

RODOLFO BARRIVIERA

## **Compressão Fractal de Imagens**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre. Programa de Pós-Graduação em Informática, Setor de Ciências Exatas, Universidade Federal do Paraná.  
Orientador: Prof. Dr. Hélio Pedrini

CURITIBA

2009

## DEDICATÓRIA

A Deus, aos meus pais, irmão, namorada e especialmente a minha amada irmã que se encontra no céu.

## AGRADECIMENTOS

A Deus que é sempre a minha fonte de inspiração e força nas conquistas da minha vida.

A todos os professores que me auxiliaram durante o mestrado, através do conhecimento de cada um e amizade nesse período.

Ao meu orientador Prof. Dr. Hélio Pedrini que me conduziu desde o início pelos melhores caminhos e por toda a sua compreensão.

Aos meus pais que foram grandes mestres em minha vida.

Aos meus irmãos que me impulsionaram quando havia desânimo para vencer as dificuldades encontradas durante o mestrado.

A minha namorada que acreditou e me motivou sempre nessa conquista.

Aos meus amigos, que me ajudaram em dúvidas, dificuldades e soluções para os problemas encontrados durante o mestrado.

**EPÍGRAFE**

A minha meta está no alto, está no céu!

Deixa passar o que passa!

Não olhar para trás!

O céu é para quem sonha grande, pensa grande, ama grande e tem a coragem de viver pequeno, isso é o céu!

O sucesso não acontece por acaso, faça o seu melhor!

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>xvii</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>xxvi</b>
<b>RESUMO</b>	<b>xxvii</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>xxviii</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 Caracterização do Problema . . . . .	1
1.2 Motivação e Justificativa . . . . .	1
1.3 Objetivos e Contribuições . . . . .	2
1.4 Organização do Texto . . . . .	2
<b>2 FUNDAMENTOS</b>	<b>3</b>
2.1 Compressão de Imagens . . . . .	3
2.1.1 Compressão sem Perdas . . . . .	4
2.1.2 Compressão com Perdas . . . . .	6
2.2 Conceitos da Compressão Fractal de Imagens . . . . .	8
2.2.1 Auto-similaridade . . . . .	11
2.2.2 Teorema do Ponto Fixo . . . . .	13
2.2.3 Teorema da Colagem . . . . .	14
2.2.4 Transformação Afim . . . . .	15
2.2.5 Sistemas de Funções Iteradas . . . . .	17
2.2.6 Sistemas de Funções Iteradas Particionadas . . . . .	18
2.2.7 Codificador Fractal Básico . . . . .	20
2.2.8 Compressão Fractal com Particionamento Quadtree . . . . .	24
2.2.8.1 Codificação . . . . .	24

2.2.8.2	Decodificação . . . . .	26
2.3	Tabela de Dispersão . . . . .	27
2.4	Medidas de Similaridade . . . . .	28
2.5	Razão de Compressão . . . . .	29
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>31</b>
3.1	Compressão Básica Fractal de Imagens . . . . .	31
3.1.1	Algoritmo de Codificação Fractal Básico . . . . .	32
3.1.2	Algoritmo de Decodificação Fractal Básico . . . . .	36
3.2	Compressão Fractal com Tabelas de Dispersão . . . . .	39
3.3	Compressão Fractal de Imagens por Particionamento Quadtree . . . . .	40
3.3.1	Codificação Fractal de Imagens por Particionamento Quadtree . . .	41
3.3.2	Decodificação Fractal de Imagens por Particionamento Quadtree . .	48
3.4	Busca Local Guiada . . . . .	54
3.5	Aplicação dos Testes . . . . .	56
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>59</b>
4.1	Resultados da Compressão Fractal de Imagens com Busca Exaustiva . . . .	59
4.1.1	Blocos de Domínio com 4 x 4 pixels . . . . .	59
4.1.2	Blocos de Domínio com 8 x 8 pixels . . . . .	68
4.1.3	Blocos de Domínio com 16 x 16 pixels . . . . .	76
4.1.4	Blocos de Domínio com 32 x 32 pixels . . . . .	83
4.2	Resultados da Compressão Fractal de Imagens com Hash Table . . . . .	91
4.2.1	Blocos de Domínio com 4 x 4 pixels . . . . .	91
4.2.2	Blocos de Domínio com 8 x 8 pixels . . . . .	98
4.2.3	Blocos de Domínio com 16 x 16 pixels . . . . .	105
4.2.4	Blocos de Domínio com 32 x 32 pixels . . . . .	113
4.3	Comparação entre Busca Exaustiva e Hash Table . . . . .	121
4.4	Resultados da Compressão Fractal de Imagens por Quadtree . . . . .	131
4.4.1	Resultados da Quadtree - 1T . . . . .	131

4.4.2	Resultados da Quadtree - 2T . . . . .	140
4.4.3	Resultados da Quadtree - 3T . . . . .	149
4.4.4	Resultados da Quadtree - 4T . . . . .	158
4.5	Resultados da Compressão Fractal de Imagens por Quadtree com GLS . .	167
4.5.1	Resultados da Quadtree com GLS - 1T . . . . .	167
4.5.2	Resultados da Quadtree com GLS - 2T . . . . .	177
4.5.3	Resultados da Quadtree com GLS - 3T . . . . .	187
4.5.4	Resultados da Quadtree com GLS - 4T . . . . .	196
4.6	Comparação entre Quadtree e Quadtree com GLS . . . . .	205
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>215</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>217</b>

## LISTA DE FIGURAS

2.1	Redundâncias em imagens: (a) redundância de dados; (b) redundância interpixel; (c) redundância psicovisual. Extraído de [21]. . . . .	4
2.2	Compressor sem perdas. Extraído de [28]. . . . .	5
2.3	Compressor com perdas. Extraído de [28]. . . . .	6
2.4	Fractais: (a) fractais nas folhas; (b) triângulo de Sierpinski. Extraído de [40].	9
2.5	Exemplos de fractais. Extraído de [13]. . . . .	10
2.6	Conjunto de Cantor. Extraído de [30]. . . . .	12
2.7	Divisão do segmento de reta. Extraído de [30]. . . . .	12
2.8	Divisão do quadrado em partes iguais. Extraído de [30]. . . . .	13
2.9	Processo iterativo que gera o fractal. Extraído de [18]. . . . .	17
2.10	Processo de planos no SFIP. Extraído de [17]. . . . .	19
2.11	Segmentação em blocos molde. Extraído de [32]. . . . .	21
2.12	Definição dos blocos de domínio com sobreposição. . . . .	22
2.13	Codificador fractal básico. Extraído de [32]. . . . .	23
2.14	Exemplo de <i>quadtree</i> : (a) árvore <i>quadtree</i> ; (b) particionamento <i>quadtree</i> com 5008 blocos. Extraído de [17, 18]. . . . .	24
2.15	Exemplos de intensidade, brilho e simetrias de imagem. Extraído de [18]. .	26
2.16	Codificação <i>quadtree</i> da imagem Lenna: (a) original; (b) codificada. Extraído de [18]. . . . .	27
2.17	Alocação de dados em uma tabela de dispersão. . . . .	27
2.18	Funções de dispersão: (a) <i>hash</i> perfeito; (b) <i>hash</i> com colisões. . . . .	28
3.1	Processo de compressão do codificador fractal básico. . . . .	32
3.2	Processo de descompressão do Codificador Fractal Básico. . . . .	36
3.3	Processo de compressão do codificador fractal por particionamento <i>quadtree</i> . 42	
3.4	Processo de descompressão do Codificador Fractal por Particionamento Quadtree. . . . .	49

3.5	Diagrama das etapas de codificação da <i>quadtree</i> com GLS. . . . .	55
3.6	Imagens originais utilizadas nos testes de compressão fractal de imagens: (a) imagem Lenna com $512 \times 512$ pixels; (b) imagem Boat com $512 \times 512$ pixels; (c) imagem Fruits com $512 \times 512$ pixels; (d) imagem Goldhill com $512 \times 512$ pixels; (e) imagem Mandrill com $512 \times 512$ pixels; (f) imagem Paolina com $512 \times 512$ pixels. . . . .	57
4.1	Análise descritiva - busca exaustiva - bloco domínio com $4 \times 4$ pixels - tempo de compressão. . . . .	61
4.2	Análise de variância - busca exaustiva - bloco de domínio com $4 \times 4$ pixels - tempo de compressão. . . . .	62
4.3	Análise descritiva - busca exaustiva - bloco de domínio com $4 \times 4$ pixels - taxa de compressão. . . . .	63
4.4	Análise variância - busca exaustiva - bloco de domínio com $4 \times 4$ pixels - RMSE. . . . .	64
4.5	Análise de área - busca exaustiva - bloco de domínio com $4 \times 4$ pixels - RMSE. . . . .	65
4.6	Análise variância - busca exaustiva - bloco de domínio com $4 \times 4$ pixels - PSNR. . . . .	66
4.7	Análise de área - busca exaustiva - bloco de domínio com $4 \times 4$ pixels - PSNR. . . . .	67
4.8	Imagens comprimidas com a busca exaustiva e tamanho de bloco de domí- nio com $4 \times 4$ pixels e medida de distância da média. Os respectivos valores dos resultados das imagens estão na mesma sequência da tabela 4.1: (a) imagens com tamanho de bloco $512 \times 512$ pixels; (b) imagens com tamanho de bloco $256 \times 256$ pixels; (c) imagens com tamanho de bloco $128 \times 128$ pixels; (d) imagens com tamanho de bloco $64 \times 64$ pixels. . . . .	67
4.9	Análise de variância - busca exaustiva - bloco de domínio com $8 \times 8$ pixels - tempo de compressão. . . . .	68

4.10	Análise descritiva - busca exaustiva - bloco de domínio com $8 \times 8$ pixels - taxa de compressão. . . . .	71
4.11	Análise variância - busca exaustiva - bloco de domínio com $8 \times 8$ pixels - RMSE. . . . .	71
4.12	Análise descritiva - busca exaustiva - bloco domínio com $8 \times 8$ pixels - PSNR.	73
4.13	Análise variância - busca exaustiva - bloco de domínio com $8 \times 8$ pixels - PSNR. . . . .	74
4.14	Imagens comprimidas com a busca exaustiva e tamanho de bloco de domínio com $8 \times 8$ pixels e medida de distância da média. Os respectivos valores dos resultados das imagens estão na mesma sequência da tabela 4.8: (a) imagens com tamanho de bloco $512 \times 512$ pixels; (b) imagens com tamanho de bloco $256 \times 256$ pixels; (c) imagens com tamanho de bloco $128 \times 128$ pixels; (d) imagens com tamanho de bloco $64 \times 64$ pixels. . . . .	75
4.15	Análise Descritiva - Busca Exaustiva - $16 \times 16$ pixels - Tempo de Compressão	76
4.16	Análise de variância - busca exaustiva - bloco de domínio com $16 \times 16$ pixels - tempo de compressão. . . . .	78
4.17	Análise Descritiva - Busca Exaustiva - $16 \times 16$ pixels - Taxa de Compressão	79
4.18	Análise de Variância - busca exaustiva - $16 \times 16$ pixels - RMSE. . . . .	80
4.19	Análise de variância - busca exaustiva - bloco de domínio com $16 \times 16$ pixels - RMSE. . . . .	81
4.20	Imagens comprimidas com a Busca Exaustiva e tamanho de bloco $16 \times 16$ pixels e medida de distância da média. Os respectivos valores dos resultados das imagens estão na mesma sequência da tabela 4.16: (a) Imagens com tamanho de bloco $512 \times 512$ pixels; (b) Imagens com tamanho de bloco $256 \times 256$ pixels; (c) Imagens com tamanho de bloco $128 \times 128$ pixels; (d) Imagens com tamanho de bloco $64 \times 64$ pixels. . . . .	82
4.21	Análise descritiva - busca exaustiva - bloco de domínio com $32 \times 32$ pixels - tempo de compressão. . . . .	83
4.22	Análise de Variância - Busca Exaustiva - $32 \times 32$ pixels - Tempo de Compressão	85

4.23	Análise descritiva - busca exaustiva - bloco de domínio com $32 \times 32$ pixels - tempo de compressão. . . . .	86
4.24	Análise descritiva - busca exaustiva - bloco de domínio com $32 \times 32$ pixels - RMSE. . . . .	87
4.25	Análise de Variância - Busca Exaustiva - $32 \times 32$ pixels - RMSE . . . . .	88
4.26	Análise descritiva - busca exaustiva - bloco de domínio com $32 \times 32$ pixels - PSNR. . . . .	89
4.27	Imagens comprimidas com a busca exaustiva e tamanho de bloco $32 \times 32$ pixels e medida de distância baseada na média. Os respectivos valores dos resultados das imagens estão na mesma sequência da tabela 4.23: (a) imagens com tamanho de bloco $512 \times 512$ pixels; (b) imagens com tamanho de bloco $256 \times 256$ pixels; (c) imagens com tamanho de bloco $128 \times 128$ pixels; (d) imagens com tamanho de bloco $64 \times 64$ pixels. . . . .	90
4.28	Análise de variância - <i>hash table</i> - bloco de domínio com $4 \times 4$ pixels - tempo de compressão. . . . .	91
4.29	Análise de variância - <i>hash table</i> - bloco de domínio com $4 \times 4$ pixels - tempo de compressão. . . . .	93
4.30	Análise descritiva - <i>hash table</i> - bloco de domínio com $4 \times 4$ pixels - RMSE.	95
4.31	Análise de variância - <i>hash table</i> - bloco de domínio com $4 \times 4$ pixels - RMSE.	96
4.32	Análise descritiva - <i>hash table</i> - bloco de domínio com $4 \times 4$ pixels - PSNR.	97
4.33	Imagens comprimidas com <i>hash table</i> e tamanho de bloco $4 \times 4$ pixels e medida de distância baseada na média. Os respectivos valores dos resul- tados das imagens estão na mesma sequência da tabela 4.31: (a) imagens com tamanho de bloco $512 \times 512$ pixels; (b) imagens com tamanho de bloco $256 \times 256$ pixels; (c) imagens com tamanho de bloco $128 \times 128$ pixels; (d) imagens com tamanho de bloco $64 \times 64$ pixels. . . . .	97
4.34	Análise descritiva - <i>hash table</i> - bloco de domínio com $8 \times 8$ pixels - tempo de compressão. . . . .	98

4.35	Análise de variância - <i>hash table</i> - bloco de domínio com $8 \times 8$ pixels - tempo de compressão. . . . .	100
4.36	Análise descritiva - <i>hash table</i> - bloco de domínio com $8 \times 8$ pixels - RMSE.	101
4.37	Análise de variância - <i>hash table</i> - bloco de domínio com $8 \times 8$ pixels - RMSE.	102
4.38	Análise descritiva - <i>hash table</i> - bloco de domínio com $8 \times 8$ pixels - RMSE.	103
4.39	Imagens comprimidas com <i>hash table</i> e tamanho de bloco $8 \times 8$ pixels e medida de distância baseada na média. Os respectivos valores dos resultados das imagens estão na mesma sequência da tabela 4.38: (a) imagens com tamanho de bloco $512 \times 512$ pixels; (b) imagens com tamanho de bloco $256 \times 256$ pixels; (c) imagens com tamanho de bloco $128 \times 128$ pixels; (d) imagens com tamanho de bloco $64 \times 64$ pixels. . . . .	104
4.40	Análise descritiva - <i>hash table</i> - bloco de domínio com $16 \times 16$ pixels - tempo de compressão. . . . .	105
4.41	Análise de variância - <i>hash table</i> - bloco de domínio com $16 \times 16$ pixels - tempo de compressão. . . . .	107
4.42	Análise descritiva - <i>hash table</i> - bloco de domínio $16 \times 16$ pixels - RMSE. .	108
4.43	Análise de variância - <i>hash table</i> - bloco de domínio com $16 \times 16$ pixels - RMSE. . . . .	109
4.44	Análise descritiva - <i>hash table</i> - bloco de domínio com $16 \times 16$ pixels - PSNR.	110
4.45	Análise de variância - <i>hash table</i> - bloco de domínio com $16 \times 16$ pixels - PSNR. . . . .	111
4.46	Imagens comprimidas com <i>hash table</i> e tamanho de bloco $16 \times 16$ pixels e medida de distância baseada na média. Os respectivos valores dos resultados das imagens estão na mesma sequência da tabela 4.45: (a) imagens com tamanho de bloco $512 \times 512$ pixels; (b) imagens com tamanho de bloco $256 \times 256$ pixels; (c) imagens com tamanho de bloco $128 \times 128$ pixels; (d) imagens com tamanho de bloco $64 \times 64$ pixels. . . . .	112
4.47	Análise descritiva - <i>hash table</i> - bloco de domínio com $32 \times 32$ pixels - tempo de compressão. . . . .	113

4.48	Análise de variância - <i>hash table</i> - bloco de domínio com $32 \times 32$ pixels - tempo de compressão. . . . .	115
4.49	Análise descritiva - <i>hash table</i> - bloco de domínio com $32 \times 32$ pixels - taxa de compressão. . . . .	116
4.50	Análise descritiva - <i>hash table</i> - bloco de domínio com $32 \times 32$ pixels - RMSE.	117
4.51	Análise de variância - <i>hash table</i> - bloco de domínio com $32 \times 32$ pixels - RMSE. . . . .	118
4.52	Análise descritiva - <i>hash table</i> - bloco de domínio com $32 \times 32$ pixels - PSNR.	119
4.53	Imagens comprimidas com <i>hash table</i> e tamanho de bloco $32 \times 32$ pixels e medida de distância baseada na média. Os respectivos valores dos resultados das imagens estão na mesma sequência da tabela 4.53: (a) imagens com tamanho de bloco $512 \times 512$ pixels; (b) imagens com tamanho de bloco $256 \times 256$ pixels; (c) imagens com tamanho de bloco $128 \times 128$ pixels; (d) imagens com tamanho de bloco $64 \times 64$ pixels. . . . .	120
4.54	Resultados das imagens comprimidas com <i>hash table</i> no critério da média e tamanho de bloco $32 \times 32$ pixels - tempo de compressão: (a) imagem da Lenna com $512 \times 512$ pixels original; (b) imagem da Lenna com $512 \times 512$ pixels comprimida; (c) imagem Lenna com $256 \times 256$ pixels comprimida; (d) imagem Lenna com $128 \times 128$ pixels comprimida; (e) imagem Lenna com $64 \times 64$ pixels comprimida. . . . .	125
4.55	Resultados das imagens comprimidas com busca exaustiva no critério da média e tamanho de bloco $32 \times 32$ pixels - tempo de compressão: (a) imagem da Lenna com $512 \times 512$ pixels original; (b) imagem da Lenna com $512 \times 512$ pixels comprimida; (c) imagem Lenna com $256 \times 256$ pixels comprimida; (d) imagem Lenna com $128 \times 128$ pixels comprimida; (e) imagem Lenna com $64 \times 64$ pixels comprimida. . . . .	126

4.56	Resultados das imagens comprimidas com <i>hash table</i> a partir da média e tamanho de bloco $4 \times 4$ pixels - RMSE e PSNR: (a) imagem da Lenna com $512 \times 512$ pixels original; (b) imagem da Lenna com $512 \times 512$ pixels comprimida; (c) imagem Lenna com $256 \times 256$ pixels comprimida; (d) imagem Lenna com $128 \times 128$ pixels comprimida; (e) imagem Lenna com $64 \times 64$ pixels comprimida. . . . .	128
4.57	Imagens comprimidas com busca exaustiva a partir da média e tamanho de bloco $4 \times 4$ pixels - RMSE e PSNR: (a) imagem da Lenna com $512 \times 512$ pixels original; (b) imagem da Lenna com $512 \times 512$ pixels comprimida; (c) imagem Lenna com $256 \times 256$ pixels comprimida; (d) imagem Lenna com $128 \times 128$ pixels comprimida; (e) imagem Lenna com $64 \times 64$ pixels comprimida. . . . .	129
4.58	Análise descritiva - <i>quadtree</i> original- domínio 1T - tempo de compressão. .	131
4.59	Análise de variância - <i>quadtree</i> original - domínio 1T - tempo de compressão.	134
4.60	Análise descritiva - <i>quadtree</i> original - domínio 1T - taxa de compressão. .	134
4.61	Análise de variância - <i>quadtree</i> original - domínio 1T - taxa de compressão.	135
4.62	Análise Descritiva - Quadtree original - Domínio 1T - RMSE. . . . .	136
4.63	Análise de variância - <i>quadtree</i> original - domínio 1T - RMSE. . . . .	137
4.64	Análise descritiva - <i>quadtree</i> original - domínio 1T - PSNR. . . . .	137
4.65	Análise de variância - <i>quadtree</i> original - domínio 1T - PSNR. . . . .	138
4.66	Imagens comprimidas com a <i>quadtree</i> sem GLS e configuração de bloco 1T e medida de distância da média. Os respectivos valores dos resultados das imagens estão na mesma sequência da tabela 4.65: (a) imagens com tamanho de bloco $512 \times 512$ pixels; (b) imagens com tamanho de bloco $256 \times 256$ pixels; (c) imagens com tamanho de bloco $128 \times 128$ pixels; (d) imagens com tamanho de bloco $64 \times 64$ pixels. . . . .	139
4.67	Análise descritiva - <i>quadtree</i> original - domínio 2T - tempo de compressão.	140
4.68	Análise de variância - <i>quadtree</i> original - domínio 2T - tempo de compressão.	142
4.69	Análise descritiva - <i>quadtree</i> original - domínio 2T - taxa de compressão. .	143

4.70	Análise de variância - <i>quadtree</i> original - domínio 2T - taxa de compressão.	144
4.71	Análise descritiva - <i>quadtree</i> original - domínio 2T - RMSE. . . . .	145
4.72	Análise de variância - <i>quadtree</i> original - domínio 2T - RMSE. . . . .	145
4.73	Análise descritiva - <i>quadtree</i> original - domínio 2T - PSNR. . . . .	146
4.74	Análise de variância - <i>quadtree</i> original - domínio 2T - PSNR. . . . .	147
4.75	Imagens comprimidas com a <i>quadtree</i> sem GLS e configuração de bloco 2T e medida de distância da média. Os respectivos valores dos resultados das imagens estão na mesma sequência da tabela 4.74: (a) imagens com tamanho de bloco $512 \times 512$ pixels; (b) imagens com tamanho de bloco $256 \times 256$ pixels; (c) imagens com tamanho de bloco $128 \times 128$ pixels; (d) imagens com tamanho de bloco $64 \times 64$ pixels. . . . .	148
4.76	Análise descritiva - <i>quadtree</i> original - domínio 3T - tempo de compressão .	149
4.77	Análise de variância - <i>quadtree</i> original - domínio 3T - tempo de compressão.	151
4.78	Análise descritiva - <i>quadtree</i> original - domínio 3T - taxa de compressão. .	152
4.79	Análise de variância - <i>quadtree</i> original - domínio 3T - taxa de compressão.	153
4.80	Análise descritiva - <i>quadtree</i> original - domínio 3T - RMSE. . . . .	154
4.81	Análise de variância - <i>quadtree</i> original - domínio 3T - RMSE. . . . .	154
4.82	Análise descritiva - <i>quadtree</i> original - domínio 3T - PSNR. . . . .	155
4.83	Análise de variância - <i>quadtree</i> original - domínio 3T - PSNR. . . . .	156
4.84	Imagens comprimidas com a <i>quadtree</i> sem GLS e configuração de bloco 3T e medida de distância da média. Os respectivos valores dos resultados das imagens estão na mesma sequência da tabela 4.83: (a) imagens com tamanho de bloco $512 \times 512$ pixels; (b) imagens com tamanho de bloco $256 \times 256$ pixels; (c) imagens com tamanho de bloco $128 \times 128$ pixels; (d) imagens com tamanho de bloco $64 \times 64$ pixels. . . . .	157
4.85	Análise descritiva - <i>quadtree</i> original - domínio 4T - tempo de compressão.	158
4.86	Análise de variância - <i>quadtree</i> original - domínio 4T - tempo de compressão.	160
4.87	Análise Descritiva - Quadtree original - Domínio 4T - Taxa de Compressão.	161
4.88	Análise de variância - <i>quadtree</i> original - domínio 4T - taxa de compressão.	162

4.89	Análise descritiva - <i>quadtree</i> original - domínio 4T - RMSE. . . . .	163
4.90	Análise de variância - <i>quadtree</i> original - domínio 4T - RMSE. . . . .	163
4.91	Análise descritiva - <i>quadtree</i> original - domínio 4T - PSNR. . . . .	164
4.92	Análise de variância - <i>quadtree</i> original - domínio 4T - PSNR. . . . .	165
4.93	Imagens comprimidas com a <i>quadtree</i> sem GLS e configuração de bloco 4T e medida de distância da média. Os respectivos valores dos resultados das imagens estão na mesma sequência da tabela 4.92: (a) imagens com tamanho de bloco $512 \times 512$ pixels; (b) imagens com tamanho de bloco $256 \times 256$ pixels; (c) imagens com tamanho de bloco $128 \times 128$ pixels; (d) imagens com tamanho de bloco $64 \times 64$ pixels. . . . .	166
4.94	Análise descritiva - <i>quadtree</i> - domínio 1T - tempo de compressão. . . . .	169
4.95	Análise de variância - <i>quadtree</i> - domínio 1T - tempo de compressão. . . . .	170
4.96	Análise descritiva - <i>quadtree</i> - domínio 1T - taxa de compressão. . . . .	171
4.97	Análise de variância - <i>quadtree</i> - domínio 1T - taxa de compressão. . . . .	171
4.98	Análise descritiva - <i>quadtree</i> - domínio 1T - RMSE. . . . .	172
4.99	Análise de variância - <i>quadtree</i> - domínio 1T - RMSE. . . . .	173
4.100	Análise descritiva - <i>quadtree</i> - domínio 1T - RMSE. . . . .	174
4.101	Análise de variância - <i>quadtree</i> - domínio 1T - PSNR. . . . .	175
4.102	Imagens comprimidas com particionamento <i>quadtree</i> com GLS e configuração de bloco 1T e medida de distância baseada na média. Os respectivos valores dos resultados das imagens estão na mesma sequência da tabela 4.101: (a) imagens com tamanho de bloco $512 \times 512$ pixels; (b) imagens com tamanho de bloco $256 \times 256$ pixels; (c) imagens com tamanho de bloco $128 \times 128$ pixels; (d) imagens com tamanho de bloco $64 \times 64$ pixels. . . . .	176
4.103	Análise descritiva - <i>quadtree</i> - domínio 2T - RMSE. . . . .	177
4.104	Análise de variância - <i>quadtree</i> - domínio 2T - tempo de compressão. . . . .	179
4.105	Análise descritiva - <i>quadtree</i> - domínio 2T - taxa de compressão. . . . .	180
4.106	Análise de variância - <i>quadtree</i> - domínio 2T - taxa de compressão. . . . .	181
4.107	Análise descritiva - <i>quadtree</i> - domínio 2T - RMSE. . . . .	182

4.108	Análise de variância - <i>quadtree</i> - domínio 2T - RMSE. . . . .	183
4.109	Análise descritiva - <i>quadtree</i> - domínio 2T - PSNR. . . . .	183
4.110	Análise de variância - <i>quadtree</i> - domínio 2T - PSNR. . . . .	184
4.111	Imagens comprimidas com particionamento <i>quadtree</i> com GLS, configuração de bloco 2T e medida de distância baseada na média. Os respectivos valores dos resultados das imagens estão na mesma sequência da tabela 4.110: (a) Imagens com tamanho de bloco $512 \times 512$ pixels; (b) imagens com tamanho de bloco $256 \times 256$ pixels; (c) imagens com tamanho de bloco $128 \times 128$ pixels; (d) imagens com tamanho de bloco $64 \times 64$ pixels. . . . .	186
4.112	Análise descritiva - <i>quadtree</i> - domínio 3T - tempo de compressão. . . . .	187
4.113	Análise de variância - <i>quadtree</i> - domínio 3T - tempo de compressão. . . . .	189
4.114	Análise descritiva - <i>quadtree</i> - domínio 3T - taxa de compressão. . . . .	190
4.115	Análise de variância - <i>quadtree</i> - domínio 3T - taxa de compressão. . . . .	191
4.116	Análise descritiva - <i>quadtree</i> - domínio 3T - RMSE. . . . .	192
4.117	Análise de variância - <i>quadtree</i> - domínio 3T - RMSE, . . . . .	192
4.118	Análise descritiva - <i>quadtree</i> - domínio 3T - PSNR. . . . .	193
4.119	Análise de variância - <i>quadtree</i> - domínio 3T - PSNR. . . . .	194
4.120	Imagens comprimidas com particionamento <i>quadtree</i> com GLS, configuração de bloco 3T e medida de distância baseada na média. Os respectivos valores dos resultados das imagens estão na mesma sequência da tabela 4.119: (a) imagens com tamanho de bloco $512 \times 512$ pixels; (b) imagens com tamanho de bloco $256 \times 256$ pixels; (c) imagens com tamanho de bloco $128 \times 128$ pixels; (d) imagens com tamanho de bloco $64 \times 64$ pixels. . . . .	195
4.121	Análise descritiva - <i>quadtree</i> - domínio 4T - tempo de compressão. . . . .	196
4.122	Análise de variância - <i>quadtree</i> - domínio 4T - tempo de compressão. . . . .	198
4.123	Análise descritiva - <i>quadtree</i> - domínio 4T - taxa de compressão. . . . .	199
4.124	Análise de variância - <i>quadtree</i> - domínio 4T - taxa de compressão. . . . .	200
4.125	Análise descritiva - <i>quadtree</i> - domínio 4T - RMSE. . . . .	201
4.126	Análise de variância - <i>quadtree</i> - domínio 4T - RMSE. . . . .	201

4.127	Análise descritiva - <i>quadtree</i> - domínio 4T - PSNR. . . . .	202
4.128	Análise de variância - <i>quadtree</i> - domínio 4T - PSNR. . . . .	203
4.129	Imagens comprimidas com particionamento <i>quadtree</i> com GLS, configuração de bloco 4T e medida de distância baseada na média. Os respectivos valores dos resultados das imagens estão na mesma sequência da tabela 4.128: (a) imagens com tamanho de bloco $512 \times 512$ pixels; (b) imagens com tamanho de bloco $256 \times 256$ pixels; (c) imagens com tamanho de bloco $128 \times 128$ pixels; (d) imagens com tamanho de bloco $64 \times 64$ pixels. . . . .	204
4.130	Imagens comprimidas com <i>quadtree</i> com GLS e modelo 2T: (a) imagem da Lenna com $512 \times 512$ pixels original; (b) imagem da Lenna com $512 \times 512$ pixels comprimida. (c) imagem Lenna com $256 \times 256$ pixels comprimida; (d) imagem Lenna com $128 \times 128$ pixels comprimida; (e) imagem Lenna com $64 \times 64$ pixels comprimida. . . . .	209
4.131	Imagens comprimidas com <i>quadtree</i> sem GLS e modelo 2T: (a) imagem da Lenna com $512 \times 512$ pixels original; (b) imagem da Lenna com $512 \times 512$ pixels comprimida; (c) imagem Lenna com $256 \times 256$ pixels comprimida; (d) imagem Lenna com $128 \times 128$ pixels comprimida; (e) imagem Lenna com $64 \times 64$ pixels comprimida. . . . .	210
4.132	Imagens comprimidas com <i>quadtree</i> com GLS e modelo 4T: (a) imagem da Lenna com $512 \times 512$ pixels original; (b) imagem da Lenna com $512 \times 512$ pixels comprimida; (c) imagem Lenna com $256 \times 256$ pixels comprimida. . . . .	211
4.133	Imagens comprimidas com Quadtree e modelo 4T: (a) Imagem da Lenna com $512 \times 512$ pixels original; (b) Imagem da Lenna com $512 \times 512$ pixels comprimida; (c) Imagem Lenna com $256 \times 256$ pixels comprimida. . . . .	213
4.134	Imagens comprimidas com <i>quadtree</i> sem GLS e modelo 1T: (a) imagem da Lenna com $512 \times 512$ pixels original; (b) imagem da Lenna com $512 \times 512$ pixels comprimida; (c) imagem Lenna com $256 \times 256$ pixels comprimida; (d) imagem Lenna com $128 \times 128$ pixels comprimida; (e) imagem Lenna com $64 \times 64$ pixels comprimida. . . . .	214

## LISTA DE TABELAS

2.1	Demonstração do teorema do ponto fixo, com $f(x) = 0,6x + 12$ . . . . .	14
3.1	Tipos de ordenação. Extraído do algoritmo baseado em <i>quadtree</i> de Fisher [18]. . . . .	44
3.2	Conjuntos de valores do algoritmo da <i>quadtree</i> . . . . .	58
4.1	Compressão fractal de imagens com busca exaustiva - bloco domínio com $4 \times 4$ pixels. . . . .	60
4.2	Análise descritiva - busca exaustiva - bloco domínio com $4 \times 4$ pixels - tempo de compressão. . . . .	61
4.3	Análise de variância - busca exaustiva - bloco domínio com $4 \times 4$ pixels - tempo de compressão. . . . .	61
4.4	Análise descritiva - busca exaustiva - bloco de domínio com $4 \times 4$ pixels - RMSE. . . . .	63
4.5	Análise de variância - busca exaustiva - bloco de domínio com $4 \times 4$ pixels - RMSE: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas. . . . .	64
4.6	Análise descritiva - busca exaustiva - bloco de domínio $4 \times 4$ pixels - PSNR. . . . .	65
4.7	Análise de variância - busca exaustiva - bloco de domínio com $4 \times 4$ pixels - PSNR: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas. . . . .	65
4.8	Compressão fractal de imagens com busca exaustiva - bloco de domínio com $8 \times 8$ pixels. . . . .	69
4.9	Análise descritiva - busca exaustiva - bloco de domínio com $8 \times 8$ pixels - tempo de compressão. . . . .	70
4.10	Análise de variância - busca exaustiva - bloco de domínio com $8 \times 8$ pixels - tempo de compressão . . . . .	70
4.11	Análise descritiva - busca exaustiva - bloco de domínio com $8 \times 8$ pixels - taxa de compressão. . . . .	70

4.12	Análise descritiva - busca exaustiva - bloco de domínio com $8 \times 8$ pixels - RMSE. . . . .	71
4.13	Análise de variância - busca exaustiva - bloco de domínio com $8 \times 8$ pixels - RMSE: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas. . . . .	72
4.14	Análise descritiva - busca exaustiva - bloco de domínio com $8 \times 8$ pixels - PSNR . . . . .	72
4.15	Análise de variância - busca exaustiva - bloco de domínio com $8 \times 8$ pixels - PSNR: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas. . . . .	73
4.16	Compressão fractal de imagens com busca exaustiva - bloco de domínio com $16 \times 16$ pixels. . . . .	77
4.17	Análise descritiva - busca exaustiva - bloco de domínio com $16 \times 16$ pixels - tempo de compressão. . . . .	78
4.18	Análise de variância - busca exaustiva - bloco de domínio com $16 \times 16$ pixels - tempo de compressão. . . . .	78
4.19	Análise Descritiva - Busca Exaustiva - Domínio $16 \times 16$ pixels - Taxa de Compressão . . . . .	79
4.20	Análise Descritiva - Busca Exaustiva - Domínio $16 \times 16$ pixels - PSNR . . . . .	79
4.21	Análise de Variância - Busca Exaustiva - Domínio $16 \times 16$ pixels - PSNR: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas . . . . .	80
4.22	Análise descritiva - busca exaustiva - bloco de domínio com $16 \times 16$ pixels - PSNR. . . . .	81
4.23	Compressão fractal de imagens com busca exaustiva - bloco de domínio com $32 \times 32$ pixels. . . . .	84
4.24	Análise descritiva - busca exaustiva - bloco de domínio com $32 \times 32$ pixels - tempo de compressão. . . . .	85
4.25	Análise de variância - busca exaustiva - bloco de domínio com $32 \times 32$ pixels - tempo de compressão: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas. . . . .	85
4.26	Análise descritiva - busca exaustiva - bloco de domínio com $32 \times 32$ pixels - taxa de compressão. . . . .	86

4.27	Análise descritiva - busca exaustiva - bloco de domínio com $32 \times 32$ pixels - RMSE. . . . .	87
4.28	Análise de variância - busca exaustiva - bloco de domínio com $32 \times 32$ pixels - RMSE: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas. . . . .	88
4.29	Análise descritiva - busca exaustiva - bloco de domínio com $32 \times 32$ pixels - PSNR. . . . .	88
4.30	Análise de variância - busca exaustiva - bloco de domínio com $32 \times 32$ pixels - PSNR: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas. . . . .	89
4.31	Compressão fractal de imagens com <i>hash table</i> - bloco de domínio com $4 \times 4$ pixels. . . . .	92
4.32	Análise descritiva - <i>hash table</i> - bloco de domínio com $4 \times 4$ pixels - tempo de compressão. . . . .	93
4.33	Análise de variância - <i>hash table</i> - bloco de domínio com $4 \times 4$ pixels - tempo de compressão: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas. . . . .	93
4.34	Análise descritiva - <i>hash table</i> - bloco de domínio com $4 \times 4$ pixels - taxa de compressão. . . . .	94
4.35	Análise descritiva - <i>hash table</i> - bloco de domínio com $4 \times 4$ pixels - RMSE. . . . .	94
4.36	Análise de variância - <i>hash table</i> - bloco de domínio com $4 \times 4$ pixels - RMSE: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas. . . . .	95
4.37	Análise descritiva - <i>hash table</i> - bloco de domínio com $4 \times 4$ pixels - PSNR. . . . .	96
4.38	Compressão fractal de imagens com <i>hash table</i> - bloco de domínio com $8 \times 8$ pixels. . . . .	99
4.39	Análise descritiva - <i>hash table</i> - bloco de domínio com $8 \times 8$ pixels - tempo de compressão. . . . .	100
4.40	Análise de variância - <i>hash table</i> - bloco de domínio com $8 \times 8$ pixels - tempo de compressão. . . . .	100
4.41	Análise descritiva - <i>hash table</i> - bloco de domínio com $8 \times 8$ pixels - taxa de compressão. . . . .	100
4.42	Análise descritiva - <i>hash table</i> - bloco de domínio com $8 \times 8$ pixels - RMSE. . . . .	101

4.43	Análise de variância - <i>hash table</i> - bloco de domínio com $8 \times 8$ pixels - RMSE: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas. . . . .	102
4.44	Análise descritiva - <i>hash table</i> - bloco de domínio com $8 \times 8$ pixels - PSNR.	103
4.45	Compressão fractal de imagens com <i>hash table</i> - bloco de domínio com $16 \times 16$ pixels. . . . .	106
4.46	Análise descritiva - <i>hash table</i> - bloco de domínio com $16 \times 16$ pixels - tempo de compressão. . . . .	107
4.47	Análise de variância - <i>hash table</i> - bloco de domínio com $16 \times 16$ pixels - tempo de compressão. . . . .	107
4.48	Análise descritiva - <i>hash table</i> - bloco de domínio com $16 \times 16$ pixels - taxa de compressão. . . . .	108
4.49	Análise descritiva - <i>hash table</i> - bloco de domínio com $16 \times 16$ pixels - RMSE.	108
4.50	Análise de variância - <i>hash table</i> - bloco de domínio com $16 \times 16$ pixels - RMSE: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas. . . . .	109
4.51	Análise Descritiva - Hash Table - Domínio $16 \times 16$ pixels - PSNR . . . . .	110
4.52	Análise de Variância - Hash Table - Domínio $16 \times 16$ pixels - PSNR: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas . . . . .	111
4.53	Compressão fractal de imagens com <i>hash table</i> - bloco de domínio com $32 \times 32$ pixels. . . . .	114
4.54	Análise descritiva - <i>hash table</i> - bloco de domínio com $32 \times 32$ pixels - tempo de compressão. . . . .	115
4.55	Análise de variância - <i>hash table</i> - bloco de domínio com $32 \times 32$ pixels - tempo de compressão. . . . .	115
4.56	Análise descritiva - <i>hash table</i> - bloco de domínio com $32 \times 32$ pixels - taxa de compressão. . . . .	116
4.57	Análise descritiva - <i>hash table</i> - bloco de domínio $32 \times 32$ pixels - RMSE. . . . .	117
4.58	Análise de variância - <i>hash table</i> - bloco de domínio com $32 \times 32$ pixels - RMSE: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas. . . . .	117
4.59	Análise descritiva - <i>hash table</i> - bloco de domínio com $32 \times 32$ pixels - PSNR.	118

4.60	Análise de variância - <i>hash table</i> - bloco de domínio com $32 \times 32$ pixels - PSNR: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas. . . . .	119
4.61	Análise Descritiva - Comparação dos resultados da Busca Exaustiva x Hash Table - Tempo de Compressão . . . . .	122
4.62	Análise descritiva - comparação dos resultados da busca exaustiva x <i>hash table</i> - taxa de compressão. . . . .	123
4.63	Análise descritiva - comparação dos resultados da busca exaustiva x <i>hash table</i> - RMSE. . . . .	124
4.64	Análise descritiva - comparação dos resultados da busca exaustiva x <i>hash table</i> - PSNR. . . . .	127
4.65	Compressão fractal de imagens por quadtree sem GLS (QTSGLS) - domínio 1T. . . . .	132
4.66	Análise descritiva - <i>quadtree</i> original - domínio 1T - tempo de compressão. . . . .	133
4.67	Análise de variância - <i>quadtree</i> original- domínio 1T - tempo de compressão: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas. . . . .	133
4.68	Análise descritiva - <i>quadtree</i> original - domínio 1T - taxa de compressão. . . . .	134
4.69	Análise de variância - <i>quadtree</i> original - domínio 1T - taxa de compressão: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas . . . . .	135
4.70	Análise descritiva - <i>quadtree</i> original - domínio 1T - RMSE. . . . .	136
4.71	Análise de variância - <i>quadtree</i> original - domínio 1T - RMSE: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas. . . . .	136
4.72	Análise descritiva - <i>quadtree</i> original - domínio 1T - PSNR. . . . .	137
4.73	Análise de variância - <i>quadtree</i> original - domínio 1T - PSNR: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas. . . . .	138
4.74	Compressão fractal de imagens por <i>quadtree</i> sem GLS (QTSGLS) - domínio 2T. . . . .	141
4.75	Análise descritiva - <i>quadtree</i> original - domínio 2T - tempo de compressão. . . . .	142
4.76	Análise de variância - <i>quadtree</i> original - domínio 2T - tempo de compressão: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas. . . . .	142

