a abertura da objetiva, L é a luminância de um cartão cinza 18% na cena fotografada em cd/m^2 e t o tempo de exposição, em segundos.

- **Ruído**

O ruído eletrônico é outro problema comum em imagens digitais. Normalmente acontece em regiões de baixa luz e se manifesta como um conjunto de pontos coloridos, normalmente vermelhos e azuis.

O aumento da temperatura do CCD é também uma fonte de ruído. Algumas câmeras digitais de estúdio sofrem superaquecimento quando são usadas durante tempos longos e a qualidade das imagens pode se deteriorar. De acordo com Kodak [20], a relação sinal/ruído (SNR) é uma boa forma de se caracterizar a qualidade de uma imagem digital. Quando $\text{SNR} = 40$ a imagem é excelente, se $\text{SNR} = 10$ a imagem é aceitável, sendo SNR definida a seguir.

$$\text{SNR} = \frac{\text{número de fotons}}{\sqrt{\text{número de fotons}}} \quad 3.4.2$$

para o número de fotons que atingem cada fotodiodo.

- **Sensibilidade espectral dos sensores eletrônicos**

CCDs e CMOSs são sistemas sensíveis a um amplo espectro de radiações. Com alguma sensibilidade ao ultravioleta e grande sensibilidade ao infravermelho, passando é claro, pela região do visível.

Por essa razão, os sensores usados em fotografia recebem filtros que reduzem muito o infravermelho. Em algumas situações particulares como a astronomia, os sensores podem se usados sem os filtros IR. A figura 3.10 mostra a sensibilidade relativa de um CCD em função do comprimento de onda em nanômetros.

Fig. 3.10. Sensibilidade espectral de um sensor CCD [18]

- **A resolução espacial ou frequência espacial**

Sensores digitais são usados para detectar variações da intensidade luminosa em função do tempo e também variações espaciais. A capacidade de detecção depende de cada tipo de sensor e pode ser expressa em resolução espacial. A resolução espacial de um sensor é medida em pares de linhas por milímetros (pl/mm) e determina quantos pares de linhas o sistema pode “separar” ou, usando uma terminologia da óptica, “resolver”.

A resolução espacial pode ser determinada pela frequência de Nyquist que é determinada pela equação:

$$F_N = \frac{1}{2} \varphi \quad 3.4.3$$

sendo φ a dimensão do fotodiodo, medida em micron, isto é, a distância entre os centros de dois fotodiodos vizinhos e a frequência de Nyquist determinada em pares de linhas por milímetro. Por exemplo, um sensor com pixels quadrados de 9 μ m apresenta resolução espacial de 55,5 linhas por milímetro.

- **Faixa dinâmica**

A faixa dinâmica (DR) determina o número de tons que um sistema pode representar. A densidade de uma imagem fotográfica é medida através de um densitômetro óptico e tem valores dentro do intervalo de zero (branco puro) a quatro (preto completo), isto é, menor densidade correspondendo a regiões claras da imagem e maiores densidades correspondendo a regiões escuras [11].

As densidades são medidas numa escala logarítmica e podem ser obtidas através das equações :

Densidade para luz refletida (papel)

$$D = \log \frac{1}{R}$$

$$\text{sendo } R = \frac{\text{intensidade de luz refletida}}{\text{intensidade de luz incidente}}$$

Densidade para luz transmitida (filme)

$$D = \log \frac{1}{T}$$

$$\text{sendo } T = \frac{\text{intensidade da luz transmitida}}{\text{intensidade da luz incidente}}$$

Assim, densidade 3,0 é na realidade 10 vezes maior que densidade 2,0. Uma diferença de intensidade luminosa de 100 : 1 corresponde a uma diferença de densidade de 2,0; uma diferença de intensidade luminosa de 1000 : 1 corresponde a uma diferença de densidade de 3,0. Valores de densidade de transmissão 4,0 são, praticamente, os maiores valores de densidade observados na fotografia (filmes positivos).

A faixa dinâmica é a diferença entre os valores máximo e mínimo das densidades que um sistema, não importa se o detector é um filme, papel fotográfico ou CCD, pode detectar.

$$D_R = D_{\max} - D_{\min}$$

3.4.4

sendo D_R , a faixa dinâmica, e D_{max} e D_{min} os valores máximo e mínimo das densidades. Dessa forma, quanto maior é a faixa dinâmica maior é, em princípio, a quantidade de tons que podem ser percebidos entre as regiões escuras e claras da imagem.

A faixa dinâmica na impressão de uma revista, isto é, a diferença entre as densidades é da ordem de 2,0, e o mesmo acontece para cópias fotográficas coloridas. Filmes negativos podem apresentar faixa dinâmica da ordem de 2,8 e filmes positivos (cromos) da ordem de 3,2.

O cálculo teórico da faixa dinâmica de um CCD depende das dimensões dos pixels e da profundidade de cor, e é muito complexo. Assim, a faixa dinâmica é normalmente determinada apenas de maneira empírica.

Tabela 3.3 - Faixa dinâmica de algumas câmeras

Câmera		Faixa Dinâmica
Nikon Coolpix 990	ISO 100	DR = 2,2
Nikon D1	ISO 200	DR = 2,7
Canon G1	ISO 100	DR = 2,2
Fuji S1 Pro	ISO 320	DR = 2,8

A tabela 3.3 mostra alguns valores de faixa dinâmica publicadas por fabricantes [11]. Um CCD com pixels de 10 μm (micron) e profundidade de cor de 8 bits pode reproduzir 256 tons para cada canal RGB entre a região mais clara e a mais escura de uma cena. Se a profundidade de cor é de 14 bits, 16 384 tons (2^{14}) para cada canal RGB, podem ser reproduzidos.

Uma outra forma de se expressar a faixa dinâmica é medi-la em decibéis (dB). Através de uma relação matemática que leva em conta o número de elétrons máximo (saturação) e mínimo (ruído de fundo) recebidos em cada pixel do CCD.

$$D_R = 20 \log \frac{N_{\text{máx}}}{n_{\text{mín}}} \quad 3.4.5$$

sendo $N_{\text{máx}}$ e $n_{\text{mín}}$ o número de elétrons máximo e mínimo respectivamente.

De acordo com literatura publicada pela Kodak [20], para o sensor KAF 16800 de 4000 x 4000 pixels tem-se:

$$N_{\text{máx.}} = 240\,000 \text{ elétrons e } n_{\text{mín}} = 20 \text{ elétrons.}$$

A partir da equação 3.4.5, a D_R desse sensor é 81,58 dB.

- **Eficiência quântica**

A eficiência quântica é uma característica do CCD e seus sistemas periféricos que mede a eficiência do sistema ao fluxo de luz que atinge cada pixel do sensor. Os CCDs têm uma grande eficiência quântica quando comparados com outros tipos de sensores de luz, filmes, tubos fotomultiplicadores, tubos de imagem Vidicon e o olho humano.

Em um CCD típico usado em câmeras digitais, 15 a 20 fótons na região visível atingindo um pixel do sensor já são suficientes para produzirem cargas de aproximadamente 10 elétrons que podem ser detectados pelo sistema eletrônico.

Além disso, os CCDs são lineares com relação à exposição, o que não acontece com as emulsões fotográficas [17].

- **Mancha ou “Blooming”**

Esse problema está associado a uma deficiência do CCD, quando alguns pixels recebem luz além de um determinado limite, elétrons migram indevidamente de um pixel para os vizinhos causando uma mancha na imagem. É semelhante ao que acontece quando uma região de um filme é super exposta.

Os CCDs mais modernos dispõem de sistemas *antiblooming* eficientes mas, de qualquer forma, áreas de alto brilho devem ser analisadas com cuidado pelo fotógrafo.

3.3 Câmeras digitais e seu funcionamento

As câmeras digitais e seus acessórios estão cada vez mais sofisticados e eficientes, apresentando conceitos e projetos que seriam inviáveis em câmeras convencionais.

Porém, da mesma forma que os equipamentos tradicionais, as câmeras digitais são divididas em grupos: câmeras compactas com ou sem zoom, câmeras “reflex” de pequeno formato, câmeras de médio e de grande formato. Cada uma delas tem suas especificidades e uso mais apropriado para determinadas situações.

- **Câmeras compactas**

São câmeras de custos mais reduzidos e muitas são excelentes para o uso amador e mesmo para alguns trabalhos profissionais. A grande maioria das compactas apresenta objetivas “zoom”, além de um “zoom” digital que amplia eletronicamente as imagens.

Câmeras compactas têm resolução dentro do amplo intervalo que vai de 1 até 5 ou 6 megapixels e as de maior resolução podem substituir o filme em ampliações fotográficas até 30 x 45 cm [11].

As câmeras compactas modernas armazenam suas imagens em mídias removíveis de diversos tipos como os cartões Compact Flash , Memory Stick, IBM Microdrive, Smartmedia, Multimidia, que tem capacidade de armazenamento variando de 8MB até 8GB. Essas mídias transferem os arquivos digitais diretamente para os computadores através de cabos, normalmente com conexões USB ou os arquivos podem ser “lidos” em dispositivos apropriados que são também conectados aos computadores.

- **Câmeras “reflex” com objetivas intercambiáveis**

Essas câmeras, normalmente usadas por profissionais ou amadores exigentes, são sistemas sofisticados, normalmente dispendo de boas objetivas e resolução no intervalo de 6 a 16 megapixels. As câmeras reflex de resolução mais baixa são, de forma geral, muito rápidas e preferidas por foto-jornalistas, habituados ao uso do motordrive, sistema mecânico que arma o obturador de forma rápida e automática. Essas câmeras têm um eficiente sistema de armazenamento das imagens e permitem seqüências de diversas imagens antes que os arquivos sejam descarregados nas mídias.

Todas essas câmeras têm visores de cristal líquido (LCD), com boa resolução, e permitem ao fotógrafo uma rápida avaliação de suas imagens e características da cena, como por exemplo, um histograma que relaciona número de pixels com luminosidade.

As câmeras “reflex” de maior resolução, na faixa de 11 a 17 megapixels, usam sensores do tipo CMOS, que são mais baratos e cuja qualidade tem melhorado a cada nova geração de câmeras.

Uma característica importante dessas câmeras é a possibilidade de armazenarem imagens no formato RAW.

O formato RAW é um sistema de arquivamento que não permite manipulação, isto é, a imagem, quando no formato RAW, não pode ser alterada por ninguém. Isto significa que os arquivos RAW devolvem à fotografia uma propriedade testemunhal. Em cada arquivo RAW estão registrados datas, horários, aberturas, tempos de exposição, dados que são inalteráveis. É evidente que a manipulação digital é fundamental e, para que ela possa ser feita, o fotógrafo deve salvar o arquivo RAW (preservando-o é claro) em outro formato de arquivo como JPEG ou TIFF e, assim, a imagem pode ser manipulada.

As câmeras “reflex” normalmente são acompanhadas por programas de manipulação eficientes e que permitem que o fotógrafo faça “upload” para a câmera, isto é, mande informações através das conexões USB modificando por exemplo, as curvas de contraste [11].

- **Câmeras digitais de médio formato**

As câmeras digitais de médio formato são adaptações de “backs” digitais às câmeras de médio formato existentes no mercado.

Como muitas das câmeras de médio formato podem usar diferentes “backs”, magazines para filmes convencionais, ou filmes instantâneos, os fabricantes digitais optaram por uma solução interessante. O corpo e as objetivas de médio formato são acoplados a um sistema digital com o CCD e circuitos auxiliares.

O CCD é colocado exatamente sobre o plano focal das câmeras e as imagens formadas pelas objetivas são projetadas nesse plano. É claro que, da mesma forma que acontece com as reflex, existe uma diferença no ângulo de campo. Até o momento, as dimensões dos sensores são inferiores às dimensões dos filmes usados nessas câmeras e, dessa forma, a imagem formada sobre o sensor sofre

uma ampliação denominada fator de corte. O fator de corte é um número que deve ser multiplicado pela distância focal da objetiva. Se o fator de corte para um determinado sensor é, por exemplo, 1,5 , a distância focal da objetiva deve ser multiplicada por este fator de corte para que o ângulo de campo possa ser determinado.

Uma vantagem desse tipo de sistema é o uso de objetivas de grande qualidade sem maiores investimentos e a possibilidade de se fotografar digitalmente e com filmes, bastando para isso substituir o “back”.

Atualmente diversos backs digitais de alta resolução já podem ser usados não conectados a computadores. Esses sistemas possuem visor de LCD, memórias internas ou usam cartões do tipo “compact flash” [11].

Fig. 3.11. Câmera Hasselblad de médio formato com Sinarback 2

Capítulo 4

Metodologia e aplicações

4.1 Teoria da informação

Segundo a teoria da evolução das espécies pela seleção natural, formulada por C. Darwin, o aprimoramento das estruturas físicas de uma espécie resulta da interação entre sua herança genética e as características do meio ambiente como o clima, relevo, disponibilidade de água e de alimento, presença de predadores, etc. Os mais adaptados ao meio tendem a deixar mais descendentes e, assim, suas características tendem a se tornar dominantes [21].

Duas modificações estruturais possibilitaram uma melhor adequação da espécie humana ao meio, em relação a seus antepassados primatas. Foram elas: (1) a locomoção bípede, em decorrência da adaptação dos pés como órgãos de marcha e, conseqüentemente, a adequação do corpo a uma posição ereta e à libertação dos membros anteriores e das mãos, que se adaptaram ao uso de utensílios; e (2) o desenvolvimento do cérebro em tamanho e em complexidade, o que possibilitou o surgimento de uma comunicação simbólica mediante a atribuição de significados específicos a sinais sonoros ou visuais específicos. Tais modificações foram muito

vantajosas para a espécie. Elas permitiram que o homem explorasse ambientes diferentes daqueles onde seus antepassados viviam e que ele criasse um sistema de comunicação bastante eficiente.

Os animais podem aprender e acumular experiências individualmente. Também podem criar inovações individualmente. Mas só podem transmitir essa experiência para outros ou dividi-la socialmente de forma muito limitada devido à falta de técnicas específicas de comunicação. Assim, o que um animal aprende não pode ser eficientemente passado para os outros e sua espécie não é capaz de acumular conhecimentos.

A comunicação entre indivíduos de um mesmo grupo não surgiu na espécie humana; nela, contudo, houve um grande aperfeiçoamento. Provavelmente, as primeiras formas de comunicação foram táteis e químicas. Por exemplo, insetos sociais como formigas são capazes de secretar substâncias químicas, chamadas feromônios, que marcam o caminho entre o formigueiro e a fonte de alimento recém descoberta. Se a fonte é rica em açúcar, maior é a intensidade do feromônio secretado pelas formigas que encontram essa fonte. Desse modo, transmitem-se informações sobre a localização e a qualidade do alimento a ser explorado. Outros animais comunicam-se através de gestos, gritos, danças, cantos, sinais luminosos (vagalumes), descargas elétricas (emitidas por certos peixes) etc.

Na espécie humana, o aparelho fonador passou a ser usado para articular “sons mais elaborados” do que gritos, o que possibilitou a construção de uma linguagem articulada. Isso representou um enorme salto na qualidade e quantidade das mensagens produzidas. Isto é, a comunicação tornou-se maior e mais precisa.

A capacidade de armazenar e processar informações é uma propriedade essencial aos seres vivos. O acúmulo de informações por hereditariedade e por aprendizagem caracteriza a vida em geral. Acredita-se que, na espécie humana, o desenvolvimento de um eficiente sistema de comunicação e de registro do conhecimento tenha influenciado sua própria constituição biológica. Assim, o

processo evolutivo do homem foi e continua sendo determinado não apenas por fatores genéticos e ambientais, mas também por fatores culturais.

Cultura é um sistema social de aprendizagem social exclusivo da espécie humana. Forma-se de um complexo conjunto de códigos através dos quais habilidades e atitudes são transmitidas, adquiridas e re-elaboradas. A Antropologia afirma que muitas das atuais características do homem resultaram da interação entre elementos biológicos e culturais. Esses elementos se entrosam de maneira diferenciada em cada indivíduo, o que o torna, num certo sentido, diferente e singular.

Além da comunicação simbólica, da locomoção bípede e de um sistema nervoso central mais complexo, o comportamento social da espécie humana foi outro fator que colaborou para o nascimento da cultura. A existência de famílias, formadas pelo macho, fêmea e prole, e de hierarquias entre os machos, e entre as fêmeas, levaram à formação de um sistema social que favorecia a difusão dos conhecimentos adquiridos pelo grupo e o compartilhamento de valores e de símbolos.

Com o acúmulo gradual de tradições culturais específicas, a sobrevivência e a característica dos indivíduos foi sendo afetada diferencialmente por fatores como: certas dietas, método de criação de filhos, conceitos religiosos referentes ao valor da vida humana, métodos de luta etc. Provavelmente, os costumes matrimoniais tiveram importantes efeitos acumulativos. Onde ocorriam casamentos consangüíneos, a variabilidade genética tornava-se menor do que onde os casamentos se davam entre pessoas sem grau de parentesco. Na verdade, qualquer população primitiva localizada teve a tendência de formar um estoque genético particular. Com a expansão das populações e os movimentos migratórios, o contato de grupos até então separados virou regra, mantendo-se, assim, a unidade biológica da espécie.

Concluindo, o desenvolvimento da linguagem constituiu um enorme avanço evolutivo para a espécie humana. Seu poder de organizar os pensamentos e a resultante proliferação de organizações sociais conferiu ao ser humano uma enorme elevação no seu potencial de sobrevivência. O homem tornou-se um animal essencialmente comunicativo.

4.2 Objetivos da teoria da comunicação

O armazenamento e a transmissão de informação precisam, inevitavelmente, de uma representação física, tal como a existência ou não de furos em um cartão, spin de elétrons apontando para cima ou para baixo, cargas elétricas presentes ou ausentes em capacitores, a seqüência de letras em um texto, etc. Uma forma conveniente de lidar com a informação é através do uso de seqüências, isto é, cadeias lineares de elementos e/ou estados diferentes. Sistemas típicos que carregam informação numa forma seqüencial são: as linguagens naturais faladas ou escritas, números, polímeros como DNA, RNA, programas de computadores, etc. Nesses sistemas, os alfabetos utilizados são, respectivamente letras, dígitos de zero a 9, nucleotídeos ou aminoácidos, etc.