4.77	Análise descritiva - <i>quadtree</i> original - domínio 2T - taxa de compressão. . . . .	143
4.78	Análise de variância - <i>quadtree</i> original - domínio 2T - taxa de compressão: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas. . . . .	143
4.79	Análise descritiva - <i>quadtree</i> original - domínio 2T - RMSE. . . . .	144
4.80	Análise de variância - <i>quadtree</i> original - domínio 2T - RMSE: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas. . . . .	145
4.81	Análise descritiva - <i>quadtree</i> original - domínio 2T - PSNR. . . . .	146
4.82	Análise de variância - <i>quadtree</i> original - domínio 2T - PSNR: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas. . . . .	147
4.83	Compressão fractal de imagens por <i>quadtree</i> sem GLS (QTSGLS) - domínio 3T. . . . .	150
4.84	Análise descritiva - <i>quadtree</i> original - domínio 3T - tempo de compressão. . . . .	151
4.85	Análise de variância - <i>quadtree</i> original - domínio 3T - tempo de compressão: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas. . . . .	151
4.86	Análise descritiva - <i>quadtree</i> original - domínio 3T - taxa de compressão. . . . .	152
4.87	Análise de variância - <i>quadtree</i> original - domínio 3T - taxa de compressão: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas. . . . .	152
4.88	Análise descritiva - <i>quadtree</i> original - domínio 3T - RMSE. . . . .	153
4.89	Análise de variância - <i>quadtree</i> original - domínio 3T - RMSE: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas. . . . .	154
4.90	Análise descritiva - <i>quadtree</i> original - domínio 3T - PSNR. . . . .	155
4.91	Análise de variância - <i>quadtree</i> original - domínio 3T - PSNR: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas. . . . .	155
4.92	Compressão fractal de imagens por <i>quadtree</i> sem GLS (QTSGLS) - domínio 4T. . . . .	159
4.93	Análise descritiva - <i>quadtree</i> original - domínio 4T - tempo de compressão. . . . .	160
4.94	Análise de variância - <i>quadtree</i> original - domínio 4T - tempo de compressão: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas. . . . .	160
4.95	Análise descritiva - <i>quadtree</i> original - domínio 4T - taxa de compressão. . . . .	161

4.96	Análise de variância - <i>quadtree</i> original - domínio 4T - taxa de compressão: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas. . . . .	161
4.97	Análise descritiva - <i>quadtree</i> original - domínio 4T - RMSE. . . . .	162
4.98	Análise de variância - <i>quadtree</i> original - domínio 4T - RMSE: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas. . . . .	162
4.99	Análise descritiva - <i>quadtree</i> original - domínio 4T - PSNR. . . . .	164
4.100	Análise de variância - <i>quadtree</i> original - domínio 4T - PSNR: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas. . . . .	164
4.101	Compressão fractal de imagens por <i>quadtree</i> com GLS (QTCGLS) - domínio 1T. . . . .	168
4.102	Análise descritiva - <i>quadtree</i> - domínio 1T - tempo de compressão. . . . .	169
4.103	Análise de variância - <i>quadtree</i> - domínio 1T - tempo de compressão: 1- Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas. . . . .	169
4.104	Análise descritiva - <i>quadtree</i> - domínio 1T - taxa de compressão. . . . .	170
4.105	Análise de variância - <i>quadtree</i> - domínio 1T - taxa de compressão: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas. . . . .	171
4.106	Análise descritiva - <i>quadtree</i> - domínio 1T - RMSE. . . . .	172
4.107	Análise de variância - <i>quadtree</i> - domínio 1T - RMSE: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas. . . . .	173
4.108	Análise descritiva - <i>quadtree</i> - domínio 1T - PSNR. . . . .	173
4.109	Análise de Variância - <i>Quadtree</i> - Domínio 1T - PSNR: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas . . . . .	174
4.110	Compressão fractal de imagens por <i>quadtree</i> com GLS (QTCGLS) - domínio 2T. . . . .	178
4.111	Análise descritiva - <i>quadtree</i> - domínio 2T - tempo de compressão . . . . .	179
4.112	Análise de variância - <i>quadtree</i> - domínio 2T - tempo de compressão: 1- Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas. . . . .	179
4.113	Análise descritiva - <i>quadtree</i> - domínio 2T - taxa de compressão. . . . .	180

4.114	Análise de variância - <i>quadtree</i> - domínio 2T - taxa de compressão: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas. . . . .	181
4.115	Análise descritiva - <i>quadtree</i> - domínio 2T - RMSE. . . . .	181
4.116	Análise de variância - <i>quadtree</i> - domínio 2T - RMSE: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas. . . . .	182
4.117	Análise descritiva - <i>quadtree</i> - domínio 2T - PSNR. . . . .	183
4.118	Análise de variância - <i>quadtree</i> - domínio 2T - PSNR: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas. . . . .	184
4.119	Compressão fractal de imagens por <i>quadtree</i> com GLS (QTCGLS) - domínio 3T. . . . .	188
4.120	Análise descritiva - <i>quadtree</i> - domínio 3T - tempo de compressão. . . . .	189
4.121	Análise de variância - <i>quadtree</i> - domínio 3T - tempo de compressão: 1- Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas. . . . .	189
4.122	Análise descritiva - <i>quadtree</i> - domínio 3T - taxa de compressão. . . . .	190
4.123	Análise de Variância - Quadtree - Domínio 3T - Taxa de Compressão: 1- Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas. . . . .	191
4.124	Análise descritiva - <i>quadtree</i> - domínio 3T - RMSE. . . . .	191
4.125	Análise de variância - <i>quadtree</i> - domínio 3T - RMSE. . . . .	192
4.126	Análise descritiva - <i>quadtree</i> - domínio 3T - PSNR, . . . . .	193
4.127	Análise de variância - <i>quadtree</i> - domínio 3T - PSNR. . . . .	193
4.128	Compressão fractal de imagens por <i>quadtree</i> com GLS (QTCGLS) - domínio 4T. . . . .	197
4.129	Análise descritiva - <i>quadtree</i> - domínio 4T - tempo de compressão. . . . .	198
4.130	Análise de variância - <i>quadtree</i> - domínio 4T - tempo de compressão: 1- Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas. . . . .	198
4.131	Análise descritiva - <i>quadtree</i> - domínio 4T - taxa de compressão. . . . .	199
4.132	Análise de variância - <i>quadtree</i> - domínio 4T - taxa de compressão: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas. . . . .	199
4.133	Análise descritiva - <i>quadtree</i> - domínio 4T - RMSE. . . . .	200

4.134	Análise de variância - <i>quadtree</i> - domínio 4T - RMSE. . . . .	201
4.135	Análise descritiva - <i>quadtree</i> - domínio 4T - PSNR. . . . .	202
4.136	Análise de variância - <i>quadtree</i> - domínio 4T - PSNR. . . . .	202
4.137	Comparação dos resultados da <i>quadtree</i> sem GLS e da <i>quadtree</i> com GLS - tempo de compressão. . . . .	206
4.138	Comparação dos resultados da <i>quadtree</i> sem GLS e da <i>quadtree</i> com GLS - taxa de compressão. . . . .	207
4.139	Comparação dos resultados da <i>quadtree</i> sem GLS e da <i>quadtree</i> com GLS - RMSE. . . . .	208
4.140	Comparação dos resultados da <i>quadtree</i> sem GLS e <i>quadtree</i> com GLS - PSNR; . . . . .	212

## RESUMO

Os sistemas computacionais, que proporcionam meios de armazenamento e transmissão de dados por conexões remotas, têm evoluído significativamente nos últimos anos. Com isso, a demanda por métodos eficientes, especificamente para compressão de dados, tem sido alta.

O objetivo desta dissertação é apresentar um método que proporcione melhor armazenamento de imagens e envio de informações por qualquer meio físico, utilizando-se da compressão de imagens com perdas.

O trabalho apresenta a compressão fractal de imagens e seus principais conceitos, além de propor um aperfeiçoamento nos algoritmos de busca exaustiva e por *quadtree* a partir da estrutura *hash table* e da busca local guiada.

Para avaliar a eficiência dessas técnicas, várias imagens foram comprimidas utilizando-se diferentes medidas de similaridade e tamanhos de blocos de domínios. Uma análise estatística detalhada é realizada para avaliar os conjuntos de dados gerados e os métodos desenvolvidos, de acordo com tempo de compressão, taxa de compressão e medidas de qualidade.

**Palavras chave:** Compressão fractal, busca exaustiva, *quadtree*, *hash table*, busca local guiada.

## ABSTRACT

Computer systems, which provide means of storage and transmission of data by remote connections, have significantly improved in recent years. Therefore, demand for efficient methods, particularly for data compression, has been high.

The objective of this dissertation is to present a method that provides better image storage and information transmission by any physical means, making use of image compression with loss.

This work presents the fractal image compression and its main concepts, and proposes an improvement on algorithms based on exhaustive search and quadtree through a hash table and a guided local search.

To evaluate the efficiency of such techniques, several images were compressed by using different similarity measures and block domain sizes. A detailed statistical analysis is performed to evaluate the generated data sets and the developed methods, according to execution time, compression rate and quality measures.

**Keywords:** Fractal compression, exhaustive search, quadtree, hash table, guided local search.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta a caracterização do problema a ser abordado neste trabalho, sua motivação e justificativa, seus principais objetivos e contribuições, bem como a organização do texto.

### 1.1 Caracterização do Problema

A evolução dos sistemas de armazenamento de dados, a velocidade de transmissão e o volume de informações transmitidas pelos possíveis meios de comunicação têm sido crescente nos últimos anos. Com isso, a demanda por métodos mais eficientes, especialmente para compressão de dados, tem sido alta.

As técnicas de compactação de arquivos, entre elas a compressão de imagens, contribuem para a eficiência dos sistemas computacionais utilizados para a transmissão de imagens por meios remotos em diversas áreas, tais como a medicina, sensoriamento remoto, automação industrial, educação a distância, entre muitas outras.

### 1.2 Motivação e Justificativa

Na compressão de imagens digitais, há diversas técnicas distribuídas em compressão de imagens com perdas e sem perdas. A compressão de imagens com perdas é um método irreversível, que tem o objetivo de garantir maiores taxas de compressão e uma qualidade mediana da imagem. Por outro lado, as técnicas de compressão de imagens sem perdas têm seu foco na qualidade da imagem e não apenas nas taxas de compressão.

Pesquisadores vêm procurando maneiras de obter compressões de imagens cada vez mais eficientes, de modo a resultar altas taxas de compressão, redução de esforço computacional e reconstrução de imagens de boa qualidade.

Uma técnica recente é a compressão fractal de imagens, que utiliza o conceito de similaridade em diferentes escalas da imagem para obter a compressão. Essa técnica permite alta taxa de compressão de imagens, boa qualidade e redução do esforço computacional na execução do algoritmo.

### 1.3 Objetivos e Contribuições

O principal objetivo deste trabalho é apresentar o estudo da técnica de compressão fractal de imagens a partir dos algoritmos de busca exaustiva e *quadtree*, bem como modificar esses algoritmos aplicando a estrutura de dados *hash table* e a busca local guiada, com o objetivo de aumentar o desempenho dos algoritmos com relação ao tempo de compressão.

Como contribuições, espera-se reduzir o tempo de processamento, ou seja, reduzir o tempo de compressão das imagens. Uma análise estatística detalhada é realizada para avaliar os métodos desenvolvidos aplicados sobre um grande volume de imagens de diferentes naturezas, tais como fotografias, dados de terreno, cenas naturais e imagens médicas.

### 1.4 Organização do Texto

Esta dissertação está estruturada como segue. O capítulo 2 apresenta os principais conceitos relacionados à compressão de dados, incluindo compressão por fractais. O capítulo 3 descreve a metodologia proposta neste trabalho. Os resultados experimentais obtidos a partir da metodologia são apresentados no capítulo 4. As conclusões e propostas para trabalhos futuros são apresentadas no capítulo 5.

## CAPÍTULO 2

### FUNDAMENTOS

Este capítulo apresenta os fundamentos sobre compressão de imagens com e sem perdas, conceitos sobre compressão fractal de imagens, os teoremas do ponto fixo e da colagem, a transformada afim, os sistemas de funções iteradas, o codificador fractal básico, a compressão fractal com particionamento *quadtree*, duas medidas de similaridade e a razão de compressão.

#### 2.1 Compressão de Imagens

Atualmente, um grande volume de informações é transmitido e recebido via Internet ou através de outros tipos de conexões remotas. Essas informações podem conter dados, áudio, imagens e vídeos.

Devido às limitações inerentes dos meios físicos utilizados para transmitir os dados digitais (fibra óptica, ondas de rádio, satélite, cabos), é necessário ter um método que comprima (compacte) as informações para serem enviadas pelo meio e, ao chegarem ao seu destino, descomprima (descompacte) as informações para utilização dos dados [5, 21].

O envio de uma cena de jogo de futebol que envolve áudio e imagens é um exemplo. Quando um jogo de futebol é transmitido via Internet, a banda utilizada não é suficiente para o envio da cena no seu tamanho completo. Por isso, essa cena é compactada e enviada até o destino que, ao receber, descompacta os dados e transmite o jogo.

Na compressão digital de imagens, três redundâncias básicas são identificadas: redundância de dados, redundância interpixel e redundância psicovisual. A compressão dos dados é possível quando se diminui ou elimina essas redundâncias.

A redundância de dados é identificada quando determinadas regiões da imagem são semelhantes ou iguais, como ilustrada na figura 2.1(a). Assim, a redundância está na forma como a imagem é representada. Essas semelhanças poderiam ser representadas por

um conjunto menor de pixels resultando na compressão da imagem.

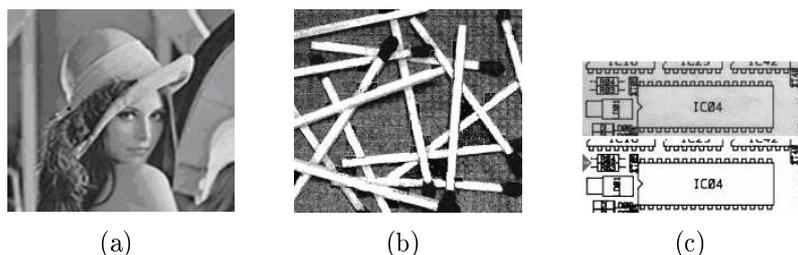


Figura 2.1: Redundâncias em imagens: (a) redundância de dados; (b) redundância interpixel; (c) redundância psicovisual. Extraído de [21].

As imagens que possuem semelhanças na sua composição (repetição de padrões na imagem), como visto na figura 2.1(b), possuem a presença da redundância interpixel. Esse fator identifica possibilidades maiores de compressão da imagem [21].

Os olhos humanos, quando observam uma imagem, logo notam a intensidade de luz de cada região. A essa intensidade semelhante das regiões denomina-se redundância psicovisual, como na figura 2.1(c). Essa redundância pode ser tratada para equilibrar o histograma da imagem e, assim, melhorar a compressão. A redundância psicovisual caracteriza-se, por se destacar em determinada parte da imagem, uma quantidade menor de brilho [21].

O processo de compressão de imagens consiste em dois subprocessos: compressão (codificação) da imagem e descompressão (decodificação) da imagem. Se o tempo de compressão for equivalente ao de descompressão, diz-se que o processo de compressão é simétrico. Se não, é assimétrico. Os métodos de compressão podem ser classificados em compressão sem perdas e com perdas, descritos a seguir [37, 40].

### 2.1.1 Compressão sem Perdas

Os métodos de compressão de imagens sem perdas têm o objetivo de reduzir a quantidade de bits para representar a imagem digital, sem perder informação e qualidade da imagem original quando for descomprimida. Após a descompressão sem perdas, a imagem resultante digital será idêntica à original.

As técnicas sem perdas eliminam as redundâncias da imagem e, assim, tenta-se obter uma nova imagem de forma visual idêntica à original, mas que numericamente não teria

o mesmo tamanho. Por isso, estas técnicas são consideradas de alta qualidade [28, 34].

Esses métodos são muito utilizados em arquivos médicos, arquivos textos, documentos, em que a perda de informação não é aceitável.

Um processo de compressão genérico divide-se em codificador e decodificador. O codificador recebe um sinal da imagem na entrada, transforma-o em símbolos e os transmite através de um canal até o decodificador. No decodificador é gerada a nova imagem digital.

Segundo Karam e Bovick [23], o codificador sem perdas possui três etapas: transformação, mapeador e codificador de símbolos. A figura 2.2 apresenta o modelo de Karam e Bovick.

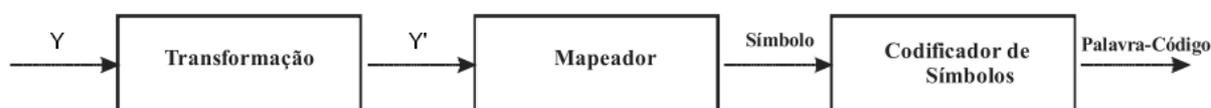


Figura 2.2: Compressor sem perdas. Extraído de [28].

A etapa de transformação do compressor sem perdas converte o sinal de entrada  $Y$  em  $Y'$  que deverá ser comprimido de forma mais eficiente. A transformação do sinal inicial é reversível, pois essa conversão consiste em transformar (representar) as regiões semelhantes da imagem com o mesmo identificador e então encaminhar esse resultado via canal para o mapeador.

No mapeador, a imagem transformada  $Y'$  é convertida em símbolos. Esta etapa faz a redução de redundâncias interpixels da imagem de entrada. Aqui pode se aplicar algumas técnicas de codificação, as quais serão mencionadas nesta seção.

Na última etapa, o codificador de símbolos produz uma sequência binária a partir dos símbolos gerados no mapeador, que resulta em uma palavra-código que representa os símbolos da entrada.

As técnicas mais utilizadas no processo de compressão de imagens sem perdas são a codificação de tamanho variável, a codificação LZW e a entropia [21]:

- a) **codificação de tamanho variável:** tem como objetivo eliminar a redundância de código na forma natural binária das imagens. O código de uma imagem se reduz a números binários que podem ser comprimidos de acordo com os padrões

identificados. Um exemplo é a codificação de Huffman [21].

- b) **codificação Lempel-Ziv-Welch (LZW)**: esta codificação está baseada em um dicionário de frases. Esse dicionário é construído à medida que novas frases são lidas do arquivo. A máquina de compressão registra uma nova frase e armazena no dicionário que representa esta frase por um código na imagem. Assim, substituindo frases idênticas por símbolos consegue-se reduzir a redundância dos dados. A técnica LZW é mais utilizada em imagens que possuem maior quantidade de padrões de texto [21].
- c) **entropia**: é uma técnica que tem o objetivo de reduzir a redundância de dados buscando valores repetidos como 0 (zero) no padrão da imagem. A entropia verifica a quantidade de vezes em que ocorre um mesmo padrão de valores na imagem e os representa por um único símbolo, o que proporciona a codificação [1, 22].

### 2.1.2 Compressão com Perdas

A compressão com perdas é um método irreversível, que permite a perda de uma parte dos dados da imagem. Como vantagem, tem-se um nível maior de compressão em relação à técnica sem perda [28].

Com esta vantagem, a técnica com perdas é preferida em algumas aplicações em que certa quantidade de erro é aceitável em benefício da alta taxa de compressão, tais como, por exemplo, transmissão de televisão, videoconferência, sensoriamento remoto. Em geral, as imagens reconstruídas por compressão com perdas são de boa qualidade visual [40].

Os compressores com perdas possuem três estágios básicos: transformada, quantização e codificação, como ilustrado na figura 2.3.

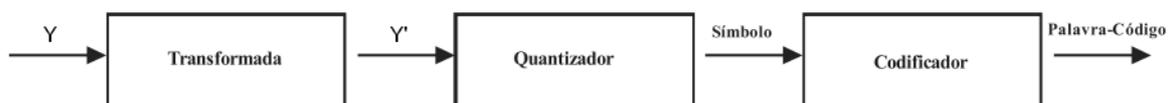


Figura 2.3: Compressor com perdas. Extraído de [28].

A etapa de transformada tem o objetivo de reduzir as correlações entre os pixels

representando-os de forma reduzida. Essa representação se realiza através de cálculos matemáticos que geram matrizes de valores.

Essa transformada é um cálculo matemático aplicado a uma matriz que representa a imagem. A matriz possui elementos que representam os níveis de intensidade de cinza da imagem.

Os valores podem variar de 0 (indica preto), 1, 2, 3,..., até  $2^{n-1}$  (indica branco). As variações entre 0 e  $2^{n-1} - 1$  representam os níveis de cinza intermediários. Quanto mais próximos do  $2^{n-1}$ , maior é a intensidade do valor do pixel.

Por ser um cálculo matemático, a transformada converte os sinais do domínio do tempo ou espaço para o domínio da frequência, dependendo da transformada. Para se ter um tempo de processamento menor, ela é aplicada em blocos de matrizes como:  $4 \times 4$ ,  $8 \times 8$ . Quanto maior o bloco, menor será a relação compressão e distorção. As transformadas mais utilizadas nesse processo são a transformada discreta do cosseno, transformada discreta do seno e transformada de Fourier [21].

Segundo Tudor [49], a etapa de quantização é utilizada para ajustar a imagem dentro de um número de níveis de cinza, de acordo com os valores possíveis empregados na representação de cada pixel. A quantização depende da quantidade de bits empregados para se definir as variações dos níveis de cinza que serão utilizados. Esta etapa é irreversível e estabelece uma perda de dados na imagem.

Após a quantização é realizada a etapa de codificação dos coeficientes quantizados. Essa codificação utiliza alguns métodos que evitam mais perda de dados. Por isso, normalmente se utiliza a codificação de Huffman ou aritmética. Essa etapa busca criar um código para representar os conjuntos de símbolos recebidos pela etapa de quantização e gerar uma nova imagem.

Os métodos mais empregados na compressão com perdas são codificação preditiva, codificação por transformada e codificação por fractal:

- a) **codificação preditiva:** esta codificação faz uma predição do valor do pixel baseando-se em outros pixels da imagem. É feito o cálculo do pixel em relação aos seus vizinhos gerando os resíduos. Assim, tem-se a imagem fonte e a residual

com menor entropia. Faz-se a diferença entre esses pixels, da imagem fonte e residual e gera-se um pixel preditivo que será codificado [16, 41].

- b) **codificação por transformada:** a codificação por transformada pode ser compreendida como uma soma das imagens bases, onde cada coeficiente da transformada determina a contribuição das imagens bases para a imagem original. Esse processo utiliza blocos da imagem que são processados em vários estágios até a imagem final [16].
- c) **codificação por fractal:** a codificação por fractal é uma técnica que identifica nas imagens, estruturas irregulares, fragmentação e similaridades em ampla escala. Com essas identificações é possível representar a imagem com partes dela mesma e obter um bom nível de compressão [40]. Essa técnica será abordada nesta pesquisa.

## 2.2 Conceitos da Compressão Fractal de Imagens

A compressão de imagens se fundamenta na Teoria de Informação de Shannon, a qual permite determinar a quantidade de informação contida nos dados. Quando uma quantidade mínima de dados consegue representar uma determinada quantidade de informação considera-se que não existe redundância [40].

Pesquisadores buscam constantemente obter métodos de compressão de imagens mais eficientes, de modo a atingir três objetivos: alta taxa de compressão, tempo de processamento e imagens codificadas de boa qualidade [36]. Os métodos já desenvolvidos não conseguem ser totalmente satisfatórios em todos esses aspectos, por isso, a divisão em métodos com perdas e sem perdas na compressão de imagens. Entre as pesquisas sobre compressão de imagens surgiu a compressão fractal de imagens, baseada em características encontradas nas imagens [8].

O matemático Mandelbrot [30], pioneiramente em 1975, fez a primeira publicação da teoria dos fractais. Os fractais são estruturas que apresentam irregularidades e fragmentação em uma faixa de escala muito ampla, como nas nuvens, fumaças, montanhas e outros objetos da natureza. Em síntese, um fractal é a forma que contém partes que são réplicas

do todo sob algum aspecto [42], como ilustrado na figura 2.4.

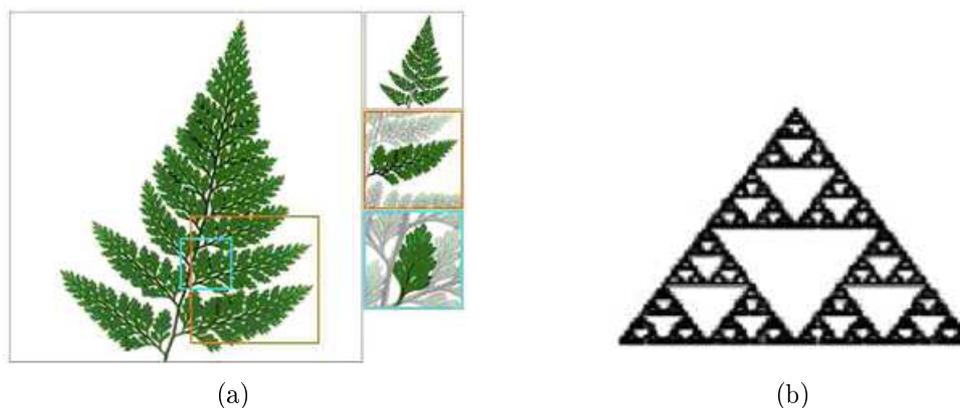


Figura 2.4: Fractais: (a) fractais nas folhas; (b) triângulo de Sierpinski. Extraído de [40].

Na figura 2.4(a), têm-se pequenas folhas que se repetem por toda a imagem e, na figura 2.4(b), a imagem é formada por pequenos triângulos. Essas ilustrações apresentam o comportamento do fractal, que é a criação do todo da imagem por suas pequenas partes que são réplicas da própria imagem. Os fractais são construídos através de processos iterativos, potencialmente infinitos.

Segundo Murr [30], Mandelbrot em 1975, no seu primeiro livro sobre fractais, definiu os fractais da seguinte maneira: Um dado conjunto  $E$  é Fractal se, em  $E$ ,  $D_H > D_T$ , sendo  $D_H$  a dimensão de Hausdorff-Besicovitch e  $D_T$  a dimensão topológica do conjunto  $E$ . O conjunto  $E$  abrange também as figuras geométricas.

A definição de Falconer [15], em 1997, esclarece de outra maneira os fractais. Ele propõe uma definição com foco nas características das construções ou conjuntos denominados fractais. Uma construção é fractal se ela possuir todas ou a maior parte das seguintes características [14, 15]:

- a) **estrutura fina em qualquer escala:** essa estrutura fina consiste em exibir detalhes do fractal em qualquer escala. Se for ampliando a imagem fractal, sempre surgirão novos detalhes da imagem. Isso não ocorre com uma reta, pois ao se ampliar uma parte da reta, não aparecem novos detalhes, apenas a reta com tamanho diferente.
- b) **não é possível descrever através de uma função analítica ou linguagem**

**geométrica tradicional:** o fractal é construído através de processo iterativo, dificilmente representado por funções simples.

- c) **apresenta, de alguma forma, auto-similaridade, mesmo se for estocasticamente:** a auto-similaridade consiste em se obter réplicas da figura, enquanto for feita a divisão da imagem. Essa auto-similaridade é ilustrada na figura 2.4.
- d) **a dimensão fractal deve ser maior que a dimensão topológica da imagem:** dimensão fractal corresponde à dimensão espacial, ou espaço ocupado pela figura, enquanto que a dimensão topológica corresponde à dimensão ocupada pela imagem (por exemplo, um ponto tem dimensão 0, uma curva dimensão 1 e a superfície dimensão 2).
- e) **pode ser definido por um processo iterativo, um algoritmo recursivo simples:** segundo Murr [30], o fractal é formado por um algoritmo recursivo, que divide a imagem em pequenas partes para codificá-la e depois compõe essas partes recursivamente para decodificar a imagem.

As imagens fractais que possuem estas características apresentam réplicas do todo da imagem em escalas menores. O modelo fractal recebe uma imagem de entrada e executa seu algoritmo fractal de forma recursiva, gerando resultados como ilustrado na figura 2.5.

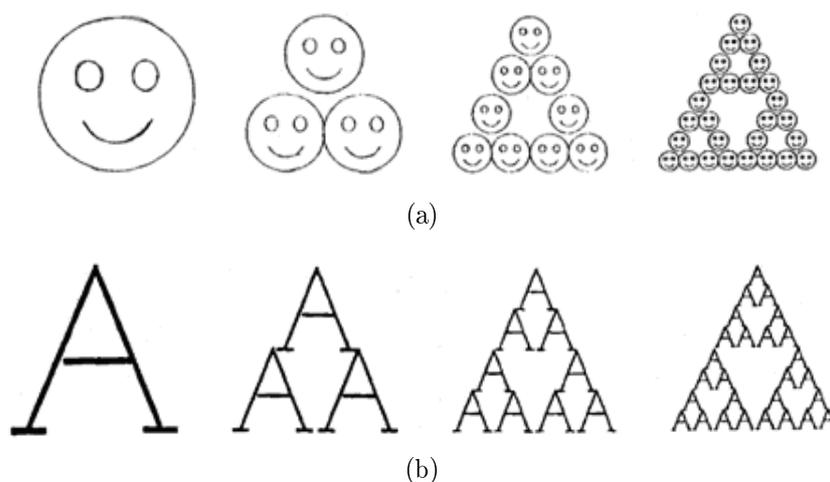


Figura 2.5: Exemplos de fractais. Extraído de [13].

Essas imagens são resultantes de transformações afins e dos resultados dos sistemas de

funções iteradas (*Iterated Function Systems - IFS*), em que se fundamenta a compressão fractal de imagens.

A transformação afim é a aplicação  $T$  de  $R^N \in \mathbb{R}^N$  que combina escala, translação, distorção e rotação no espaço  $n$  dimensional. Essa transformação será explicada na seção 2.2.4.

A partir dessa transformação e do sistema de funções iteradas, pode-se modificar a largura, altura, rotação e translação da imagem de entrada para gerar uma imagem codificada [13].

Alguns conceitos importantes e fundamentais sobre compressão fractal de imagens serão discutidos nas próximas seções.

### 2.2.1 Auto-similaridade

A auto-similaridade é uma propriedade das figuras geométricas tradicionais e também dos fractais. Consiste em se terem réplicas menores do todo da imagem, quando de sua divisão ou ampliação.

Para esclarecer o conceito de auto-similaridade essencial nos fractais, utiliza-se o conjunto de Cantor. O conjunto de Cantor [10, 27, 30] é a construção de um objeto que possui várias partes, cujas partes são obtidas após um determinado número de iterações e divisões, que resulta em um conjunto de valores.

Para construção do conjunto de Cantor tem-se um segmento de reta, que é dividido a cada iteração e tem sua terça parte média retirada. Assim, formam-se outros dois conjuntos de segmentos de retas. Na próxima iteração, esses segmentos de reta são divididos novamente e sua terça parte média é retirada, o que resulta em novos segmentos. Esse processo de  $E$  etapas tendendo ao infinito ( $E \rightarrow \infty$ ) é ilustrado na figura 2.6.

No final das iterações, tem-se várias porções de segmentos de retas que geram um conjunto de valores que se denomina, conjunto de Cantor.

Portanto, o conceito do conjunto de Cantor nos auxilia na compreensão da divisão de uma imagem em pequenas partes que possuem similaridades e podem ser representadas.

A partir do conceito do conjunto de Cantor, compreende-se a razão existente entre as



Figura 2.6: Conjunto de Cantor. Extraído de [30].

partes similares da imagem no processo de compressão fractal, que é explicado através de um segmento de reta.

Um segmento de reta pode ser dividido em partes menores e iguais  $p$ , semelhantes ao todo da reta original, porém reduzida por determinada razão  $r$ . O número  $s$  de segmentos de reta se relaciona com a razão  $r$  da seguinte forma:

$$s = \frac{1}{r} \quad (2.1)$$

A figura 2.7, ilustra a subdivisão do segmento de reta. Esta divisão é feita em quatro partes iguais e a razão da semelhança é de  $\frac{1}{4}$ .

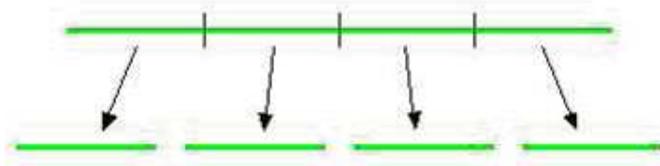


Figura 2.7: Divisão do segmento de reta. Extraído de [30].

A divisão de um quadrado em partes iguais de cada um dos seus lados  $p$  gera  $p^2$  quadrados semelhantes ao original, o que se conclui  $p^2 = s$ . A relação de  $r$  e  $s$  fica da seguinte forma:

$$s = \frac{1}{r^2} \quad (2.2)$$

O quadrado apresenta a divisão em três partes iguais, o que resulta em 9 quadrados iguais. Assim, a razão de semelhança é de  $\frac{1}{3}$ , como ilustrado na figura 2.8.

Como as figuras tradicionais, o segmento de reta tem dimensão 1 e o quadrado dimen-

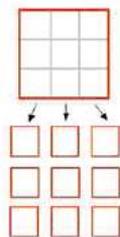


Figura 2.8: Divisão do quadrado em partes iguais. Extraído de [30].

são 2. Assim, é possível afirmar que:

$$s = \frac{1}{r^D} \quad (2.3)$$

em que  $D$  é a dimensão espacial [35],  $r$  é a razão da semelhança e  $s$  o número de réplicas da figura, que se obteve pela divisão de suas partes iguais.

Desse modo, entende-se que uma imagem pode ter porções similares que, de certa forma, contribuam para o processo de compressão e descompressão fractal.

### 2.2.2 Teorema do Ponto Fixo

Algumas funções utilizadas nos modelos fractais são denominadas contrativas. Essas funções possuem um valor denominado atrator da função, que é chamado de ponto fixo [40].

O teorema do ponto fixo diz que: *toda transformação contrativa, ao ser aplicada várias vezes com qualquer valor inicial, converge para um ponto fixo* [13].

Sendo  $X$  uma métrica no espaço e  $f$  uma função,  $f : X \rightarrow X$  contrativo, então  $f$  tem um ponto fixo  $|f|$ .

A função é contrativa, quando se aplica o resultado dela a ela mesma, o que faz tender a um determinado valor, que é o atrator da função. Uma contração é representada da seguinte forma

$$f(x) = sx + o \quad (2.4)$$

em que  $s$  é o fator de contração com  $0 < s < 1$  e  $o$  a constante de brilho. Observa-se que  $x$  pode tender a qualquer valor inicial na função, pois irá tender ao ponto fixo da função

contrativa.

A tabela 2.1 apresenta a demonstração de convergência do teorema do ponto fixo, sendo  $s = 0,6$  e  $o = 12$ .

N. de Iterações	x	f(x)
1	0	12
2	12	19,2
3	19,2	23,5
4	23,52	26,1
5	26,11	27,7
6	27,67	28,6
7	28,6	29,2
8	29,16	29,5
9	29,5	29,7
10	29,7	29,8
11	29,82	29,9
12	29,89	29,9
13	29,93	30
14	29,96	30
15	29,98	30
16	29,99	30
17	29,99	30
18	29,99	30
19	30	30
20	30	30

Tabela 2.1: Demonstração do teorema do ponto fixo, com  $f(x) = 0,6x + 12$ .

Segundo a demonstração ilustrada na tabela 2.1, à medida que as iterações aumentam, tende-se ao ponto fixo (o contrator) da função executada.

Esse teorema serve como base para os outros conceitos sobre fractais [32], pois os fractais são formados por partes dele mesmo durante as iterações e principalmente no processo de decodificação da imagem fractal.

### 2.2.3 Teorema da Colagem

O teorema da colagem utiliza uma característica dos fractais chamada de auto-similaridade, que é o fato do fractal ser formado por ele mesmo em escalas menores como no Conjunto de Cantor. A auto-similaridade, como vista na seção 2.2.1, é a base para o teorema da colagem. Ele informa que, se determinado conjunto de fractais tem esta característica, ele pode ser representado por transformações sobre o todo.

Essas transformações são funções contrativas e aplicadas infinitas vezes sobre o conjunto que representa o fractal. De forma intuitiva, um conjunto auto-similar que sofre essas transformações pode ser decomposto em partes, em que cada parte é semelhante ao conjunto total.

O teorema da colagem diz que sendo  $f$  uma função,  $X$  uma métrica no espaço e  $d$  a distância, tem-se a transformação  $f : X \rightarrow X$  um mapeamento contrativo em determinado espaço métrico completo  $(X, d)$  com um ponto fixo  $x_f$  e fator de contração  $s$ , então [39]

$$d(x, x_f) \leq \frac{1}{1-s} d(x, f(x)) \quad \forall x \in X. \quad (2.5)$$

Nota-se que a distância entre um ponto qualquer do espaço e seu atrator é menor que da sua transformação. Desse modo, quanto menor a distância  $d(x, f(x))$ , mais próximo se está do atrator. Assim, ao se descobrir a função  $f(x)$  que tende a  $d(x, f(x))$  para zero, se descobre a função associada ao atrator  $x_f$ .

As transformações buscam encontrar a menor distância entre os pontos para que se possa atingir o atrator da função e realizar de modo mais eficiente a transformação do fractal [16].

## 2.2.4 Transformação Afim

A transformação afim faz parte de uma família de transformações polinomiais de grau  $N$ ,  $f : \mathfrak{R} \rightarrow \mathfrak{R}$ , expressa do seguinte modo

$$f(x) = a_0 + a_1 x^1 + a_2 x^2 + \dots + a_N x^N \quad (2.6)$$

em que  $a_i, i = 0, 1, \dots, N$ , são números reais com  $a_N \neq 0$  e  $N$  um inteiro não-negativo [39].

Uma transformação afim é importante nos fractais devido à possibilidade de se fazer combinações de rotação, escala, distorção e translação no espaço  $n$  dimensional, onde  $n$  é a dimensão [40].

A transformação afim é uma aplicação de  $T$  de  $R^n \in R^n$ , sendo que no plano  $R^2$  é

representada da seguinte maneira

$$T(x, y) = (ax + by + e, \quad cx + dy + f) \quad (2.7)$$

A equação 2.7 pode ser apresentada na forma matricial

$$T \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e \\ f \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

em que  $a, b, c, d, e, f$  são escalares.

Outra representação comum é a vetorial,  $T(x) = Ax + t$ , em que  $A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$ ,

sendo uma matriz  $(2 \times 2)$  e  $t = \begin{pmatrix} e \\ f \end{pmatrix}$  é um vetor coluna  $(2 \times 1)$  [40].

Os parâmetros lineares  $a, b, c, d$  determinam a rotação, escala e distorção. Os parâmetros que determinam a translação são  $e$  e  $f$ . Um exemplo de utilização desse teorema são as equações que demonstram algumas iterações do triângulo de Sierpinski (figura 2.4(b)), como segue

$$T^1 \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

$$T^2 \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

$$T^3 \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{2} \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

A utilização de transformações afins são importantes como base fundamental para a

compressão fractal de imagens, devido à possibilidade de se manipular parâmetros lineares que determinam formas de comportamento dos fractais.

## 2.2.5 Sistemas de Funções Iteradas

Segundo Ribas [32], um conjunto de transformações afins contrativas em um espaço métrico completo denomina-se Sistemas de Funções Iteradas (SFI).

O SFI é um processo de iterações sobre um ponto (seção 2.2.2) que gera um fractal através de transformações afins contrativas (seção 2.2.4), tendendo sempre a um ponto fixo.

Fisher [18] utiliza o exemplo de uma máquina de copiar para exemplificar essas iterações. A imagem de entrada recebida na máquina é, a cada passo, diminuída e duplicada novamente durante os ciclos (iteraões) que resultam no fractal. Uma ilustração é mostrada na figura 2.9.

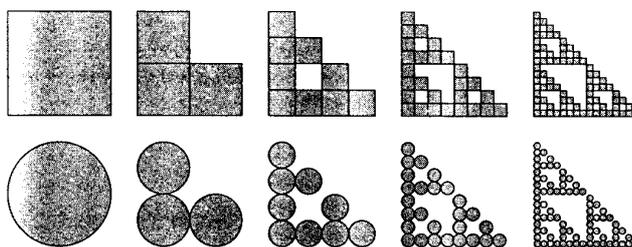


Figura 2.9: Processo iterativo que gera o fractal. Extraído de [18].

O método SFI utiliza-se de um processo iterativo com transformações afins (seção 2.2.4) que envolvem contrações. Essas transformações determinam a forma final do fractal.

Os fractais podem ser definidos em qualquer espaço métrico mas, para melhor compreensão e definição do Sistema de Funções Iteradas, será utilizado o espaço métrico  $\mathbb{R}^2$ .

Segundo Silva [40], o Sistema de Funções Iteradas está contido em um espaço métrico completo  $(X, d)$ , que contém um conjunto finito de mapeamentos contrativos  $f_i : X \rightarrow X$ , com os fatores de contratividade  $c_i$ , para  $i = 1, 2, \dots, I$ , sendo a notação para SFI:  $\{(X, d) : f_i, i = 1, 2, \dots, I\}$  com fator de contratividade  $c = \max\{c_i, i = 1, 2, \dots, I\}$ .

Considere  $A \subset \mathbb{R}^2$  um conjunto inicial e  $C$  contrações  $f_i : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$  com contração

$0 < \alpha < 1 (i = 1, \dots, I)$ . Assim, define-se  $F : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ , sendo

$$F(A) = \bigcup_{i=1}^I f_i(A) \quad (2.12)$$

em que  $i$  são as iterações,  $f_i(A) = \{f_i(x) | x \in A\}$  é a imagem da transformação  $f_i$  ao ser aplicada aos vetores de  $A$ .  $F$  pode ser uma contração, ao se obter o fator  $\alpha$  que é a quantidade máxima de iterações a ser atingida,  $\alpha \equiv \max\{\alpha_i, i = 1, \dots, I\}$ , de acordo com [30].

Segundo Murr [30], um fractal gerado por SFI está em um conjunto  $X \subset \mathbb{R}^2$ , que se define por

$$X = \lim_{n \rightarrow +\infty} f_i(A). \quad (2.13)$$

De acordo com a equação 2.13, para gerar um fractal é necessário aplicar, de forma iterativa, o conjunto das contrações  $f_i$  a um conjunto qualquer  $A$ .

Se o fractal é formado por cópias individuais reduzidas da sua própria imagem, como na seção 2.2.1, então a contração de  $F : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$  é possível nesse espaço para todas as imagens. Logo, o SFI é um conjunto de iterações que necessita das contrações que tendem para um único ponto, como na seção do teorema do ponto fixo (seção 2.2.2).

## 2.2.6 Sistemas de Funções Iteradas Particionadas

Os Sistemas de Funções Iteradas Particionadas (SFIP) são uma extensão do SFI [9], porém, com o diferencial de aplicar as iterações em partições menores da imagem. Essas partições são selecionadas de acordo com as características de similaridade (seção 2.2.1).

Segundo Fisher [17], o SFIP utiliza as transformações afins  $\omega_i$  na forma matricial, como apresentado na equação 2.14.

$$\omega_i \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_i & b_i & 0 \\ c_i & d_i & 0 \\ 0 & 0 & s_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_i \\ f_i \\ o_i \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

em que  $s_i$  define o contraste e  $o_i$  o brilho na transformação das imagens.

Como a imagem é um domínio e esse é dividido em regiões (sub-domínio) com similaridades, pode-se modelar como uma função  $f(x, y)$ .