Apesar da importância que o acúmulo e a transmissão de informação tiveram ao longo da história humana, foi apenas recentemente que se elaborou um formalismo matemático para descrever e mediar a informação. Na abordagem proposta por C.E. Shannon, em 1948, a informação é tratada como uma quantidade física, tal como massa ou energia. A teoria da informação originou-se a partir de estudos sobre a natureza estatística dos equipamentos elétricos de telecomunicação. O objetivo de um sistema de telecomunicação é reproduzir, no terminal de saída, uma mensagem selecionada no terminal de entrada. Basicamente, tal sistema consiste de cinco elementos:

- 1- a fonte de informação. É um dispositivo que seleciona uma mensagem pertencente a um conjunto de mensagens possíveis, a fim de ser transmitida para o

terminal receptor. A mensagem pode ser de vários tipos, por exemplo, uma seqüência de letras e números como no telégrafo, uma função contínua no tempo como o rádio, uma função $f(x,y,t)$ do tempo t e de duas variáveis x e y , como na TV em preto e branco, em que f representa a intensidade da luz no ponto de coordenadas (x,y) no instante t , uma função f de várias variáveis como em uma imagem digital formada onde a imagem forma-se da reunião de três funções $r(x,y)$, $g(x,y)$, $b(x,y)$, para a intensidade das cores vermelho, verde e azul no ponto de coordenadas (x,y) , etc.

2- o codificador. Opera na mensagem de modo a produzir um sinal conveniente para a transmissão por um canal até o ponto de recepção. Uma mensagem codificada é menos suscetível ao ruído do canal.

3- o canal. Consiste no meio usado para transmitir o sinal do transmissor até o ponto de recepção. Podem ser um par de cabos, um cabo coaxial, um cabo de fibras ópticas, etc. Durante a transmissão, o sinal pode ser perturbado por ruído ou distorção. Distorção é uma operação fixa, aplicada ao sinal. Ruído envolve perturbações aleatórias e imprevisíveis. Distorção pode, em princípio, ser corrigida aplicando-se a operação inversa no sinal recebido, enquanto o ruído não pode sempre ser removido, pois o sinal nem sempre sofre a mesma alteração durante a transmissão. Assim, um canal é um sistema em que o sinal de saída depende probabilisticamente do sinal de entrada.

4- o decodificador. Atua sobre o sinal recebido e tenta reproduzir, a partir dele, a forma original da mensagem, que é aceitável para o reproduzidor. Em geral, o decodificador usa redundância do código para corrigir os erros ocorridos nas palavras recebidas.

5- o destinatário. É a pessoa ou máquina para o qual se envia uma mensagem.

A finalidade da teoria da informação é estabelecer medidas quantitativas da capacidade dos vários sistemas de gerar, transmitir e armazenar a informação. Através dessa teoria, procura-se responder, entre outras, às questões:

- 1- Como definir a quantidade de informação?
- 2- Como medir essa quantidade, e qual a unidade mais conveniente?
- 3- Como medir a taxa na qual uma fonte de informação fornece informação?

Pode-se mostrar que a quantidade de informação transmitida por uma seqüência de símbolos depende da previsibilidade dessa seqüência, sendo função da probabilidade da mensagem recebida. Maior quantidade de informação é transportada por mensagens mais improváveis. Essa quantidade é convenientemente medida em bits, a quantia de informação necessária para informar qual de dois eventos equiprováveis ocorreu. A grandeza definida como entropia informacional mede a taxa na qual uma fonte fornece informação. Supõe-se que a fonte transmite ao acaso qualquer uma das mensagens pré-especificadas. Não se sabe qual mensagem será transmitida a seguir, mas se conhece a probabilidade de transmissão de cada uma das mensagens possíveis. A entropia da fonte coincide com a taxa máxima de compressão da informação.

A grandeza definida como capacidade do canal representa a taxa máxima de transmissão da comunicação. A capacidade do canal e a entropia da fonte estão ligadas pelo teorema fundamental da codificação de um canal ruidoso. Esse teorema estabelece que se a entropia da fonte é menor que a capacidade do canal, então uma comunicação com probabilidade de erro arbitrariamente pequena pode ser atingida.

4.3 A entropia informacional

A premissa fundamental da teoria da informação é que a geração de informação pode ser modelada como um processo probabilístico, que pode ser medido de maneira que concorde com a nossa intuição. De acordo com essa suposição, diz-se

que um evento aleatório E que ocorra com probabilidade $P(E)$ contém $I(E)$ unidades de informação.

$$I(E) = \log_2 \frac{1}{P(E)} = -\log_2 P(E) \quad 4-1$$

A quantidade $I(E)$ é freqüentemente denominada auto-informação de E .

Se $P(E)=1$, o evento sempre ocorre, logo $I(E)=0$, e nenhuma informação é a ele atribuída. Isto é, como nenhuma incerteza está associada ao evento, nenhuma informação seria transferida pela comunicação da ocorrência do evento. Se $P(E)=0,99$, a comunicação de ocorrência transfere uma pequena quantidade de informação [12].

Quando a auto-informação é transferida entre uma fonte e um usuário, diz-se que a fonte de informação está conectada ao usuário por um canal. O canal de informação é o meio físico que liga a fonte ao usuário. Pode ser uma linha telefônica, um caminho de propagação de uma onda eletromagnética, um fio em um computador digital ou uma câmera fotográfica digital.

Vamos assumir que a fonte de informações gere uma seqüência aleatória de símbolos de um conjunto enumerável finito de símbolos possíveis. Isto é, a saída da fonte é uma variável aleatória discreta. O conjunto de símbolos fonte $\{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n, \dots\}$ é denominado alfabeto da fonte A , e os elementos do conjunto, denotados por a_n , são chamados símbolos ou letras. A probabilidade do evento de que a fonte produzirá o símbolo a_n é $P(a_n)$ e:

$$\sum_{n=1}^N P(a_n) = 1 \quad 4.2$$

A probabilidade da fonte discreta emitir o símbolo a_n é $P(a_n)$, assim a auto-formatação gerada pela produção de um único símbolo fonte é, de acordo com a equação 4-1:

$$I(a_n) = -\log_2 P(a_n) \quad 4.3$$

Se k símbolos fonte forem gerados, a lei dos grandes números estipula que, para um valor suficientemente grande de k , o símbolo a_n será, em média, produzido $kP(a_n)$. Assim, a auto-informação média obtida a partir de k saídas é:

$$-k \sum_{n=1}^N P(a_n) \log_2 P(a_n) \quad 4.4$$

A informação média por saída da fonte, denotada H é

$$H = -\sum_{n=1}^N P(a_n) \log_2 P(a_n) \quad 4.5$$

que é denominada entropia informacional da fonte.

Ela define a quantidade de informação em unidades por símbolo, obtida pela observação de uma única saída da fonte.

Conforme sua magnitude aumenta, mais incerteza e, portanto, mais informação estará associada com a fonte. Uma entropia informacional alta está associada com uma grande variação nos valores de intensidade dos pixels da

imagem. Uma imagem com baixa entropia possui pixels de intensidade mais uniforme e pouca informação pode ser obtida dessas imagens [12].

O limite superior no valor da Entropia depende do número possível de símbolos associados a uma fonte. Admitindo que o número de símbolos associados a uma imagem digital vai depender de sua profundidade de cor (n) tem-se:

$$H = - \sum_{n=1}^N P(n) \log_2 (P(n)) \quad 4.5$$

N = número de símbolos = 2^{bits} caso os símbolos sejam equiprováveis

$P(n) = \frac{1}{2^k}$ para todo n e a entropia máxima de Shannon [17] é dada por :

$$H_{\text{Max}} = - \sum_{n=1}^N \frac{1}{2^k} \log_2 \left(\frac{1}{2^k} \right) \quad 4.6$$

$$H_{\text{Max}} = - N \left[\frac{1}{2^k} (-k) \right] \quad 4.7$$

$$H_{\text{Max}} = k \text{ bits / símbolo} \quad 4.8$$

Dessa forma, a entropia informacional para imagens (fontes) codificadas com profundidade de cor de 8 bits por canal de cor ou tons de cinza tem seu limite superior igual a 8.

4.4 Aplicações do método para imagens sintéticas

Com a finalidade de se verificar a eficiência do método para o cálculo da entropia informacional, utilizou-se um conjunto de imagens sintéticas, isto é, imagens digitais criadas a partir de programas como o Photoshop CS2 da Adobe.

Os valores da entropia informacional foram calculados a partir de um programa gerado em Matlab.

4.4.1 Imagens sintéticas e a entropia

Um conjunto de imagens sintéticas é criado no PhotoshopCS2 da Adobe. As imagens são em 8 bits com um único canal (*grayscale*), com uma resolução de 1000 x 500 pixels, a imagem 6 tem resolução menor com 500 x 250 pixels e a imagem 11 tem apenas 200 x 100 pixels. Observa-se que a entropia da imagem 4.11 é praticamente igual à da imagem 4.9. Os valores da entropia informacional e o histograma das imagens são apresentados.

Cada histograma mostra a distribuição do número de pixels da imagem com uma determinada luminosidade ou brilho. Nessas imagens observa-se que os valores da entropia não dependem do formato do arquivo JPG ou TIFF e também do número de pixels.

1- Imagem JPG com 1000 x 500 pixels - branca

Fig. 4.1. Imagem com 1000 x 500 pixels; $H=0$

Fig. 4.2. Histograma da figura 4.1.

2- Imagem JPG com 1000 x 500 pixels - preta

Fig. 4.3. Imagem com 1000 x 500 pixels; $H=0$

Fig. 4.4. Histograma da figura 4.3.

3- Imagem JPG com 1000 x 500 pixels – cinza médio

Fig. 4.5. Imagem com 1000 x 500 pixels; $H=0$

Fig. 4.6. Histograma da figura 4.5.

4- Imagem JPG com 1000 x 500 pixels – preto e branca

Fig. 4.7. Imagem com 1000 x 500 pixels; $H=1$

Fig. 4.8. Histograma da figura 4.7.

5- Imagem TIF com 1000 x 500 pixels – preto e branca

Fig. 4.9. Imagem com 1000 x 500 pixels; $H=1$

Fig. 4.10. Histograma da figura 4.9.

6- Imagem JPG com 500 x 250 pixels – preto e branca

Fig. 4.11. Imagem com 500 x 250 pixels; $H=1$

Fig. 4.12. Histograma da figura 4.11.

7- Imagem JPG com 1000 x 500 pixels – preto e branca

Fig. 4.13. Imagem com 1000 x 500 pixels; $H=1,0935$

Fig. 4.14. Histograma da figura 4.13.

8- Imagem JPG com 1000 x 500 pixels – preto e branca, GB=10

Fig. 4.15. Imagem com 1000 x 500 pixels; $H=2,2767$, Gaussian Blur =10 pixels

Fig. 4.16. Histograma da figura 4.15.

8- Imagem JPG com 1000 x 500 pixels – preto e branca, GB=20

Fig. 4.17. Imagem com 1000 x 500 pixels; $H=3,2503$, Gaussian Blur =20 pixels

Fig. 4.18. Histograma da figura 4.17.

9- Imagem JPG com 1000 x 500 pixels – preto e branca, GB=30

Fig. 4.19. Imagem com 1000 x 500 pixels; $H=4,0653$, Gaussian Blur =30 pixels

Fig. 4.20. Histograma da figura 4.19.

10- Imagem JPG com 1000 x 500 pixels – preto e branca, dégradé

Fig. 4.21. Imagem com 1000 x 500 pixels; $H = 7,9503$

Fig. 4.22. Histograma da figura 4.21.

11- Imagem JPG com 200 x 100 pixels – preto e branca, dégradé

Fig. 4.23. Imagem com 200 x 100 pixels; $H = 7,9305$

Fig. 4.24. Histograma da figura 4.23.

12- Imagem JPG com 3000 x 2000 pixels – preto e branca, dégradé

Fig. 4.25. Imagem com 3000 x 2000 pixels ; $H=7,9155$

Fig. 4.26. Histograma da figura 4.25.

4.5 Aplicações do método para imagens fotográficas em sistemas digitais de grande resolução e filme positivo

Como o objetivo central do trabalho é usar a entropia informacional para uma avaliação da qualidade de imagens geradas por sistemas digitais, um considerável número de experimentos foi realizado.

O primeiro conjunto de experimentos analisa imagens fotográficas feitas com a mesma câmera, uma Hasselblad 500CM, uma objetiva Sonnar de 150mm, $f/4$ e três diferentes sensores; dois digitais e um analógico; um sensor digital Leaf Aptus 75 com 33 MP um sensor digital Sinar 54M e 22 MP e um filme positivo Fuji Provia de ISO 100. O filme foi escaneado com scanner Imacon Flextight 949 de alta resolução e o arquivo produzido é de 65,7MB (TIFF), enquanto os arquivos produzidos pelo sistema Leaf é de 98,1 MB (TIFF) e o arquivo produzido pelo 54M é de 64,5MB (TIFF) .

Fig.4.27. Sistema digital Sinar 54M (22 MP) e Leaf Aptus (33 MP)

As imagens digitais obtidas com os dois backs foram originalmente fotografadas nos formatos RAW de cada um dos fabricantes, MOS para o sistema Leaf e CPS para o sistema Sinar. A conversão para o formato TIFF e para o modo de escala de cinzas foi feita no Photoshop CS2 da Adobe sem nenhum tipo de filtragem, melhora de nitidez ou controle de cor. O mesmo padrão foi aplicado aos arquivos produzidos a partir do escaneamento do filme. A iluminação usada no experimento foi a de um flash eletrônico Broncolor com temperatura de cor de 5270 K.

A distância entre os objetos fotografados e o plano das imagens era de 3,4m e a fotometria para os sensores digitais com sensibilidade de ISO 50 recomendava abertura $f/8$ enquanto que para o filme a abertura usada foi de $f/11$ uma vez que sua sensibilidade nominal é de ISO 100. Os objetos alvos estavam nivelados bem como o sistema óptico. Como os objetos alvos e o sistema fotográfico permaneceram estáticos durante os testes, as características da objetiva, notadamente sua resolução óptica e balanço cromático podem ser considerados constantes para os três sensores.

Fig.4.28. Controle na temperatura de cor do flash eletrônico, 5270 K e exposição

O “flare” observado nessa imagem de registro feita com uma câmera digital amadora, e reproduzida na Figura 4.28, não aparece nas imagens dos testes [22].

Fig.4.29. Controle de nível dos objetos alvos [22]

As figuras 4.28 e 4.29 mostram os objetos alvo e como os mesmos foram posicionados para a realização dos testes. Todos os testes comparativos foram realizados no mesmo dia, de forma a se preservar os alinhamentos e ajustes de nível.

4.5.1 Resultados do cálculo da Entropia Informacional

A seguir um conjunto de imagens, seus histogramas e valores da entropia para imagens com 500 x 500 pixels, são apresentados:

a) Conjunto de imagens produzidas pelo sistema Leaf:

I)

Fig.4.30. Imagem com Diagonal

Fig.4.31. Histograma da figura 4.30.

II)

Fig.4.32. Imagem com Listas

Fig.4.33. Histograma da figura 4.32.

III)

Fig.4.34. Imagem com Quadriculado

Fig.4.35. Histograma da figura 4.34.

b) Conjunto de imagens produzidas pelo sistema Sinar:

I)

Fig.4.36. Imagem com Diagonal

Fig.4.37. Histograma da figura 4.36.

II)

Fig.4.38. Imagem com Listas

Fig.4.39. Histograma da figura 4.38.

III)

$H = 6,975$

Fig.4.40. Imagem com Quadriculado

Fig.4.41. Histograma da figura 4.40.

c) Conjunto de imagens produzidas pelo filme positivo Provia 100:

I)

Fig.4.42. Imagem com Diagonal

Fig.4.43. Histograma da figura 4.42.

II)

Fig.4.44. Imagem com Listas

Fig.4.45. Histograma da figura 4.44.

III)

$H = 6,9748$

Fig.4.46. Imagem com Quadriculado

Fig.4.47. Histograma da figura 4.46.

IV) A imagem anterior com um menor número de pixels:

$H = 6,7779$

Fig.4.48. Imagem com Quadriculado menor

Fig.4.49. Histograma da figura 4.48.

Resumo dos resultados para a entropia informacional

A Tabela 4.1 apresenta os resultados dos testes realizados com a mesma câmera fotográfica, uma Hasselblad 500CM, uma objetiva Sonnar de 150mm, $f/4$ e três diferentes sensores, dois digitais e um analógico: um sensor digital Leaf Aptus 75 com 33 MP, um sensor digital Sinar 54M e 22 MP, e um filme positivo Fuji Provia de ISO 100. O filme foi escaneado com scanner Imacon Flextight 949 de alta resolução e o arquivo produzido é de 65,7MB (TIFF), enquanto o arquivo produzido pelo sistema Leaf é de 98,1 MB (TIFF), e o arquivo produzido pelo Sinar 54M é de 64,5MB (TIFF) .

Tabela: 4.1. Resultados da entropia informacional para os sistemas Leaf, Sinar e Provia

	Diagonal	Listas	Quadriculado
Sistema Leaf	3,424	5,380	7,024
Sistema Sinar	3,453	5,401	6,975
Filme Provia	5,014	6,115	6,975

Fonte: o autor

4.6 Aplicações do método para imagens fotográficas em sistemas digitais reflex

Um segundo conjunto de experimentos foi realizado com o propósito de se avaliar a entropia informacional das imagens fotográficas produzidas por câmeras reflex de pequeno formato. Câmeras reflex são sistemas fotográficos onde a luz que atinge o sensor ou filme fotográfico é desviada por um sistema de espelho basculante e pentaprisma para o visor óptico. São câmeras muito versáteis, mas durante a tomada fotográfica o visor fica obscurecido e o fotógrafo deixa de visualizar a cena fotografada [11].

Nesses testes, três tipos de avaliações foram realizadas:

- a) Para uma mesma câmera, duas objetivas com a mesma distância focal foram usadas: uma objetiva AF Micro Nikkor 105mm 1: 2.8D e uma objetiva AF Nikkor Zoom Nikkor Zoom 28-105mm 1:3.5 – 1: 4.5 D .
- b) Duas câmeras idênticas, Kodak 14n com 14 MP foram comparadas, também nessas comparações as duas objetivas foram utilizadas. Como critério de identificação as câmeras Kodak 14n são denominadas Kodak-M e Kodak-T.
- c) Quatro câmeras usando as mesmas objetivas foram testadas, Kodak-M, Kodak-T, Nikon D-70 com 6 MP e Nikon D-80 com 10 MP.