Se  $\omega_i$  define o domínio total da imagem  $f$ , que é representado por  $\omega_i(f) \equiv \omega_i(x, y, f(x, y))$ , então  $v_i$  determina os sub-domínios particionados da imagem original, mapeados com contraste e brilho das transformações como denotado na equação 2.15.

$$v_i(x, y) = \begin{bmatrix} a_i & b_i \\ c_i & d_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_i \\ f_i \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Portanto, é preciso obter uma imagem  $f' = |W|$  com distância  $\delta(f', f)$  que seja mínima. Logo, é necessário encontrar um mapeamento  $W$  para cada bloco molde  $R_i$  da imagem que será codificada [32], como na equação 2.16.

$$\delta(f \cap (R_i x I), w_i(f)) \quad i = 1, \dots, N. \quad (2.16)$$

A equação 2.16 informa que, ao encontrar o bloco de domínio  $D_i$  com seus respectivos mapeamentos  $w_i$  quando aplicados a  $D_i$ , resultam em regiões próximas dos blocos moldes  $R_i$ .

O codificador fractal baseia-se na representação de regiões da imagem (bloco molde) através das transformações afins de outra região da própria imagem (blocos de domínio), onde se explora a propriedade de auto-similaridade para esse processo.

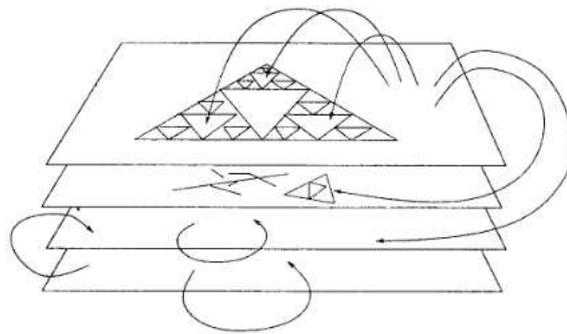


Figura 2.10: Processo de planos no SFIP. Extraído de [17].

Como ilustrado na figura 2.10, durante o processo do SFIP, as transformações reali-

zadas entre a imagem de entrada e a codificada geram planos que se relacionam através da propriedade de auto-similaridade. Assim, o fractal é criado a partir da identificação de domínios e sub-domínios da imagem, segundo determinadas propriedades.

### 2.2.7 Codificador Fractal Básico

O codificador fractal básico tem o objetivo de iniciar a compressão da imagem recebida na entrada e gerar uma nova imagem codificada e comprimida de boa qualidade na saída.

As transformações executadas nesse codificador se diferem de outros compressores de imagens, pois utiliza características como auto-similaridade e ponto contrator da imagem para sua compressão.

A abordagem do fractal utilizada na codificação da imagem é baseada em modelos locais (domínios e sub-domínios), que busca encontrar regiões similares na imagem para permitir a compressão. Dessa forma, há também um ganho computacional relevante durante as transformações da compressão [16, 55].

Os algoritmos de compressão por fractal buscam a característica da auto-similaridade entre as partes maiores (blocos de domínio) e menores (blocos moldes) da imagem. Para isso, as imagens devem ser uma colagem das partes auto-similares que podem ser mapeadas entre elas [40].

Os blocos moldes da imagem são de dimensão  $n \times n$  pixels e os blocos de domínio são o dobro de tamanho  $2n \times 2n$ . O método que utiliza busca exaustiva para associação dos blocos moldes e blocos domínios foi originalmente proposto por Barnsley e Hurd [2].

O codificador fractal básico pode ser exemplificado por meio de três etapas: segmentação da imagem, obtenção dos blocos de domínio e geração dos códigos fractais:

1. **segmentação da imagem:** nesta etapa a imagem  $N \times N$  original é segmentada em blocos quadrados (blocos moldes) de tamanho fixo  $n \times n$  em  $(N/n)^2$ , que podem ser  $2 \times 2$ ,  $4 \times 4$ ,  $8 \times 8$  a sua dimensão. Assim, uma imagem com dimensão  $512 \times 512$  pixels e blocos de  $4 \times 4$  pixels seria composta por uma matriz de 128 linhas e 128 colunas, ou seja, 16384 blocos moldes, em que cada bloco molde irá gerar uma função

resultando em 16384 funções [40]. Caso  $O$  denote a imagem original,  $O_r$  denota os blocos moldes que são as partições de  $O$ .



Figura 2.11: Segmentação em blocos molde. Extraído de [32].

A figura 2.11 ilustra a divisão da imagem em blocos moldes com a mesma dimensão  $n \times n$ . Com a divisão da imagem original em blocos moldes, permite-se um melhor desempenho computacional e facilidade de aplicação das transformações.

2. **obtenção dos blocos de domínio:** esta etapa tem o objetivo de fazer referências às transformações que serão executadas de acordo com as comparações de auto-similaridade e colagem entre os pixels dos blocos molde e de domínio, através da definição dos blocos de domínio.

A obtenção dos blocos de domínio consiste em dividir toda a imagem em blocos  $2n \times 2n$  pixels, o dobro de tamanho dos blocos moldes. Essa divisão é realizada em qualquer parte da imagem sem sobreposição. Um exemplo de sobreposição é a figura 2.12. Seguindo o exemplo anterior, os blocos de domínio serão de tamanho  $8 \times 8$  pixels.

Na etapa de segmentação, para se definir os blocos moldes não se considera a sobreposição entre blocos, entretanto, durante a definição dos blocos de domínio, pode-se usar a sobreposição [46].

Uma imagem de  $512 \times 512$  pixels com blocos moldes de  $4 \times 4$  pixels resulta em blocos de domínio com  $8 \times 8$  pixels. Entretanto, devido aos limites da imagem que não podem ser ultrapassados e ao bloco  $2n \times 2n$  que extrapolaria a imagem, deve-se retirar  $2n - 1$  pixels de cada eixo. Portanto, tem-se  $(512 - (8 - 1)) * (512 - (8 - 1))$ , que resulta em 255025 blocos de domínio, como ilustrado na figura 2.12.

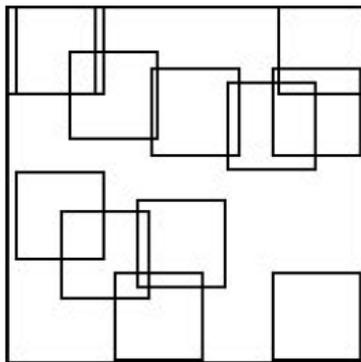


Figura 2.12: Definição dos blocos de domínio com sobreposição.

Nesta fase da codificação podem ser feitas diversas implementações para melhorar o algoritmo básico de compressão por fractal. Uma dessas implementações é o uso de uma *quadtree*, que será apresentada na seção 2.2.8 [18].

3. **geração dos códigos fractais:** com os blocos moldes e domínios já definidos, inicia-se o processo de comparações e transformações para gerar a nova imagem comprimida.

Primeiramente, reduz-se os blocos de domínio a um quarto do seu tamanho,  $(2n \times 2n)/4$ , para poder comparar com os blocos moldes de mesmo tamanho.

Com o bloco de domínio reduzido, faz-se a busca do bloco molde que melhor se aproxima, segundo a métrica de similaridade usada.

Para cada bloco molde da imagem, ajusta-se o fator de deslocamento de intensidade ( $o$ ), que se obtém pela diferença entre as médias de intensidade dos blocos de domínio reduzidos e dos blocos moldes. Logo em seguida, verifica-se quais das seguintes simetrias, que são transformações geométricas como: identidade, rotação de  $90^0$ , rotação de  $180^0$ , rotação de  $270^0$ , reflexão horizontal, reflexão horizontal da imagem com rotação de  $90^0$ , reflexão vertical ou reflexão na diagonal apresentam melhor aproximação (menor distância) em relação ao bloco de domínio.

Após verificar todos os blocos moldes para um determinado bloco de domínio, tem-se o melhor bloco molde. Aquele que apresenta menor distância para com o bloco de domínio.

Nesse processo são selecionadas e armazenadas a posição  $(Dx, Dy)$ , a simetria  $(sim_i, i \in \{0, 1, 2, \dots, 7\})$  e o fator de deslocamento de intensidade  $(o_i)$  referente ao bloco molde que possui a menor dessas distâncias.

As etapas do codificador fractal básico são ilustradas na figura 2.13. Para cada bloco molde referenciado, armazena-se as tuplas  $(Dx, Dy, sim_i, o_i)$ . Esse conjunto de tuplas forma o fractal da imagem de saída, ou seja, o registro que será gravado no arquivo codificado da imagem [40].

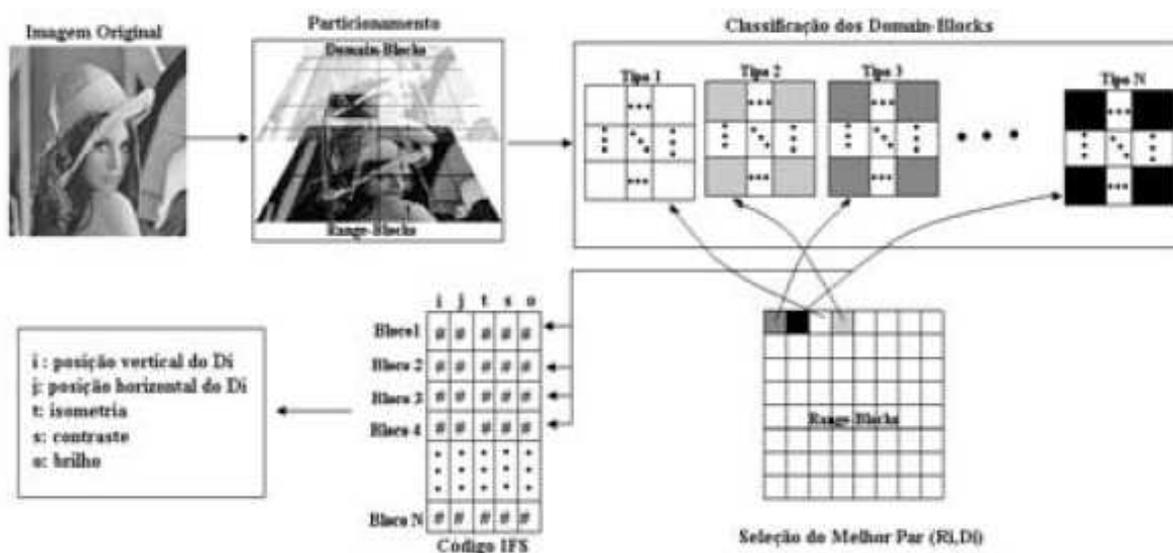


Figura 2.13: Codificador fractal básico. Extraído de [32].

Esses passos são executados para todos os blocos moldes. Se a imagem tiver dimensão  $512 \times 512$  pixels e blocos moldes de  $4 \times 4$  pixels, então serão realizadas  $8 * (512^2 = 2097152)$  comparações para cada bloco molde.

O processo explicado nessas três etapas são para codificação da imagem de entrada. A descompressão (decodificação) da imagem tem uma sequência simples de iterações, que inicia com  $f_0$  qualquer, aplica-se iterativamente as transformações utilizando as tuplas definidas  $(Dx, Dy, sim_i, o_i)$  até se obter uma convergência desejada, normalmente em torno de dez iterações segundo [2, 40].

## 2.2.8 Compressão Fractal com Particionamento Quadtree

A técnica de compressão fractal com particionamento *quadtree* é utilizada devido ao seu melhor desempenho computacional atingido com sua forma de particionamento [43, 38, 54], a estrutura em árvore.

Fisher [18] apresentou um algoritmo de compressão fractal de imagens com *quadtrees* em seu livro no ano de 1995.

### 2.2.8.1 Codificação

Segundo Fisher [18], o particionamento por quadtree tem o objetivo de dividir a imagem em blocos moldes. Durante as iterações, esses blocos são comparados, a fim de encontrar semelhança para as transformações. Caso esse cálculo de similaridade esteja fora do aceitável, o bloco é subdividido em quatro novos blocos para continuar a busca. Esse processo é realizado até o término da codificação. A figura 2.14(b) ilustra as divisões dos blocos em uma imagem.

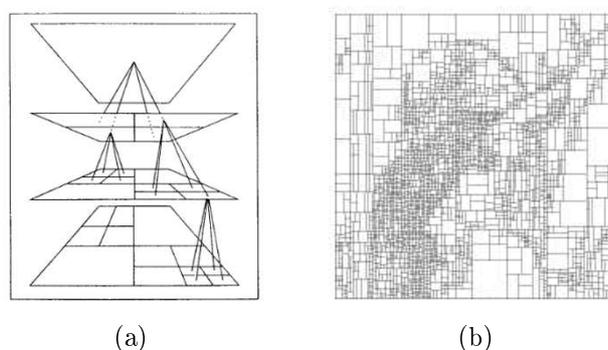


Figura 2.14: Exemplo de *quadtree*: (a) árvore *quadtree*; (b) particionamento *quadtree* com 5008 blocos. Extraído de [17, 18].

A *quadtree* baseia-se na estrutura de árvore que se forma à medida que aumenta o número de iterações, como ilustrado na figura 2.14(a).

A raiz da árvore é a imagem original e, à medida que as iterações avançam, os nodos da árvore são criados com os blocos domínio e molde. Cada vez que um determinado bloco quadrado apresenta um RMSE maior que o permitido, esse bloco (quadrante) é subdividido em outros quatro blocos formando outros nodos da árvore. Esse procedimento

é realizado sucessivamente até o final da execução dos blocos moldes com os blocos de domínios [18, 33].

## Domínio e Classificação

Os domínios podem ser definidos de formas diferentes, de acordo com Fisher [18]. O mais comum é definir um tipo de domínio que tenha blocos de tamanhos menores ou iguais à quantidade de blocos maiores. Entretanto, pode ocorrer de se ter blocos maiores em mais quantidade do que blocos menores e vice-versa.

Nesse processo de codificação é importante se definir um método de classificação das regiões. Um método eficiente de classificação é a definição das regiões mais próximas aquele bloco em uso. Assim, é possível diminuir o tempo de processamento das iterações [4].

Neste caso, pode-se computar valores proporcionais para cada quadrante segundo a média e variância para classificação. Se o valor do pixel está no quadrante  $q$ , então  $r_1^q, \dots, r_{max}^q$ , sendo  $q = 1, 2, 3, 4$ , utiliza-se a fórmula 2.17.

$$A_q = \sum_{j=1}^{max} v_j^q \quad (2.17)$$

onde  $q$  é o quadrante,  $v$  representa o valor dos pixels do quadrante,  $j$  cada pixel da região do quadrante e  $A_q$  o somatório de todos os valores do quadrante. Os valores de brilho ou média dos quadrantes e as simetrias podem ser utilizados para se definir a classificação dos quadrantes das imagens de acordo com a equação 2.18.

$$R_q = \sum_{j=1}^{max} (v_j^q)^2 - A_q^2 \quad (2.18)$$

onde  $A_q^2$  o somatório do quadrante ao quadrado,  $(v_j^q)^2$  é o valor do pixel ao quadrado e  $R_i$  é o valor resultante de brilho ou média do quadrante.

A figura 2.15 ilustra os brilhos, simetrias e médias de valores que podem ser utilizados para classificação dos quadrantes.

Portanto, nessa fase do particionamento *quadtree*, a imagem é dividida em quadrantes,

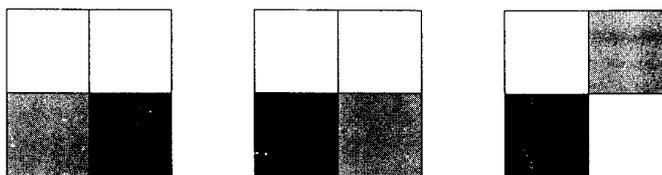


Figura 2.15: Exemplos de intensidade, brilho e simetrias de imagem. Extraído de [18].

denominados blocos, que são comparados ao da imagem original em busca de similaridades de acordo com a medida escolhida (média, desvio padrão, entre outras possíveis) e distância entre os blocos [3].

Caso esses valores não estejam dentro dos valores definidos, o quadrante é subdividido em outros quatro novos blocos para se buscar novamente as similaridades.

Essas divisões são importantes para se comparar os blocos de dois tamanhos diferentes, o que proporciona melhor compressão e qualidade da imagem resultante.

### 2.2.8.2 Decodificação

Segundo Fisher [18], a decodificação consiste em executar iterações  $W$  para qualquer imagem inicial. O particionamento *quadtree* determina as regiões da imagem a serem divididas. Cada uma dessas regiões é representada por  $R_i$ , seu domínio por  $D_i$  mapeado para cada dimensão  $2 \times 2$  pixels sem sobreposição. Os pixels referentes ao domínio são multiplicados por  $s_i$ , adicionado ao  $o_i$  e colocado na região conforme sua informação e orientação. Assim, finaliza-se uma iteração da decodificação.

Essas iterações são realizadas até se encontrar o ponto fixo da função (seção 2.2.2) por meio do contrator da função, pois, quando se chega ao ponto fixo da função, a imagem não é mais alterada devido ao seu contrator (como na seção 2.2.4) e se tem a imagem final.

Na ilustração da figura 2.16, tem-se a imagem original à esquerda e a imagem codificada por partição *quadtree* à direita.

Para melhorar a compressão foi utilizado um bit para cada nível da *quadtree* e cinco bits para armazenamento e escala da estrutura da árvore. O domínio foi indexado segundo esses parâmetros e foram utilizados três bits para armazenar a orientação do domínio da

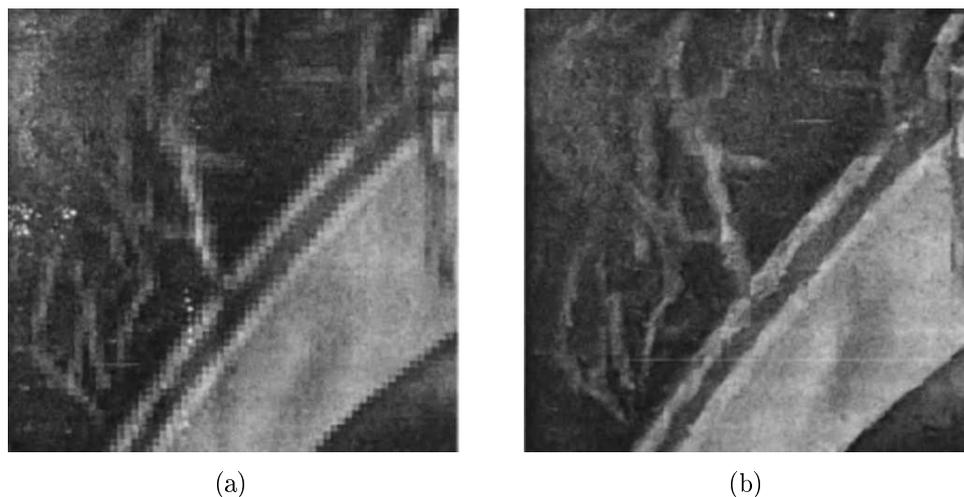


Figura 2.16: Codificação *quadtree* da imagem Lenna: (a) original; (b) codificada. Extraído de [18].

região.

A decodificação executa várias iterações até encontrar o ponto fixo e utiliza-se dos valores das transformações durante essas iterações para recalcular os valores dos pixels e decodificar a imagem.

## 2.3 Tabela de Dispersão

A estrutura de dados chamada tabela de dispersão (*hash table*) [7, 25] é utilizada quando se tem um conjunto de dados que pode ser distribuído em um arranjo. Esse arranjo é um conjunto de posições numeradas que aloca dados em suas posições como ilustrado na figura 2.17.

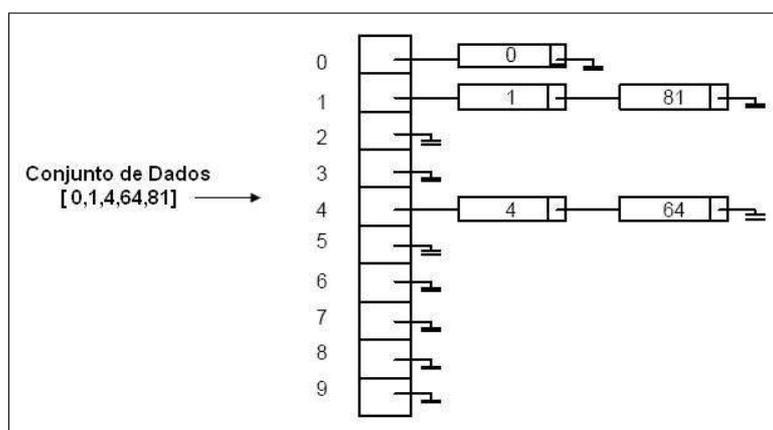


Figura 2.17: Alocação de dados em uma tabela de dispersão.

A distribuição dos elementos na tabela é realizada por meio de uma função de dispersão

(*hashing*). A função utiliza alguma informação do conjunto de dados para calcular a posição da tabela em que o dado será alocado. O resultado dessa função pode ser único (função de dispersão perfeita), em que cada elemento do conjunto é distribuído em uma posição específica única da tabela ou pode ter colisões, em que uma ou mais posições apresentam mais de um elemento do conjunto. A figura 2.18 ilustra o *hash* perfeito e com colisões [12, 29].

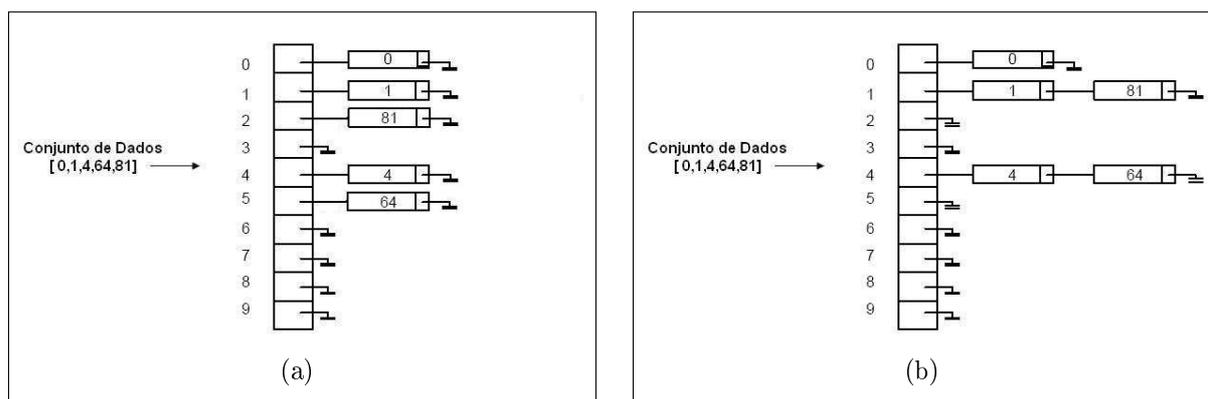


Figura 2.18: Funções de dispersão: (a) *hash* perfeito; (b) *hash* com colisões.

Essa estrutura é adequada quando se tem a necessidade de pesquisar dados com baixo tempo de processamento. Quando os dados são distribuídos sem colisão na tabela, ou seja, em posições distintas, é possível fazer acesso a cada posição da tabela em tempo constante, ou seja, custo  $O(1)$  [19].

Segundo Moraes [29], há diversas estratégias para tratamento de colisões, tais como endereçamento direto, endereçamento aberto, métodos lineares e quadráticos, método da divisão e da multiplicação.

## 2.4 Medidas de Similaridade

O processo de compressão fractal de imagens utiliza o codificador e decodificador de imagens. Esses processos exigem uma métrica que possa retornar um valor correspondente à qualidade da compressão que foi aplicada.

Uma métrica comum é a raiz do erro quadrático médio (RMSE, do inglês *root mean square error*), que permite a comparação de duas imagens  $A$  e  $B$  com as mesmas dimensões. Esta métrica também pode ser utilizada como medida de comparação entre os

blocos moldes e de domínio durante a codificação e decodificação da imagem [6].

O RMSE soma o quadrado do módulo da diferença de cada pixel da imagem  $A$  pelo correspondente da imagem  $B$  e os divide pelos pixels resultantes da imagem. Sobre esse resultado é calculada a raiz quadrada, como na equação 2.19.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [A(x, y) - B(x, y)]^2} \quad (2.19)$$

em que  $M$  e  $N$  são as dimensões da imagem em pixel, enquanto  $A(x, y)$  e  $B(x, y)$  são os valores dos pixels das respectivas imagens  $A$  e  $B$ .

As taxas obtidas com a métrica RMSE informam sobre a qualidade da compressão. Quanto maior essa taxa, menor é a qualidade da imagem resultante. Em algumas compressões de imagens, a diferença de qualidade será perceptível apenas por meio das taxas RMSE e não visualmente.

Outra medida utilizada para medir a qualidade das imagens após a compressão é a relação sinal-ruído de pico (PSNR, do inglês *peak signal-to-noise ratio*) [18]. Essa métrica retorna um valor em decibéis (dB), de acordo com a equação 2.20.

$$PSNR = 20 \log_{10} \left\{ \frac{2^x - 1}{RMSE} \right\} \quad (2.20)$$

em que  $(2^x - 1)$  é o maior valor que o pixel pode assumir na imagem.

O resultado da medida PSNR deve ser interpretado de forma diferente da RMSE. Quanto maior o valor resultante, melhor é a qualidade da imagem.

## 2.5 Razão de Compressão

A imagem ocupa determinada quantidade de *bytes* para o seu armazenamento. Nos processos de codificação e decodificação ou na compressão de imagens, a quantidade de *bytes* pode ser superior a que estava sendo ocupada anteriormente.

O processo de compressão fractal de imagens tem o objetivo de manter a qualidade da imagem e diminuir o seu espaço ocupado. Para medir essa razão de compressão [6, 18],

usa-se a equação 2.21.

$$R = \frac{TO}{TC} \quad (2.21)$$

em que  $R$  é a razão de compressão,  $TO$  é a quantidade de *bytes* utilizados para armazenar a imagem original e  $TC$  a quantidade de *bytes* utilizados para armazenar a imagem comprimida.

Esta equação permite medir a taxa de compressão entre a imagem original e imagem resultante, sendo útil para determinar a eficiência do algoritmo de compressão com relação ao espaço de armazenamento da imagem.

## CAPÍTULO 3

### METODOLOGIA

O objetivo deste capítulo é apresentar a metodologia proposta para compressão básica fractal de imagens e compressão baseada no particionamento *quadtree*. A partir dessas idéias, propõe-se um aperfeiçoamento do método *quadtree*, o qual é objeto de contribuição desta dissertação.

A seção 3.1 apresenta a metodologia de um modelo fractal básico, a seção 3.3 descreve a metodologia do modelo fractal com particionamento *quadtree* e a seção 3.4 apresenta a proposta de aperfeiçoamento do modelo fractal com particionamento *quadtree*, que utiliza a heurística da busca local guiada.

### 3.1 Compressão Básica Fractal de Imagens

No codificador fractal básico, a essência da compressão está nas etapas de divisão de blocos e as referências (busca) entre os blocos, pois essas etapas influenciam no desempenho computacional, na razão de compressão e na qualidade da imagem.

No processo de compressão, a divisão é feita em blocos de  $n \times n$  e  $2n \times 2n$  pixels, tal que a referência entre blocos moldes e domínios é feita por busca em exaustão, ou seja, busca-se em todos os blocos moldes o conjunto de pixels que se assemelha com o conjunto de pixels do bloco de domínio.

O tempo de processamento pode ser alto dependendo do modo como é feita a busca do melhor conjunto de pixels e a divisão dos blocos de domínios e moldes. Para isso, há algumas implementações desenvolvidas, que se propõem a melhorar tanto o processo de busca, quanto de particionamento dos códigos fractais [11, 24].

No processo de compressão e descompressão do codificador fractal básico de imagem, aplicam-se os seguintes fundamentos: escala, quantização, medida de distância, simetrias e auto-similaridade, além das transformações afins e ponto contrator.

Para melhor explicação das iterações e estrutura do algoritmo codificador fractal básico, esta seção está dividida em duas partes, a codificação e a decodificação.

### 3.1.1 Algoritmo de Codificação Fractal Básico

O processo de compressão do algoritmo codificador fractal básico tem o objetivo de comprimir a imagem original e criar uma imagem codificada com tamanho reduzido (comprimido).

Todas as etapas referentes ao processo de compressão são ilustradas na figura 3.1, que é utilizada para explicação do processo de compressão da imagem original.

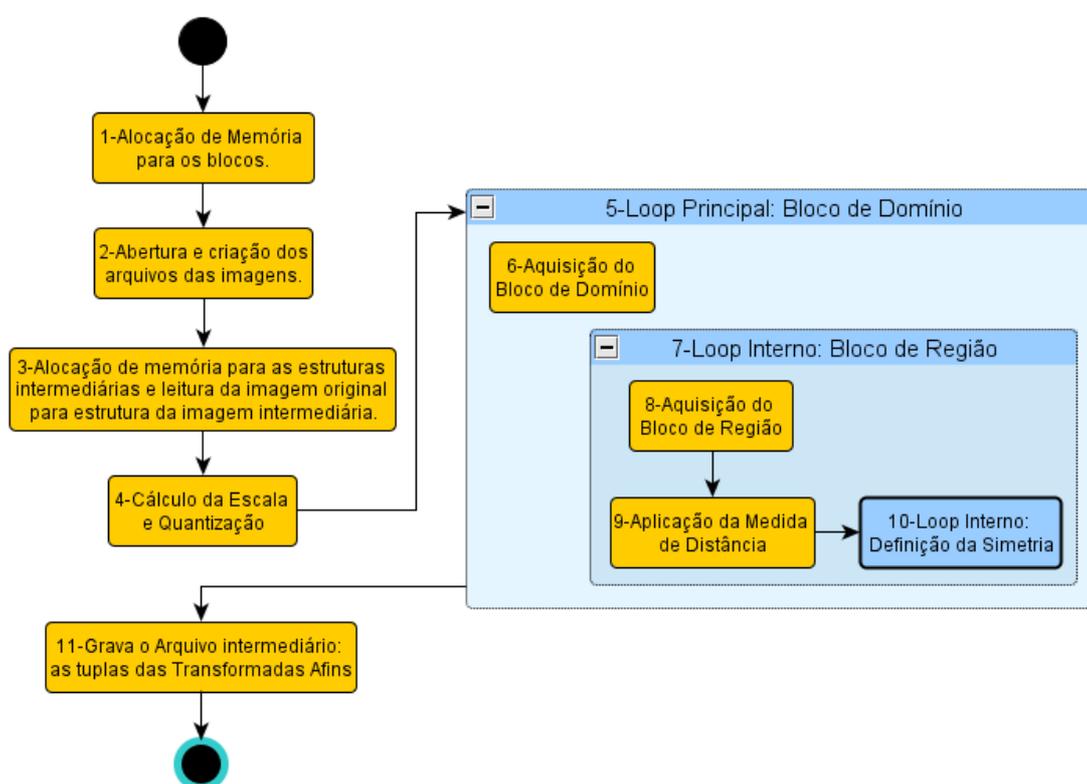


Figura 3.1: Processo de compressão do codificador fractal básico.

A compressão é realizada com apenas dois argumentos: o arquivo original (imagem digital) e o nome que se deseja para imagem codificada. Com a inclusão desses dois argumentos, o algoritmo inicia o seu processo de compressão.

A ilustração da figura 3.1 apresenta as etapas mais importantes no processo de compressão do codificador fractal básico:

**etapa 1:** o processo de compressão inicia-se nesta etapa com a alocação de memória para os blocos de domínio, blocos moldes e blocos resultantes. Todos esses blocos são dimensionados com o mesmo tamanho,  $2n \times 2n$  pixels, com profundidade entre 0 e 255 cores. Esta etapa tem como objetivo garantir as regiões da memória que serão utilizadas para manipulação dos blocos de pixels coletados da imagem original.

**etapa 2:** após a alocação dos blocos na memória, esta etapa dedica-se à abertura do arquivo da imagem original e à criação do arquivo da imagem codificada. O arquivo da imagem resultante recebe o mesmo cabeçalho da imagem original e aguarda o final do processo de compressão, para então receber os registros das transformadas afins que compõem o conteúdo deste arquivo.

**etapa 3:** depois de aberto o arquivo da imagem original, nesta etapa é alocada uma região da memória com o mesmo tamanho da imagem original para a imagem intermediária e uma região da memória com a metade do tamanho da imagem original, destinada à imagem reduzida que é utilizada durante o processo de compressão. Com essas regiões alocadas, a etapa 3 é finalizada com a cópia de todos os pixels da imagem original para a região da memória destinada à imagem intermediária. Assim, a imagem original não é mais necessária e, portanto, é fechada.

**etapa 4:** os pixels lidos da imagem original, agora armazenados na imagem intermediária na memória, passam pelo processo de escala, tal que a imagem tem seu tamanho reduzido para a metade da proporção original (1:2) para ser comparada com o bloco molde. Após esse escalamento da imagem, os pixels são quantizados para terem um maior nível de compressão na profundidade dos pixels. O algoritmo de compressão tem, após a quarta etapa, o arquivo da imagem original fechado, o arquivo da imagem codificada aberto somente com o cabeçalho gravado, as estruturas de memória alocadas para os blocos, a estrutura de memória da imagem intermediária preenchida com todos os pixels da imagem original e a estrutura de memória da imagem reduzida (com a metade do tamanho da imagem original) preenchida com os pixels quantizados.

**etapa 5:** esta etapa tem o objetivo de encontrar para cada bloco de domínio definido, os blocos moldes que possuem similaridades. Cada vez que se encontra um bloco molde similar, cria-se um registro contendo o conjunto de tuplas das transformadas afins. A referência entre um bloco de domínio e um bloco molde é definida após a aplicação e verificação das oito simetrias e o cálculo da medida de distância. Após a aplicação de uma das simetrias e o cálculo da medida de distância no bloco molde, se o valor resultante estiver dentro da tolerância especificada, conclui-se que um bloco de melhor similaridade foi encontrado. Então, o conjunto de tuplas é criado.

**etapa 6:** para se definir um bloco de domínio, percorre-se toda a estrutura de pixels da imagem intermediária de  $2n \times 2n$  pixels exaustivamente (sequencialmente) e, a cada bloco de domínio encontrado, percorre-se toda a estrutura da imagem reduzida para comparar este bloco de domínio com todos os blocos moldes possíveis da imagem reduzida. Por exemplo, se houver 1000 blocos de domínio e 1.350.000 blocos moldes, cada bloco de domínio terá 1.350.000 comparações com os blocos moldes. Cada vez que se encontra um bloco de domínio, ele é copiado para a estrutura de blocos de domínio da memória e determina-se a sua medida. Essa medida do bloco de domínio é a média calculada dos seus pixels, ou seja, o somatório do valor de todos os pixels dividido pelo tamanho do bloco de domínio.

**etapa 7:** esta etapa tem o objetivo de encontrar todos os possíveis blocos moldes exaustivamente (sequencialmente) na imagem reduzida e aplicar as simetrias e o cálculo da medida de distância (média, desvio padrão, entropia, as três medidas combinadas) para cada bloco molde. Cada bloco molde deve ser comparado com o bloco de domínio em avaliação para verificar se possui ou não similaridade entre os blocos. Essa etapa é realizada para cada bloco de domínio encontrado.

**etapa 8:** os blocos moldes são encontrados ao ser percorrida a estrutura da imagem reduzida de  $2n \times 2n$  pixels exaustivamente, alocada na memória, ou seja, a cada iteração do *loop* da etapa 7 encontra-se um bloco molde de tamanho  $2n \times 2n$  pixels, que é atribuído à região de bloco molde da memória. O bloco molde é do mesmo

tamanho que o bloco de domínio, pois como os valores dos pixels foram escalados e quantizados, este bloco tem tamanho menor no conteúdo do que o bloco de domínio, permitindo que o cálculo da medida da distância seja feito na mesma proporção.

**etapa 9:** para cada bloco molde é calculada a medida de distância do bloco de domínio e somada aos seus pixels a diferença entre a média do bloco de domínio e do bloco molde. Esta é uma forma de aplicar a medida de distância nos pixels do bloco molde e verificar a sua similaridade com o bloco de domínio.

**etapa 10:** depois do bloco molde ter recebido a medida da distância, inicia-se o processo de aplicação das oito simetrias. As simetrias são aplicadas ao mesmo bloco molde e seu resultado é armazenado na região da memória destinada aos blocos resultantes, que representam os resultados das aplicações das simetrias. A cada aplicação de simetria é calculada a medida de distância entre o bloco de domínio e bloco molde. Essa medida é utilizada para indicar se determinado bloco molde possui similaridade com o bloco de domínio. O valor da distância é comparada com um valor de referência dinâmico definido no algoritmo. Se na comparação o valor da distância for menor do que o de referência, esse bloco molde é aceito, ou seja, ele possui similaridade com o bloco de domínio. Entretanto, se depois de verificadas todas as simetrias, este bloco molde não possuir similaridade suficiente, outro bloco molde é analisado até se verificar todos os possíveis blocos moldes da imagem. Após isso, inicia-se o processo para o próximo bloco de domínio e toda essa etapa é realizada novamente. Caso se encontre um bloco molde com a similaridade aceita pelos parâmetros do algoritmo, grava-se na região da memória destinada às transformadas afins um registro com as tuplas formadas pelos seguintes itens: medida de distância entre os blocos de domínio e molde, a simetria aplicada e a posição  $x$  e  $y$  do bloco molde na imagem reduzida. O valor de referência dinâmico utilizado na comparação da distância entre bloco de domínio e bloco molde é inicialmente definido no algoritmo como  $255 * 255 * lb * ab$ , em que  $lb$  é a largura do bloco de domínio e  $ab$  é a altura do bloco de domínio. Esse valor se modifica cada vez que um bloco molde

é aceito, pois, quando um bloco molde é aceito, o valor de referência é substituído pela nova distância encontrada entre o bloco de domínio e o bloco molde.

**etapa 11:** com a finalização da busca de todos os blocos de domínios e blocos moldes, têm-se todos os registros das transformadas afins armazenados na região de memória destinada a essas transformações. Assim, o processo de compressão finaliza-se com a gravação única de todos esses registros das tuplas no arquivo da imagem codificada. Após o processo de compressão, todas as regiões de memória são liberadas e o arquivo codificado fechado.

### 3.1.2 Algoritmo de Decodificação Fractal Básico

O processo de descompressão do algoritmo codificador fractal básico tem o objetivo de descomprimir a imagem codificada e criar uma imagem semelhante à original com possíveis perdas visuais e numéricas.

Todas as etapas referentes ao processo de descompressão são ilustradas na figura 3.2, que é utilizada para explicação do processo de descompressão da imagem codificada.

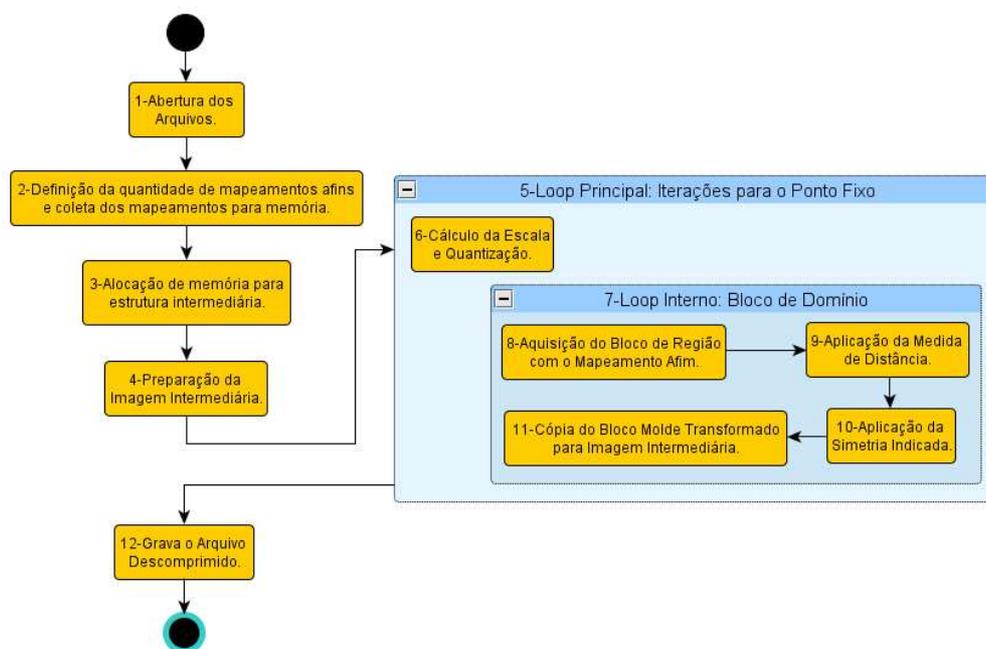


Figura 3.2: Processo de descompressão do Codificador Fractal Básico.

A descompressão permite que sejam incluídos até quatro argumentos: o número de

iterações (para encontrar o ponto fixo), imagem original, imagem codificada e imagem decodificada.

Os dois primeiros argumentos podem ser omitidos sem causar problemas na execução do algoritmo, entretanto, é imprescindível que os argumentos referentes à imagem codificada e imagem decodificada sejam incluídos:

**etapa 1:** no início do algoritmo de descompressão, o arquivo da imagem codificada e o arquivo da imagem decodificada são abertos. Após a abertura dos arquivos, o arquivo da imagem decodificada recebe o mesmo cabeçalho da imagem codificada que define o seu tipo de arquivo.

**etapa 2:** nesta etapa, calcula-se a quantidade de mapeamentos afins que há no arquivo codificado. Esse cálculo é feito como  $\frac{MxN}{lb*ab}$ , em que  $M$  e  $N$  são respectivamente a largura e a altura da imagem, enquanto  $lb$  e o  $ab$  são a largura do bloco de domínio e a altura do bloco de domínio. Assim, é possível determinar quantos registros foram gravados no arquivo codificado e alocar espaço de memória para a estrutura dos mapeamentos afins. Com a alocação de memória realizada, todos os registros dos mapeamentos afins da imagem codificada são lidos e copiados para esta região da memória. Ao final desta etapa, fecha-se a imagem codificada.

**etapa 3:** esta etapa tem o objetivo de alocar memória para todas as estruturas intermediárias que serão utilizadas durante o processo de decodificação. As estruturas alocadas são: imagem intermediária, imagem reduzida, bloco molde e bloco molde transformado.

**etapa 4:** com as estruturas de memória alocadas, inicia-se o processo de preparação da imagem que será decodificada. Caso não tenha sido incluído o parâmetro referente ao número de iterações, o algoritmo preenche toda a região da memória destinada à imagem intermediária com valores de pixels iguais a 128 (valor arbitrário). Entretanto, se esse parâmetro for informado, o algoritmo preenche toda a imagem intermediária com os valores dos pixels da imagem original.

**etapa 5:** a decodificação fundamenta-se no cálculo das transformações afins, que devem ser executadas um determinado número de vezes até atingir o ponto fixo da função, ou seja, executar os cálculos das transformadas afins que são coletadas do arquivo comprimido e aplicadas na função iterativamente um certo número de vezes de forma repetida até que o seu resultado não se modifique e retorne sempre o mesmo valor. Por este motivo, esta etapa tem o objetivo de fazer o laço das iterações do ponto fixo. O número de iterações pode ser especificado pelo usuário como um parâmetro ou, se não definido, o algoritmo utilizará 16 iterações, que o autor do algoritmo definiu como padrão.

**etapa 6:** esta etapa tem o objetivo de fazer a leitura de todos os pixels da imagem intermediária e aplicar o cálculo da escala em 1:2 e a quantização. Ao executar essas operações, o resultado é incluído na região da memória destinada à imagem reduzida. Esses cálculos são aplicados para se obter uma imagem que será utilizada para extração dos blocos moldes, uma vez que por meio desses blocos moldes é que se aplicam as transformações afins, como no algoritmo de codificação.

**etapa 7:** corresponde a um laço que é o responsável por extrair os blocos de domínio da imagem intermediária e extrair os blocos moldes da imagem reduzida, combinados com os pixels dos mapeamentos afins da imagem codificada. A cada iteração do laço, percorre-se os blocos de domínio  $2n \times 2n$  pixels da imagem intermediária e os registros dos mapeamentos afins alocados na memória. Durante as iterações, utiliza-se a posição  $x$  e  $y$  dos mapeamentos afins que fazem parte de cada registro da imagem codificada.

**etapa 8:** após a etapa 7, inicia-se a etapa de extração do bloco de região, que é composta pelos pixels da imagem reduzida (escalada e quantizada) e os pixels dos mapeamentos afins coletados da imagem codificada, indicados pelas posições  $x$  e  $y$  do registro. Os pixels da imagem reduzida são somados aos pixels dos mapeamentos afins, e o resultado é armazenado na região da memória destinada ao bloco molde.

**etapa 9:** com a soma dos pixels finalizada, deve-se adicionar a medida da distância que

foi calculada no processo de codificação. Então, para cada pixel do bloco molde, soma-se a medida de distância coletada no registro dos mapeamentos afins.

**etapa 10:** aplica-se aos pixels do bloco molde a simetria indicada no registro do mapeamento afim encontrada no processo de codificação da imagem. A simetria indicada no registro é aplicada aos pixels e o resultado é armazenado na região da memória destinada ao bloco molde transformado. Essa é uma etapa importante, pois finaliza o cálculo das transformações afins.

**etapa 11:** esta etapa tem o objetivo de copiar cada bloco molde transformado, que contém os pixels já transformados, para a estrutura da imagem intermediária alocada na memória em forma de registros. As etapas 8, 9, 10 e 11 são executadas para cada bloco de domínio encontrado. Ao finalizar o processamento do último bloco de domínio da imagem, esse processo volta a se repetir novamente até a última iteração do ponto fixo, ou seja, todas as etapas incluídas na etapa 7 são executadas o número de vezes indicado pelas iterações do ponto fixo, indicando convergência no processo. O algoritmo não implementa nenhum tipo de controle para verificação do resultado do ponto fixo, apenas determina uma quantidade de iterações para se calcular repetidas vezes as transformadas.

**etapa 12:** com todas as operações realizadas e o ponto fixo da função encontrado, têm-se os pixels decodificados e armazenados na região da memória destinada à imagem intermediária. Portanto, esta etapa tem o objetivo de gravar no arquivo da imagem decodificada todos os pixels da imagem intermediária, o que finaliza todo o processo de decodificação.

## 3.2 Compressão Fractal com Tabelas de Dispersão

A seção 2.3 descreveu a estrutura de dados conhecida como tabela de dispersão (*hash table*). As técnicas para obter uma boa função de dispersão, ou seja, evitar colisões de elementos nas posições da tabela, dependem do foco da aplicação [26].

A função de dispersão definida no algoritmo para compressão fractal de imagens baseada em *hash table* é definida como

$$\sum f_{mod} \left( \left\lfloor \frac{\chi[a, b] - \bar{\chi}}{\lambda \sigma} + B \right\rfloor, C \right) \quad (3.1)$$

em que  $f_{mod}$  é a função que retorna o resto da divisão entre as partes,  $\chi[a, b] - \bar{\chi}$  é o valor do pixel do bloco menos a média do bloco,  $B$  é uma constante com valor 75000 (obtido empiricamente),  $\lambda$  tem valor 0,4 (obtido empiricamente),  $\sigma$  é o valor de desvio padrão do bloco e a constante  $C$  é denotada pela equação  $\frac{\sqrt{5}-1}{2}$  obtida empiricamente.

O processo de compressão de imagem com essa estrutura ocorre em duas etapas: distribuição dos blocos de domínio na tabela *hash* e associação dos blocos de domínio aos blocos moldes através de pesquisa na tabela.

Para distribuir os blocos de domínios na tabela utiliza-se o valor de desvio padrão de cada bloco de domínio e os pixels do bloco. As informações do bloco são enviadas para a função *hash* que gera um valor indicando a posição na tabela. O resultado é a distribuição dos blocos, como na ilustração da figura 2.17, com nodos encadeados na mesma posição.

Após a distribuição dos blocos de domínios são utilizadas as mesmas características dos blocos moldes para gerar uma posição da tabela. Com a posição calculada é realizada a pesquisa pelos blocos de domínio dentro de um intervalo, visto que dificilmente o bloco molde obtém o mesmo valor de chave do bloco de domínio. Assim, todos os blocos moldes ao serem comparados com os blocos de domínio são associados aos domínios com mais semelhanças, finalizando o processo de compressão.

### 3.3 Compressão Fractal de Imagens por Particionamento Quadtree

O objetivo do particionamento *quadtree* é obter melhor desempenho e qualidade da imagem codificada. Esta seção apresenta as etapas realizadas para codificação e decodificação da imagem.

Segundo Fisher [17], o particionamento *quadtree* inicia o processo com a leitura da

imagem de entrada, dividindo-a em nodos como a estrutura de árvore. Assim, o nodo raiz é a própria imagem. A cada iteração, divide-se o nodo superior em quatro blocos, tal que a divisão segue a ordem da esquerda para direita, de cima para baixo.

Quando se divide o bloco, calcula-se para ele o valor RMSE. O resultado desse cálculo é comparado com o valor de referência determinado no algoritmo. Esse valor é o limite da distância entre o bloco de domínio (nodo raiz) e o bloco molde (nodo folha) . Caso esse valor esteja além do estipulado, o bloco é subdividido em outros quatro blocos. Assim, consegue-se encontrar os pixels de melhor vizinhança.

Durante o processo de divisão dos blocos é importante se definir um método de classificação dos blocos divididos para diminuir o tempo de processamento. Nesse método, utiliza-se a classificação por regiões, segundo a soma, média e variância calculadas. Pode-se utilizar ainda os valores de brilho ou as simetrias para se classificar os blocos.

Em analogia à compressão básica fractal, o nodos superiores são os blocos de domínio e suas folhas são os blocos moldes. Para melhor explicação das iterações e estrutura do algoritmo codificador fractal de imagens por particionamento *Quadtree*, esta seção está dividida em duas partes: codificação e decodificação.

### 3.3.1 Codificação Fractal de Imagens por Particionamento Quadtree

A figura 3.3 ilustra as principais etapas no processo de compressão fractal por particionamento *quadtree*.

O algoritmo de compressão fractal por particionamento *quadtree* possibilita diversos parâmetros como entrada. A maioria dos parâmetros não é obrigatória, exceto o arquivo original e o nome para o arquivo codificado que conterà o resultado final da compressão.

Os parâmetros aceitos pelo algoritmo, exceto os nomes dos arquivos das imagens, são:

- t: valor de tolerância;
- m: profundidade mínima de recursão;
- M: profundidade máxima de recursão;

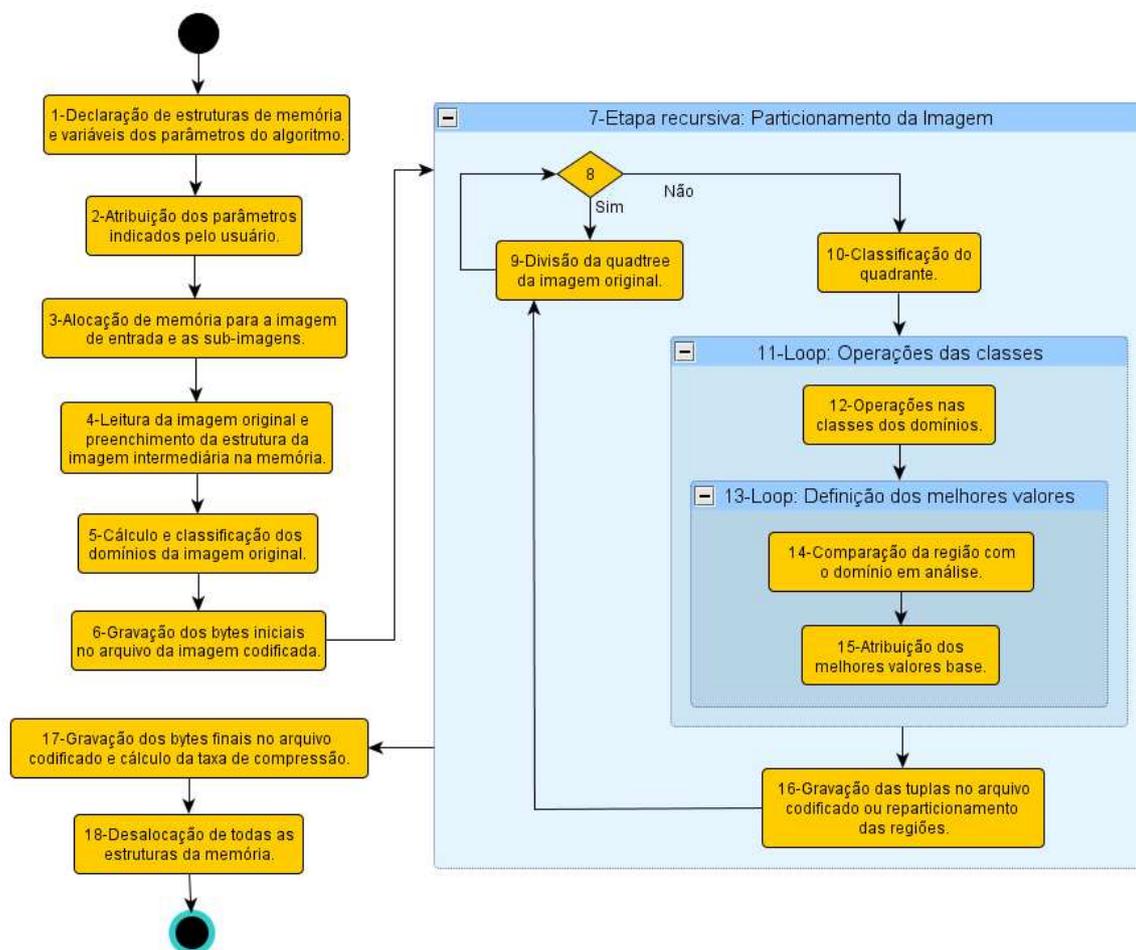


Figura 3.3: Processo de compressão do codificador fractal por particionamento *quadtree*.

- S: quantidade de *bytes* para caminhar no início do arquivo;
- w: largura da imagem;
- h: altura da imagem;
- d: tamanho do bloco de domínio;
- D: tipo de conjuntos de tamanho do bloco de domínio;
- s: quantidade de bits para quantização do fator de escala das transformações afins;
- o: número de bits utilizados para quantização do *offset* das transformações afins;
- N: número máximo de escala para a imagem;
- p: determina que sejam utilizadas somente escalas positivas;
- f: quantidade de sub-classes de domínio que serão pesquisadas;
- F: quantidade de classes de domínio que serão pesquisadas;
- H: imprime informações de ajuda sobre os parâmetros de entrada do algoritmo.

Uma descrição das principais etapas ilustradas na figura 3.3 é dada a seguir:

**etapa 1:** a primeira etapa tem o objetivo de declarar as estruturas e tipos que serão utilizados durante a execução do algoritmo. Nesta etapa, destaca-se a declaração das variáveis com seus respectivos valores que representam os parâmetros que o usuário pode determinar na chamada do algoritmo. Assim, caso o usuário não defina nenhum valor de parâmetro, exceto os nomes dos arquivos das imagens, os valores pré-definidos das variáveis referentes aos parâmetros serão utilizados no algoritmo.

**etapa 2:** os parâmetros que podem ser utilizados na chamada do algoritmo são muito importantes, pois determinam seu funcionamento, tais como profundidade da árvore, divisão de quadrantes e domínio, quantidade de classes e sub-classes. Devido a essa importância, esta etapa tem o objetivo de atribuir às respectivas variáveis declaradas no algoritmo os valores dos parâmetros determinados pelo usuário, inclusive a atribuição dos nomes dos arquivos das imagens às variáveis correspondentes.

**etapa 3:** o particionamento *quadtree* baseia-se na divisão da imagem em quadrantes na estrutura de árvore, ou seja, cada nó raiz da árvore é um quadrante que tem uma ramificação de outros sub-quadrantes denominados folhas. Quando iniciado o processo de particionamento, a imagem total é o nó raiz, depois ela é dividida em quatro quadrantes (as folhas). Essa divisão pode acontecer até o limite máximo de profundidade. Para que o particionamento ocorra, esta etapa aloca uma região de memória do tamanho da imagem original e outras quatro regiões de memória com 1/4 de tamanho da imagem original para alocar os quadrantes.

**etapa 4:** esta etapa tem o objetivo de abrir o arquivo da imagem original, fazer a leitura de todos os pixels e armazená-los na região de memória destinada à imagem original. Com a leitura dos pixels da imagem original e a alocação dos pixels na memória, o arquivo da imagem original é fechado. Neste momento, o algoritmo possui somente uma região da memória com os pixels da imagem original. Assim, após esta etapa, o algoritmo irá manipular apenas o arquivo codificado e as regiões de memória que foram ou ainda serão alocadas.

**etapa 5:** o particionamento da imagem fundamenta-se no valor RMSE dos quadrantes, ou seja, se determinado quadrante (nó folha) tem um valor de RMSE dentro do indicado pelo algoritmo, então este se relaciona com o domínio (nó raiz). Esta verificação é possível quando se consegue determinar os domínios e classificá-los, o que torna possível a comparação entre o domínio e as regiões.

Nesta etapa, percorre-se os pixels da imagem original encontrando os possíveis domínios até o limite de profundidade especificado. A cada domínio encontrado, calcula-se sua soma, soma<sup>2</sup>, média e variância e os classifica na estrutura de classes. A definição de qual classe o domínio pertence é obtida através de alguns passos executados nos pixels do domínio.

Primeiramente calcula-se a média, soma, soma<sup>2</sup> e variância dos pixels do domínio. Em seguida, ordena-se os pixels do domínio de acordo com a intensidade do brilho, ou seja, do claro (canto superior esquerdo) para o mais escuro (canto inferior direito).

O algoritmo define um vetor com quatro posições que determina os tipos de ordenações. Assim, cada domínio pode ser ordenado através dessas posições. Fisher [18] criou quatro posições de ordenação para determinar a qual classe o domínio pertence e se necessita sofrer rotação para posicionar melhor os pixels.

Dependendo da ordenação do domínio com base no brilho dos pixels, é aplicada a operação de rotação nos pixels. Essa rotação tem o objetivo de colocar os pixels mais claros a partir do canto superior esquerdo. A tabela 3.1 apresenta os tipos de ordenação, as classes e qual o tipo de ordenação que sofre a rotação.

Tabela 3.1: Tipos de ordenação. Extraído do algoritmo baseado em *quadtree* de Fisher [18].

Tipo de Ordenação	Classe	Rotação
0,2,1,3	0	0
0,2,3,1	0	1
0,1,2,3	1	0
0,3,2,1	1	1
0,1,3,2	2	0
0,3,1,2	2	1

A rotação é aplicada somente nos tipos de ordenação que possuem o valor 1 na coluna da rotação, como ilustrada na tabela 3.1. Com a rotação ou não do domínio,

classifica-se o domínio em uma das três possíveis classes que possuem 24 sub-classes individualmente. Essa classificação é feita de acordo com o brilho dos pixels no domínio e tipo de ordenação. A simetria é aplicada após a classificação do domínio. Ao final desta etapa, tem-se os domínios classificados e ordenados nas possíveis classes e sub-classes com seus valores de soma, soma<sup>2</sup> e simetria armazenados. Esses valores serão utilizados quando for iniciada a comparação do domínio com as possíveis regiões.

**etapa 6:** esta etapa tem o objetivo de gravar no início do arquivo da imagem codificada os primeiros valores relacionados ao processo de codificação da imagem. Os valores correspondem ao valor mínimo e máximo do particionamento das regiões, a densidade dos pixels do domínio, o divisor ou multiplicador para densidade do domínio, o conjunto de classes para geração do domínio e a altura e largura da imagem.

**etapa 7:** a *quadtree* utiliza-se de recursividade para particionar a imagem. O método de particionamento faz chamadas para outros métodos que se encarregam de fazer o particionamento e as comparações entre os blocos moldes e de domínio.

Nesta etapa, concentram-se os métodos mais importantes do algoritmo, que são o particionamento da imagem, o cálculo dos blocos moldes, a comparação entre os blocos domínio e molde e a gravação das tuplas resultantes das transformações afins no arquivo codificado.

O conjunto desses métodos que são apresentados nas próximas etapas tem o objetivo de procurar todos os possíveis blocos moldes (nós folhas) e compará-los com os domínios que foram classificados, com o intuito de relacionar cada bloco molde com seu respectivo domínio. Assim que encontrada a relação entre o bloco molde e o domínio, gera-se a tupla que será gravada no arquivo codificado.

**etapa 8:** nesta etapa, o algoritmo utiliza-se de uma condição para dividir a imagem. Essa condição tem o objetivo de dividir o quadrante até que seja a menor parte possível. Assim, se o valor de profundidade for maior que a quantidade de partições mínimas

especificadas no algoritmo, chama-se recursivamente o método de particionamento para a região até atingir o mínimo. Entretanto, se aquele quadrante estiver no tamanho mínimo, ele é encaminhado para o processo de classificação e comparação com os domínios.

**etapa 9:** o processo de particionamento do quadrante envolve os valores das posições  $x$  e  $y$ , tamanho, tolerância e profundidade. A partir desses valores, o quadrante é dividido em partes até o tamanho mínimo especificado.

As posições  $x$  e  $y$  indicam onde está posicionada a região dos pixels a ser particionada. O tamanho refere-se à quantidade de pixels dessa região que se inicia em  $x$  e  $y$ . A tolerância é um critério de fidelidade utilizado para o controle de particionamento e a profundidade indica até qual altura da árvore pode-se dividir o quadrante.

**etapa 10:** o método de classificação utilizado nos domínios é aplicado de forma igual aos blocos moldes, ou seja, todo o processo de classificação indicado na etapa 5 é utilizado para os blocos moldes (nós folhas). Os resultados obtidos após a classificação dos blocos moldes são a primeira classe, segunda classe, terceira classe, simetria da região, soma e soma<sup>2</sup>. Alguns desses valores são utilizados na comparação entre o bloco molde e de domínio. Ao final desta etapa, a região está classificada e permite, de forma simplificada, a comparação com o domínio.

**etapa 11:** o laço utilizado nesta etapa envolve as operações específicas com as classes. Ela tem o objetivo de definir a primeira e última classes que devem ser pesquisadas e como são feitas as comparações. A quantidade padrão para as classes varia de 3 a 24 para as subclasses. Esses valores podem ser modificados pelos parâmetros  $-f$  e  $-F$  na chamada do algoritmo. No final desta etapa, os resultados gerados são as tuplas que devem ser gravadas no arquivo codificado.

**etapa 12:** esta etapa tem o objetivo de, durante o laço mencionado na etapa 11, pesquisar em cada parte do domínio as regiões com escalas negativas e positivas.

Para as regiões com escalas negativas, o algoritmo utiliza-se um conjunto de trans-

formadas para serem aplicadas nessas regiões e também um conjunto de rotações que representam as simetrias. O conjunto de transformadas e simetrias são matrizes bidimensionais, em que o autor do algoritmo definiu valores prévios para as transformadas e simetrias. Esses valores não podem ser alterados por parâmetros na chamada do algoritmo. O autor não informa através das documentações do código como ele chegou aos valores das transformadas e simetrias. A cada iteração do laço verifica-se se o valor é negativo e atribui-se à sub-classe um valor correspondente à classe de transformada e à região de simetria uma rotação correspondente ao conjunto de rotações.

Quando a escala é positiva, não é necessário utilizar o conjunto de transformações e rotações, devido ao posicionamento dos pixels naquela região. Então, define-se a simetria final através do somatório da simetria do domínio e da região.

**etapa 13:** esta etapa consiste em comparar os valores do bloco molde com o domínio e, assim, resultar nos melhores valores para as tuplas que, posteriormente, devem ser gravadas no arquivo codificado.

**etapa 14:** a etapa de comparação tem o objetivo de resultar no valor RMSE do bloco molde e compará-lo com o RMSE do domínio que está armazenado na estrutura de domínio e verificar qual bloco molde se relaciona com o bloco de domínio. O algoritmo necessita de alguns cálculos para obter este valor. Primeiramente, calcula-se o somatório do bloco molde em análise, a soma, a soma<sup>2</sup> e a escala. Esta etapa finaliza-se com o cálculo do RMSE do bloco molde que deve ser comparado com o RMSE do domínio.

**etapa 15:** com o RMSE do bloco molde é feita a comparação com o melhor RMSE obtido até o momento. Nota-se que, por ser um laço de repetição que percorre todas os possíveis blocos moldes para comparar apenas com um domínio, haverá diversos RMSE possíveis. Desse modo, ao final do laço, tem-se o bloco molde que mais se relaciona com o bloco de domínio.

Esta etapa tem o objetivo de armazenar as informações referentes ao melhor RMSE

encontrado e determinar qual bloco se relaciona melhor com o bloco de domínio.

**etapa 16:** esta etapa tem o objetivo de verificar se, mesmo encontrando o melhor valor RMSE até o momento, ainda é preciso redividir a região. Se não for atingido o valor de profundidade máximo, então faz uma nova divisão do quadrante. Entretanto, se o valor de profundidade for atingido, então grava-se no arquivo codificado as tuplas posição do domínio  $x$  e  $y$ , simetria, valor de RMSE, valor  $\alpha$  e  $\beta$ .

As etapas de 7 até 16 são realizadas até se analisar todos os domínios com todos os possíveis blocos moldes. Essas verificações resultam nas tuplas que são gravadas no arquivo codificado.

**etapa 17:** esta etapa tem o objetivo de gravar no final do arquivo codificado os *bytes* que representam o final de arquivo e, em seguida, fechar o arquivo codificado.

**etapa 18:** com o processo de codificação fractal por particionamento *quadtree* finalizado é necessária a liberação de todas as regiões de memória. Assim, todas as estruturas de memória alocadas durante o algoritmo são desalocadas e finaliza-se o algoritmo.

### 3.3.2 Decodificação Fractal de Imagens por Particionamento Quadtree

A figura 3.4 ilustra as etapas importantes no processo de descompressão fractal por particionamento *quadtree*.

O algoritmo de descompressão fractal por particionamento *quadtree* possibilita diversos parâmetros como entrada. A maioria dos parâmetros não é obrigatória, exceto o nome do arquivo codificado e o nome para o arquivo decodificado que conterà o resultado final da descompressão.

Os parâmetros aceitos pelo algoritmo, exceto os nomes dos arquivos das imagens, são:

- n: número de iterações para encontrar o ponto fixo da função;
- f: número real para escalar a saída da imagem;

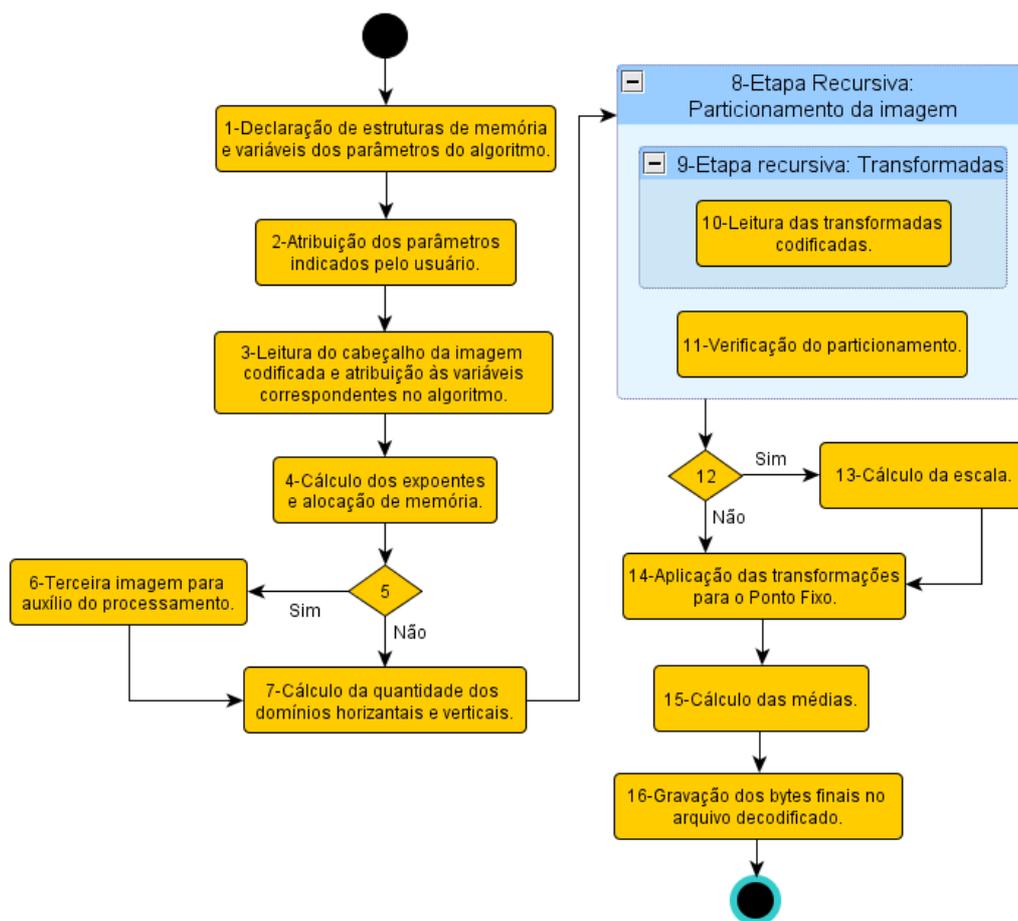


Figura 3.4: Processo de descompressão do Codificador Fractal por Particionamento Quadtree.

- i: imagem que pode ser utilizada para auxiliar no cálculo do sistema de funções iteradas;
- N: número máximo de escala para a imagem;
- s: quantidade de bits para quantização do fator de escala das transformações afins;
- o: número de bits utilizados para quantização do *offset* das transformações afins;
- p: suprime o pós-processamento da imagem, que calcula a média dos quadrantes da imagem;
- P: exibe na tela dados de saída sobre as partições das regiões;
- H: imprime informações de ajuda sobre os parâmetros de entrada do algoritmo.

Uma descrição das principais etapas ilustradas na figura 3.4 é dada a seguir:

**etapa 1:** a primeira etapa tem o objetivo de declarar as variáveis correspondentes aos parâmetros com seus valores padrões, que podem ser utilizados na chamada do

algoritmo de decodificação por particionamento *quadtree*. Os parâmetros indicados pelo usuário modificam esses valores pré-definidos no algoritmo.

Além das variáveis, uma estrutura é declarada para manipular todos os dados das transformadas do arquivo codificado.

**etapa 2:** com a primeira etapa do algoritmo finalizada, inicia-se o processo de leitura dos parâmetros fornecidos na chamada do algoritmo. Todos os parâmetros são lidos e atribuídos às suas respectivas variáveis, particularmente, os nomes das imagens.

Os parâmetros referentes aos nomes da imagem codificada e decodificada são os únicos que devem obrigatoriamente ser fornecidos para execução do algoritmo.

**etapa 3:** o arquivo codificado possui nos seus primeiros *bytes* as informações referentes ao tamanho da partição, ao tamanho da imagem e à divisão de domínio que foram utilizados na codificação da imagem. Esses valores são lidos no cabeçalho do arquivo codificado e atribuídos às variáveis respectivas do algoritmo de decodificação. Os dados do cabeçalho da imagem são imprescindíveis para o funcionamento do algoritmo, pois determinam como serão realizadas as etapas de particionamento da imagem.

**etapa 4:** nesta etapa são calculados, com base na largura e altura da imagem, os expoentes necessários para os cálculos referentes aos tamanhos de domínios e bits necessários para as transformadas, com o objetivo principal de alocar memória para as iterações que serão realizados nas próximas etapas do algoritmo.

**etapa 5:** o objetivo desta etapa é verificar se foi incluído como parâmetro uma terceira imagem para auxiliar na etapa inicial de transformação do ponto fixo. Se o usuário incluiu esta imagem na chamada do algoritmo, chama-se o método de leitura dessa imagem, ou seja, utiliza-se uma imagem como um fundo que auxiliará no processo do ponto fixo. Caso contrário, o algoritmo continua normalmente seguindo para a etapa sete.

**etapa 6:** o algoritmo permite que seja utilizada uma imagem auxiliar antes de iniciar

a leitura das transformadas do arquivo comprimido, para que a imagem já tenha alguns valores dos pixels. Quando a imagem auxiliar é fornecida nos parâmetros do algoritmo, seus pixels são lidos e alocados na memória. A estrutura usada para armazenar esses pixels é a mesma para armazenar os pixels resultantes das transformadas. Portanto, ao se iniciar as operações das transformadas pelas tuplas armazenadas no arquivo codificado, tanto os pixels da imagem auxiliar como os valores das tuplas são utilizados no mesmo cálculo das transformadas. Dessa forma, esses pixels auxiliam o início do processo de decodificação.

**etapa 7:** os dados gravados no arquivo codificado não contêm a quantidade de domínios existentes na imagem. Por isso, esta etapa tem o objetivo de calcular a quantidade de domínios horizontais e verticais que existem na imagem que será decodificada. Esta etapa é necessária devido ao modo como o algoritmo manipula os pixels. Os pixels da imagem são manipulados em linha, ou seja, os pixels são lidos na forma horizontal dentro da imagem, o que justifica a necessidade prévia desses cálculos antes das transformadas.

**etapa 8:** esta etapa tem o objetivo de realizar, de forma recursiva, todo o particionamento da imagem. No algoritmo de codificação, particionou-se a imagem para fazer as leituras dos pixels e associá-los aos domínios e depois codificá-los para gravar no arquivo intermediário. No processo de decodificação, esse particionamento é utilizado para se chegar às divisões que foram realizadas e compor novamente a imagem através das transformadas calculadas nas iterações do método referente ao ponto fixo.

**etapa 9:** a cada iteração recursiva do particionamento da imagem, as tuplas respectivas ao quadrante contidas no arquivo codificado são lidas da memória. Essa leitura é feita de forma recursiva para se dividir a região e encontrar o tamanho correto do quadrante.

**etapa 10:** o principal objetivo desta etapa é ler as transformadas gravadas no arquivo codificado, calcular novamente os valores de  $\alpha$  e  $\beta$  e preparar os pixels para a trans-

formada do ponto fixo. A leitura das tuplas não é feita de forma tão trivial, pois, para se calcular o ponto fixo, é fundamental conhecer o quadrante que gerou aquele conjunto de dados do registro. Por isso, antes de ler os registros do arquivo codificado, o método de leitura das transformadas divide a imagem até a profundidade e quadrante corretos e depois faz a leitura e o cálculo dos valores importantes para continuação do algoritmo.

**etapa 11:** a etapa número 10 é encerrada quando o particionamento inicial da imagem chega ao fim. No entanto, se após este particionamento inicial ainda não for atingida a profundidade desejada na imagem (a divisão esperada do quadrante), isto significa que ainda há divisões a serem feitas e registros para serem lidos. Assim, particiona-se novamente a imagem.

O particionamento recursivo da imagem é realizado devido à forma como as tuplas foram gravadas no arquivo codificado. As tuplas são gravadas de acordo com o quadrante encontrado. Por esse motivo, para se decodificar a imagem é necessário encontrar o mesmo tipo de quadrante e, então, ler as tuplas correspondentes àquela região.

Essa etapa tem a função de verificar se, após os particionamentos, os limites da imagem foram atingidos, como largura, altura e profundidade. Se o algoritmo fez a varredura por toda a imagem até o seu limite de área e profundidade, segue-se para a próxima etapa.

**etapa 12:** esta etapa tem o objetivo de aplicar a escala na imagem decodificada, caso esta seja informada pelo usuário nos parâmetros do algoritmo.

A escala utilizada deve ser informada pelo usuário nos parâmetros de entrada do algoritmo (parâmetro -s). Se o usuário determinar um valor de escala, o método para redimensionamento de escala é chamado. Caso contrário, a imagem decodificada terá o mesmo tamanho da imagem original.

**etapa 13:** o método de cálculo da escala atribui às variáveis referentes ao tamanho e à posição da imagem o tipo de escala que deve ser aplicado na imagem resultante. Com

esses valores calculados, o tamanho da imagem já está definido e as transformações são realizadas na área definida para a imagem. O algoritmo não aplica métodos de interpolação de pixels e também não utiliza nenhum método para garantir a qualidade da imagem quando se aplica a escala.

**etapa 14:** esta etapa tem o objetivo de encontrar o ponto fixo da imagem decodificada. Por isso, aplica as transformações nos pixels por um determinado número de vezes, para se obter ao final das iterações o valor do ponto fixo.

Antes de iniciar esta etapa, todas as estruturas de memória e de particionamento dos quadrantes já estão prontas com os seus respectivos valores provenientes das tuplas. O algoritmo tem o valor pré-determinado de 15 iterações para se atingir o ponto fixo da imagem, entretanto, esse número de iterações pode ser alterado pelo parâmetro -n.

As transformações consistem na aplicação repetida da mesma simetria, escala e *offset* nos pixels da imagem. A cada iteração, os pixels são modificados por esses cálculos e, ao final de  $x$  iterações, chega-se à imagem decodificada.

O algoritmo não faz nenhuma verificação do resultado final, simplesmente determina o número de iterações que podem resultar na imagem decodificada. Essas iterações podem também não chegar ao resultado esperado.

**etapa 15:** esta etapa tem o objetivo de calcular as médias obtidas nas transformações realizadas nos pixels da imagem decodificada. O resultado das médias são exibidos quando é utilizado o parâmetro -P na chamada do algoritmo. As médias são utilizadas para análise de desempenho da descompressão da imagem.

**etapa 16:** a última etapa do processo de decodificação consiste em gravar *bytes* no arquivo decodificado para indicar o final do arquivo e, em seguida, fechar o arquivo decodificado.

### 3.4 Busca Local Guiada

O objetivo de aplicar a técnica da busca local guiada (GLS, do inglês *guided local search*) é melhorar a velocidade da busca dos blocos da imagem no método *quadtree*.

A busca local guiada é um método de busca heurística da classe das metaheurísticas baseado na busca local [44, 47], que tem o objetivo de resolver problemas de otimização combinatorial. Ela foi proposta em 1996 por Voudouris e Tsang [51, 53]. Outros métodos heurísticos que também se incluem na classe das metaheurísticas são a busca tabu, os algoritmos genéticos e o resfriamento simulado (*Simulated Annealing*).

O foco principal da GLS é explorar o problema através das informações sobre as buscas realizadas e guiar a heurística das próximas buscas dentro do espaço determinado [48]. Para isso, a GLS utiliza-se do resultado do custo da função, aplicação de penalidades e alteração dinâmica do custo da função [50, 52].

A cada iteração são feitas buscas locais na região determinada para escolher a melhor solução. Caso esta busca se encontre em um mínimo local, três passos são aplicados:

1. A penalidade é modificada e aplicada;
2. A busca local é chamada novamente para minimizar o problema;
3. O custo da função é modificado.

Com o método de busca local guiada, o processo de subdivisão das regiões da imagem pode ser melhorado, visto que é necessário avaliar as semelhanças dos pixels de determinada região para dividir o bloco em análise.

Para isso, esse método de busca heurística será empregado como condição para se dividir os blocos da imagem, substituindo o cálculo do RMSE pelo custo da função. De acordo com a ilustração da figura 3.5, a aplicação da busca local guiada é feita desde o princípio da divisão dos blocos.

A busca local guiada necessita de um conjunto de informações para orientar a busca no melhor caminho. Esse conjunto constitui-se de característica da solução, argumento

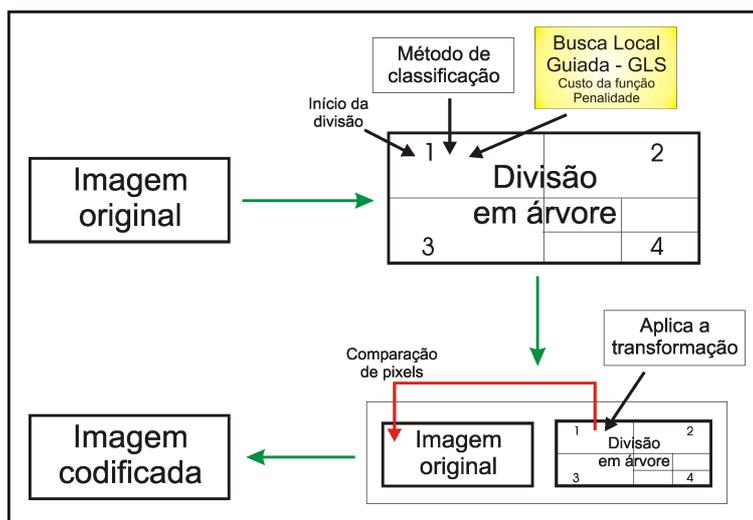


Figura 3.5: Diagrama das etapas de codificação da *quadtree* com GLS.

de custo da função e penalidade para processar e gerar um resultado que conduza a busca pelo caminho.

No contexto do algoritmo *quadtree*, a característica da solução selecionada é a profundidade atingida em determinado momento, devido à relação da profundidade com o desempenho do algoritmo.

O argumento de custo da função é formado por alguns valores como

$$h(s) = g(s) + \lambda \sum_{i=1}^M p_i I_i(s) \quad (3.2)$$

em que  $h(s)$  é o custo que representa o consumo (desempenho) da função,  $g(s)$  é a profundidade atingida,  $\lambda$  representa a tolerância do algoritmo para particionamento,  $\sum_{i=1}^M p_i$  é o somatório das repetições realizadas em busca do melhor bloco molde e  $I_i(s)$  é a característica da solução. Com essa equação, obtém-se o custo da função para determinada busca.

Com o custo da função definido, calcula-se o melhor custo para penalização dos mínimos locais encontrados até o global ótimo. Portanto, o valor retornado pela função da busca local guiada baseado nos cálculos dos custos da função orienta a busca dentro do contexto dos blocos moldes para associação com blocos de domínio.

### 3.5 Aplicação dos Testes

O objetivo desta seção é descrever como os testes de compressão fractal de imagens são realizados e qual abordagem é aplicada para se concluir os resultados apresentados no capítulo 4.

Inicialmente foram selecionadas 6 imagens de tamanho  $512 \times 512$  pixels, no formato TGA em tons de cinza com conteúdos diferentes, obtidas do repositório [45].

Cada uma dessas imagens foi reduzida, por meio do pacote de manipulação de imagens GIMP [20], para as dimensões,  $256 \times 256$ ,  $128 \times 128$  e  $64 \times 64$  pixels. As imagens utilizadas são ilustradas na figura 3.6.

Os algoritmos utilizados para compressão de imagens fractal são baseados na busca exaustiva - código fonte original do autor Fisher, *hash table* - código fonte acrescentado no algoritmo de busca exaustiva, *quadtree* - código fonte original do autor Fisher e *quadtree* com GLS - código fonte acrescentado no algoritmo da *quadtree*. Em cada algoritmo, as medidas de distâncias aplicadas são a média, o desvio padrão, a entropia e as três medidas combinadas. Para cada medida, testou-se as seis imagens com os seguintes tamanhos  $512 \times 512$ ,  $256 \times 256$ ,  $128 \times 128$  e  $64 \times 64$  pixels. Como o objetivo da pesquisa é avaliar o desempenho dos algoritmos, definiu-se tamanhos de blocos de domínios para leitura das imagens com os seguintes tamanhos:  $4 \times 4$ ,  $8 \times 8$ ,  $16 \times 16$  e  $32 \times 32$  pixels para os algoritmos de busca exaustiva e *hash table*.

O algoritmo da *quadtree* faz a divisão da imagem baseada em parâmetros, o qual destacam-se a partição mínima e partição máxima que representam a profundidade na imagem e influenciam diretamente o desempenho do algoritmo. Esses valores correspondem à profundidade mínima e máxima que serão atingidas em cada quadrante da imagem. Os valores padrões são: partição mínima com valor 4 e partição máxima com valor 8. Assim, o algoritmo aplica quatro vezes a divisão de quatro blocos em determinada área da imagem e, se não for suficiente, o algoritmo faz mais divisões até o limite indicado pela partição máxima, que de acordo com o padrão é oito. Devido a esse comportamento da *quadtree* para testar o desempenho do algoritmo foram criados quatro conjuntos de valores que são ilustrados na tabela 3.2. Segundo a tabela 3.2, o conjunto 1T contém a



(a)



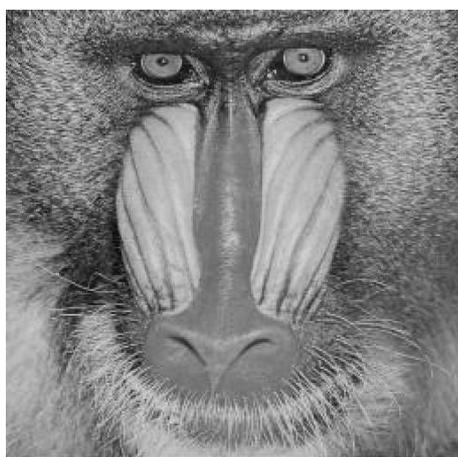
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 3.6: Imagens originais utilizadas nos testes de compressão fractal de imagens: (a) imagem Lenna com  $512 \times 512$  pixels; (b) imagem Boat com  $512 \times 512$  pixels; (c) imagem Fruits com  $512 \times 512$  pixels; (d) imagem Goldhill com  $512 \times 512$  pixels; (e) imagem Mandrill com  $512 \times 512$  pixels; (f) imagem Paolina com  $512 \times 512$  pixels.

partição mínima com 4 e partição máxima de 6, o conjunto 2T - partição mínima de 2 e partição máxima de 6, o conjunto 3T - partição mínima de 2 e partição máxima de 8 e o

Tabela 3.2: Conjuntos de valores do algoritmo da *quadtree*.