Fig. 4. 50. Kodak 14n com 14 MP e sensor CMOS

Fig. 4.51. Nikon D-80 com 10 MP e sensor CCD

Fig. 4.52. Nikon D-70 com 6 MP e sensor CCD

Os objetos-alvo usados nessa série de experimentos foram:

Fig. 4. 53. Imagem com Diagonal

Fig. 4.54. Imagem com Listas

Fig. 4.55. Imagem com Quadriculado

Resultados do cálculo da entropia para as câmeras e objetivas

A Tabela 4.2 abaixo mostra os valores da entropia informacional obtidos pela Kodak-T de 14 MP, uma objetiva AF Micro Nikkor 105mm 1: 2.8D e uma objetiva AF Nikkor Zoom Nikkor Zoom 28-105mm 1:3.5 – 1: 4.5 D.

O valor da entropia informacional para a primeira coluna da tabela, isto é, para o “alvo” diagonal é menor para a objetiva 105 fixa. Isto indica que essa objetiva reproduz melhor uma cena de alto contraste como se observa no “alvo” “diagonal”. Nos outros dois alvos, “listas” e “quadriculado”, o contraste é menor e o desempenho das duas objetivas torna-se praticamente igual.

Tabela 4.2 - Resultados do cálculo da entropia para a câmera e objetivas Kodak-T

KODAK-T	Diagonal	Listas	Quadriculado
105 Fixa	4,051	5,360	7,363
105 Zoom	4,134	5,354	7,210

Fonte: o autor

A Tabela 4.3 mostra os valores da entropia informacional obtidos pela Kodak-M de 14 MP, uma objetiva AF Micro Nikkor 105mm 1: 2.8D e uma objetiva AF Nikkor Zoom Nikkor Zoom 28-105mm 1:3.5 – 1: 4.5 D. O valor da entropia informacional para a primeira coluna da tabela, isto é, para o “alvo” diagonal é menor para a objetiva 105 fixa, isto indica que essa objetiva reproduz melhor uma cena de alto contraste como se observa no “alvo” diagonal. Nos outros dois alvos, “listas” e “quadriculado” o contraste é menor e o desempenho das duas objetivas torna-se praticamente igual. Os resultados são muito semelhantes aos observados com a Kodak-T, apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.3 - Resultados do cálculo da entropia para a câmera e objetivas Kodak-M

KODAK-M	Diagonal	Listas	Quadriculado
105 Fixa	4,135	5,454	6,907
105 Zoom	4,229	5,401	7,267

Fonte: o autor

A comparação entre esses valores indica que as câmeras Kodak T e Kodak M, ambas de 14MP são muito semelhantes, o que é um resultado interessante e mostra que o método de se avaliar a qualidade de uma imagem digital a partir da entropia informacional pode ser válido e útil.

A Tabela 4.4 abaixo apresenta os valores da entropia informacional obtidos a partir do uso de uma Nikon D-80 com 10 MP. Neste caso, os resultados obtidos para os três “alvos”: “diagonal”, “listas” e “quadriculado” é um forte indicativo da melhor capacidade de reprodução de contrastes de objetiva 105 fixa em comparação à 105 zoom. A Nikon D-80 com 10 MP é a mais moderna das câmeras testadas. Nesse caso, o sistema digital se beneficia da maior qualidade do sistema óptico.

Tabela 4.4 - Resultados do cálculo da entropia para a câmera e objetivas Nikon D-80

NIKON D-80	Diagonal	Listas	Quadriculado
105 Fixa	3,029	4,150	6,173
105 Zoom	4,138	5,765	7,463

Fonte: o autor

A Tabela 4.5 apresenta os valores da entropia informacional obtidos a partir do uso de uma Nikon D-70 com 6 MP. Os resultados obtidos para os três “alvos”: “diagonal”, “listas” e “quadriculado” é também aqui um forte indicativo da melhor capacidade de reprodução de contrastes de objetiva 105 fixa em comparação à 105 zoom. A Nikon D-70, da mesma forma que a D-80, se beneficia da maior qualidade óptica da lente 105 fixa.

Tabela 4.5 - Resultados do cálculo da entropia para a câmera e objetivas Nikon D-70

NIKON D-70	Diagonal	Listas	Quadriculado
105 Fixa	2,966	4,375	6,430
105 Zoom	4,296	6,090	7,813

Fonte: o autor

4.7 Aplicações do método para imagens sintéticas em RGB

O objetivo desse item é definir uma entropia informacional que possa servir como medida para a avaliação da qualidade das imagens digitais em RGB. Neste trabalho, define-se a entropia informacional em RGB a partir da definição dada por Shannon[8]. Partindo-se da entropia informacional dada por:

$$H = -\sum_{n=1}^N P(a_n) \log_2 P(a_n) \quad 4.5$$

a entropia informacional RGB é calculada com base na entropia informacional Total H_T e as entropias para cada um dos canais H_R , H_G , H_B . A Entropia Informacional Total é definida como:

$$H_T = k_R H_R + k_G H_G + k_B H_B \quad 4.7.1$$

$$k_R = \frac{\sum \text{valores dos pixels R}}{\sum \text{valores de todos os pixels}} \quad 4.7.2$$

$$k_G = \frac{\sum \text{valores dos pixels G}}{\sum \text{valores de todos os pixels}} \quad 4.7.3$$

$$k_B = \frac{\sum \text{valores dos pixels B}}{\sum \text{valores de todos os pixels}} \quad 4.7.4$$

A seguir, são apresentados os resultados experimentais para imagens sintéticas, isto é, aquelas geradas a partir de um programa, e as imagens digitais obtidas experimentalmente a partir de fotografias digitais.

4.7.1 Entropia informacional de imagens sintéticas em RGB

As imagens sintéticas foram criadas no Photoshop CS2 da Adobe com um número limitado de pixel e no formato TIF ou TIFF.

O espaço de cor usado em todas as imagens RGB, é o sRGB. Esse espaço de cor, mais limitado que outros espaços de cor como o Adobe RGB, foi escolhido pois é o padrão para impressão de imagens fotográficas digitais em minilabs fotográficos.

a) Imagem em RGB com o mesmo número de pixels para cada canal

R=255, G=255, B=255

Fig.4.56. Imagem RGB-a

$$H_R = 0,9183$$

$$H_G = 0,9351$$

$$H_B = 0,9334$$

$$H_T = 0,9289$$

b) Imagem em RGB com R=255 e Preto

Fig.4.57. Imagem RGB-b

$$H_R = 1,0578$$

$$H_G = 0$$

$$H_B = 0$$

$$H_T = 1,0578$$

c) Imagem em RGB com G=255 e Preto

Fig. 4.58. Imagem RGB-c

$$H_R = 0$$

$$H_G = 1,0866$$

$$H_B = 0$$

$$H_T = 1,0866$$

d) Imagem em RGB com B=255 e Preto

Fig.4.59. Imagem RGB-d

$$H_R = 0$$

$$H_G = 0$$

$$H_B = 1,0866$$

$$H_T = 1,0866$$

e) Dégradé em R variando de 255 a 128

Fig.4.60. Imagem RGB-e

$$H_R = 6,9605$$

$$H_G = 0$$

$$H_B = 0$$

$$H_T = 6,9605$$

f) Dégradé em G variando de 255 a 128

Fig.4.61. Imagem RGB-f

$$H_R = 0$$

$$H_G = 6,9605$$

$$H_B = 0$$

$$H_T = 6,9605$$

g) Dégradé em B variando de 255 a 128

Fig.4.62. Imagem RGB-g

$$H_R = 0$$

$$H_G = 0$$

$$H_B = 6,9530$$

$$H_T = 6,9530$$

h) Imagem com entropia máxima, $H_T = 8$, gerada em Matlab, com 4 096x4 096 pixels.

Fig.4.63. Imagem com entropia máxima: $H=8$

Uma imagem em RGB com Entropia máxima deve ser formada por, no mínimo, 4 096 x 4 096 pixels. Esse é o número mínimo de pixels que uma imagem RGB deve ter para que a entropia seja máxima e, dessa forma, todas as variações de intensidade de cada pixel possam ser registradas.

Entre os anos de 1999 e 2001, fabricantes de sensores do tipo CCD ofereceram ao mercado os primeiros sensores com 16 MP. No formato quadrado com 4 096 fotodiodos de lado, esses sensores poderiam produzir imagens com entropia máxima. Naturalmente, o mercado fotográfico não avaliava a razão desse tipo de sensores, uma vez que a grande maioria das imagens fotográficas é retangular e, dessa forma, um conjunto de pixels era descartado da imagem final. Somente no início de 2002 sensores retangulares com 22 MP foram apresentados ao mercado, com aproximadamente 4 000 x 5 000 pixels na imagem final. A literatura internacional não menciona essa imagem particular de entropia máxima.