Parâmetros	Conjuntos			
	1T	2T	3T	4T
Tolerância	8	8	8	8
Bits para escala	5	5	5	5
Bits para offset	7	7	7	7
Partição Mínima	4	2	2	4
Partição Máxima	6	6	8	8

conjunto 4T - partição mínima de 4 e partição máxima de 8. Todos os quatro conjuntos são executados com a tolerância máxima de divisão 8, com 5 bits para escala e 7 bits para *offset* para os métodos baseados em *quadtree* e *quadtree* com GLS. Muitos parâmetros podem ser modificados neste tipo de algoritmo, porém, como o objetivo é testar o desempenho, somente a profundidade foi alterada, permanecendo todos os outros parâmetros com valores padrões.

Nos algoritmos *quadtree* e *quadtree* com GLS, os conjuntos 3T e 4T apresentaram alguns erros nas execuções de algumas imagens devido aos limites estabelecidos nos valores de profundidade. Os erros gerados se referem ao tamanho mínimo e máximo de profundidade. Para imagens com tamanho de  $128 \times 128$  e  $64 \times 64$  pixels, o algoritmo da *quadtree* não consegue fazer a compressão utilizando as configurações dos conjuntos 3T e 4T. Ao final dos testes, a quantidade total de imagens geradas foi de 384 imagens. Os resultados da compressão das imagens são abordados no capítulo 4.

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS

O objetivo deste capítulo é apresentar os resultados obtidos a partir da metodologia proposta para compressão fractal de imagens. As técnicas baseadas em busca exaustiva, tabela de dispersão (*hash table*), particionamento *quadtree* e busca local guiada são aplicadas em um conjunto de imagens digitais e os resultados analisados e comparados.

#### 4.1 Resultados da Compressão Fractal de Imagens com Busca Exaustiva

Esta seção apresenta os resultados obtidos pela técnica de compressão fractal de imagens baseada em busca exaustiva. Os tamanhos dos blocos de domínio utilizados no processo de compressão são, respectivamente,  $4 \times 4$ ,  $8 \times 8$ ,  $16 \times 16$  e  $32 \times 32$  pixels.

##### 4.1.1 Blocos de Domínio com $4 \times 4$ pixels

A busca exaustiva em compressão fractal de imagens é um método que utiliza a comparação entre todos os blocos da imagem para fazer a compressão da imagem. A tabela 4.1 apresenta os resultados obtidos pelo método de busca exaustiva utilizando-se blocos de tamanho  $4 \times 4$  pixels.

Os itens a seguir descrevem os resultados obtidos com relação ao tempo de compressão, à taxa de compressão, às medidas de qualidade e às características visuais das imagens comprimidas.

#### Tempo de Compressão

De acordo com a tabela 4.1, nota-se que o tempo de compressão das imagens com vários tamanhos foi diferente entre as medidas. Entretanto, é possível verificar através

Tabela 4.1: Compressão fractal de imagens com busca exaustiva - bloco domínio com  $4 \times 4$  pixels.

Domínio $4 \times 4$ Imagem	Medida: Média			Medida: Desvio Padrão			Medida: Entropia			Medida: 3 Medidas Somadas			
	Tempo(s)	Taxa	RMSE	Tempo(s)	Taxa	RMSE	Tempo(s)	Taxa	RMSE	Tempo(s)	Taxa	RMSE	PSNR
Boat	12000	1,999	3,659	12600	1,999	13,296	25,656	1,999	4,675	34,736	1,999	139,035	5,268
Fruits	512x512	12180	1,999	3,361	12720	1,999	29,823	18,640	1,999	20,888	1,999	170,708	3,486
Goldhill	512x512	12060	1,999	2,902	12480	1,999	10,746	27,506	1,999	3,491	1,999	129,204	5,905
Lenna	512x512	12060	1,999	3,982	12720	1,999	13,426	25,572	1,999	5,135	1,999	136,627	5,420
Mandrill	512x512	12000	1,999	5,547	12720	1,999	12,488	26,201	1,999	7,541	1,999	136,864	5,416
Paolina	512x512	12120	1,999	2,548	12720	1,999	37,449	16,662	1,999	4,099	1,999	157,751	4,171
Boat	256x256	734,47	1,999	7,047	777,35	1,999	17,020	23,511	1,999	9,006	1,999	133,868	5,597
Fruits	256x256	731,98	1,999	6,863	775,98	1,999	37,167	16,728	1,999	8,843	1,999	169,552	3,545
Goldhill	256x256	738,04	1,999	5,051	776,96	1,999	9,710	28,387	1,999	6,947	1,999	126,129	6,114
Lenna	256x256	733,21	1,999	6,332	776,97	1,999	14,000	25,208	1,999	8,208	1,999	135,168	5,513
Mandrill	256x256	731,98	1,999	11,124	777,45	1,999	17,699	23,172	1,999	13,534	1,999	134,885	5,532
Paolina	256x256	735,89	1,999	4,816	776,96	1,999	44,136	15,235	1,999	8,975	1,999	157,514	4,184
Boat	128x128	43,80	1,999	8,863	46,43	1,999	20,663	21,827	1,999	11,462	1,999	132,840	5,664
Fruits	128x128	43,51	1,999	8,624	46,30	1,999	32,966	17,770	1,999	11,557	1,999	169,655	3,539
Goldhill	128x128	43,55	1,999	6,952	46,21	1,999	15,816	24,149	1,999	9,545	1,999	124,619	6,219
Lenna	128x128	43,66	1,999	7,794	46,27	1,999	17,653	23,194	1,999	10,529	1,999	132,618	5,679
Mandrill	128x128	43,89	1,999	9,384	46,26	1,999	27,166	19,450	1,999	11,749	1,999	135,884	5,467
Paolina	128x128	43,57	1,999	7,834	46,30	1,999	90,176	9,029	1,999	9,726	1,999	157,225	4,199
Boat	64x64	2,48	1,996	11,345	2,61	1,996	22,812	20,968	1,996	15,023	1,996	131,614	5,745
Fruits	64x64	2,46	1,996	10,765	2,64	1,996	30,232	18,521	1,996	14,046	1,996	168,569	3,595
Goldhill	64x64	2,46	1,996	9,532	2,62	1,996	49,349	14,265	1,996	13,038	1,996	118,759	6,637
Lenna	64x64	2,46	1,996	10,527	2,60	1,996	34,702	17,324	1,996	14,195	1,996	126,063	6,119
Mandrill	64x64	2,46	1,996	8,966	2,63	1,996	43,776	15,306	1,996	11,692	1,996	132,698	5,674
Paolina	64x64	2,46	1,996	7,929	2,61	1,996	110,963	7,227	1,996	12,982	1,996	140,781	5,160

Algoritmo: Busca Exaustiva Original

da análise descritiva (medida estatística) que a combinação das três medidas obteve um tempo menor em relação às outras medidas. O item 3M apresentado na figura 4.1 ilustra essa diferença.

Tabela 4.2: Análise descritiva - busca exaustiva - bloco domínio com  $4 \times 4$  pixels - tempo de compressão.

<b>Tempo de Compressão - EX - B4</b>	<b>Média</b>	<b>Devio Padrão</b>	<b>Entropia</b>	<b>3M</b>
Tamanho da amostra =	24	24	24	24
Mínimo	2,46	2,6	4,15	4,34
Máximo	12180	12720	22800	1317,61
Mediana	387,935	411,205	654,1	78,315
Média Aritmética	3212,5971	3371,465	5374,359	371,1896

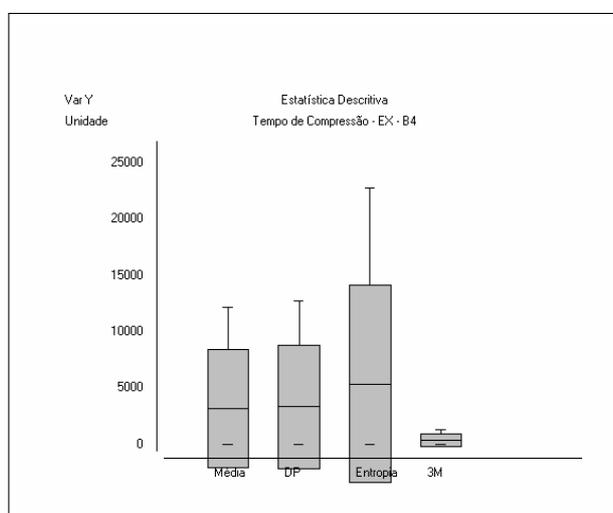


Figura 4.1: Análise descritiva - busca exaustiva - bloco domínio com  $4 \times 4$  pixels - tempo de compressão.

A tabela 4.2 da análise descritiva apresenta de forma numérica essa diferença. Na coluna 3M, a média aritmética é de 371,1896, inferior às demais medidas, o que comprova a taxa de tempo menor.

Tabela 4.3: Análise de variância - busca exaustiva - bloco domínio com  $4 \times 4$  pixels - tempo de compressão.

<b>Tempo de Compressão - EX - B4</b>	<b>Resultados</b>
H =	2,3241
Graus de liberdade =	3
(p) Kruskal-Wallis =	0,5079

Apesar de existir uma diferença no tempo de compressão, como mostra a tabela 4.2, tanto a medida de comparação da tabela 4.3 como a ilustração da figura 4.2 estatisticamente não apresentam diferenças entre as medidas (*ns – diferenanosignificativa*) no

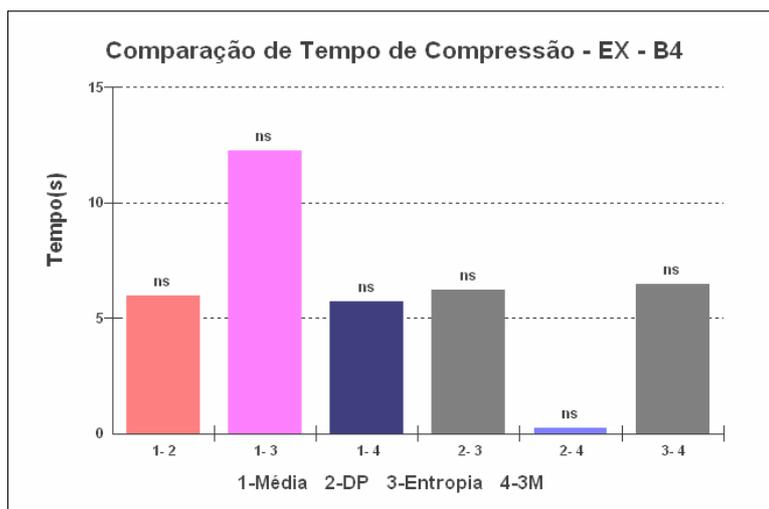


Figura 4.2: Análise de variância - busca exaustiva - bloco de domínio com  $4 \times 4$  pixels - tempo de compressão.

gráfico, de acordo com a medida de Kruskal-Wallis,  $p > 0,5079$ . Para existir diferença entre os conjuntos de medidas,  $p$  deve ser menor que  $0,5 (p < 0,5)$ . A diferença de qualidade apresentada entre as medidas deve-se ao fato do tipo de medida e tamanho do bloco aplicado no algoritmo.

Portanto, no tempo de compressão, a combinação das três medidas é melhor, seguido da média, desvio padrão e entropia.

## Taxa de Compressão

A taxa de compressão é a medida que não sofre modificações em nenhuma medida durante a execução do algoritmo, como pode ser observado na tabela 4.1. Os valores da taxa de compressão aumentam quando o tamanho dos blocos aumentam. Para compreensão gráfica desse comportamento da taxa de compressão, a figura 4.3 apresenta a análise descritiva sem variações entre as medidas.

## RMSE

A medida RMSE é utilizada entre os algoritmos para medir a qualidade da imagem após o processo de descompressão da imagem.

Os valores apresentados na tabela 4.1 foram obtidos após a descompressão da imagem. Nota-se que há variações de qualidade nas imagens geradas com blocos de tamanho  $4 \times 4$

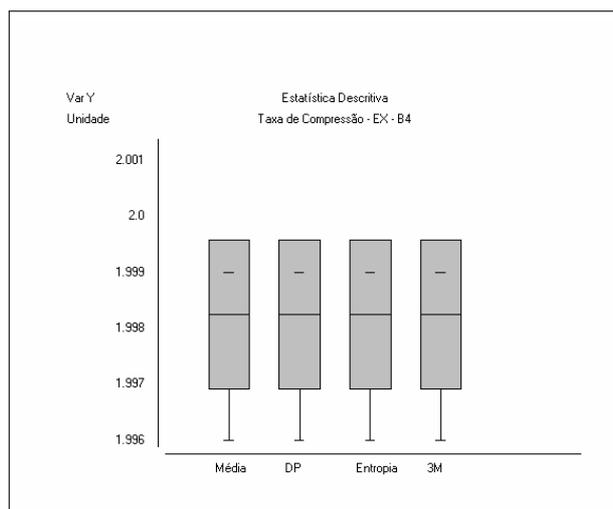


Figura 4.3: Análise descritiva - busca exaustiva - bloco de domínio com  $4 \times 4$  pixels - taxa de compressão.

pixels.

Essas diferenças são melhor compreendidas através da tabela 4.4 de análise descritiva, cuja coluna da média apresenta a menor média aritmética de todas as medidas.

Tabela 4.4: Análise descritiva - busca exaustiva - bloco de domínio com  $4 \times 4$  pixels - RMSE.

<b>RMSE - EX - B4</b>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Entropia</i>	<i>3M</i>
Tamanho da amostra =	24	24	24	24
Mínimo	2,548	9,71	3,491	118,8
Máximo	11,345	110,96	20,888	170,7
Mediana	7,4205	24,989	10,1275	135,5
Média Aritmética	7,1561	31,385	10,2869	141,6

A tabela 4.5 de análise de variância apresenta as comparações feitas entre as quatro medidas. Observa-se que há diferenças de qualidade significativas em quase todas as comparações, exceto entre a média e entropia. Essas duas medidas produziram uma imagem com qualidade muito semelhante. A diferença entre as medidas é considerada somente quando  $p < 0,05$ .

Com a ilustração da figura 4.4 de análise de variância, nota-se que, entre as medidas, houve diferenças de qualidade em termos estatísticos, exceto quando se compara a média e entropia. No topo das colunas é apresentada a diferença encontrada. Quanto menor o valor de  $p$ , maior é a diferença.

Portanto, a partir do gráfico de área ilustrado na figura 4.5, conclui-se que a média obteve melhor qualidade de imagem, seguida da entropia, desvio padrão e as três medidas

Tabela 4.5: Análise de variância - busca exaustiva - bloco de domínio com  $4 \times 4$  pixels - RMSE: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas.

<b>RMSE - EX - B4</b>	<i>Resultados</i>	- 2 -
H =	78,1509	
Graus de liberdade =	3	
(p) Kruskal-Wallis =	0	
R 1 (posto médio) =	18,7083	
R 2 (posto médio) =	58,125	
R 3 (posto médio) =	32,6667	
R 4 (posto médio) =	84,5	
Comparações Student-Newman-Keuls	Dif. Postos	p-valor
Grupos ( 1 e 2) =	39,4167	< 0,0001
Grupos ( 1 e 3) =	13,9583	0,0826
Grupos ( 1 e 4) =	65,7917	< 0,0001
Grupos ( 2 e 3) =	25,4583	0,0015
Grupos ( 2 e 4) =	26,375	0,001
Grupos ( 3 e 4) =	51,8333	< 0,0001

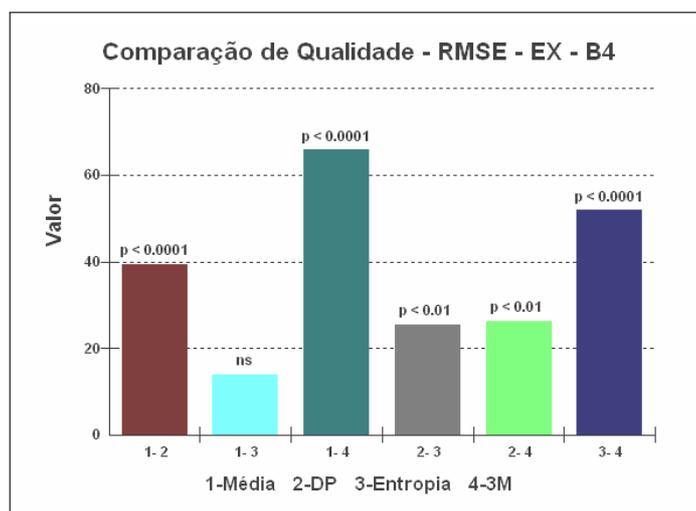


Figura 4.4: Análise variância - busca exaustiva - bloco de domínio com  $4 \times 4$  pixels - RMSE.

combinadas.

## PSNR

A medida PSNR mede a qualidade da imagem de forma contrária à RMSE, ou seja, quanto maior seu valor, melhor é a qualidade da imagem. Dessa forma, a tabela 4.1 apresenta os valores nas colunas PSNR que comprovam a média como a melhor medida para obter qualidade na imagem.

A tabela 4.6 apresenta a média com a maior média aritmética referente à medida PSNR. A tabela 4.7 também ajuda a compreender que há diferenças de qualidade entre

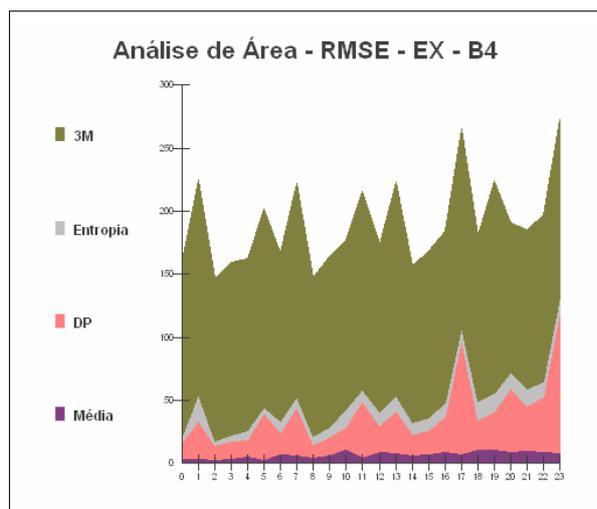


Figura 4.5: Análise de área - busca exaustiva - bloco de domínio com  $4 \times 4$  pixels - RMSE.

Tabela 4.6: Análise descritiva - busca exaustiva - bloco de domínio  $4 \times 4$  pixels - PSNR.

<b>PSNR - EX - B4</b>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Entropia</i>	<i>3M</i>
Tamanho da amostra =	24	24	24	24
Mínimo	27,035	7,227	21,733	3,486
Máximo	40,008	28,387	37,271	6,637
Mediana	30,7335	20,209	28,109	5,49
Média Aritmética	31,7601	20,063	28,6208	5,16

as medidas, exceto entre média e entropia, em que a diferença não é muito significativa, pois  $p < 0,0873$ .

Tabela 4.7: Análise de variância - busca exaustiva - bloco de domínio com  $4 \times 4$  pixels - PSNR: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas.

<b>PSNR - EX - B4</b>	<i>Resultados</i>	<i>- 2 -</i>
H =	78,1453	
Graus de liberdade =	3	
(p) Kruskal-Wallis =	0	
R 1 (posto médio) =	78,2083	
R 2 (posto médio) =	38,8333	
R 3 (posto médio) =	64,4583	
R 4 (posto médio) =	12,5	
Comparações Student-Newman-Keuls	Dif. Postos	p-valor
Grupos ( 1 e 2) =	39,375	< 0,0001
Grupos ( 1 e 3) =	13,75	0,0873
Grupos ( 1 e 4) =	65,7083	< 0,0001
Grupos ( 2 e 3) =	25,625	0,0014
Grupos ( 2 e 4) =	26,3333	0,0011
Grupos ( 3 e 4) =	51,9583	< 0,0001

O gráfico ilustrado na figura 4.6 exibe as barras com os valores de diferenças entre as comparações das medidas. Este gráfico ilustra a análise de variância da tabela 4.7.

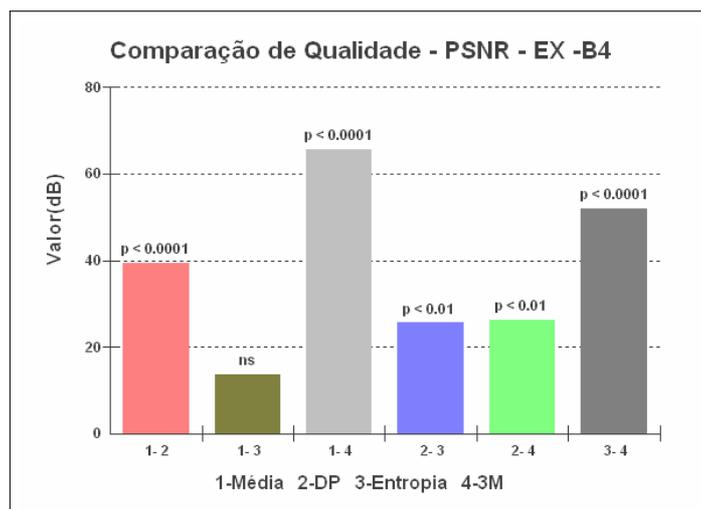


Figura 4.6: Análise variância - busca exaustiva - bloco de domínio com  $4 \times 4$  pixels - PSNR.

Portanto, os resultados apresentados pela medida RMSE são comprovados pelos resultados PSNR, que deve apresentar comportamento oposto. Conforme a figura 4.7, pode-se observar que a área da média é a maior, seguida da entropia, desvio padrão e as três medidas combinadas.

Os resultados obtidos com este tamanho de bloco e busca exaustiva mostram que quando o tamanho do bloco de domínio é pequeno ( $4 \times 4$  pixels), consegue-se imagens de boa qualidade. Porém, o tempo de processamento é mais elevado.

Segundo a tabela 4.1, a combinação das três medidas atingiu tempo menor de compressão, o que teoricamente não era esperado devido à quantidade de medidas somadas. Porém, ao observar as imagens resultantes com qualidade muito ruim, compreende-se que nesse contexto o melhor tempo produz as piores imagens.

## Resultado visual das imagens comprimidas

As imagens comprimidas, ilustradas na figura 4.8, são os resultados visuais do processo de compressão fractal baseada em busca exaustiva, com tamanho de blocos de domínio de  $4 \times 4$  pixels e medida de distância baseada na média. A sequência das imagens é a mesma apresentada na tabela 4.1.

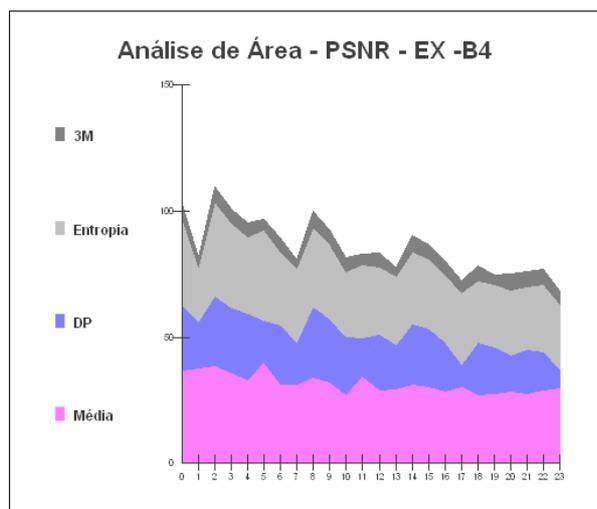


Figura 4.7: Análise de área - busca exaustiva - bloco de domínio com  $4 \times 4$  pixels - PSNR.



Figura 4.8: Imagens comprimidas com a busca exaustiva e tamanho de bloco de domínio com  $4 \times 4$  pixels e medida de distância da média. Os respectivos valores dos resultados das imagens estão na mesma sequência da tabela 4.1: (a) imagens com tamanho de bloco  $512 \times 512$  pixels; (b) imagens com tamanho de bloco  $256 \times 256$  pixels; (c) imagens com tamanho de bloco  $128 \times 128$  pixels; (d) imagens com tamanho de bloco  $64 \times 64$  pixels.

### 4.1.2 Blocos de Domínio com 8 x 8 pixels

A tabela 4.8 apresenta os resultados obtidos pelo método de busca exaustiva utilizando-se blocos de domínio de tamanho 8 x 8 pixels.

#### Tempo de Compressão

De acordo com a tabela 4.8, o tempo de compressão possui variações bem aproximadas entre as medidas.

A tabela de análise descritiva 4.9 auxilia a verificar qual das medidas foi a mais rápida em relação ao tempo de compressão. Verifica-se que a medida de desvio padrão obteve o menor tempo, a média aritmética é 3088,7. Esta tabela é importante para analisar esse contexto, pois, quando se utiliza a análise de variância, estatisticamente não há diferença entre as medidas de tempo.

A tabela 4.10 mostra que a medida Kruskal-Wallis,  $p < 0,1381$ , não corresponde a uma diferença significativa. Esta tabela é complementada pela ilustração da figura 4.9, que apresenta as colunas com a descrição ns (não significativo) ilustrando que não há diferença estatística.

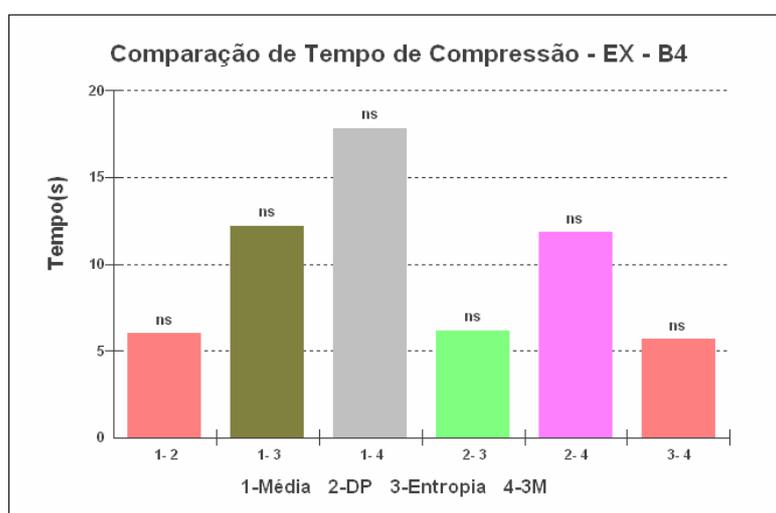


Figura 4.9: Análise de variância - busca exaustiva - bloco de domínio com 8 x 8 pixels - tempo de compressão.

Portanto, baseado na tabela 4.9 de análise descritiva, conclui-se que a medida de menor tempo de compressão é o desvio padrão, seguido da média, entropia e as três medidas

Tabela 4.8: Compressão fractal de imagens com busca exaustiva - bloco de domínio com  $8 \times 8$  pixels.

Domínio $8 \times 8$ Imagem	Medida: Média			Medida: Desvio Padrão			Medida: Entropia			Medida: 3 Medidas Somadas							
	Tempo(s)	Taxa	RMSE	PSNR	Tempo(s)	Taxa	RMSE	PSNR	Tempo(s)	Taxa	RMSE	PSNR					
Boat	512x512	11340	7,999	8,534	29,508	11580	7,999	12,160	26,432	19560	7,999	28,288	19500	7,999	12,453	26,225	
Fruits	512x512	11280	7,999	7,933	30,409	11640	7,999	12,285	30,343	19140	7,999	9,328	19440	7,999	164,663	3,799	
Goldhill	512x512	11220	7,999	6,501	31,871	11640	7,999	8,018	30,050	19140	7,999	7,762	19440	7,999	1187,43	7,996	
Lenna	512x512	11160	7,999	8,120	20,939	11640	7,999	10,950	27,343	19140	7,999	9,109	19500	7,999	74,895	10,642	
Mandrill	512x512	11160	7,999	13,010	25,845	11640	7,999	15,346	24,411	19080	7,999	14,490	20160	7,999	129,215	5,905	
Paolina	512x512	11400	7,999	4,692	34,703	11640	7,999	15,513	24,317	19200	7,999	5,563	20100	7,999	151,897	4,500	
Boat	256x256	671,63	7,996	13,395	25,592	684,05	7,996	17,888	23,080	1129,64	7,996	15,300	24,437	1187,59	7,996	18,589	22,746
Fruits	256x256	671,10	7,996	11,986	26,557	684,56	7,996	19,373	22,387	1130,04	7,996	13,844	25,306	1186,55	7,996	158,749	4,117
Goldhill	256x256	658,12	7,996	10,368	27,817	686,61	7,996	14,054	25,175	1124,11	7,996	12,224	26,387	1187,43	7,996	103,401	7,840
Lenna	256x256	658,81	7,996	11,580	26,857	685,21	7,996	15,289	24,443	1128,60	7,996	13,101	25,784	1187,29	7,996	120,281	6,527
Mandrill	256x256	659,26	7,996	18,006	23,022	684,39	7,996	21,041	21,669	1126,46	7,996	19,296	22,422	1192,14	7,996	128,574	5,948
Paolina	256x256	659,68	7,996	8,482	29,561	685,26	7,996	17,125	23,458	1129,97	7,996	9,692	28,402	1187,48	7,996	151,096	4,546
Boat	128x128	36,73	7,984	16,606	23,726	38,06	7,984	23,706	20,634	62,74	7,984	19,120	22,501	65,94	7,984	26,657	19,615
Fruits	128x128	36,47	7,984	15,040	24,586	37,91	7,984	19,138	22,493	62,46	7,984	16,829	23,610	65,86	7,984	159,325	4,085
Goldhill	128x128	36,53	7,984	13,906	25,267	37,93	7,984	20,036	22,095	62,68	7,984	16,037	24,029	65,88	7,984	86,519	9,389
Lenna	128x128	36,80	7,984	14,857	24,692	38,05	7,984	21,542	21,465	63,12	7,984	17,578	23,231	65,82	7,984	114,115	6,984
Mandrill	128x128	36,62	7,984	15,189	24,500	37,94	7,984	18,786	22,654	62,73	7,984	17,090	23,476	65,88	7,984	119,345	6,595
Paolina	128x128	36,61	7,984	12,635	26,099	37,88	7,984	34,078	17,481	62,52	7,984	13,963	25,232	66,38	7,984	139,703	5,227
Boat	64x64	1,78	7,937	20,233	22,010	1,82	7,937	29,525	18,727	3,04	7,937	24,341	20,404	3,18	7,937	97,027	8,393
Fruits	64x64	1,76	7,937	18,793	22,651	1,82	7,937	33,144	17,723	3,05	7,937	22,972	20,907	3,19	7,937	143,380	5,001
Goldhill	64x64	1,76	7,937	17,998	23,026	1,83	7,937	26,671	19,610	3,05	7,937	21,236	21,589	3,19	7,937	64,260	11,972
Lenna	64x64	1,76	7,937	22,774	20,982	1,82	7,937	32,370	17,928	3,03	7,937	27,340	19,395	3,20	7,937	81,584	9,899
Mandrill	64x64	1,76	7,937	16,460	23,802	1,83	7,937	20,870	21,740	3,04	7,937	19,133	22,495	3,20	7,937	112,323	7,121
Paolina	64x64	1,75	7,937	17,305	23,367	1,82	7,937	27,575	19,321	3,06	7,937	19,843	22,179	3,20	7,937	131,076	5,780

Algoritmo: Busca Exaustiva Original

Tabela 4.9: Análise descritiva - busca exaustiva - bloco de domínio com  $8 \times 8$  pixels - tempo de compressão.

<b>Tempo de Compressão - EX - B8</b>	<i>Média</i>	<i>Devio Padrão</i>	<i>Entropia</i>	<i>3M</i>
Tamanho da amostra =	24	24	24	24
Mínimo	1,75	1,82	3,03	3,18
Máximo	11400	11640	19560	20160
Mediana	347,46	361,055	593,615	626,465
Média Aritmética	2990,3721	3088,7	5100,973	5236,808

Tabela 4.10: Análise de variância - busca exaustiva - bloco de domínio com  $8 \times 8$  pixels - tempo de compressão

<b>Tempo de Compressão - EX - B8</b>	<i>Resultados</i>
H =	5,509
Graus de liberdade =	3
(p) Kruskal-Wallis =	0,1381

combinadas.

## Taxa de Compressão

A taxa de compressão apresentada na tabela 4.8 é idêntica para todos os tipos de imagens, não caracterizando diferença entre as medidas.

Tabela 4.11: Análise descritiva - busca exaustiva - bloco de domínio com  $8 \times 8$  pixels - taxa de compressão.

<b>Taxa de Compressão - EX - B8</b>	<i>Média</i>	<i>Devio Padrão</i>	<i>Entropia</i>	<i>3M</i>
Tamanho da amostra =	24	24	24	24
Mínimo	7,937	7,937	7,937	7,937
Máximo	7,999	7,999	7,999	7,999
Mediana	7,99	7,99	7,99	7,99
Média Aritmética	7,979	7,979	7,979	7,979

Com a tabela 4.11 de análise descritiva e a ilustração da análise descritiva na figura 4.10, comprova-se que são iguais as taxas para as mesmas imagens entre as medidas diferentes, pois a média aritmética da tabela e no gráfico é idêntica em todas as medidas.

## RMSE

Segundo a tabela 4.12 de análise descritiva da medida de qualidade RMSE, a média obteve a melhor qualidade de imagem, com o valor 13,5068, como pode ser observado na coluna da média e no item média aritmética.

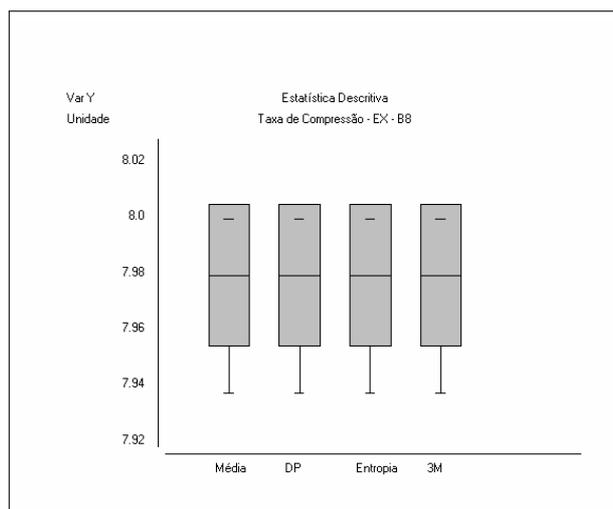


Figura 4.10: Análise descritiva - busca exaustiva - bloco de domínio com  $8 \times 8$  pixels - taxa de compressão.

Tabela 4.12: Análise descritiva - busca exaustiva - bloco de domínio com  $8 \times 8$  pixels - RMSE.

<b>RMSE - EX - B8</b>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Entropia</i>	<i>3M</i>
Tamanho da amostra =	24	24	24	24
Mínimo	4,692	8,018	5,563	12,453
Máximo	22,774	34,078	27,34	1187,43
Mediana	13,6505	19,2555	15,6685	119,813
Média Aritmética	13,5068	20,2701	15,6255	153,1899

As comparações entre as medidas com o bloco  $8 \times 8$  pixels apresentam diferenças na maioria das medidas. A ilustração da figura 4.11 apresenta as diferenças entre as medidas comparadas. Observa-se que entre a média e entropia, desvio padrão e entropia as diferenças não são significativas, mas há diferenças nas outras comparações.

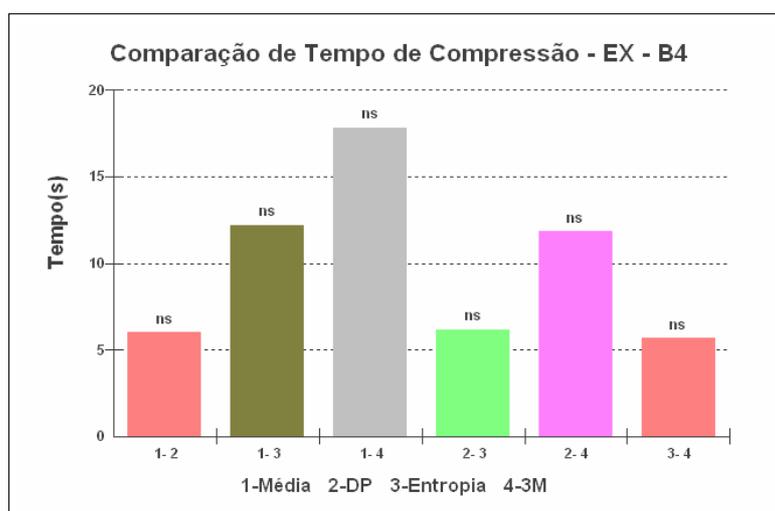


Figura 4.11: Análise variância - busca exaustiva - bloco de domínio com  $8 \times 8$  pixels - RMSE.

A figura 4.11 ilustra graficamente a tabela 4.13 de análise de variância que, para cada

comparação de medidas, exibe o resultado da probabilidade  $p$ .

Tabela 4.13: Análise de variância - busca exaustiva - bloco de domínio com  $8 \times 8$  pixels - RMSE: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas.

<b>PSNR - EX - B8</b>	<i>Resultados</i>	- 2 -
H =	51,0142	
Graus de liberdade =	3	
(p) Kruskal-Wallis =	0	
R 1 (posto médio) =	27,6667	
R 2 (posto médio) =	49,4167	
R 3 (posto médio) =	35,9167	
R 4 (posto médio) =	81	
Comparações Student-Newman-Keuls	Dif. Postos	p-valor
Grupos ( 1 e 2) =	21,75	0,0068
Grupos ( 1 e 3) =	8,25	0,3049
Grupos ( 1 e 4) =	53,3333	< 0,0001
Grupos ( 2 e 3) =	13,5	0,0932
Grupos ( 2 e 4) =	31,5833	< 0,0001
Grupos ( 3 e 4) =	45,0833	< 0,0001

Portanto, a partir dos valores apresentados, conclui-se que a medida que gerou uma imagem de melhor qualidade é a média, seguida da entropia, do desvio padrão e das três medidas combinadas.

## PSNR

A medida PSNR, segundo a tabela 4.14 de análise descritiva, apresenta a média como a medida que melhor contribui para a qualidade da imagem em blocos de tamanho  $8 \times 8$  pixels.

Tabela 4.14: Análise descritiva - busca exaustiva - bloco de domínio com  $8 \times 8$  pixels - PSNR

<b>PSNR - EX - B8</b>	<i>Média</i>	<i>Devio Padrão</i>	<i>Entropia</i>	<i>3M</i>
Tamanho da amostra =	24	24	24	24
Mínimo	20,939	17,481	19,395	3,799
Máximo	34,703	30,05	33,224	26,225
Mediana	24,9795	22,44	24,233	6,7895
Média Aritmética	25,7245	22,5408	24,8423	8,7855

O gráfico, ilustrado na figura 4.12, exibe esse resultado. Os valores referentes à média são um pouco acima da entropia, porém, bem acima das três medidas combinadas, que obtiveram o pior resultado de qualidade.

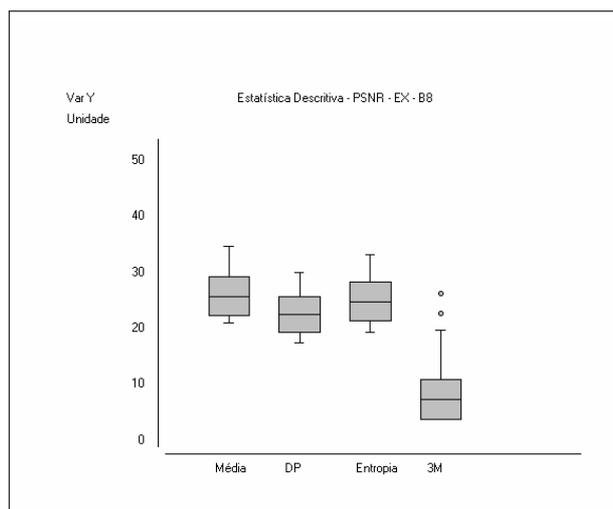


Figura 4.12: Análise descritiva - busca exaustiva - bloco domínio com  $8 \times 8$  pixels - PSNR.

Na análise de variância, nota-se que há diferenças entre as medidas quando estas são comparadas, evidenciada na tabela 4.15. A maioria das comparações possui diferenças significativas, o que não ocorre com apenas duas comparações, média  $\times$  entropia e desvio padrão  $\times$  entropia, o que caracteriza uma semelhança entre a qualidade da imagem gerada por essas medidas.

Tabela 4.15: Análise de variância - busca exaustiva - bloco de domínio com  $8 \times 8$  pixels - PSNR: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas.

<b>PSNR - EX - B8</b>		<i>Resultados</i>	- 2 -
H =		49,5452	
Graus de liberdade =		3	
(p) Kruskal-Wallis =		0	
R 1 (posto médio) =		67,7917	
R 2 (posto médio) =		48,25	
R 3 (posto médio) =		61,875	
R 4 (posto médio) =		16,0833	
Comparações Student-Newman-Keuls		Dif. Postos	p-valor
Grupos ( 1 e 2) =		19,5417	0,0151
Grupos ( 1 e 3) =		5,9167	0,4619
Grupos ( 1 e 4) =		51,7083	< 0,0001
Grupos ( 2 e 3) =		13,625	0,0902
Grupos ( 2 e 4) =		32,1667	< 0,0001
Grupos ( 3 e 4) =		45,7917	< 0,0001

O gráfico ilustrado na figura 4.13 correspondem aos dados apresentados na tabela 4.15. Portanto, quando o algoritmo é executado, com blocos de tamanho  $8 \times 8$  pixels, a medida de melhor qualidade é a média.

Os dados apresentados na tabela 4.8 indicam a medida de desvio padrão com o melhor

tempo. Entretanto, a medida de distância da média apresenta nas imagens maiores ( $512 \times 512$  e  $256 \times 256$  pixels) melhor qualidade de imagem, enquanto que as outras medidas não atingem boa qualidade. Porém o tempo de processamento da dessa medida de distância não é alta e consegue atingir boa qualidade nos vários tipos de imagem.

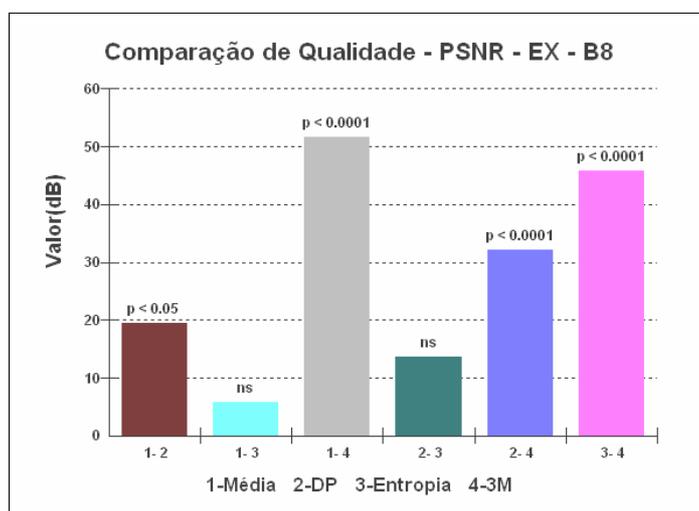


Figura 4.13: Análise variância - busca exaustiva - bloco de domínio com  $8 \times 8$  pixels - PSNR.