4.8 Aplicações do método para imagens fotográficas em RGB

A literatura [4] [5] [6] apresenta o conceito de entropia informacional como método de avaliar a qualidade de imagens digitais em diferentes situações. Em Charrier e Cherifi [4], imagens de tecidos, paisagens, pinturas e imagens médicas são analisadas sob o ponto de vista da entropia informacional. Diferentes espaços de cor são usados e as transformações entre espaços de cor, discutidas. Não existem referências sobre o método de aquisição das imagens. O trabalho mostra que espaços de cor mais reduzidos determinam menores valores de entropia informacional.

Em Sun *et al* [5], define-se uma grandeza, PIM (Picture Information Measure), que é calculada par um grupo de imagens de baixa resolução com o intuito de agrupá-las a partir de suas características.

Hunter *et al* [6] usam a entropia informacional como instrumento de determinação de qualidade de imagens produzidas por um oftalmoscópio, um microscópio onde a objetiva é substituída pela óptica do globo ocular.

No presente trabalho, a entropia informacional é determinada experimentalmente a partir da fotografia de um “alvo” RGB gerado em Photoshop e impresso em minilab.

As imagens foram obtidas com a mesma câmera, uma Hasselblad 500CM, uma objetiva Sonnar de 150mm, $f/4$ e três diferentes sensores: dois digitais e um analógico - um sensor digital Leaf Aptus 75 com 33 MP, um sensor digital Sinar 54M e 22 MP, e um filme positivo Fuji Provia de ISO 100. O filme foi escaneado com scanner Imacon Flextight 949 de alta resolução e o arquivo produzido é de

65,7MB (TIFF), enquanto o arquivos produzido pelo sistema Leaf é de 98,1 MB (TIFF), e o arquivo produzido pelo 54M é de 64,5MB (TIFF) .

Sistema Leaf:

Fig.4.64. Imagem feita com sistema Leaf

Fig.4.65. Histograma da figura 4.64.

Fig.4.66. Histograma da figura 4.64.

Fig.4.67. Histograma da figura 4.64.

Sistema Sinar:

Fig.4.68. Imagem feita com Sistema Sinar

Fig.4.69. Histograma da figura 4.68

Fig.4.70. Histograma da figura 4.68

Fig.4.71. Histograma da figura 4.68

Filme Fuji Provia 100

$H_{Total} = 6,5628$

Fig.4.72. Imagem feita com filme Fuji Provia 100

Fig.4.73. Histograma da figura 4.72.

Fig.4.74. Histograma da figura 4.72.

Fig.4.75. Histograma da figura 4.72.

Como elemento de comparação, duas imagens quadradas produzidas a partir do escaneamento do filme com 500 e 1 000 pixels são apresentadas.

Filme 500x500 pixels:

Fig.4.76. Filme 500x500 pixels

Fig.4.77. Histograma da figura 4.76.

Filme 1 000 x 1 000 pixels:

Fig.4.78. Imagem feita com filme Provia ISO 100

Fig.4.79. Histograma da figura 4.78.

Os valores obtidos para a Entropia Total são:

$H_T=6,5459$ para a imagem com 500 x 500 pixels

$H_T=6,5888$ para a imagem com 1 000 x 1 000 pixels

Para uma inclinação na imagem com 1 000 x 1 000 pixels o resultado é:

Fig.4.80. Imagem inclinada feita com filme

Fig.4.81. Histograma da figura 4.80.

O resultado apresentado anteriormente parece indicar que o cálculo da entropia informacional total de uma imagem fotográfica produzida por um sistema, não depende do número total de pixels nem da direção do corte feito na imagem.

Resumo dos resultados do cálculo da entropia informacional em RGB

A tabela 4.6 abaixo mostra os valores da entropia informacional total e nos canais RGB, para os sistemas Leaf, Sinar e Filme Provia. Os valores obtidos para o experimento com filme são sistematicamente maiores do que os valores obtidos para os sistemas de captura digital.

Tabela 4.6 - Resultados da Entropia Informacional Total para os sistemas Leaf, Sinar e Provia

	H_{Total}	H_R	H_G	H_B
Sistema Leaf	5,241	5,159	5,217	5,351
Sistema Sinar	5,244	5,198	5,382	5,158
Filme Provia	6,563	6,651	6,521	6,512

Fonte: o autor

4.9 Determinação da entropia informacional em uma situação específica e prática com mudanças de objetivas

Uma preocupação relacionada à avaliação da qualidade das imagens digitais pelo método da entropia é a praticidade na sua aplicação. Procurando um critério mais prático para se avaliar a qualidade de um sistema digital ou comparar objetivas, o seguinte método foi desenvolvido.

Fotografa-se um texto impresso com boa qualidade gráfica com os sistemas que se deseja analisar. Naturalmente a distância, a iluminação, a temperatura de cor e nivelamento entre a câmera e o objeto devem ser mantidos constantes.

Nos testes realizados, uma câmera Kodak 14n com 14 MP foi utilizada e quatro diferentes objetivas testadas.

As objetivas foram:

- objetiva Nikkor 105mm fixa de construção moderna (105 fixa moderna)
- objetiva Nikkor 105 mm fixa de construção antiga (105 fixa antiga)
- objetiva Nikkor Zoom 28-105mm de construção moderna (105 zoom)
- objetiva Nikkor 105mm serie E de construção antiga (105 serieE)

Como os projetos ópticos e principalmente as técnicas na construção das objetivas fotográficas passam por constante evolução, no que diz respeito aos materiais ópticos empregados, às técnicas de corte e polimento dos elementos ópticos e às técnicas de *coating*, é de se supor que as objetivas modernas tenham melhor desempenho. Um texto de alto contraste foi fotografado com as quatro objetivas e o resultado é apresentado abaixo.

Fig. 4.82. Texto com 1 000 x 500 pixels em JPG usado para a comparação das objetivas

Os resultados das entropias informacionais estão indicados na Tabela abaixo.

Tabela 4.7 - Resultados da determinação da Entropia Informacional para uma câmera Kodak 14n e diferentes objetivas

105 Fixa Moderna	H=4,5705
105 Zoom Moderna	H=5,1587
105 Fixa Antiga	H=5,3039
105 Serie E Antiga	H=5,353

Fonte: o autor

A diferença entre os valores da entropia informacional para as objetivas modernas e antigas é considerável, particularmente no caso da objetiva 105 Serie E que, sabidamente, é uma objetiva com elementos plásticos e de preço muito reduzido. Se o teste fosse realizado com câmeras digitais mais modernas como a Nikon D-70 ou Nikon D-80, a diferença entre os desempenhos das objetivas deveria ser ainda mais notável.

4.10 Determinação da entropia informacional em uma situação específica e prática com mudanças no tempo de exposição

Neste teste, um objeto padrão quadriculado foi fotografado com Kodak 14n com 14 MP e uma objetiva zoom ajustada para 50 mm.

O valor de exposição (VE) ou luminância é mantido constante, os tempos de exposição variam entre 1/15 de segundo e 8 segundos. De forma que a abertura fosse mantida constante em $f16$, a distância entre a fonte luminosa e o objeto alvo foi sendo modificada, e a exposição controlada por um fotômetro de luz incidente. Uma imagem com 200 x 300 pixels no formato TIFF foi usada com padrão para

todas as medidas. As imagens foram capturadas em RAW e convertidas para o formato TIFF pelo Adobe Câmera Raw. Os resultados da entropia informacional são apresentados na Tabela 4.8 abaixo.

Tabela 4.8 - Valores da entropia informacional em função do tempo de exposição para uma mesma abertura . VE=5 para ISO 80

Tempo de exposição (s)	Entropia Informacional
1/15	H= 6,69
1/8	H= 7,16
1/4	H= 7,10
1/2	H=7,14
1	H=7,08
2	H=6,92
4	H=6,82
8	H=7,03

Fonte: o autor

O valor de exposição usado no experimento foi VE=5 para ISO 80, o que determina quais são os pares abertura / tempo de exposição apropriados. Os resultados obtidos dos experimentos e apresentados na Tabela 4.8 não indicam uma variação importante da entropia informacional, pelo menos dentro do intervalo de tempos de exposição analisados.

4.11 O uso dos filtros de nitidez e a entropia informacional

É pratica muito comum entre os fotógrafos, que todas as imagens digitais passem por um processo de tratamento através de um programa específico, como o Photoshop da Adobe. Nesses tratamentos, modificações de níveis, ajustes de cores, ajustes na resolução da imagem e melhoria da nitidez da imagem são freqüentes.

Os ajustes de nitidez ou *unsharp mask*, são feitos dentro de certos critérios mas, normalmente são critérios visuais.

De acordo com alguns autores [14] [23] filtros de nitidez podem ser criados a partir de um filtro Laplaciano que vai ser aplicado à imagem $f(x,y)$ e que pode ser definido como:

$$\nabla^2 f(x,y) = \frac{\partial^2 f(x,y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f(x,y)}{\partial y^2} \quad 4.11.1$$

$$\nabla^2 f = [f(x+1,y) + f(x-1,y) + f(x,y+1) + f(x,y-1)] - 4f(x,y) \quad 4.11.2$$

Essa expressão pode ser implementada em todos os pontos da imagem (x,y) , fazendo-se a convolução da imagem com a seguinte “máscara” espacial.