## Resultado visual das imagens comprimidas

As imagens comprimidas ilustradas na figura 4.14 são os resultados visuais do processo de compressão fractal do algoritmo de busca exaustiva com tamanho de bloco  $8 \times 8$  pixels e medida de distância da média. A sequência das imagens é a mesma apresentada na tabela 4.8.

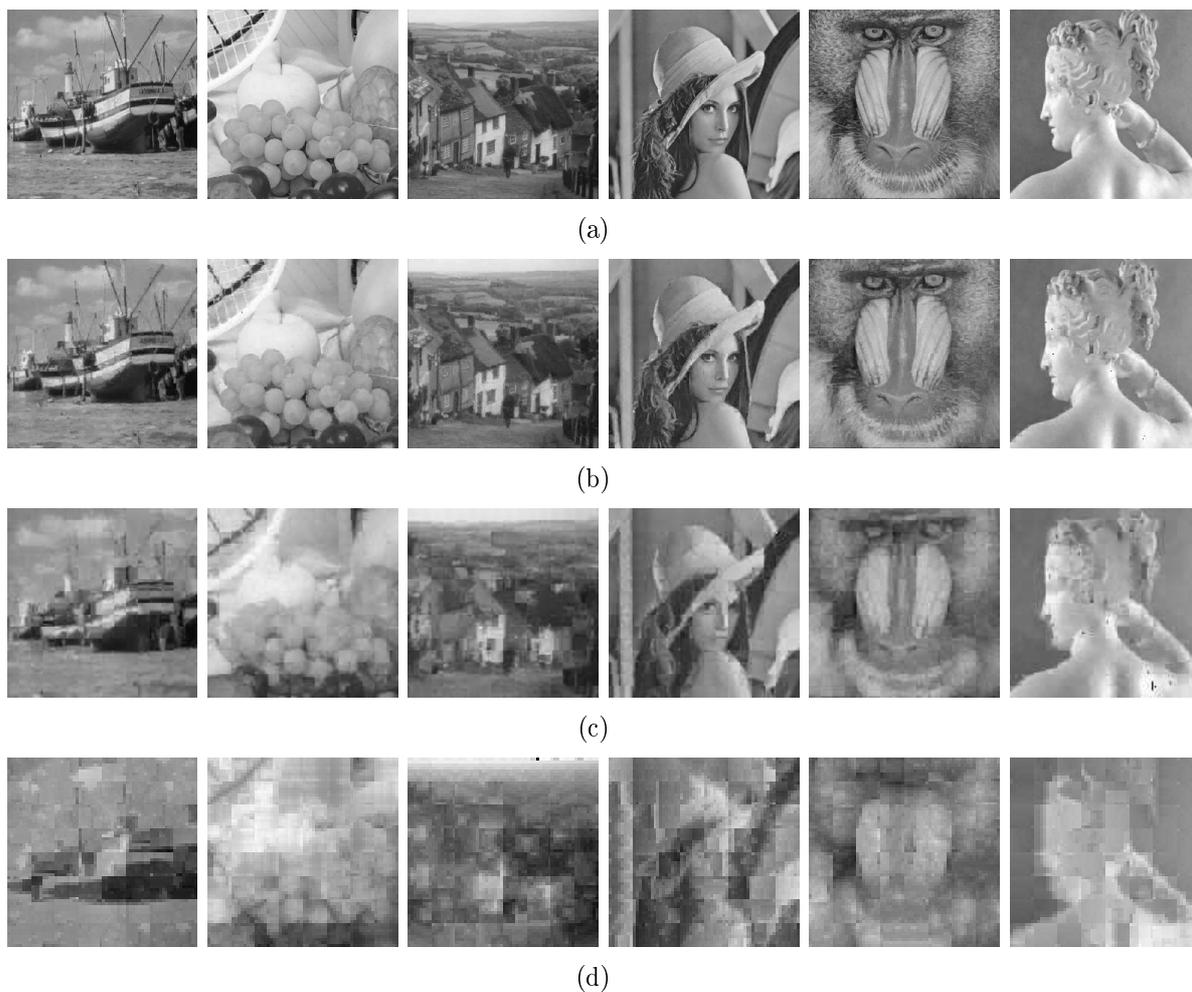


Figura 4.14: Imagens comprimidas com a busca exaustiva e tamanho de bloco de domínio com  $8 \times 8$  pixels e medida de distância da média. Os respectivos valores dos resultados das imagens estão na mesma sequência da tabela 4.8: (a) imagens com tamanho de bloco  $512 \times 512$  pixels; (b) imagens com tamanho de bloco  $256 \times 256$  pixels; (c) imagens com tamanho de bloco  $128 \times 128$  pixels; (d) imagens com tamanho de bloco  $64 \times 64$  pixels.

### 4.1.3 Blocos de Domínio com 16 × 16 pixels

A tabela 4.16 apresenta os resultados obtidos pelo método de busca exaustiva utilizando-se blocos de domínio de tamanho 16 × 16 pixels.

#### Tempo de Compressão

O tempo de compressão apresentado nas medidas usando tamanho de bloco de domínio com 16 × 16 pixels apresenta uma diferença significativa entre a medida mais rápida e as demais. Conforme a tabela 4.17, a média aritmética da entropia é de 390,7246, sendo a mais rápida na compressão.

A segunda medida mais rápida, a média, tem uma média aritmética de 570,76 sendo mais próxima das medidas que obtêm os piores tempos.

Os resultados da análise descritiva são ilustrados no gráfico da figura 4.15, o qual apresenta a entropia como a medida de menor tempo entre as outras que se mostram mais próximas.

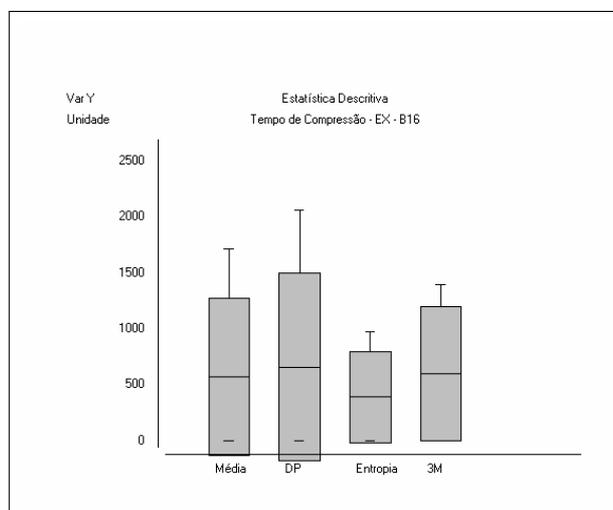


Figura 4.15: Análise Descritiva - Busca Exaustiva - 16 × 16 pixels - Tempo de Compressão

As diferenças podem ser vistas através da análise descritiva, pois não há diferenças estatisticamente significativas a partir da análise de variância. O resultado da medida Kruskal-Wallis é  $p < 0,4085$ , um valor estatístico considerado não significativo, de acordo com a tabela 4.18. Este valor é ilustrado graficamente na figura 4.16, que mostra as colunas com a indicação **ns** (diferença não significativa).

Tabela 4.16: Compressão fractal de imagens com busca exaustiva - bloco de domínio  $com16 \times 16$  pixels.

Domínio	$16 \times 16$ Imagem	Algoritmo: Busca Exaustiva Original															
		Medida: Média				Medida: Desvio Padrão				Medida: Entropia				Medida: 3 Medidas Somadas			
		Tempo(s)	Taxa	RMSE	PSNR	Tempo(s)	Taxa	RMSE	PSNR	Tempo(s)	Taxa	RMSE	PSNR	Tempo(s)	Taxa	RMSE	PSNR
Boat	512x512	1685,63	31,984	14,061	25,171	2015,91	31,984	15,976	24,062	615,76	31,984	137,555	5,361	1394,05	31,984	16,189	23,946
Fruits	512x512	1683,72	31,984	12,443	26,232	2022,83	31,984	14,861	24,690	540,89	31,984	171,974	3,422	1400,03	31,984	16,941	23,552
Goldhill	512x512	1711,19	31,984	11,011	27,294	2063,47	31,984	12,360	26,291	515,54	31,984	122,268	6,385	1328,97	31,984	12,657	26,084
Lenna	512x512	1716,14	31,984	12,278	26,348	2023,92	31,984	14,000	25,208	522,52	31,984	132,449	5,690	1313,81	31,984	15,331	24,419
Mandrill	512x512	1679,19	31,984	18,630	22,727	2029,87	31,984	19,928	22,142	535,29	31,984	135,309	5,504	1315,31	31,984	21,001	21,686
Paolina	512x512	1675,89	31,984	8,304	29,745	2025,15	31,984	12,244	26,373	527,85	31,984	160,376	4,028	1303,87	31,984	22,525	21,078
Boat	256x256	562,43	31,937	20,274	21,992	582,54	31,937	22,729	20,999	972,59	31,937	137,555	5,361	1016,01	31,937	22,856	20,951
Fruits	256x256	564,63	31,937	17,881	23,083	583,63	31,937	20,364	21,954	971,31	31,937	171,973	3,422	1016,74	31,937	25,764	19,911
Goldhill	256x256	564,76	31,937	16,363	23,853	582,76	31,937	19,209	22,461	973,32	31,937	122,268	6,385	1018,57	31,937	20,588	21,859
Lenna	256x256	562,68	31,937	18,043	23,005	583,59	31,937	20,818	21,762	972,33	31,937	132,449	5,690	1016,35	31,937	21,755	21,380
Mandrill	256x256	564,50	31,937	22,130	21,231	583,44	31,937	23,511	20,706	972,71	31,937	135,309	5,504	1019,12	31,937	24,281	20,425
Paolina	256x256	563,49	31,937	16,509	23,777	581,69	31,937	17,960	23,240	973,66	31,937	160,375	4,028	1016,53	31,937	26,330	19,722
Boat	128x128	26,56	31,751	24,547	20,331	27,39	31,751	26,610	19,630	45,95	31,751	137,174	5,385	47,79	31,751	28,554	19,017
Fruits	128x128	26,56	31,751	21,867	21,335	27,32	31,751	26,295	19,733	45,96	31,751	171,824	3,429	47,81	31,751	31,361	18,203
Goldhill	128x128	26,57	31,751	22,842	20,956	27,34	31,751	25,377	20,042	45,73	31,751	122,061	6,399	48,02	31,751	25,471	20,010
Lenna	128x128	26,44	31,751	26,650	19,617	27,32	31,751	28,813	18,939	45,95	31,751	132,142	5,710	47,93	31,751	30,195	18,532
Mandrill	128x128	26,48	31,751	21,559	21,458	27,36	31,751	23,171	20,832	45,73	31,751	134,500	5,556	47,91	31,751	22,431	21,114
Paolina	128x128	26,56	31,751	19,740	22,224	27,54	31,751	23,344	20,767	45,89	31,751	160,365	4,029	47,82	31,751	30,297	18,503
Boat	64x64	0,84	31,030	30,072	18,567	0,82	31,030	32,821	17,808	1,41	31,030	136,621	5,420	1,45	31,030	42,531	15,557
Fruits	64x64	0,80	31,030	28,670	18,982	0,82	31,030	34,422	17,394	1,41	31,030	171,563	3,442	1,46	31,030	35,110	17,222
Goldhill	64x64	0,79	31,030	25,331	20,058	0,82	31,030	31,749	18,096	1,43	31,030	121,702	6,425	1,48	31,030	30,114	18,556
Lenna	64x64	0,79	31,030	35,040	17,239	0,82	31,030	40,073	16,074	1,37	31,030	131,646	5,743	1,45	31,030	48,143	14,480
Mandrill	64x64	0,80	31,030	23,416	20,740	0,82	31,030	27,205	19,438	1,38	31,030	134,008	5,588	1,48	31,030	29,653	18,690
Paolina	64x64	0,80	31,030	28,489	19,037	0,82	31,030	29,676	18,683	1,41	31,030	160,192	4,038	1,44	31,030	70,160	11,209

Tabela 4.17: Análise descritiva - busca exaustiva - bloco de domínio com  $16 \times 16$  pixels - tempo de compressão.

<b>Tempo de Compressão - EX - B16</b>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Entropia</i>	<i>3M</i>
Tamanho da amostra =	24	24	24	24
Mínimo	0,79	0,82	1,37	1,44
Máximo	1716,14	2063,47	973,66	1400,03
Mediana	294,5	304,615	280,75	532,015
Média Aritmética	570,76	660,3329	390,7246	602,3083

Tabela 4.18: Análise de variância - busca exaustiva - bloco de domínio com  $16 \times 16$  pixels - tempo de compressão.

<b>Tempo de Compressão - EX - B16</b>	<i>Resultados</i>
H =	2,8928
Graus de liberdade =	3
(p) Kruskal-Wallis =	0,4085

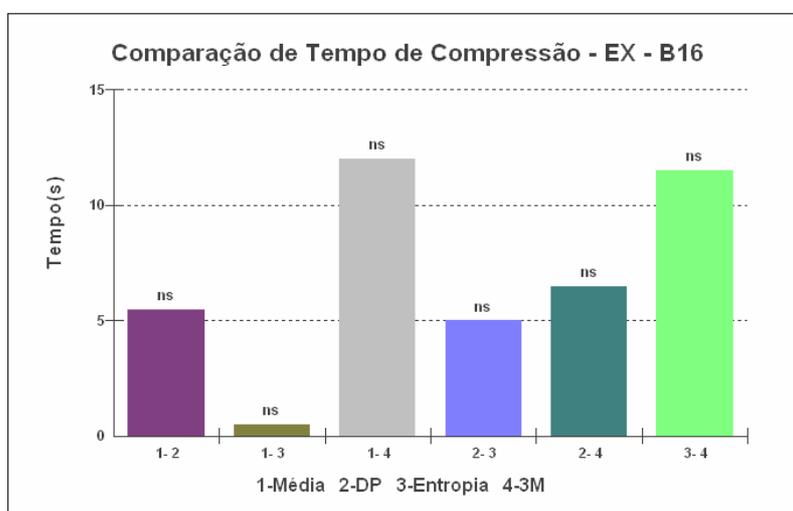


Figura 4.16: Análise de variância - busca exaustiva - bloco de domínio com  $16 \times 16$  pixels - tempo de compressão.

Portanto, com blocos de tamanho  $16 \times 16$  pixels, o melhor tempo de compressão foi obtido pela medida entropia, seguida da média, as três medidas combinadas e o desvio padrão.

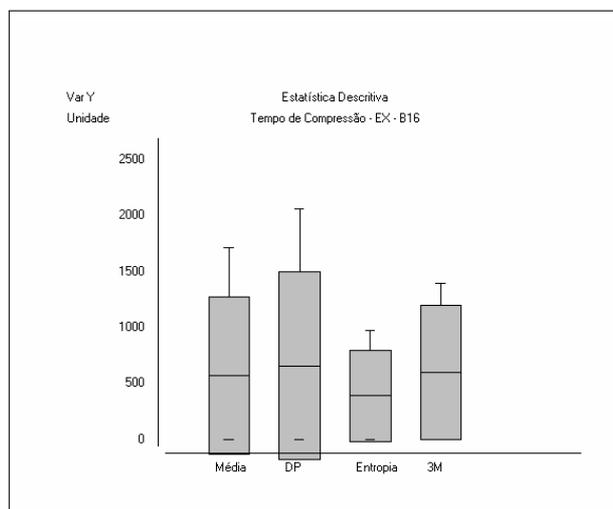
## Taxa de Compressão

A taxa de compressão, como pode ser vista na tabela 4.16, é idêntica em todas as medidas testadas no algoritmo.

Com o auxílio da análise descritiva mostrada na tabela 4.19 e sua ilustração gráfica na figura 4.17, observa-se que, quando aplicadas medidas diferentes no algoritmo, a taxa de compressão não é modificada.

Tabela 4.19: Análise Descritiva - Busca Exaustiva - Domínio  $16 \times 16$  pixels - Taxa de Compressão

<b>Taxa de Compressão - EX - B16</b>	<i>Média</i>	<i>Devio Padrão</i>	<i>Entropia</i>	<i>3M</i>
Tamanho da amostra =	24	24	24	24
Mínimo	31,03	31,03	31,03	31,03
Máximo	31,984	31,984	31,984	31,984
Mediana	31,844	31,844	31,844	31,844
Média Aritmética	31,6755	31,676	31,676	31,676

Figura 4.17: Análise Descritiva - Busca Exaustiva -  $16 \times 16$  pixels - Taxa de Compressão

## RMSE

Conforme a tabela 4.16, os valores da medida RMSE são ruins na maioria das medidas, com valor bastante alto para a entropia. Com base nos testes realizados, um valor adequado para RMSE situa-se abaixo de 10. Na tabela de análise descritiva 4.20, o menor valor na média aritmética é 20,6729 referente à média.

Tabela 4.20: Análise Descritiva - Busca Exaustiva - Domínio  $16 \times 16$  pixels - PSNR

<b>RMSE - EX - B16</b>	<i>Média</i>	<i>Devio Padrão</i>	<i>Entropia</i>	<i>3M</i>
Tamanho da amostra =	24	24	24	24
Mínimo	8,304	12,244	121,702	12,657
Máximo	35,04	40,073	171,974	70,16
Mediana	20,9165	23,258	135,965	25,6175
Média Aritmética	20,6729	23,463	143,0691	27,9266

Na análise de variância da tabela 4.21, que compara as medidas umas com as outras, nota-se que a entropia é aquela que produz a maior diferença comparadas com as demais.

A tabela de análise de variância apresenta diferença em todas as comparações que envolve o grupo 3 (entropia). Portanto, entre todas as medidas de qualidade, a entropia é a que gerou piores resultados, enquanto as outras medidas mesmo não produzindo bons

Tabela 4.21: Análise de Variância - Busca Exaustiva - Domínio  $16 \times 16$  pixels - PSNR: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas

<b>RMSE - EX - B16</b>	<i>Resultados</i>	- 2 -
H =	56,9825	
Graus de liberdade =	3	
(p) Kruskal-Wallis =	0	
R 1 (posto médio) =	28,9167	
R 2 (posto médio) =	36,5417	
R 3 (posto médio) =	84,5	
R 4 (posto médio) =	44,0417	
Comparações Student-Newman-Keuls	Dif. Postos	p-valor
Grupos ( 1 e 2) =	7,625	0,343
Grupos ( 1 e 3) =	55,5833	< 0,0001
Grupos ( 1 e 4) =	15,125	0,06
Grupos ( 2 e 3) =	47,9583	< 0,0001
Grupos ( 2 e 4) =	7,5	0,351
Grupos ( 3 e 4) =	40,4583	< 0,0001

resultados foram semelhantes.

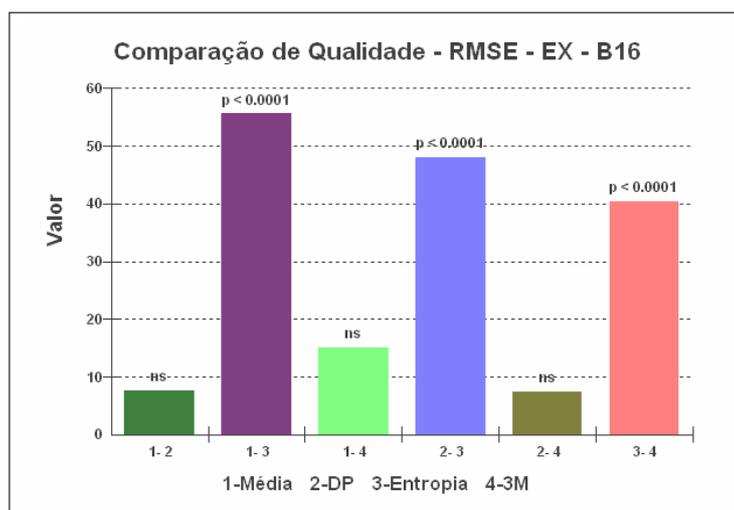


Figura 4.18: Análise de Variância - busca exaustiva -  $16 \times 16$  pixels - RMSE.

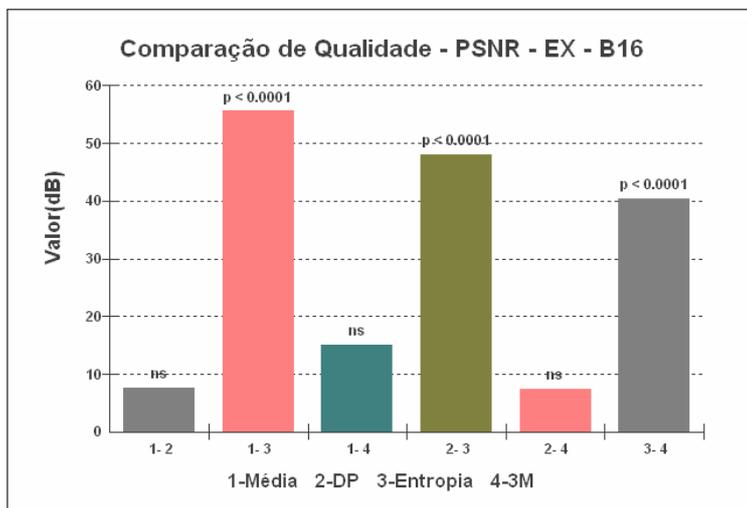
A figura 4.18 ilustra a diferença entre a entropia e todas as outras medidas. Entre as outras medidas, exceto a entropia, não há diferenças estatísticas significativas.

## PSNR

A tabela de análise descritiva 4.22 da medida PSNR apresenta o mesmo comportamento da análise descritiva da medida RMSE 4.20. A entropia se destaca como o pior valor de qualidade.

Tabela 4.22: Análise descritiva - busca exaustiva - bloco de domínio com  $16 \times 16$  pixels - PSNR.

<b>PSNR - EX - B16</b>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Entropia</i>	<i>3M</i>
Tamanho da amostra =	24	24	24	24
Mínimo	17,239	16,074	3,422	11,209
Máximo	29,745	26,373	6,425	26,084
Mediana	21,725	20,8	5,462	19,961
Média Aritmética	22,2918	21,139	5,081	19,838

Figura 4.19: Análise de variância - busca exaustiva - bloco de domínio com  $16 \times 16$  pixels - RMSE.

A figura 4.19 apresenta graficamente essa diferença da entropia com as outras medidas, enquanto que, entre as outras medidas, não há diferenças significativas, ou seja, possuem resultados semelhantes de qualidade.

## Resultado visual das imagens comprimidas

As imagens comprimidas, ilustradas na figura 4.20, são os resultados visuais do processo de compressão fractal do algoritmo de busca exaustiva com tamanho de bloco  $16 \times 16$  pixels e medida de distância da média. A sequência das imagens é a mesma apresentada na tabela 4.16.

Os resultados obtidos com tamanho de bloco  $16 \times 16$  pixels não mostram qualidade visual e tempo de compressão satisfatórios para as imagens menores, somente para imagem de  $512 \times 512$  pixels. Observa-se que com o aumento do tamanho do bloco de domínio as imagens tendem a perder qualidade, mas diminuem o tempo de processamento para todos os tipos de imagem.

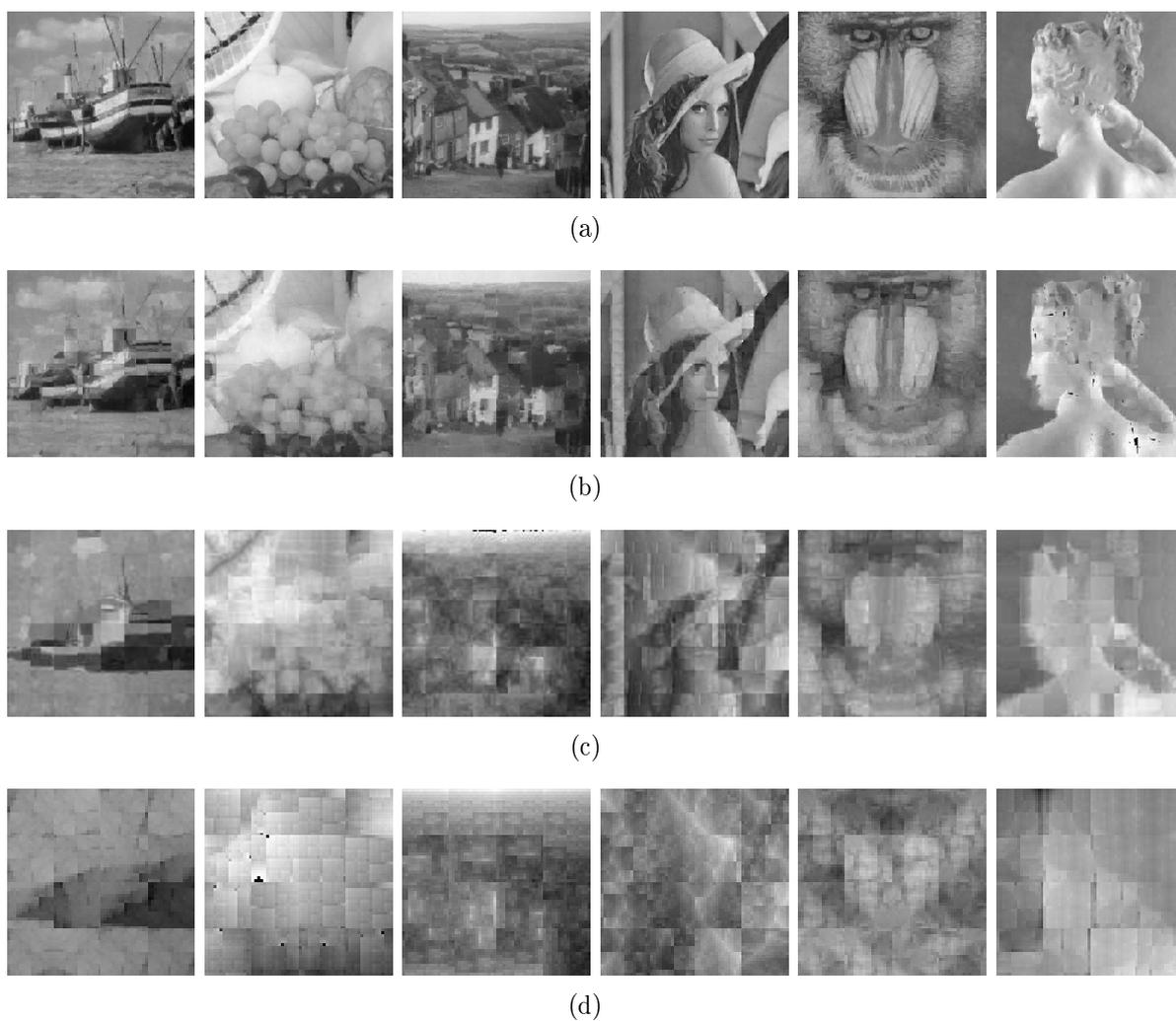


Figura 4.20: Imagens comprimidas com a Busca Exaustiva e tamanho de bloco  $16 \times 16$  pixels e medida de distância da média. Os respectivos valores dos resultados das imagens estão na mesma sequência da tabela 4.16: (a) Imagens com tamanho de bloco  $512 \times 512$  pixels; (b) Imagens com tamanho de bloco  $256 \times 256$  pixels; (c) Imagens com tamanho de bloco  $128 \times 128$  pixels; (d) Imagens com tamanho de bloco  $64 \times 64$  pixels.

#### 4.1.4 Blocos de Domínio com $32 \times 32$ pixels

A tabela 4.23 apresenta os resultados obtidos pelo método de busca exaustiva utilizando-se blocos de domínio de tamanho  $32 \times 32$  pixels.

#### Tempo de Compressão

A tabela 4.23 apresenta os dados correspondentes às execuções com tamanho de bloco  $32 \times 32$  pixels utilizando-se as diferentes medidas.

Os dados apresentados na tabela descritiva mostram, a partir da média aritmética, que a medida da média obteve o melhor tempo de compressão (180,1792) com relação às outras medidas. A diferença da média para as outras medidas cresce de forma praticamente exponencial ao longo dos testes. O gráfico da figura 4.21 ilustra este crescimento.

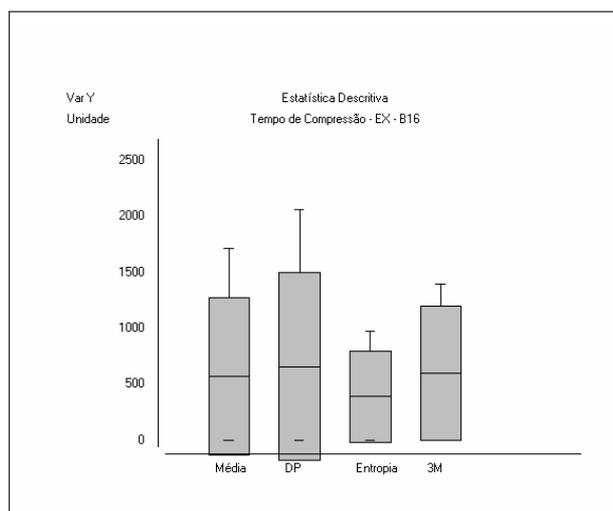


Figura 4.21: Análise descritiva - busca exaustiva - bloco de domínio com  $32 \times 32$  pixels - tempo de compressão.

A tabela de análise de variância 4.25 apresenta as diferenças entre as medidas utilizadas no algoritmo. As comparações entre as medidas apresentam diferenças significativas estatisticamente entre o grupo 1-3 e 1-4, ou seja, a média se difere da entropia e das três medidas combinadas, mas apresenta tempo semelhante ao desvio padrão.

Portanto, conclui-se que a melhor medida de tempo obtida é a partir da média, pela média, seguida do desvio padrão, as três medidas combinadas e a entropia. A média se difere apenas da entropia e das três medidas combinadas, como ilustra o gráfico da



Tabela 4.24: Análise descritiva - busca exaustiva - bloco de domínio com  $32 \times 32$  pixels - tempo de compressão.

<b>Tempo de Compressão - EX - B32</b>	<i>Média</i>	<i>Devio Padrão</i>	<i>Entropia</i>	<i>3M</i>
Tamanho da amostra =	24	24	24	24
Mínimo	0	0	0	0
Máximo	414,02	588,24	31620	16200
Mediana	151,04	218,88	367,2	382,925
Média Aritmética	180,1792	254,6729	5493,8538	4204,1404

Tabela 4.25: Análise de variância - busca exaustiva - bloco de domínio com  $32 \times 32$  pixels - tempo de compressão: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas.

<b>Tempo de Compressão - EX - B32</b>	<i>Resultados</i>	<i>- 2 -</i>
H =	10,4712	
Graus de liberdade =	3	
(p) Kruskal-Wallis =	0,015	
R 1 (posto médio) =	36	
R 2 (posto médio) =	43,5	
R 3 (posto médio) =	55,8542	
R 4 (posto médio) =	58,6458	
Comparações Student-Newman-Keuls	Dif. Postos	p-valor
Grupos ( 1 e 2) =	7,5	0,351
Grupos ( 1 e 3) =	19,8542	0,0136
Grupos ( 1 e 4) =	22,6458	0,0049
Grupos ( 2 e 3) =	12,3542	0,1245
Grupos ( 2 e 4) =	15,1458	0,0596
Grupos ( 3 e 4) =	2,7917	0,7285

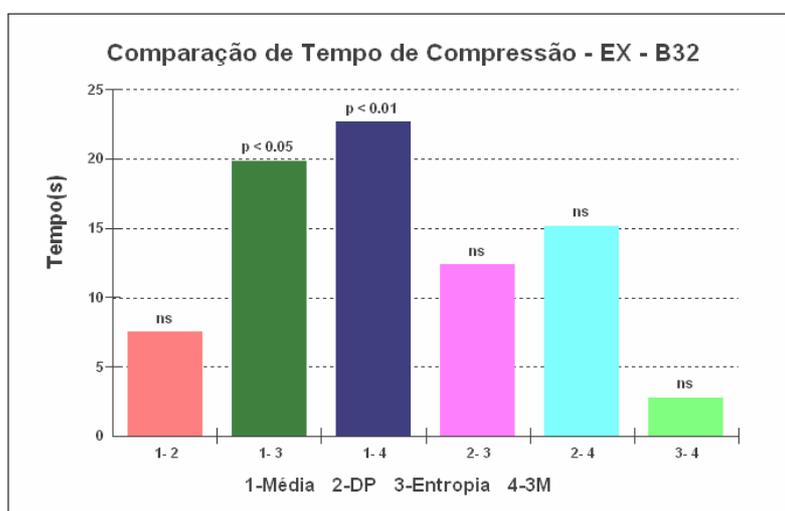


Figura 4.22: Análise de Variância - Busca Exaustiva -  $32 \times 32$  pixels - Tempo de Compressão

figura 4.22. As outras comparações não apresentam diferenças significativas.

## Taxa de Compressão

A taxa de compressão apresentada durante todas as execuções das medidas não apresenta variações, como mostra a tabela 4.26.

Tabela 4.26: Análise descritiva - busca exaustiva - bloco de domínio com  $32 \times 32$  pixels - taxa de compressão.

<b>Taxa de Compressão - EX - B32</b>	<i>Média</i>	<i>Devio Padrão</i>	<i>Entropia</i>	<i>3M</i>
Tamanho da amostra =	24	24	24	24
Mínimo	113,777	113,777	113,777	113,777
Máximo	127,75	127,75	127,75	127,75
Mediana	125,564	125,564	125,564	125,564
Média Aritmética	123,164	123,1638	123,164	123,164

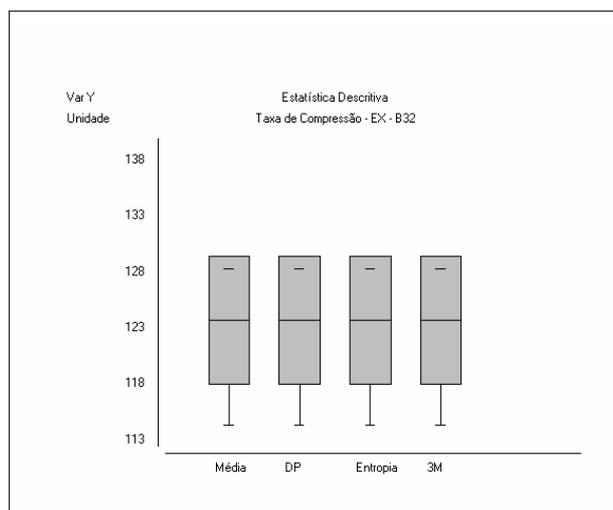


Figura 4.23: Análise descritiva - busca exaustiva - bloco de domínio com  $32 \times 32$  pixels - tempo de compressão.

Os valores indicados em todas as medidas pela média aritmética da tabela são iguais a 123,164. A figura 4.23 ilustra estes valores graficamente. Portanto, pode-se concluir que, para qualquer dessas quatro medidas utilizadas com tamanhos de blocos  $32 \times 32$  pixels, a taxa de compressão não sofrerá variações.

## RMSE

A qualidade das imagens geradas por esse tamanho de bloco sofre variações acentuadas, conforme mostra a tabela 4.27 de análise descritiva.

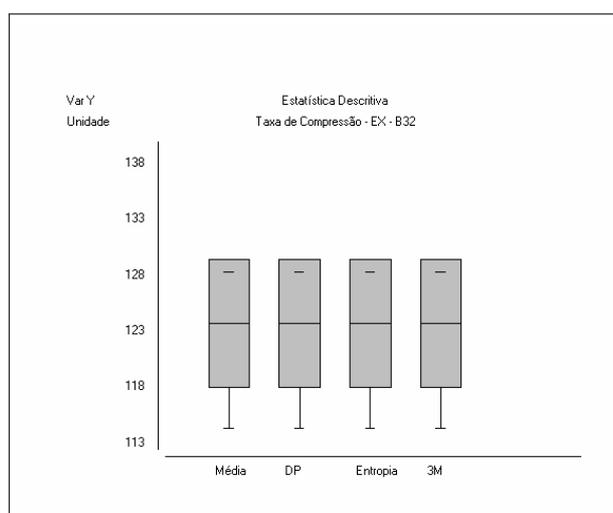
O valor 28,2757 da melhor medida de qualidade, referente à média, possui diferenças significativas em relação às outras medidas. De acordo com o gráfico 4.24 da análise

Tabela 4.27: Análise descritiva - busca exaustiva - bloco de domínio com  $32 \times 32$  pixels - RMSE.

<b>RMSE - EX - B32</b>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Entropia</i>	<i>3M</i>
Tamanho da amostra =	24	24	24	24
Mínimo	13,208	14,249	121,702	14,645
Máximo	43,47	91,677	171,974	99,014
Mediana	27,9	30,0655	135,965	29,57
Média Aritmética	28,2757	41	143,084	42,0107

descritiva é possível perceber essas diferenças de forma mais clara.

A média proporciona o menor tempo, a entropia o pior tempo, enquanto as medidas de entropia e as três medidas combinadas possuem valores semelhantes.

Figura 4.24: Análise descritiva - busca exaustiva - bloco de domínio com  $32 \times 32$  pixels - RMSE.

Quando se utiliza a análise de variância da tabela 4.28 é possível identificar as semelhanças e diferenças entre as medidas utilizadas. A tabela apresenta diferenças significativas nas comparações entre os grupos 1 e 3, 2 e 3, e 3 e 4.

Portanto, com auxílio do gráfico da figura 4.25 é possível concluir que a entropia é a medida que mais apresenta diferenças entre as medidas, sendo a pior em qualidade, enquanto a média é a medida que produz o melhor resultado de qualidade nesse contexto.

## PSNR

O comportamento apresentado pelas execuções na medida RMSE se repete na medida de qualidade PSNR, ou seja, segundo a tabela 4.29 de análise descritiva, a entropia apresenta pior qualidade, enquanto que a média a melhor qualidade.

Tabela 4.28: Análise de variância - busca exaustiva - bloco de domínio com  $32 \times 32$  pixels - RMSE: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas.

<b>RMSE - EX - B32</b>	<i>Resultados</i>	- 2 -
H =	54,1581	
Graus de liberdade =	3	
(p) Kruskal-Wallis =	0	
R 1 (posto médio) =	32,5833	
R 2 (posto médio) =	38,2917	
R 3 (posto médio) =	84,5	
R 4 (posto médio) =	38,625	
Comparações Student-Newman-Keuls	Dif. Postos	p-valor
Grupos ( 1 e 2) =	5,7083	0,4778
Grupos ( 1 e 3) =	51,9167	< 0,0001
Grupos ( 1 e 4) =	6,0417	0,4525
Grupos ( 2 e 3) =	46,2083	< 0,0001
Grupos ( 2 e 4) =	0,3333	0,9669
Grupos ( 3 e 4) =	45,875	< 0,0001

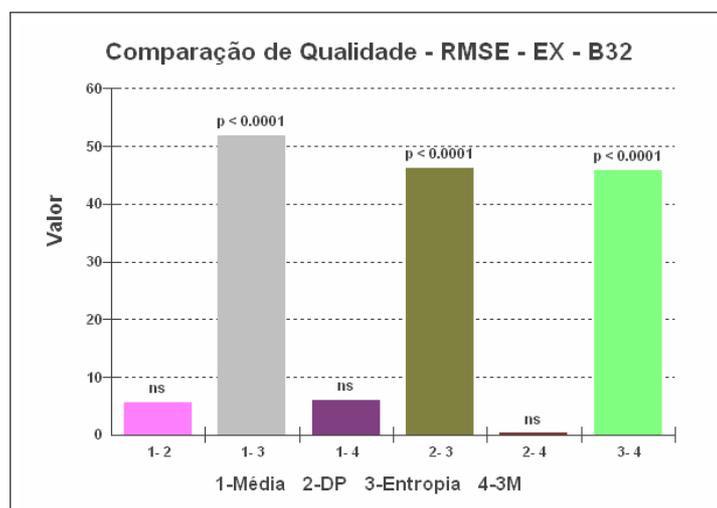


Figura 4.25: Análise de Variância - Busca Exaustiva -  $32 \times 32$  pixels - RMSE

Tabela 4.29: Análise descritiva - busca exaustiva - bloco de domínio com  $32 \times 32$  pixels - PSNR.

<b>PSNR - EX - B32</b>	<i>Média</i>	<i>Devio Padrão</i>	<i>Entropia</i>	<i>3M</i>
Tamanho da amostra =	24	24	24	24
Mínimo	15,367	8,886	3,422	8,217
Máximo	25,714	25,055	6,425	24,817
Mediana	19,219	18,5695	5,462	18,715
Média Aritmética	19,4659	17,3369	5,0393	17,245

A tabela 4.29 apresenta na média aritmética, coluna da entropia, o menor valor (5,0393), o que demonstra a baixa qualidade segundo a medida PSNR. A média proporciona a melhor qualidade. O gráfico da figura 4.26 apresenta os resultados da medida PSNR e permite concluir que a entropia é a pior medida em qualidade.

Com a tabela de análise de variância 4.30 é possível concluir que a única medida que

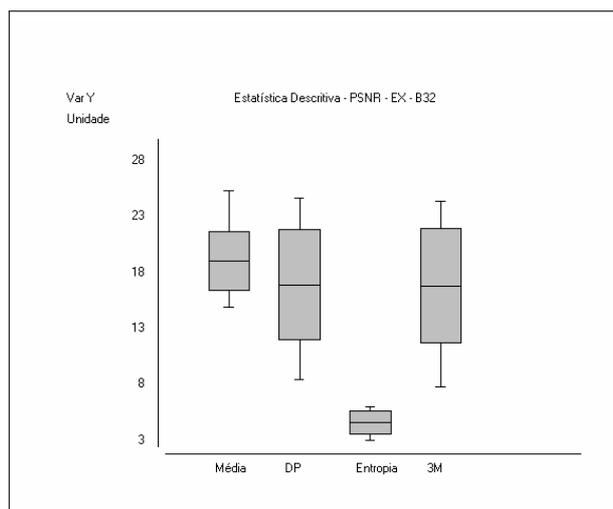


Figura 4.26: Análise descritiva - busca exaustiva - bloco de domínio com  $32 \times 32$  pixels - PSNR.

Tabela 4.30: Análise de variância - busca exaustiva - bloco de domínio com  $32 \times 32$  pixels - PSNR: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas.

<b>PSNR - EX - B32</b>	<i>Resultados</i>	- 2 -
H =	54,1585	
Graus de liberdade =	3	
(p) Kruskal-Wallis =	0	
R 1 (posto médio) =	64,4167	
R 2 (posto médio) =	58,7083	
R 3 (posto médio) =	12,5	
R 4 (posto médio) =	58,375	
Comparações Student-Newman-Keuls	Dif. Postos	p-valor
Grupos ( 1 e 2) =	5,7083	0,4778
Grupos ( 1 e 3) =	51,9167	< 0,0001
Grupos ( 1 e 4) =	6,0417	0,4525
Grupos ( 2 e 3) =	46,2083	< 0,0001
Grupos ( 2 e 4) =	0,3333	0,9669
Grupos ( 3 e 4) =	45,875	< 0,0001

estatisticamente difere de todas as outras é a entropia (grupo 3). A melhor medida em termos de qualidade, segundo a tabela 4.29 de análise descritiva é a média, as outras medidas não apresentam na análise de variância diferenças significativas ( $p < 0,05$ ).