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

ou ainda uma segunda máscara que leva em consideração os elementos diagonais:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -8 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

O aumento na nitidez da imagem usando o Laplaciano é baseado na equação:

$$g(x,y) = f(x,y) + c[\nabla^2 f(x,y)] \quad 4.11.3$$

$f(x,y)$ é a imagem original e $g(x,y)$ a imagem com maior nitidez, $c=1$ se o centro da máscara é positivo e $c=-1$ se o centro da máscara é negativo.

Uma máscara Laplaciana ainda mais sofisticada pode ser obtida a partir da matriz:

$$\begin{array}{ccc} \frac{\alpha}{1+\alpha} & \frac{1-\alpha}{1+\alpha} & \frac{\alpha}{1+\alpha} \\ \frac{1-\alpha}{1+\alpha} & \frac{-4}{1+\alpha} & \frac{1-\alpha}{1+\alpha} \\ \frac{\alpha}{1+\alpha} & \frac{1-\alpha}{1+\alpha} & \frac{\alpha}{1+\alpha} \end{array} \quad 4.11.4$$

O parâmetro α que controla a nitidez deve ser $0 \leq \alpha \leq 1$ sendo o valor padrão 0,2.

Um pequeno programa foi desenvolvido no Matlab que aplica máscara Laplaciana em função de α . A partir do aumento na nitidez da imagem a entropia informacional é determinada. Dessa forma é possível se verificar, para uma determinada imagem, de que forma a entropia varia e escolher o *sharp* mais apropriado.

Fig.4.83. Pequeno animal marinho corado

A imagem acima com 500 x 500 pixels em RGB de um pequeno animal marinho pode servir como objeto de análise para a variação da entropia em função da nitidez.

Nessa análise a entropia em RGB é determinada em função de α , que varia de zero até 1 com intervalos de 0,1.

Fig. 4.84. Variação da entropia por canal em função do filtro de nitidez aplicado

Atenção às legendas da figura. No canal vermelho a entropia é praticamente constante, no verde a redução é mais acentuada e no azul inferior à do canal verde. A entropia total também se reduz com o aumento da nitidez.

Análises que relacionem os valores da entropia informacional com os filtros de nitidez podem ser valiosos instrumentos no tratamento de imagens. Em programas de tratamento digital de imagens, como o Photoshop, por exemplo, o controle dos filtros de nitidez pode ser feito a partir de valores calculados da entropia informacional. Ao contrário de se aplicar filtros de nitidez a partir de observação das imagens no monitor, a entropia da imagem pode ser calculada a cada nova tentativa do operador. Quando um valor mínimo da entropia informacional é obtido, o processo deve ser interrompido.

Capítulo 5

Conclusões

Os aspectos mais relevantes deste trabalho e que representam contribuições inéditas não encontradas na literatura são:

- 1- O uso da Entropia Informacional como método para a avaliação da qualidade de imagens digitais produzidas por câmeras fotográficas digitais, e que pode ser usado por não especialistas em análise de imagens.
- 2- O carácter experimental do trabalho apresentado, com a utilização de câmeras digitais com diferentes resoluções e usando diferentes objetivas.
- 3- O desenvolvimento e aplicação do conceito de Entropia Informacional em RGB a imagens sintéticas e imagens fotográficas.

- 4- A proposição de que a Entropia Informacional seja usada como método de controle de qualidade nos programas de tratamento de imagem.

Conclusão I

As imagens sintéticas ou fotográficas que apresentam maior complexidade são aquelas em que a entropia informacional é maior, tanto para a entropia em um único canal como também para as imagens em RGB.

Um problema que nos parece importante é a escolha de “objetos-alvo”. Quando o contraste é alto, isto é as fronteiras são bem definidas, sistemas digitais – sensores, processamento e objetivas devem produzir imagens com entropia baixa. Por outro lado quando os “objetos-alvo” têm contraste baixo, isto é, os pixels que definem as fronteiras de transição assumem valores que se modificam lentamente, as entropias das imagens são maiores.

Um exemplo disso pode ser verificado na situação descrita abaixo. Uma câmera Nikon D-80 com uma objetiva Nikkor Zoom 28-105mm foi usada para se fotografar, nas mesmas condições, dois “objetos-alvo”, um diagrama de linhas pretas e brancas de alto contraste e um conjunto de linhas pretas e brancas com uma variação senoidal de contraste.

Fig.5.1 Conjunto de linhas de alto contraste, 500 x 100 pixels

Fig.5.2. Conjunto de linhas de baixo contraste, 500 x 100 pixels

Os histogramas e as entropias são apresentados a seguir:

Fig.5.3. Histograma da figura 5.1 de alto contraste local

Fig.5.4. Histograma da figura 5.2 de baixo contraste local

Para o diagrama de alto contraste o sistema determina uma entropia de $H=5,235$ e para o diagrama de baixo contraste a entropia é $H=7,219$. Logo, a escolha do “objeto-alvo” deve levar em conta o que se pretende medir. Um sistema melhor deve gerar imagens de menor entropia a partir de “objeto-alvo” de alto contraste e imagens de maior entropia quando os “objeto-alvo” tem contraste baixo.

Conclusão II

Uma segunda conclusão a que se pode chegar é que sistemas de maior resolução e que usam sensores com CCD cujos fotodiodos maiores, $9\mu\text{m}$ no sistema Sinar e $7,2\mu\text{m}$ no sistema Leaf tem entropias praticamente iguais nas diferentes medidas e de forma geral entropias inferiores a aquelas das imagens produzidas pelo filme positivo de ISO 100.

Tabela 5.1- Valores de Entropia Informacional

	Diagonal	Listas	Quadriculado
Sistema Leaf	$H=3,424$	$H=5,380$	$H=7,024$
Sistema Sinar	$H=3,453$	$H=5,401$	$H=6,975$
Filme Provia	$H=5,014$	$H=6,115$	$H=6,975$

Fonte: o autor

A Tabela 5.1 apresenta os resultados dos testes realizados com a mesma câmera fotográfica, uma Hasselblad 500CM, uma objetiva Sonnar de 150mm, $f/4$ e três diferentes sensores: dois digitais e um analógico - um sensor digital Leaf Aptus 75 com 33 MP, um sensor digital Sinar 54M e 22 MP, e um filme positivo Fuji Provia de ISO 100. O filme foi escaneado com scanner Imacon Flextight 949 de alta resolução e o arquivo produzido é de 65,7MB (TIFF), enquanto o arquivo produzido pelo sistema Leaf é de 98,1 MB (TIFF), e o arquivo produzido pelo 54M é de 64,5MB (TIFF) .

A entropia das imagens produzidas pelo filme é maior, notadamente nas imagens mais simples, ou seja aquelas onde a separação entre as regiões de

contraste é maior. É possível que esse efeito esteja associado à própria estrutura das emulsões fotográficas, ao processamento químico e também ao escaneamento [3].

Conclusão III

Quando duas câmeras com as mesmas características, a KODAK-T e KODAK-M usando as mesmas objetivas são comparadas, os resultados são muito próximos.

Tabela 5.2 - Valores de Entropia Informacional para a Kodak T

KODAK-T	Diagonal	Listas	Quadriculado
105 Fixa	H=4,051	H=5,360	H=7,363
105 Zoom	H=4,134	H=5,354	H=7,210

Fonte: o autor

Tabela 5.3 - Valores de Entropia Informacional para a Kodak M

KODAK-M	Diagonal	Listas	Quadriculado
105 Fixa	H=4,135	H=5,454	H=6,907
105 Zoom	H=4,229	H=5,401	H=7,267

Fonte: o autor

As tabelas 5.2 e 5.3 apresentam os valores da entropia informacional para imagens produzidas por duas câmeras idênticas. Kodak T e Kodak M com 14 MP.

Eventuais diferenças podem se imputadas a pequenos erros de focalização uma vez que o foco é automático e mesmo uma pequena mudança no plano de formação da imagem provoca o aparecimento de um *blur* que provoca aumento na entropia como pode ser constatado nas imagens sintéticas analisadas.

Conclusão IV

Quando duas câmeras produzidas pelo mesmo fabricante mas com diferença de uma geração, isto é, a D-70 e sua evolução a D-80 ambas usando sensores do tipo CCD com 6 MP e 10 MP respectivamente os melhores resultados são, de forma geral os produzidos pela câmera mais nova, ou seja a D-80.

Tabela 5.4 - Valores de Entropia Informacional Nikon D-80

NIKON D-80	Diagonal	Listas	Quadriculado
105 Fixa	H=3,029	H=4,150	H=6,173
105 Zoom	H=4,138	H=5,765	H=7,463

Fonte: o autor

Tabela 5.5 - Valores de Entropia Informacional Nikon D-70

NIKON D-70	Diagonal	Listas	Quadriculado
105 Fixa	H=2,966	H=4,375	H=6,430
105 Zoom	H=4,296	H=6,090	H=7,813

Fonte: o autor

Como, em nossos testes, as imagens usadas para o cálculo da entropia tinham sempre o mesmo número de pixels, a resolução do sensor, ou seja o número total de pixels presentes nos sensores não influencia de forma definitiva na entropia.

Sem dúvida, os resultados apresentados pelas câmeras mais modernas, isto é, a Nikon D-70 e Nikon D-80 são muito superiores aos resultados obtidos com as câmeras Kodak T e Kodak M usando-se as mesmas objetivas. Câmeras mais modernas se beneficiam da melhor óptica presente na objetiva 105 Fixa em comparação com a objetiva 105 zoom.

Conclusão V

Quando uma imagem é feita com câmeras de resoluções diferentes, como a D-70 de 6 MP e a D-80 de 10 MP, usando a mesma objetiva, 105 Fixa, e a cena fotografada não é cortada e sim analisada de uma forma integral as diferenças entre as entropias não são grandes.

A cena apresentada a seguir foi fotografada com a D-70 e têm 986x588 pixels e a entropia é de $H=5,788$ e com a D-80 têm 1255x756 pixels e a entropia calculada é $H=5,5606$.

Fig.5.5. A mesma cena fotografada com a Nikon D-70 e Nikon D-80

Tabela 5.6 - Valores de Entropia Informacional para iamgens obtidas com diferentes câmeras e a mesma objetiva

Nikon D-70	986 x 588 pixels	$H= 5,788$
Nikon D-80	1255 x 756 pixels	$H= 5,560$

Fonte: o autor

Conclusão VI

Um outro efeito particularmente importante está associado à tecnologia da construção das objetivas. Quando uma mesma câmera, a KODAK-T de 14 MP é usada para se fotografar um texto impresso, a diferença entre os resultado na entropia obtidos para uma imagem produzida por uma lente moderna em comparação com uma lente mais antiga é expressivo.

Tabela 5.7 - Valores de Entropia Informacional

105 Fixa Moderna	H=4,5705
105 Zoom Moderna	H=5,1587
105 Fixa Antiga	H=5,3039
105 Serie E Antiga	H=5,353

Fonte: o autor

As objetivas 105 Fixa Moderna e a 105 Fixa Antiga são objetivas do mesmo padrão, isto é, a objetiva 105 Fixa Antiga era a melhor 105 mm da Nikon quando foi lançada na década de 1970 e o mesmo ocorre com a 105 Fixa Moderna. Se o mesmo teste fosse realizado com uma câmera mais moderna, isto é, com sensor, eletrônica e programas mais desenvolvidos, provavelmente os resultados da entropia informacional seriam ainda mais favoráveis às objetivas de melhor projeto e construção óptica.

Conclusão VII

Com relação ao cálculo da entropia informacional em RGB, realizado para os dois sistemas digitais de alta resolução Leaf de 33 MP e Sinar de 22 MP, e comparado com o filme Fuji Provia de ISO 100, os resultados obtidos para uma imagem de listas em RGB são:

Tabela 5.8 - Valores de Entropia Informacional RGB

	H_{Total}	H_R	H_G	H_B
Sistema Leaf	5,241	5,159	5,217	5,351
Sistema Sinar	5,244	5,198	5,382	5,158
Filme Provia	6,563	6,651	6,521	6,512

Fonte: o autor

Sem dúvida o desempenho dos sistemas digitais é superior ao do filme no que diz respeito às entropias informacionais considerando-se os canais RGB ou a entropia total. Um desenvolvimento natural deste teste é se analisar o resultado do escaneamento do filme Provia com diferentes scanners. Pode ser interessante se determinar a Entropia Informacional das imagens produzidas com filme quando scanners com diferentes dimensões de fotodiodo são usados.

Conclusão VIII

Quando se analisa a variação do tempo de exposição nos valores da entropia informacional, as variações na entropia são pequenas para tempos de exposição variando entre 1/15 de segundo e 8 segundos. Os resultados são apresentados na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 - Valores da entropia informacional em função do tempo de exposição para uma mesma abertura . VE=5 para ISO 80

Tempo de exposição (s)	Entropia Informacional
1/15	H= 6,69
1/8	H= 7,16
1/4	H= 7,10
1/2	H=7,14
1	H=7,08
2	H=6,92
4	H=6,82
8	H=7,03

Fonte: o autor

O valor de exposição usado no experimento foi $VE=5$ para ISO 80, o que determina quais são os pares abertura / tempo de exposição apropriados. Os resultados obtidos dos experimentos apresentados na tabela 5.9 não indicam uma variação importante da entropia informacional, pelo menos dentro do intervalo de tempos de exposição analisados. É interessante que esse tipo de teste possa ser feito com tempos de exposição maiores, e também com diferentes sensibilidades ISO do sensor.

Conclusão IX

Outra questão que pode ser analisada a partir da entropia informacional é sua relação com a aplicação de uma máscara de nitidez. Uma imagem fotográfica de 500 x 500 pixels originalmente em RGB é tratada no Photoshop da Abope com diferentes valores para a máscara de nitidez: A quantidade (amount) aplicada em todas as imagens é 100, mas o raio de aplicação da máscara assume os valores 1, 2, 5, 10 e 20.

Fig.5.6. Imagem com 500x500 pixels; os valores em verde indicam a intensidade dos canais RGB em cada posição.

Tabela 5.10 - Valores de Entropia Informacional

Valores Aplicados	H_{Total}	H_R	H_G	H_B
100-1	5,927	5,992	5,998	5,796
100-2	5,992	6,055	6,060	5,864
100-5	6,035	6,114	6,118	5,878
100-10	5,625	5,686	5,724	5,471
100-20	5,935	6,104	6,037	5,667

Fonte: o autor

Observa-se que a entropia no canal do azul é sistematicamente menor que nos outros canais. Quando a imagem com valores de 100-20 é analisada a partir do Laplaciano, os resultados são mostrados na figura a seguir.

Fig.5.7. Variação da entropia por canal para a imagem com máscara de nitidez 100-20

Referências

- 1- COX, A. **Optica fotografia**. Barcelona: Ediciones Omega, 1979.

- 2- RAY, S. F. **Applied photographic optics**. Londres: Focal Press, 1988.

- 3- PERKO, R.; KLAUS, A.; GRUBER, M. **Quality comparison of digital and film-based images for photogrametric purposes**. ISPRS Commission III: Theory and Algorithms. 2004.

- 4- CHARRIER, C.; CHERIFI, H. Minimization of color image entropy through colorimetric transformation. In: IEEE DIGITAL SIGNAL PROCESSING WORKSHOP, 1996, Loen, Norway. **Proceedings**. Piscataway: IEEE, 1996. p. 17-20.

- 5- SUN, J.; ZHANG, X.; CUI, J.; ZHOU, L. Image retrieval based on color distribution entropy. **Pattern Recognition Letters**, v. 27, p. 1122-1126, 2006.

- 6- HUNTER, J.J.; COOKSON, C.J.; KISILAK, M.L.; BUENO, J.M.; CAMPBELL, M.C.W. Characterizing image quality in a scanning laser ophthalmoscope with differing pinholes and induced scattered light. **J. opt. Soc. Am. A**, v. 24, n. 5, May 2007.

- 7- PIQUEIRA, J.R.C.; SERBONCINI, F. A.; MOTEIRO, L.H.A. Biological models: measuring variability with classical and quantum information. **Journal of Theoretical Biology**, v. 242, p. 309-313, 2006.

- 8- SHANNON, C. E. A mathematical theory of communication. **Bell Syst. Tech. J.**, v. 27, p. 379-423, 1948.

- 9- AALAND, M ; BURGER, R. **Digital photography**. New York: Randon House, 1992.

- 10- FLUSSER, V. **Filosofia da caixa preta: ensaios para uma futura filosofia da fotografia**. Rio de Janeiro: Relume Dumará, 2002.

- 11- TRIGO, T. **Equipamento fotográfico- teoria e prática**. 3.e.d. São Paulo: Editora SENAC-SP, 2005.

- 12- GONZALES, R.C.M. ; WOODS, R.E. **Processamento de imagens digitais**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2000.

- 13- McFARLANE, M. Digital pictures fifty years ago. **Proceedings of IEEE**, v. 60, n. 7, 1972.

- 14- GONZALES, R.C.M. ; WOODS, R.E.; EDDINS, S. L. **Digital image processing**. Upper Saddle River: Pearson Education, 2004.

- 15- CTEIN, **Post exposure. Advanced techniques for the photographic printer**. 2.ed. Boston: Focal Press, 2000.

- 16- CCITT. Comité Consultatif Internationale de Telegraphie et Telephonie. **T 81**. (ITU. International Telecommunications Union).

- 17- THEUWISSEN, A.J.P. **Solid-state imaging with charge-coupled devices.** Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1995.
- 18- DAVIES, A ; FENNESSY, P. **Digital imaging for photographers.** 4.ed. Oxford: Focal Press, 2001.
- 19- LONG, B. **Complete digital photography.** Hingham: Charles River Media, 1992.
- 20- KODAK. **Application note MTD/OS – 0234 Kodak image sensors.** Disponível em: www.kodak.com
- 21- PIQUEIRA, J.R.C.; MONTEIRO, L.H.A. **Notas de teoria da informação.** São Paulo: Escola Politécnica da USP, s.d. /não publicada/
- 22- IMATEST site. Disponível em: <http://www.imatest.com/>
- 23- RITTER, G.; WILSON, J. **Computer vision algorithms in image algebra.** Boca Raton: CRC Press, 1996.
- 24- HUNT, R.W.G. **The reproduction of color.** 5.ed. Kingston-upon-Thames, Fountain Press, 1995.
- 25- KASAI, A ; SPARKMAN, R. **Essentials of digital photography.** Indiana: New Riders, 1997.