A execução do algoritmo de busca exaustiva com tamanho de bloco  $32 \times 32$  pixels mostra através dos resultados que a média é a melhor medida nesse contexto, tanto em tempo como em qualidade. Porém, a qualidade obtida com esse tamanho de bloco é ruim em comparação com os outros resultados com tamanhos de blocos menores.

## Resultado visual das imagens comprimidas

As imagens comprimidas ilustradas na figura 4.27 são os resultados visuais do processo de compressão fractal do algoritmo de busca exaustiva com tamanho de bloco  $32 \times 32$  pixels e medida de distância baseada na média. A sequência das imagens é a mesma apresentada na tabela 4.23.

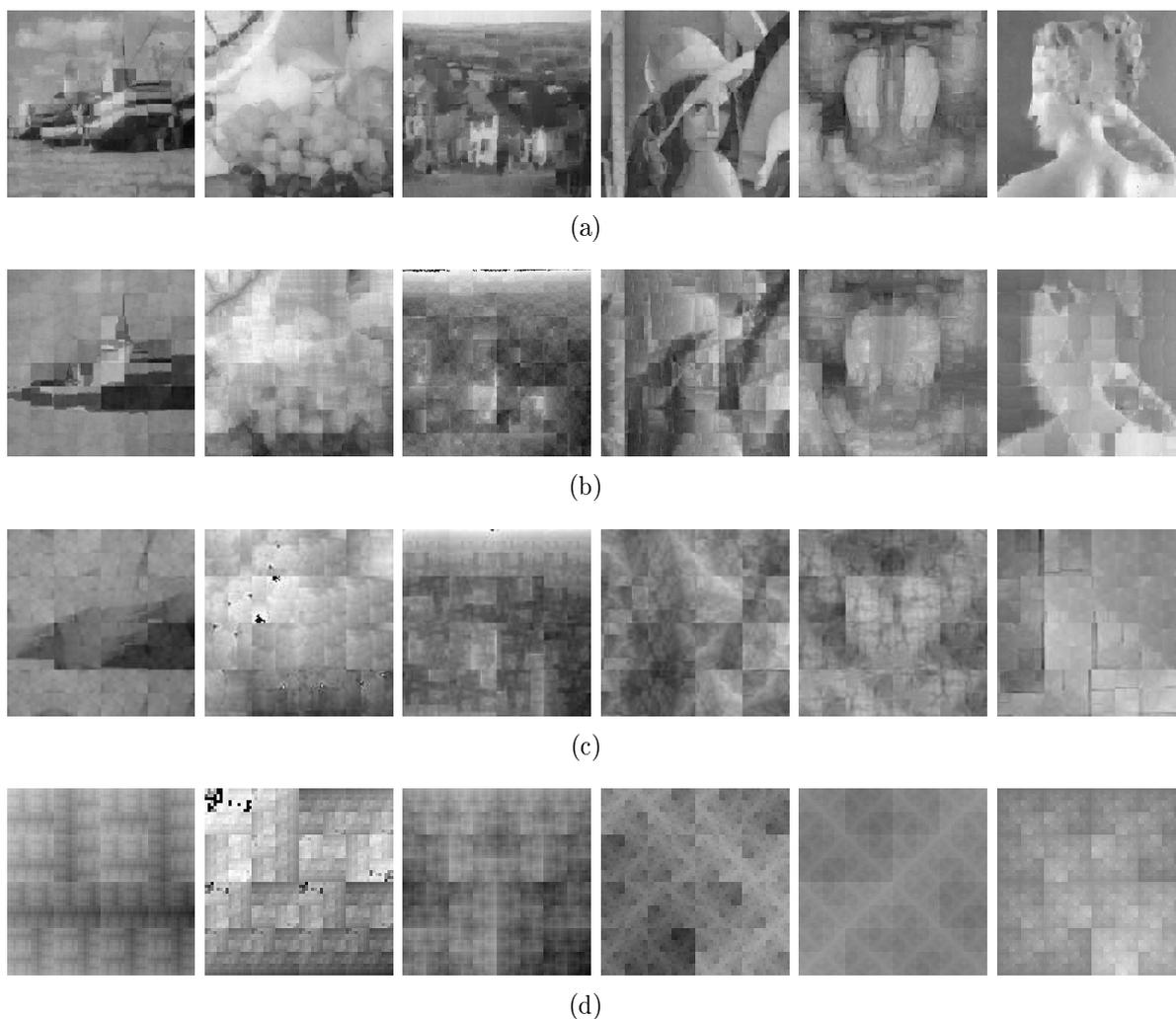


Figura 4.27: Imagens comprimidas com a busca exaustiva e tamanho de bloco  $32 \times 32$  pixels e medida de distância baseada na média. Os respectivos valores dos resultados das imagens estão na mesma sequência da tabela 4.23: (a) imagens com tamanho de bloco  $512 \times 512$  pixels; (b) imagens com tamanho de bloco  $256 \times 256$  pixels; (c) imagens com tamanho de bloco  $128 \times 128$  pixels; (d) imagens com tamanho de bloco  $64 \times 64$  pixels.

## 4.2 Resultados da Compressão Fractal de Imagens com Hash Table

Esta seção apresenta os resultados obtidos pela técnica de compressão fractal de imagens baseada na tabela de dispersão (*hash table*). Os tamanhos dos blocos de domínio utilizados no processo de compressão são, respectivamente,  $4 \times 4$ ,  $8 \times 8$ ,  $16 \times 16$  e  $32 \times 32$  pixels.

### 4.2.1 Blocos de Domínio com $4 \times 4$ pixels

A tabela 4.31 apresenta os resultados obtidos pelo método de compressão fractal baseada em *hash table* utilizando-se blocos de tamanho  $4 \times 4$  pixels.

### Tempo de Compressão

O tempo de compressão, conforme a tabela 4.31, diminui à medida que as dimensões das imagens ficam menores. De acordo com a análise descritiva da tabela 4.32, a medida que obteve o melhor tempo é a média, com o valor 380,1638 de média aritmética.

O gráfico da figura 4.28 ilustra que os valores resultantes do tempo de compressão são semelhantes, mas a entropia se destaca por possuir o pior tempo entre as medidas.

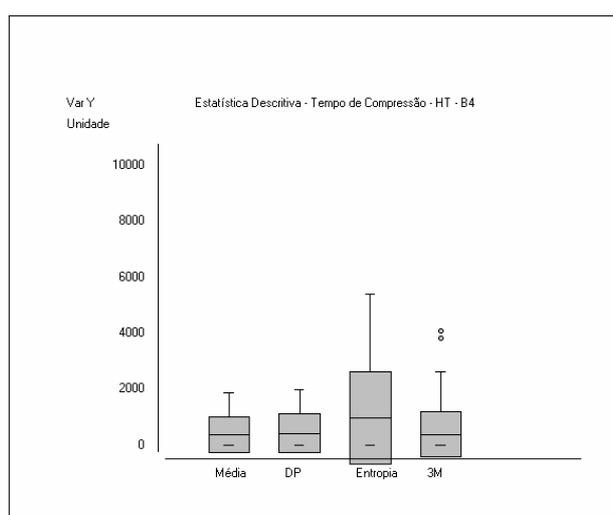


Figura 4.28: Análise de variância - *hash table* - bloco de domínio com  $4 \times 4$  pixels - tempo de compressão.

Estatisticamente, as quatro medidas não possuem diferenças em relação ao tempo, o

Tabela 4.31: Compressão fractal de imagens com *hash table* - bloco de domínio com  $4 \times 4$  pixels.

Domínio	$32 \times 32$ Imagem	Medida: Média			Medida: Desvio Padrão			Medida: Entropia			Medida: 3 Medidas Somadas				
		Tempo(s)	Taxa	RMSE	Tempo(s)	Taxa	RMSE	Tempo(s)	Taxa	RMSE	Tempo(s)	Taxa	RMSE	PSNR	PSNR
Boat	512x512	1823,390	1,999	3,884	36,344	1994,04	11,634	4140	1,999	27,786	19,254	191,23	1,999	139,467	5,241
Fruits	512x512	1285,6	1,999	8,76	29,28	1400,6	8,796	2880	1,999	47,748	14,552	2580	1,999	170,69	3,487
Goldhill	512x512	1789,84	1,999	2,968	38,682	1843,83	16,385	3780	1,999	38,692	16,738	4080	1,999	128,079	5,981
Lenna	512x512	1375,33	1,999	4,205	35,656	1502,94	13,491	3120	1,999	32,119	17,976	3840	1,999	140,257	5,192
Mandrill	512x512	1886,79	1,999	5,978	32,6	1655,96	13,334	5400	1,999	23,88	20,57	1608,19	1,999	138,015	5,332
Paolina	512x512	1077,21	1,999	2,645	39,681	1174,85	11,244	2460	1,999	40,892	15,898	2640	1,999	157,819	4,168
Boat	256x256	115,24	1,999	7,529	30,596	126,07	9,261	260,32	1,999	29,42	18,758	282,01	1,999	133,67	5,61
Fruits	256x256	68,73	1,999	7,163	31,029	74,93	8,993	155,45	1,999	43,098	15,442	168,41	1,999	170,085	3,517
Goldhill	256x256	120,63	1,999	5,518	33,295	131,85	13,766	271,7	1,999	36,494	16,886	294,84	1,999	125,578	6,153
Lenna	256x256	91,44	1,999	6,742	31,555	99,82	7,915	205,79	1,999	22,995	20,898	223,77	1,999	134,575	5,552
Mandrill	256x256	150,01	1,999	11,714	26,757	172,14	11,281	339,78	1,999	17,079	23,481	367,26	1,999	135,267	5,507
Paolina	256x256	58,7	1,999	5,34	33,581	64,13	7,838	132,76	1,999	32,714	17,836	144,11	1,999	159,179	4,093
Boat	128x128	12,32	1,999	9,219	28,837	13,56	13,357	27,67	1,999	14,751	24,754	30,3	1,999	126,653	6,078
Fruits	128x128	8,13	1,999	8,748	29,293	8,9	88,369	18,37	1,999	25,363	20,047	19,88	1,999	168,616	3,593
Goldhill	128x128	13,38	1,999	7,48	30,653	14,6	68,736	30,1	1,999	15,025	24,595	32,72	1,999	126,65	6,079
Lenna	128x128	7,75	1,999	8,378	29,668	8,46	88,975	17,44	1,999	24,44	20,369	18,83	1,999	129,147	5,909
Mandrill	128x128	11,86	1,999	9,903	28,216	12,95	58,324	26,68	1,999	12,61	26,117	28,98	1,999	135,384	5,499
Paolina	128x128	6,71	1,999	7,743	30,353	7,31	126,671	6,077	1,999	15,694	24,216	16,32	1,999	157,803	4,169
Boat	64x64	0,6	1,996	11,98	26,561	0,66	64,367	1,39	1,996	18,688	22,7	1,47	1,996	126,799	6,068
Fruits	64x64	0,48	1,996	11,13	27,201	0,52	111,352	7,197	1,996	31,288	18,223	1,15	1,996	167,974	3,626
Goldhill	64x64	0,72	1,996	10,346	27,836	0,79	65,948	11,747	1,996	28,104	19,155	1,76	1,996	120,091	6,541
Lenna	64x64	0,83	1,996	11,072	27,247	0,91	78,133	10,274	1,996	27,594	19,314	2,04	1,996	122,067	6,399
Mandrill	64x64	0,55	1,996	9,674	28,418	0,6	75,477	10,574	1,996	17,562	23,239	1,32	1,996	133,746	5,605
Paolina	64x64	0,38	1,996	9,667	28,425	0,42	115,074	6,911	1,996	37,485	16,654	0,94	1,996	137,145	5,387

Algoritmo: Aprimoramento da Busca Exaustiva com Hash Table

Tabela 4.32: Análise descritiva - *hash table* - bloco de domínio com  $4 \times 4$  pixels - tempo de compressão.

<b>Tempo de Compressão - HT - B4</b>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Entropia</i>	<i>3M</i>
Tamanho da amostra =	24,000	24,000	24,000	24,000
Mínimo	0,3800	0,4200	0,9100	0,9400
Máximo	1886,7900	1994,0400	5400,0000	4080,0000
Mediana	36,0400	39,3650	81,4300	88,4150
Média Aritmética	380,1638	429,6017	970,3879	690,6471

que pode ser observado pela métrica Kruskal-Wallis ( $p < 0,05$ ) da tabela 4.33 de análise de variância.

Tabela 4.33: Análise de variância - *hash table* - bloco de domínio com  $4 \times 4$  pixels - tempo de compressão: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas.

<b>Tempo de Compressão - HT - B4</b>	<i>Resultados</i>
$H =$	<i>3,8153</i>
Graus de liberdade =	3,000
(p) Kruskal-Wallis =	0,2821

O resultado obtido de 0,2821 é superior a 0,05, o que corresponde a uma diferença não significativa estatisticamente, como ilustrado no gráfico da figura 4.29.

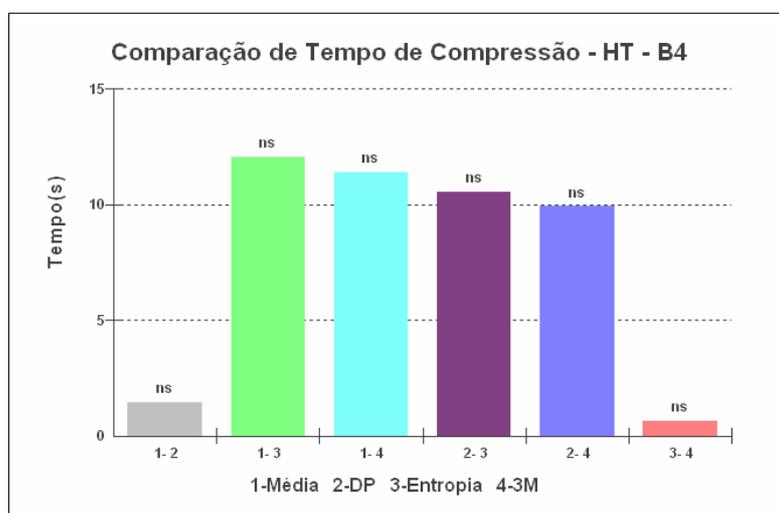


Figura 4.29: Análise de variância - *hash table* - bloco de domínio com  $4 \times 4$  pixels - tempo de compressão.

Assim, segundo o gráfico da figura 4.29, os resultados dos tempos são semelhantes. Entretanto, através da análise descritiva da tabela 4.32, a medida com melhor tempo é a média, seguida do desvio padrão, das três medidas combinadas e da entropia.

## Taxa de Compressão

A taxa de compressão, como pode ser observada na tabela 4.31, não sofre alterações durante as várias execuções que o algoritmo realiza com as imagens.

Quando se utiliza a análise descritiva para verificar o comportamento da taxa de compressão, nota-se que a média aritmética é a mesma para todas as medidas, mostrada na tabela 4.34.

Tabela 4.34: Análise descritiva - *hash table* - bloco de domínio com  $4 \times 4$  pixels - taxa de compressão.

<b>Taxa de Compressão - HT - B4</b>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Entropia</i>	<i>3M</i>
Tamanho da amostra =	24,000	24,000	24,000	24,000
Mínimo	1,9960	1,9960	1,9960	1,9960
Máximo	1,9990	1,9990	1,9990	1,9990
Mediana	1,9990	1,9990	1,9990	1,9990
Média Aritmética	1,9983	1,9983	1,9983	1,9983

Portanto, conclui-se que a taxa de compressão não sofre nenhuma alteração com a modificação da medida de distância, segundo a tabela 4.34.

## RMSE

Conforme a tabela 4.31, a mudança de medida de distância implica, de maneira considerável, na qualidade da imagem resultante.

A análise descritiva na tabela 4.35 mostra os dados com grandes diferenças de qualidade. Na linha da média aritmética é possível verificar claramente que a média obteve melhor qualidade. As três medidas combinadas produziram imagens com menor qualidade.

Tabela 4.35: Análise descritiva - *hash table* - bloco de domínio com  $4 \times 4$  pixels - RMSE.

<b>RMSE - HT - B4</b>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Entropia</i>	<i>3M</i>
Tamanho da amostra =	24,000	24,000	24,000	24,000
Mínimo	2,6450	38,6620	12,6100	120,0910
Máximo	11,9800	126,6710	47,7480	170,6900
Mediana	8,0605	72,6795	27,6900	135,3255
Média Aritmética	7,8244	78,2216	27,5663	141,0315

Para auxiliar nessas conclusões, o gráfico da figura 4.30 ilustra as diferenças entre as medidas, sendo que as mais próximas do eixo  $x$  equivalem às melhores medidas.

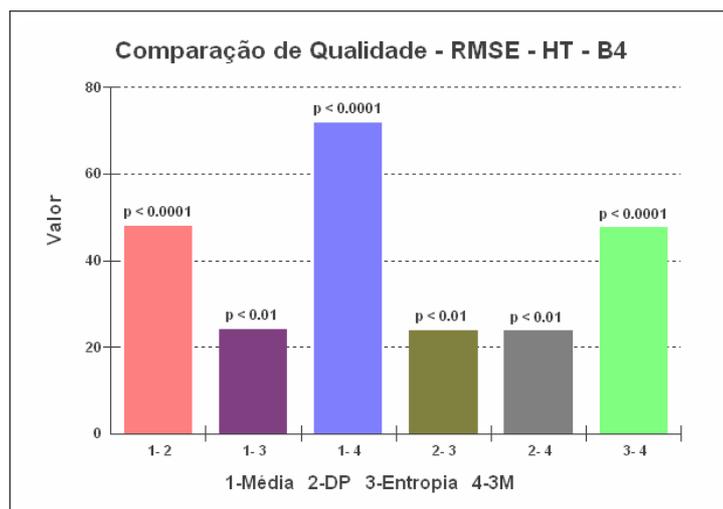


Figura 4.30: Análise descritiva - *hash table* - bloco de domínio com  $4 \times 4$  pixels - RMSE.

A partir do valor de RMSE, pode-se notar a partir da tabela 4.36 que todos os resultados das medidas de distância se diferenciam uns dos outros.

Tabela 4.36: Análise de variância - *hash table* - bloco de domínio com  $4 \times 4$  pixels - RMSE: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas.

RMSE - HT - B4		Resultados	- 2 -
H =		88,5177	
Graus de liberdade =		3	
(p) Kruskal-Wallis =		0	
R 1 (posto médio) =		12,5	
R 2 (posto médio) =		60,5417	
R 3 (posto médio) =		36,6667	
R 4 (posto médio) =		84,2917	
Comparações Student-Newman-Keuls		Dif. Postos	p-valor
Grupos ( 1 e 2) =		48,0417	$< 0,0001$
Grupos ( 1 e 3) =		24,1667	0,0027
Grupos ( 1 e 4) =		71,7917	$< 0,0001$
Grupos ( 2 e 3) =		23,875	0,003
Grupos ( 2 e 4) =		23,75	0,0031
Grupos ( 3 e 4) =		47,625	$< 0,0001$

Com essas diferenças, conclui-se que, quando se altera o tipo de medida de distância utilizada no algoritmo com tamanho de bloco  $4 \times 4$  pixels, a qualidade da imagem é alterada, como mostra o gráfico da figura 4.31.

## PSNR

O comportamento apresentado na medida PSNR é apresentada na tabela 4.37, com as diferenças indicadas na linha da média aritmética.

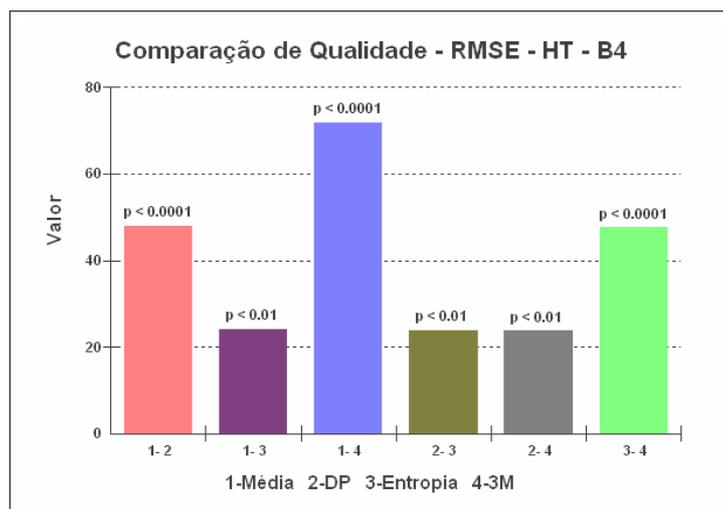


Figura 4.31: Análise de variância - *hash table* - bloco de domínio com  $4 \times 4$  pixels - RMSE.

Tabela 4.37: Análise descritiva - *hash table* - bloco de domínio com  $4 \times 4$  pixels - PSNR.

PSNR - HT - B4	Média	Desvio Padrão	Entropia	3M
Tamanho da amostra =	24,000	24,000	24,000	24,000
Mínimo	26,5610	6,0770	14,5520	3,4870
Máximo	39,6810	16,3850	26,1170	6,5410
Mediana	30,0105	10,9090	19,2840	5,5030
Média Aritmética	30,9068	10,6077	19,9030	5,1994

De acordo com a tabela 4.37, a média apresenta a melhor qualidade com valor 30,9068, seguida da entropia, desvio padrão e as três medidas combinadas, mostrado no gráfico da figura 4.32.

Os resultados dessa compressão com o algoritmo *hash table* apresentam a média como a melhor medida. Aquela que conseguiu unir o melhor tempo e melhor qualidade de imagem, entretanto, quando a imagem possui um tamanho bem pequeno ( $64 \times 64$  pixels) ocorre uma perda de qualidade.

## Resultado visual das imagens comprimidas

As imagens comprimidas ilustradas na figura 4.33 são os resultados visuais do processo de compressão fractal do algoritmo baseado em *hash table* com tamanho de bloco  $4 \times 4$  pixels e medida de distância baseada na média. A sequência das imagens é a mesma apresentada na tabela 4.31.

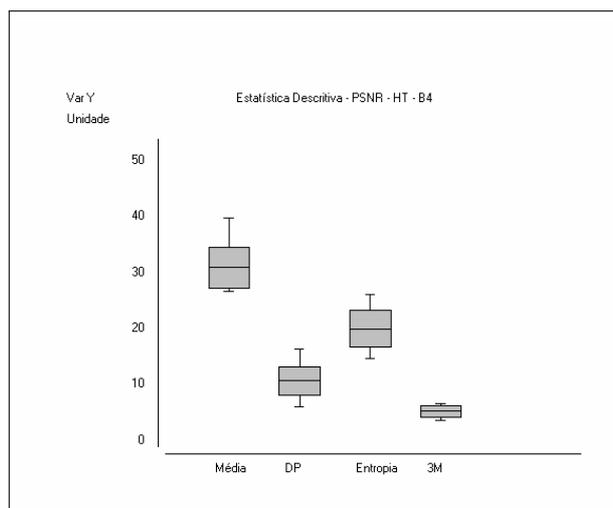


Figura 4.32: Análise descritiva - *hash table* - bloco de domínio com  $4 \times 4$  pixels - PSNR.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.33: Imagens comprimidas com *hash table* e tamanho de bloco  $4 \times 4$  pixels e medida de distância baseada na média. Os respectivos valores dos resultados das imagens estão na mesma sequência da tabela 4.31: (a) imagens com tamanho de bloco  $512 \times 512$  pixels; (b) imagens com tamanho de bloco  $256 \times 256$  pixels; (c) imagens com tamanho de bloco  $128 \times 128$  pixels; (d) imagens com tamanho de bloco  $64 \times 64$  pixels.

## 4.2.2 Blocos de Domínio com 8 x 8 pixels

A tabela 4.38 apresenta os resultados obtidos pelo método de compressão fractal baseada em *hash table* utilizando-se blocos de tamanho  $8 \times 8$  pixels.

### Tempo de Compressão

O tempo de compressão apresentado na tabela 4.38 tem comportamento semelhante entre as quatro medidas. Entretanto, quando os dados são avaliados pela análise descritiva (tabela 4.39), nota-se que as semelhanças podem ser classificadas em dois grupos.

O primeiro grupo é formado por semelhanças entre a média e o desvio padrão e o segundo é formado pela entropia e as três medidas combinadas, conforme gráfico da figura 4.34, ou seja, a média e entropia possuem valores de tempo muito semelhantes, assim como o desvio padrão e as três medidas combinadas.

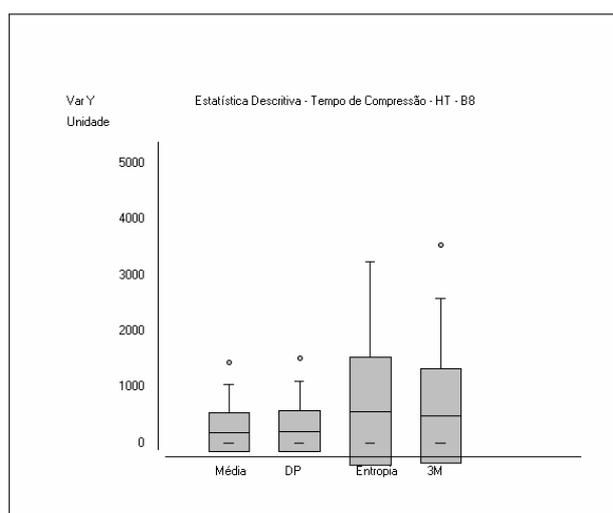


Figura 4.34: Análise descritiva - *hash table* - bloco de domínio com  $8 \times 8$  pixels - tempo de compressão.

Entretanto, quando se avalia a tabela 4.40 de análise de variância, observa-se que estatisticamente não há diferenças entre as medidas. Este resultado pode ser visto graficamente na figura 4.35. Esse resultado ocorre devido ao espalhamento dos tempos entre os diversos tipos de imagens.

Tabela 4.38: Compressão fractal de imagens com *hash table* - bloco de domínio com  $8 \times 8$  pixels.

Domínio $8 \times 8$ Imagem	Medida: Média			Medida: Desvio Padrão			Medida: Entropia			Medida: 3 Medidas Somadas							
	Tempo(s)	Taxa	RMSE	Tempo(s)	Taxa	RMSE	Tempo(s)	Taxa	RMSE	Tempo(s)	Taxa	RMSE	PSNR	PSNR	PSNR		
Boat	512x512	1040,7	7,999	9,012	29,035	1109,42	7,999	70,422	11,177	2400	7,999	19,513	22,324	2580	7,999	48,795	14,363
Fruits	512x512	583,6	7,999	8,141	29,918	620,61	7,999	66,114	11,725	1351,02	7,999	19,657	22,26	1438,77	7,999	165,107	3,775
Goldhill	512x512	1043,33	7,999	6,94	31,304	1111,8	7,999	47,423	14,611	2400	7,999	23,799	20,6	2580	7,999	108,081	7,456
Lenna	512x512	793,27	7,999	8,445	29,599	845,66	7,999	92,197	8,836	1827,90	7,999	15,447	24,354	1963,72	7,999	128,927	5,924
Mandrill	512x512	1434,73	7,999	13,574	25,477	1526,22	7,999	40,433	15,996	3240	7,999	16,184	23,949	3540	7,999	127,909	5,993
Paolina	512x512	531,75	7,999	6,194	32,292	567,95	7,999	87,977	9,243	1236,78	7,999	16,276	23,9	1314,43	7,999	145,612	4,867
Boat	256x256	101,37	7,996	14,132	25,126	108	7,996	28,754	18,957	234,43	7,996	24,355	20,399	249,54	7,996	43,078	15,446
Fruits	256x256	67,96	7,996	12,692	26,06	72,52	7,996	40,366	10,011	157,92	7,996	27,177	19,447	167,21	7,996	161,223	3,982
Goldhill	256x256	94,7	7,996	11,101	27,223	101,03	7,996	17,031	23,506	218,46	7,996	20,253	22,001	232,4	7,996	104,012	7,789
Lenna	256x256	71,83	7,996	12,132	26,452	76,64	7,996	65,431	11,815	167,66	7,996	17,787	23,129	175,85	7,996	122,464	6,371
Mandrill	256x256	95,7	7,996	18,573	22,753	103,68	7,996	23,66	20,65	220,78	7,996	23,239	20,806	235,13	7,996	128,72	5,938
Paolina	256x256	64,86	7,996	8,566	29,475	68,97	7,996	51,625	13,874	149,81	7,996	19,834	22,183	159,17	7,996	145,789	4,856
Boat	128x128	5,68	7,984	17,77	23,137	6,08	7,984	46,712	14,742	13,1	7,984	30,446	18,46	13,93	7,984	95,971	8,488
Fruits	128x128	4,34	7,984	15,448	24,353	4,62	7,984	41,222	15,828	9,96	7,984	22,959	20,912	10,55	7,984	161,395	3,973
Goldhill	128x128	7,24	7,984	14,686	24,792	7,72	7,984	32,956	17,772	16,71	7,984	34,48	17,38	17,79	7,984	90,26	9,021
Lenna	128x128	7,49	7,984	15,684	24,222	7,97	7,984	52,659	13,701	17,3	7,984	29,362	18,775	18,29	7,984	116,575	6,799
Mandrill	128x128	5,25	7,984	15,83	24,141	5,58	7,984	38,136	16,504	11,98	7,984	22,416	21,12	12,72	7,984	115,099	6,909
Paolina	128x128	3	7,984	12,396	26,265	3,21	7,984	89,639	9,107	6,82	7,984	25,697	19,933	7,27	7,984	141,363	5,124
Boat	64x64	0,37	7,937	21,088	21,65	0,39	7,937	34,534	17,366	0,83	7,937	39,942	16,201	0,88	7,937	97,862	8,318
Fruits	64x64	0,28	7,937	19,07	22,524	0,31	7,937	54,76	13,362	0,64	7,937	35,613	19,962	0,67	7,937	146,444	4,817
Goldhill	64x64	0,44	7,937	27,313	19,403	0,46	7,937	35,266	17,184	0,97	7,937	32,765	17,823	1,02	7,937	67,497	11,545
Lenna	64x64	0,58	7,937	24,388	20,887	0,58	7,937	42	15,666	1,23	7,937	33,271	17,689	1,31	7,937	91,063	8,944
Mandrill	64x64	0,35	7,937	17,353	23,343	0,38	7,937	28,132	19,147	0,8	7,937	21,748	21,382	0,84	7,937	111,827	7,16
Paolina	64x64	0,45	7,937	18,351	22,858	0,45	7,937	53,638	13,541	0,96	7,937	33,213	17,705	1,03	7,937	138,124	5,325

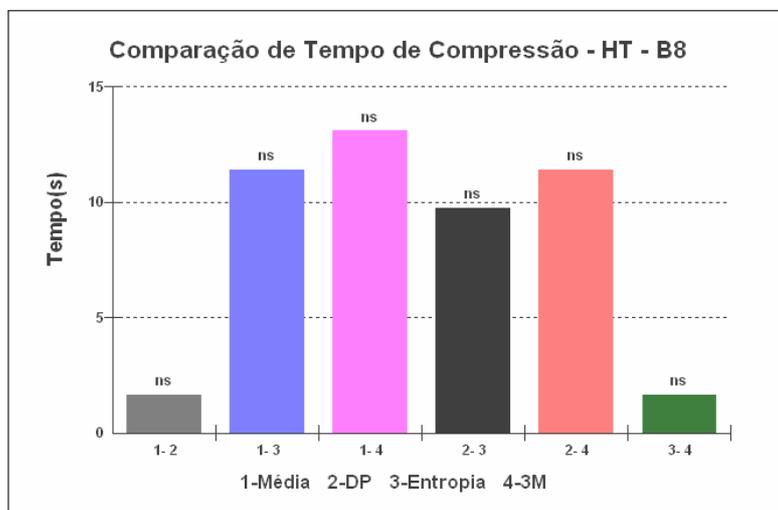
Algoritmo: Aprimoramento da Busca Exaustiva com Hash Table

Tabela 4.39: Análise descritiva - *hash table* - bloco de domínio com  $8 \times 8$  pixels - tempo de compressão.

<b>Tempo de Compressão - HT - B8</b>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Entropia</i>	<i>3M</i>
Tamanho da amostra =	24	24	24	24
Mínimo	0,2800	0,3100	0,6400	0,6700
Máximo	1434,7300	1526,2200	3240,0000	3540,0000
Mediana	36,1750	38,4700	83,5550	88,7300
Média Aritmética	248,3029	264,5938	570,2525	613,4383

Tabela 4.40: Análise de variância - *hash table* - bloco de domínio com  $8 \times 8$  pixels - tempo de compressão.

<b>Tempo de Compressão - HT - B8</b>	<i>Resultados</i>
$H =$	<i>4,1172</i>
Graus de liberdade =	3
(p) Kruskal-Wallis =	0,2491

Figura 4.35: Análise de variância - *hash table* - bloco de domínio com  $8 \times 8$  pixels - tempo de compressão.

## Taxa de Compressão

Segundo a tabela 4.38, a taxa de compressão apresenta o mesmo comportamento em todas as medidas utilizadas no algoritmo.

Tabela 4.41: Análise descritiva - *hash table* - bloco de domínio com  $8 \times 8$  pixels - taxa de compressão.

<b>Taxa de Compressão - HT - B8</b>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Entropia</i>	<i>3M</i>
Tamanho da amostra =	24	24	24	24
Mínimo	7,9370	7,9370	7,9370	7,9370
Máximo	7,9990	7,9990	7,9990	7,9990
Mediana	7,9900	7,9900	7,9900	7,9900
Média Aritmética	7,9790	7,9790	7,9790	7,9790

A tabela 4.41 de análise descritiva mostra no item média aritmética o mesmo valor

para todas as medidas, o que auxilia na conclusão de que não há variações nas execuções do algoritmo.

## RMSE

Os valores da tabela 4.38 mostram que os valores RMSE entre as medidas apresentam muitas variações entre as medidas utilizadas no algoritmo.

Essas variações ficam claras quando avaliadas por meio da análise descritiva na tabela 4.42. Nota-se que os valores possuem diferenças altas entre as medidas. Esses valores podem ser vistos no item média aritmética da tabela.

Tabela 4.42: Análise descritiva - *hash table* - bloco de domínio com  $8 \times 8$  pixels - RMSE.

<b>RMSE - HT - B8</b>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Entropia</i>	<i>3M</i>
Tamanho da amostra =	24	24	24	24
Mínimo	6,1940	17,0310	15,4470	43,0780
Máximo	27,3130	92,1970	39,9420	165,1070
Mediana	14,4090	44,3560	23,5190	119,5195
Média Aritmética	14,5366	49,2120	24,8097	116,7999

A ilustração da análise descritiva é apresentada na figura 4.36, onde se observa claramente que a média obteve a melhor medida de qualidade, seguida da entropia, o desvio padrão e as três medidas combinadas.

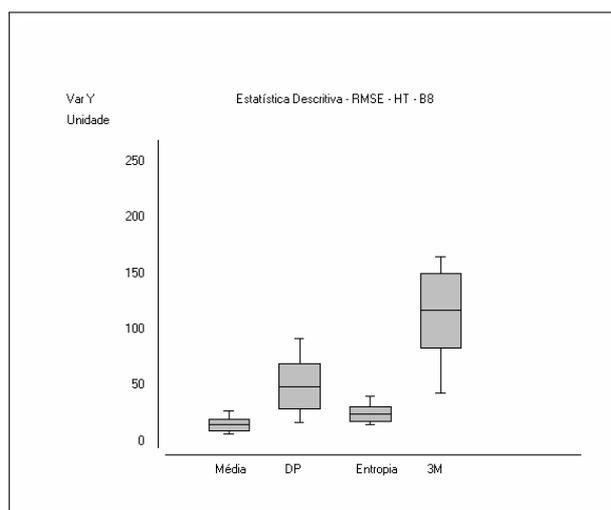


Figura 4.36: Análise descritiva - *hash table* - bloco de domínio com  $8 \times 8$  pixels - RMSE.

Com a análise de variância, verifica-se que há diferença entre as medidas aplicadas no algoritmo (tabela 4.43). De acordo com os valores de probabilidade dos grupos, todos os

resultados de qualidade possuem diferenças significativas quando se compara as medidas.

Tabela 4.43: Análise de variância - *hash table* - bloco de domínio com  $8 \times 8$  pixels - RMSE: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas.

<b>RMSE - HT - B8</b>	<i>Resultados</i>	- 2 -
H =	79,4283	
Graus de liberdade =	3	
(p) Kruskal-Wallis =	0	
R 1 (posto médio) =	15,4167	
R 2 (posto médio) =	59	
R 3 (posto médio) =	36,25	
R 4 (posto médio) =	83,3333	
Comparações Student-Newman-Keuls	Dif. Postos	p-valor
Grupos ( 1 e 2) =	43,5833	< 0,0001
Grupos ( 1 e 3) =	20,8333	0,0096
Grupos ( 1 e 4) =	67,9167	< 0,0001
Grupos ( 2 e 3) =	22,75	0,0047
Grupos ( 2 e 4) =	24,3333	0,0025
Grupos ( 3 e 4) =	47,0833	< 0,0001

Portanto, conclui-se que a qualidade da imagem possui diferenças significativas entre as medidas e, através da tabela 4.42 de análise descritiva, a medida que melhor contribui para a qualidade da imagem é a média, seguida da entropia, do desvio padrão e das três medidas combinadas.

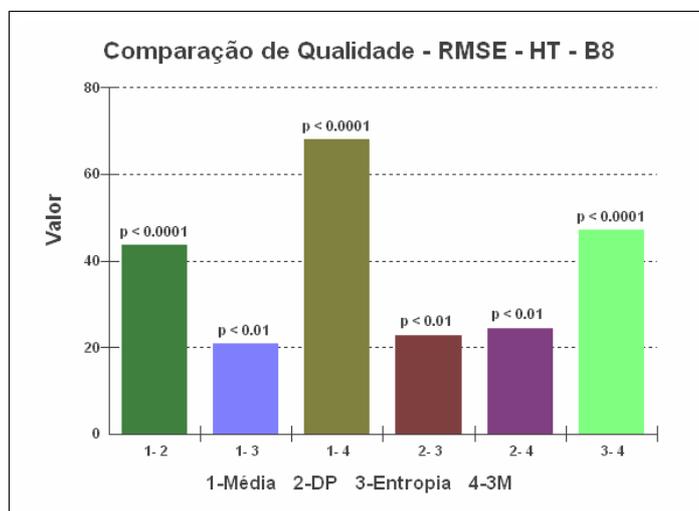


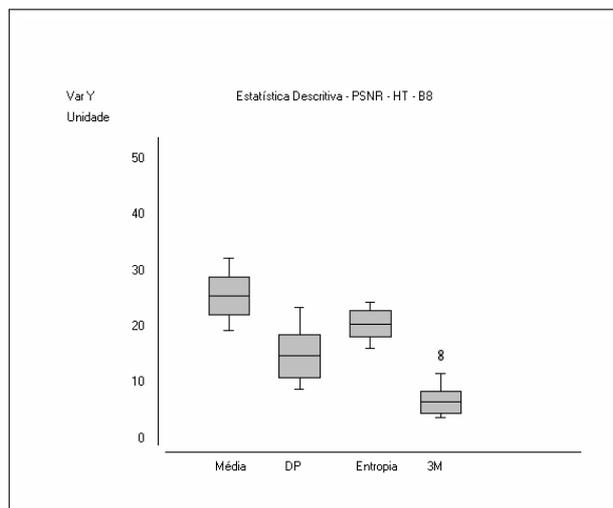
Figura 4.37: Análise de variância - *hash table* - bloco de domínio com  $8 \times 8$  pixels - RMSE.

## PSNR

A análise descritiva do PSNR torna mais evidente as diferenças entre as medidas, como mostra a tabela 4.44 e o gráfico da figura 4.38.

Tabela 4.44: Análise descritiva - *hash table* - bloco de domínio com  $8 \times 8$  pixels - PSNR.

<b>PSNR - HT - B8</b>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Entropia</i>	<i>3M</i>
Tamanho da amostra =	24	24	24	24
Mínimo	19,4030	8,8360	16,2010	3,7750
Máximo	32,2920	23,5060	24,3540	15,4460
Mediana	24,9590	14,6765	20,7030	6,5850
Média Aritmética	25,4912	14,7634	20,5289	7,2160

Figura 4.38: Análise descritiva - *hash table* - bloco de domínio com  $8 \times 8$  pixels - RMSE.

A partir dos dados da tabela 4.44 e gráfico da figura 4.38, conclui-se que a média produz melhor valor de qualidade, seguida da entropia, desvio padrão e as três medidas combinadas.

Com a alteração do tamanho de bloco para  $8 \times 8$  pixels, a medida de distância da média novamente apresenta-se como a medida que obteve melhor tempo e qualidade em relação às outras medidas. Porém, a perda de qualidade é notável quando as imagens diminuem de tamanho.

## Resultado visual das imagens comprimidas

As imagens comprimidas ilustradas na figura 4.39 são os resultados visuais do processo de compressão fractal do algoritmo *hash table* com tamanho de bloco  $8 \times 8$  pixels e medida de distância baseada na média. A sequência das imagens é a mesma apresentada na tabela 4.38.

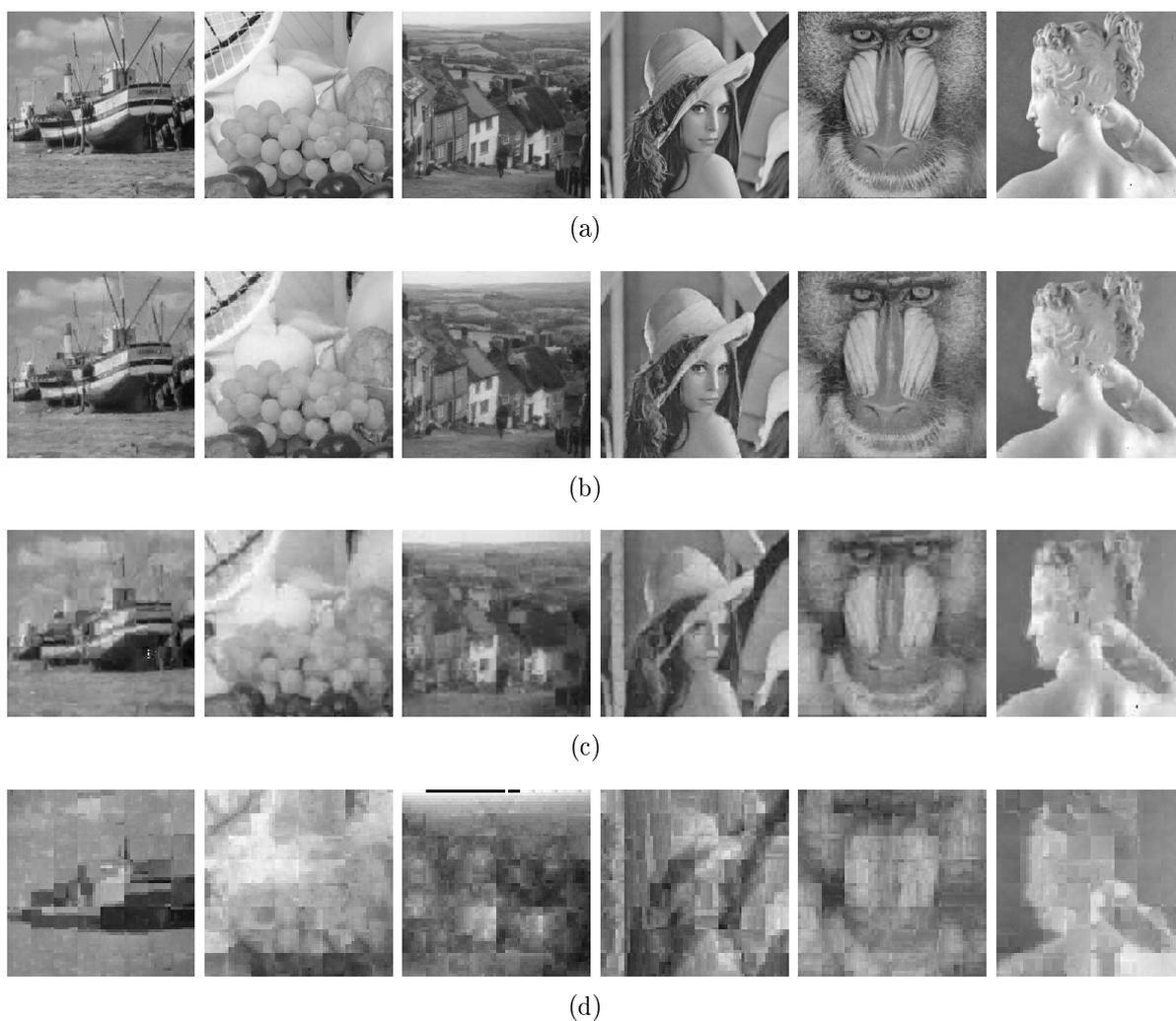


Figura 4.39: Imagens comprimidas com *hash table* e tamanho de bloco  $8 \times 8$  pixels e medida de distância baseada na média. Os respectivos valores dos resultados das imagens estão na mesma sequência da tabela 4.38: (a) imagens com tamanho de bloco  $512 \times 512$  pixels; (b) imagens com tamanho de bloco  $256 \times 256$  pixels; (c) imagens com tamanho de bloco  $128 \times 128$  pixels; (d) imagens com tamanho de bloco  $64 \times 64$  pixels.

### 4.2.3 Blocos de Domínio com 16 × 16 pixels

A tabela 4.45 apresenta os resultados obtidos pelo método de compressão fractal baseada em *hash table* utilizando-se blocos de tamanho 16 × 16 pixels.

#### Tempo de Compressão

Segundo a tabela 4.45, os valores do tempo de compressão diminuem quando as dimensões da imagem diminuem. Embora os tempos pareçam semelhantes, a análise descritiva, apresentada na tabela 4.46, mostra um resultado diferente.

Pode-se observar que as quatro medidas se dividem em dois grupos com valores próximos. O primeiro é formado pela média (205,4425) e desvio padrão (2109,0871), que correspondem aos mais rápidos, enquanto o outro grupo é formado pelas três medidas combinadas (445,5521) e entropia (463,6146), que correspondem aos mais lentos. O gráfico da figura 4.40 ilustra esta divisão dos grupos.

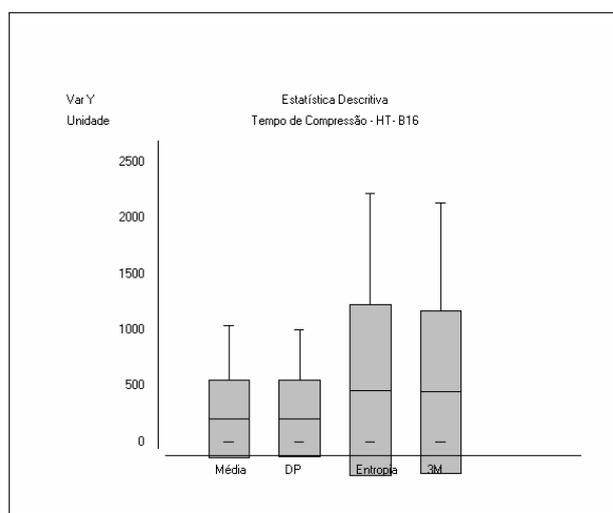


Figura 4.40: Análise descritiva - *hash table* - bloco de domínio com 16 × 16 pixels - tempo de compressão.

A análise descritiva exhibe exatamente como os grupos estão divididos, porém, quando se utiliza a análise de variância, percebe-se que não há diferenças significativas entre as medidas, conforme exibido na tabela 4.47 e no gráfico da figura 4.41.

Portanto, pode-se concluir a partir desses dados que a média obteve melhor tempo, seguido do desvio padrão, as três medidas combinadas e a entropia, entretanto, não há

Tabela 4.45: Compressão fractal de imagens com *hash table* - bloco de domínio com  $16 \times 16$  pixels.

Domínio Imagem	Algoritmo: Aprimoramento da Busca Exaustiva com Hash Table															
	Medida: Média				Medida: Desvio Padrão				Medida: Entropia				Medida: 3 Medidas Somadas			
	Tempo(s)	Taxa	RMSE	PSNR	Tempo(s)	Taxa	RMSE	PSNR	Tempo(s)	Taxa	RMSE	PSNR	Tempo(s)	Taxa	RMSE	PSNR
Boat	512x512	859,37	31,984	14,731	24,766	31,984	25,457	20,015	2025,74	31,984	137,555	5,361	2141,24	31,984	40,482	15,909
Fruits	512x512	617,51	31,984	12,935	25,895	31,984	31,25	18,234	1448,96	31,984	171,974	3,422	1535,9	31,984	67,142	11,591
Goldhill	512x512	823,71	31,984	12,004	26,544	31,984	16,107	23,99	1929,23	31,984	122,268	6,385	2040,47	31,984	20,013	22,104
Lenna	512x512	621,91	31,984	12,732	26,033	31,984	50,543	14,058	1449,5	31,984	132,449	5,69	1539,69	31,984	48,423	14,43
Mandrill	512x512	946,12	31,984	19,13	22,496	31,984	21,62	21,434	2220	31,984	135,309	5,504	1260	31,984	37,476	16,656
Paolina	512x512	524,72	31,984	8,74	29,3	31,984	51,113	13,96	1226,97	31,984	160,376	4,028	1299,8	31,984	76,741	10,43
Boat	256x256	54,39	31,937	21,05	21,666	31,937	48,371	14,439	126,75	31,937	137,555	5,361	134,15	31,937	58,356	12,809
Fruits	256x256	38,71	31,937	18,621	22,731	31,937	48,829	14,357	89,41	31,937	171,973	3,422	94,61	31,937	66,725	11,645
Goldhill	256x256	78,09	31,937	17,007	23,518	31,937	26,415	19,694	182,54	31,937	122,268	6,385	193,55	31,937	32,394	17,921
Lenna	256x256	71,32	31,937	18,58	22,75	31,937	41,014	15,872	166,55	31,937	132,449	5,69	176,54	31,937	55,676	13,217
Mandrill	256x256	52,93	31,937	22,6	21,049	31,937	26,478	19,673	122,43	31,937	135,309	5,504	129,69	31,937	30,69	18,391
Paolina	256x256	34,57	31,937	13,325	25,637	31,937	52,234	13,772	79,81	31,937	160,375	4,028	84,42	31,937	62,921	12,155
Boat	128x128	3,42	31,751	25,188	20,107	31,751	33,828	17,545	7,68	31,751	137,174	5,385	8,11	31,751	31,211	18,245
Fruits	128x128	3,82	31,751	22,741	20,995	31,751	34,004	17,5	8,7	31,751	171,824	3,429	9,8	31,751	31,812	18,079
Goldhill	128x128	4,69	31,751	22,826	20,962	31,751	29,581	18,711	10,62	31,751	122,061	6,399	11,32	31,751	26,706	19,599
Lenna	128x128	4,1	31,751	27,187	19,444	31,751	37,17	16,727	9,3	31,751	132,142	5,71	9,93	31,751	42,18	15,629
Mandrill	128x128	3,24	31,751	21,706	21,399	31,751	24,964	20,184	7,29	31,751	134,5	5,556	7,73	31,751	24,462	20,361
Paolina	128x128	5,72	31,751	20,723	21,802	31,751	37,381	16,678	13,3	31,751	160,365	4,029	14,12	31,751	39,385	16,224
Boat	64x64	0,12	31,03	31,205	18,246	31,03	69,822	11,251	0,23	31,03	136,621	5,42	0,24	31,03	44,264	15,21
Fruits	64x64	0,17	31,03	30,808	18,358	31,03	68,282	11,444	0,36	31,03	171,563	3,442	0,4	31,03	51,435	13,906
Goldhill	64x64	0,15	31,03	27,53	19,335	31,03	64,006	12,006	0,31	31,03	121,702	6,425	0,34	31,03	36,601	16,861
Lenna	64x64	0,16	31,03	34,675	17,331	31,03	50,312	14,097	0,34	31,03	131,646	5,743	0,38	31,03	50,418	14,079
Mandrill	64x64	0,19	31,03	24,498	20,348	31,03	40,51	15,98	0,4	31,03	134,008	5,588	0,44	31,03	35,53	17,119
Paolina	64x64	0,16	31,03	29,447	18,75	31,03	31,84	18,071	0,33	31,03	160,192	4,038	0,38	31,03	75,108	10,617

Tabela 4.46: Análise descritiva - *hash table* - bloco de domínio com  $16 \times 16$  pixels - tempo de compressão.

<b>Tempo de Compressão - HT - B16</b>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Entropia</i>	<i>3M</i>
Tamanho da amostra =	24	24	24	24
Mínimo	0,12	0,12	0,23	0,24
Máximo	1040,7	1005,12	2220	2141,24
Mediana	20,145	21,35	46,555	49,27
Média Aritmética	205,4425	210,0871	463,6146	445,5521

Tabela 4.47: Análise de variância - *hash table* - bloco de domínio com  $16 \times 16$  pixels - tempo de compressão.

<b>Tempo de Compressão - HT - B16</b>	<i>Resultados</i>
H =	4,4835
Graus de liberdade =	3
(p) Kruskal-Wallis =	0,2138

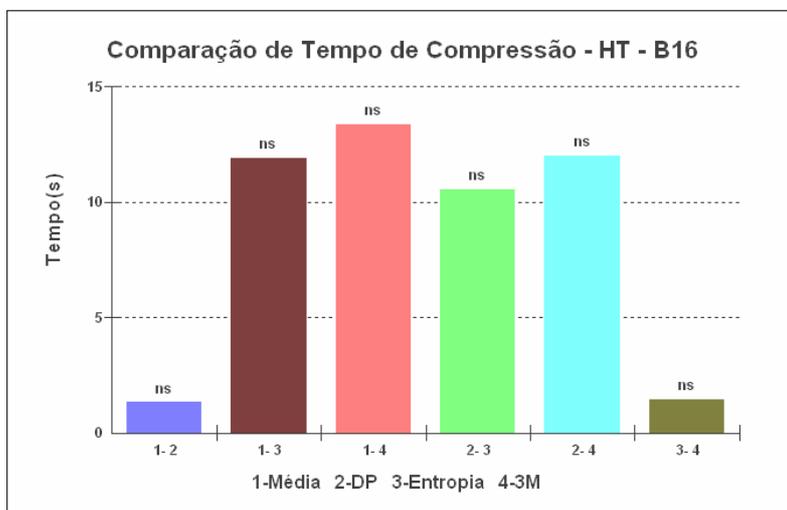


Figura 4.41: Análise de variância - *hash table* - bloco de domínio com  $16 \times 16$  pixels - tempo de compressão.

diferenças significativas entre elas.

## Taxa de Compressão

A taxa de compressão, segundo a tabela 4.45, diminui quando o tamanho das imagens diminui ao se considerar uma única medida. Entretanto, o conjunto de valores é igual iguais para todas as medidas.

Com a análise descritiva é possível identificar na tabela 4.48, no item média aritmética os mesmos valores para cada medida, ou seja, 31,67.

Tabela 4.48: Análise descritiva - *hash table* - bloco de domínio com  $16 \times 16$  pixels - taxa de compressão.

<b>Taxa de Compressão - HT - B16</b>	<i>Média</i>	Desvio Padrão	<i>Entropia</i>	<i>3M</i>
Tamanho da amostra =	24	24	24	24
Mínimo	31,03	31,03	31,03	31,03
Máximo	31,984	31,984	31,984	31,984
Mediana	31,844	31,844	31,844	31,844
Média Aritmética	31,6755	31,676	31,6755	31,6755

## RMSE

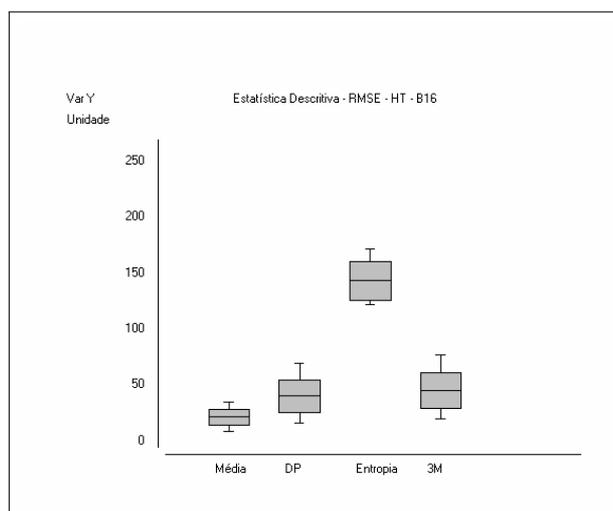
Os valores de RMSE sofrem aumento quando se modifica a medida de distância baseada na média para outras medidas (tabela 4.45), o que caracteriza uma perda de qualidade.

A análise descritiva da tabela 4.49 apresenta este comportamento e mostra que a média possui melhor qualidade em relação às outras medidas. O valor indicado no item média aritmética é igual a 21,2495.

Tabela 4.49: Análise descritiva - *hash table* - bloco de domínio com  $16 \times 16$  pixels - RMSE.

<b>RMSE - HT - B16</b>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Entropia</i>	<i>3M</i>
Tamanho da amostra =	24	24	24	24
Mínimo	8,74	16,107	121,7	20,01
Máximo	34,675	69,822	171,97	76,74
Mediana	21,378	37,2755	135,97	41,33
Média Aritmética	21,2495	40,0473	143,07	45,26

O gráfico da figura 4.42 da análise descritiva mostra claramente a diferença de qualidade entre as medidas, ou seja, a média apresenta valores mais baixos, enquanto a entropia apresenta pior qualidade.

Figura 4.42: Análise descritiva - *hash table* - bloco de domínio  $16 \times 16$  pixels - RMSE.

Com a análise de variância é possível verificar que estatisticamente há diferenças de qualidade entre os tipos de medidas utilizadas no algoritmo, de acordo com a tabela 4.50 e o gráfico da figura 4.43.

Tabela 4.50: Análise de variância - *hash table* - bloco de domínio com  $16 \times 16$  pixels - RMSE: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas.

RMSE - HT - B16		Resultados	- 2 -
H =		72,4697	
Graus de liberdade =		3	
(p) Kruskal-Wallis =		0	
R 1 (posto médio) =		16,5	
R 2 (posto médio) =		43,75	
R 3 (posto médio) =		84,5	
R 4 (posto médio) =		49,25	
Comparações Student-Newman-Keuls		Dif. Postos	p-valor
Grupos ( 1 e 2) =		27,25	0,0007
Grupos ( 1 e 3) =		68	< 0,0001
Grupos ( 1 e 4) =		32,75	< 0,0001
Grupos ( 2 e 3) =		40,75	< 0,0001
Grupos ( 2 e 4) =		5,5	0,494
Grupos ( 3 e 4) =		35,25	< 0,0001

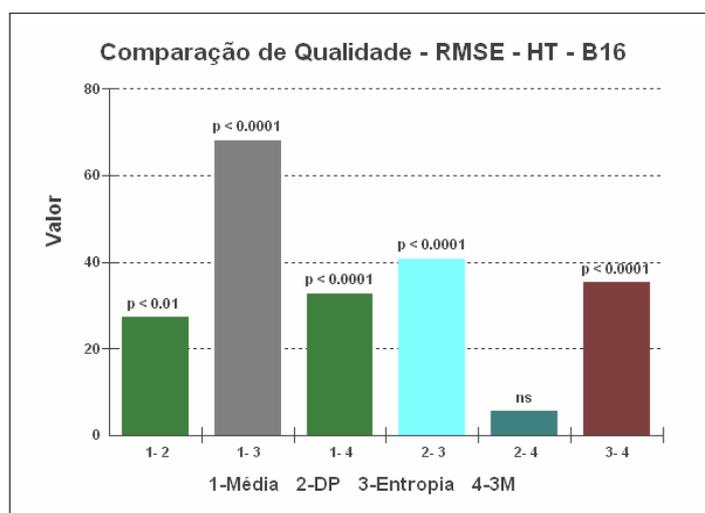


Figura 4.43: Análise de variância - *hash table* - bloco de domínio com  $16 \times 16$  pixels - RMSE.

A tabela de análise de variância não apresenta diferença significativa apenas entre a medida de desvio padrão e as três medidas combinadas, entretanto, há diferenças significativa entre as outras medidas, conforme tabela 4.50.

## PSNR

Os valores da medida de qualidade PSNR apresentados na tabela 4.45 de análise descritiva sofrem variações quando se modifica o tipo de medida de distância no algoritmo, a exemplo do que ocorre com a medida RMSE.

Tabela 4.51: Análise Descritiva - Hash Table - Domínio  $16 \times 16$  pixels - PSNR

<b>PSNR - HT - B16</b>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Entropia</i>	<i>3M</i>
Tamanho da amostra =	24	24	24	24
Mínimo	17,331	11,251	3,422	10,43
Máximo	29,3	23,99	6,425	22,1
Mediana	21,5325	16,7025	5,462	15,77
Média Aritmética	22,0609	16,6538	5,081	15,55

Segundo a tabela 4.51 de análise descritiva, os valores sofrem variações de qualidade. O item média aritmética apresenta essas diferenças e auxilia na conclusão de que a média é a medida que mais contribui para a qualidade da imagem, enquanto a que menos contribui é a entropia. A figura 4.44 apresenta graficamente esses dados.

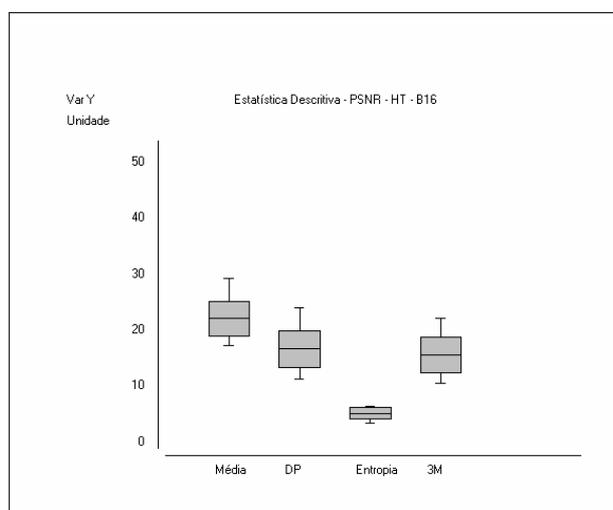


Figura 4.44: Análise descritiva - *hash table* - bloco de domínio com  $16 \times 16$  pixels - PSNR.

Com a análise de variância da tabela 4.52 é possível concluir que há diferenças significativas de qualidade entre as medidas.

A figura referente à análise de variância 4.45 ilustra essas diferenças estatísticas que ocorrem nas medidas, exceto entre o desvio padrão e as três medidas combinadas.

Os resultados com o tamanho de bloco  $16 \times 16$  pixels mostram que a média é a melhor medida de distância para este contexto, pois as melhores taxas de qualidade e tempo

Tabela 4.52: Análise de Variância - Hash Table - Domínio  $16 \times 16$  pixels - PSNR: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas

<b>PSNR - HT - B16</b>		<i>Resultados</i>	- 2 -
H =		72,485	
Graus de liberdade =		3	
(p) Kruskal-Wallis =		0	
R 1 (posto médio) =		80,5	
R 2 (posto médio) =		53,2917	
R 3 (posto médio) =		12,5	
R 4 (posto médio) =		47,7083	
Comparações Student-Newman-Keuls		Dif. Postos	p-valor
Grupos ( 1 e 2) =		27,2083	0,0007
Grupos ( 1 e 3) =		68	< 0,0001
Grupos ( 1 e 4) =		32,7917	< 0,0001
Grupos ( 2 e 3) =		40,7917	< 0,0001
Grupos ( 2 e 4) =		5,5833	0,4875
Grupos ( 3 e 4) =		35,2083	< 0,0001

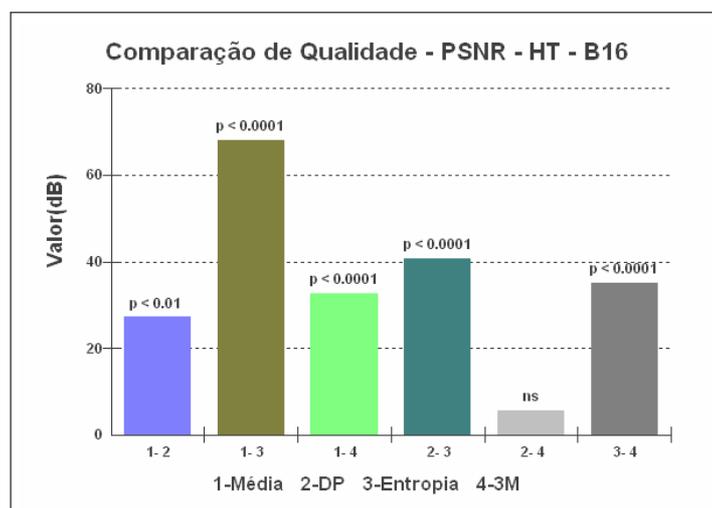


Figura 4.45: Análise de variância - *hash table* - bloco de domínio com  $16 \times 16$  pixels - PSNR.

foram obtidas por esta medida com todos os tipos de imagens. No entanto, quando as imagens diminuem de tamanho, a qualidade visual também diminui, como pode ser visto na figura 4.46.

## Resultado visual das imagens comprimidas

As imagens comprimidas ilustradas na figura 4.46 são os resultados visuais do processo de compressão fractal do algoritmo *hash table* com tamanho de bloco  $16 \times 16$  pixels e medida de distância baseada na média. A sequência das imagens é a mesma apresentada na tabela 4.45.

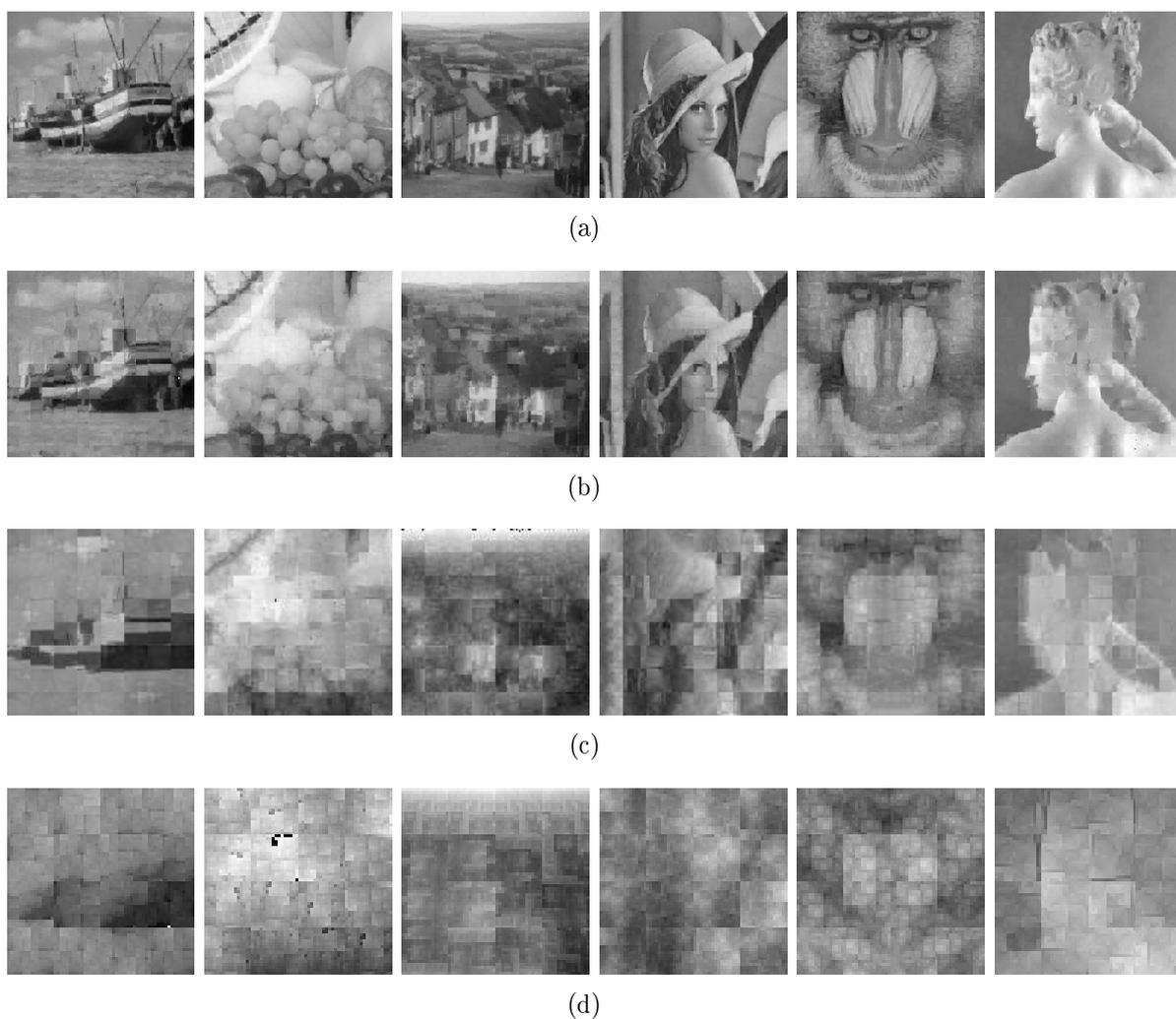


Figura 4.46: Imagens comprimidas com *hash table* e tamanho de bloco  $16 \times 16$  pixels e medida de distância baseada na média. Os respectivos valores dos resultados das imagens estão na mesma sequência da tabela 4.45: (a) imagens com tamanho de bloco  $512 \times 512$  pixels; (b) imagens com tamanho de bloco  $256 \times 256$  pixels; (c) imagens com tamanho de bloco  $128 \times 128$  pixels; (d) imagens com tamanho de bloco  $64 \times 64$  pixels.

#### 4.2.4 Blocos de Domínio com 32 x 32 pixels

A tabela 4.53 apresenta os resultados obtidos pelo método de compressão fractal baseada em *hash table* utilizando-se blocos de tamanho 32 x 32 pixels.

#### Tempo de Compressão

Conforme tabela 4.53, o tempo de compressão diminui à medida que as imagens diminuem de tamanho. Entre as medidas, as variações são semelhantes, mas não é possível identificar no conjunto qual das medidas é mais eficiente.

Com a análise descritiva da tabela 4.54 é possível verificar que essas variações são próximas, mas se diferenciam em dois grupos. O primeiro grupo é formado pela medidas mais rápidas, o desvio padrão (164,405) e a média (175.9313), enquanto o outro grupo é formado pelas medidas mais lentas, constituído pela entropia (361,8471) e as três medidas combinadas (382,4929).

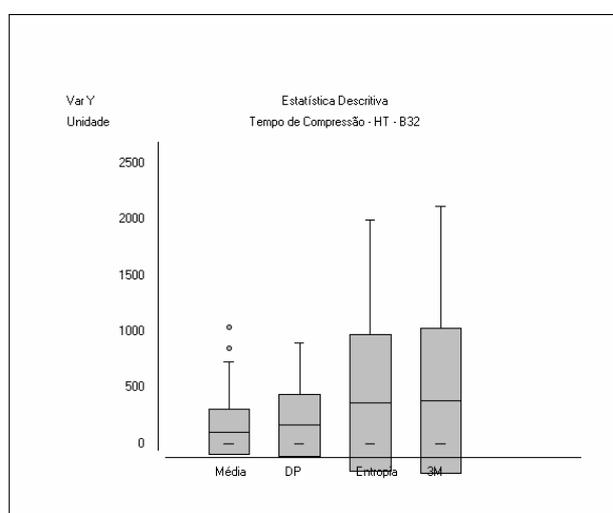


Figura 4.47: Análise descritiva - *hash table* - bloco de domínio com 32 x 32 pixels - tempo de compressão.

O gráfico da figura 4.47 mostra essa divisão das medidas em grupos, o que auxilia a conclusão do conjunto mais rápido e menos rápido.

No entanto, quando se utiliza a análise de variância para verificar as diferenças entre as medidas, nota-se que, mesmo existindo variações de tempo entre as medidas, não há diferença estatística significativa, como indicado na tabela 4.55 de análise de variância



Tabela 4.54: Análise descritiva - *hash table* - bloco de domínio com  $32 \times 32$  pixels - tempo de compressão.

<b>Tempo de Compressão - HT - B32</b>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Entropia</i>	<i>3M</i>
Tamanho da amostra =	24	24	24	24
Mínimo	0,01	0,01	0	0,01
Máximo	1040,7	902,34	1999,18	2117,8
Mediana	13,825	14,58	29,73	31,305
Média Aritmética	175,9313	164,405	361,8471	382,4929

Tabela 4.55: Análise de variância - *hash table* - bloco de domínio com  $32 \times 32$  pixels - tempo de compressão.

<b>Tempo de Compressão - HT - B32</b>	<i>Resultados</i>
H =	2,9773
Graus de liberdade =	3
(p) Kruskal-Wallis =	0,3951

pelo valor  $p < 0,3951$ .

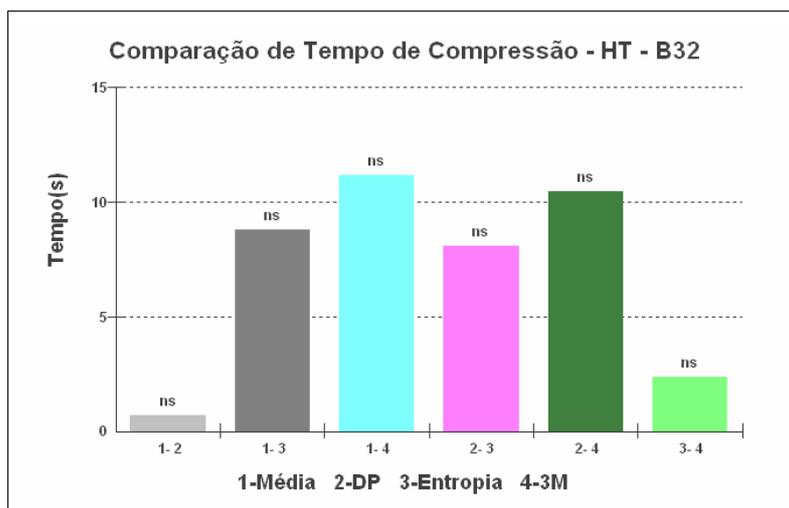


Figura 4.48: Análise de variância - *hash table* - bloco de domínio com  $32 \times 32$  pixels - tempo de compressão.

O gráfico da análise de variância 4.48 ilustra essas comparações e as diferenças não significativas entre as medidas. Porém, conclui-se através da análise descritiva que a medida que obteve melhor tempo foi o desvio padrão, seguido da média, da entropia e das três medidas combinadas.

## Taxa de Compressão

Os valores da taxa de compressão diminuem quando o tamanho das imagens também diminui. Além desse comportamento dentro da mesma medida, os valores são os mesmos

quando se modifica o tipo de medida de distância, como mostra a tabela 4.53.

Tabela 4.56: Análise descritiva - *hash table* - bloco de domínio com  $32 \times 32$  pixels - taxa de compressão.

<b>Taxa de Compressão - HT - B32</b>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Entropia</i>	<i>3M</i>
Tamanho da amostra =	24	24	24	24
Mínimo	113,777	113,777	113,777	113,777
Máximo	127,75	127,75	127,75	127,75
Mediana	125,564	125,564	125,564	125,564
Média Aritmética	123,1638	123,1638	123,164	123,164

Com a análise descritiva comprova-se esse comportamento da taxa de compressão. O item média aritmética da tabela 4.56 é o mesmo para cada medida (123,16), indicando que não há diferença de taxa de compressão entre as medidas. Assim, como também é ilustrado no gráfico da figura 4.49.

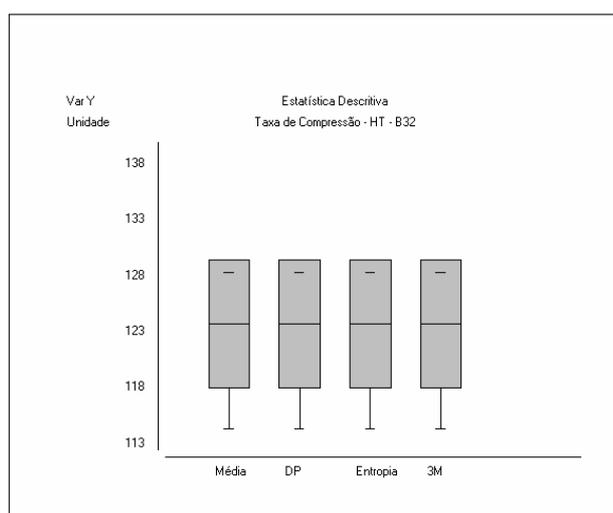


Figura 4.49: Análise descritiva - *hash table* - bloco de domínio com  $32 \times 32$  pixels - taxa de compressão.

Portanto, conclui-se que a taxa de compressão tem o mesmo comportamento durante a execução do algoritmo nas imagens quando as medidas de distância são modificadas.

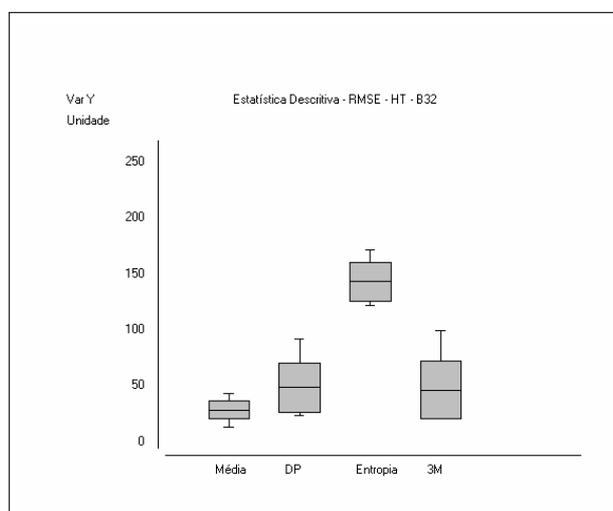
## RMSE

A medida RMSE obtida nas medidas de distância de forma geral não é de boa qualidade, ocorrendo pequenas variações nas medidas, conforme pode ser observado na tabela 4.53, mas não se mantém a qualidade da imagem.

Tabela 4.57: Análise descritiva - *hash table* - bloco de domínio  $32 \times 32$  pixels - RMSE.

<b>RMSE - HT - B32</b>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Entropia</i>	<i>3M</i>
Tamanho da amostra =	24	24	24	24
Mínimo	13,585	23,517	121,7	20,53
Máximo	43,47	91,677	171,97	99,01
Mediana	29,0885	37,2125	135,97	34,38
Média Aritmética	28,5788	48,3555	143,07	46,19

Na análise descritiva da medida de qualidade RMSE, verifica-se que a medida que obteve melhor qualidade foi a média e a pior em qualidade foi a entropia. Entretanto, o valor de RMSE da média é ainda alto, o que não representa boa qualidade de imagem. O comportamento da análise descritiva é ilustrado no gráfico da figura 4.50.

Figura 4.50: Análise descritiva - *hash table* - bloco de domínio com  $32 \times 32$  pixels - RMSE.Tabela 4.58: Análise de variância - *hash table* - bloco de domínio com  $32 \times 32$  pixels - RMSE: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas.

<b>RMSE - HT - B32</b>	<i>Resultados</i>	- 2 -
H =	62,7359	
Graus de liberdade =	3	
(p) Kruskal-Wallis =	0	
R 1 (posto médio) =	22,875	
R 2 (posto médio) =	46,625	
R 3 (posto médio) =	84,5	
R 4 (posto médio) =	40	
Comparações Student-Newman-Keuls	Dif. Postos	p-valor
Grupos ( 1 e 2) =	23,75	0,0031
Grupos ( 1 e 3) =	61,625	< 0,0001
Grupos ( 1 e 4) =	17,125	0,0332
Grupos ( 2 e 3) =	37,875	< 0,0001
Grupos ( 2 e 4) =	6,625	0,41
Grupos ( 3 e 4) =	44,5	< 0,0001

Para verificar as diferenças notáveis entre os valores RMSE da tabela 4.57 de análise descritiva, utiliza-se a análise de variância que indica através da tabela 4.58 a existência de diferenças estatísticas significativas entre as medidas, exceto entre o desvio padrão e as três medidas combinadas.

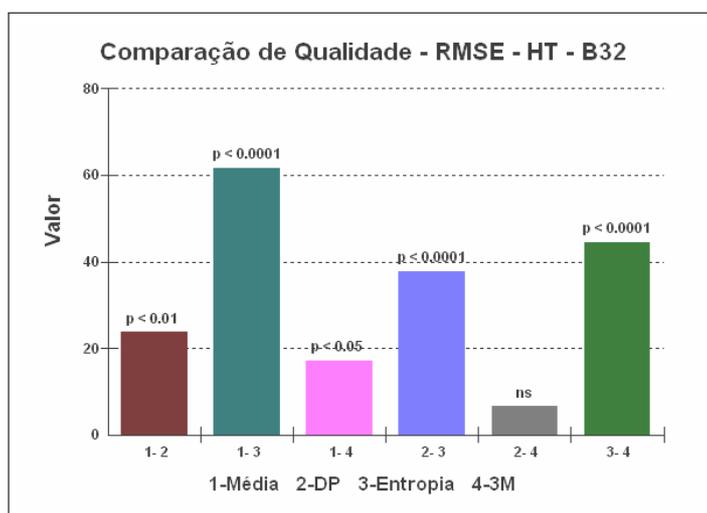


Figura 4.51: Análise de variância - *hash table* - bloco de domínio com  $32 \times 32$  pixels - RMSE.

Portanto, conclui-se que há diferenças entre os resultados de qualidade das imagens, exceto entre o desvio padrão e as três medidas combinadas, entretanto, a medida de distância baseada na média ainda produz imagens com baixa qualidade.

## PSNR

Em contrapartida aos valores de RMSE, os valores de qualidade PSNR são apresentados na tabela 4.53.

Tabela 4.59: Análise descritiva - *hash table* - bloco de domínio com  $32 \times 32$  pixels - PSNR.

<b>PSNR - HT - B32</b>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Entropia</i>	<i>3M</i>
Tamanho da amostra =	24	24	24	24
Mínimo	15,367	8,886	3,422	8,217
Máximo	25,469	20,703	6,425	21,88
Mediana	18,8565	16,645	5,462	17,4
Média Aritmética	19,3534	15,2044	5,081	15,9

A tabela de análise descritiva 4.59 apresenta os valores resultantes da qualidade, os quais não são bons. Isto auxilia a conclusão de que, nessas circunstâncias, a média apresenta melhor qualidade. O conjunto de valores de qualidade é ilustrado na figura 4.52.

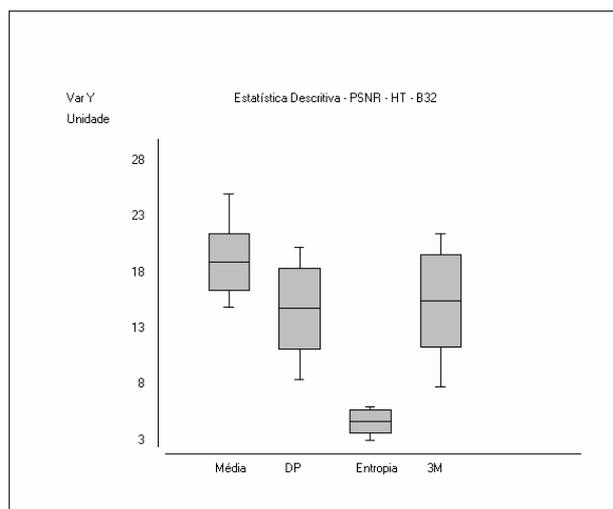


Figura 4.52: Análise descritiva - *hash table* - bloco de domínio com  $32 \times 32$  pixels - PSNR.

Tabela 4.60: Análise de variância - *hash table* - bloco de domínio com  $32 \times 32$  pixels - PSNR: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas.

<b>PSNR - HT - B32</b>	<i>Resultados</i>	- 2 -
H =	62,7981	
Graus de liberdade =	3	
(p) Kruskal-Wallis =	0	
R 1 (posto médio) =	74,1667	
R 2 (posto médio) =	50,3333	
R 3 (posto médio) =	12,5	
R 4 (posto médio) =	57	
Comparações Student-Newman-Keuls	Dif. Postos	p-valor
Grupos ( 1 e 2) =	23,8333	0,003
Grupos ( 1 e 3) =	61,6667	< 0,0001
Grupos ( 1 e 4) =	17,1667	0,0328
Grupos ( 2 e 3) =	37,8333	< 0,0001
Grupos ( 2 e 4) =	6,6667	0,4071
Grupos ( 3 e 4) =	44,5	< 0,0001

Com a análise de variância, a conclusão fica mais abrangente, pois a tabela 4.60 auxilia no fato de que as medidas possuem diferenças entre seus resultados, apesar de não serem bons, e que apenas as medidas de desvio padrão e as três medidas combinadas apresentam semelhanças nos resultados de qualidade.

Os resultados da compressão com tamanho de bloco  $32 \times 32$  pixels mostram a média como a melhor medida tanto em qualidade e tempo, apesar das imagens resultantes serem ruins comparadas às imagens de tamanho de blocos menores. Observa-se que à medida que o tamanho da imagem diminua neste contexto, a qualidade sofre degradação.

## Resultado visual das imagens comprimidas

As imagens comprimidas ilustradas na figura 4.53 são os resultados visuais do processo de compressão fractal do algoritmo *hash table* com tamanho de bloco  $32 \times 32$  pixels e medida de distância baseada na média. A sequência das imagens é a mesma apresentada na tabela 4.53.

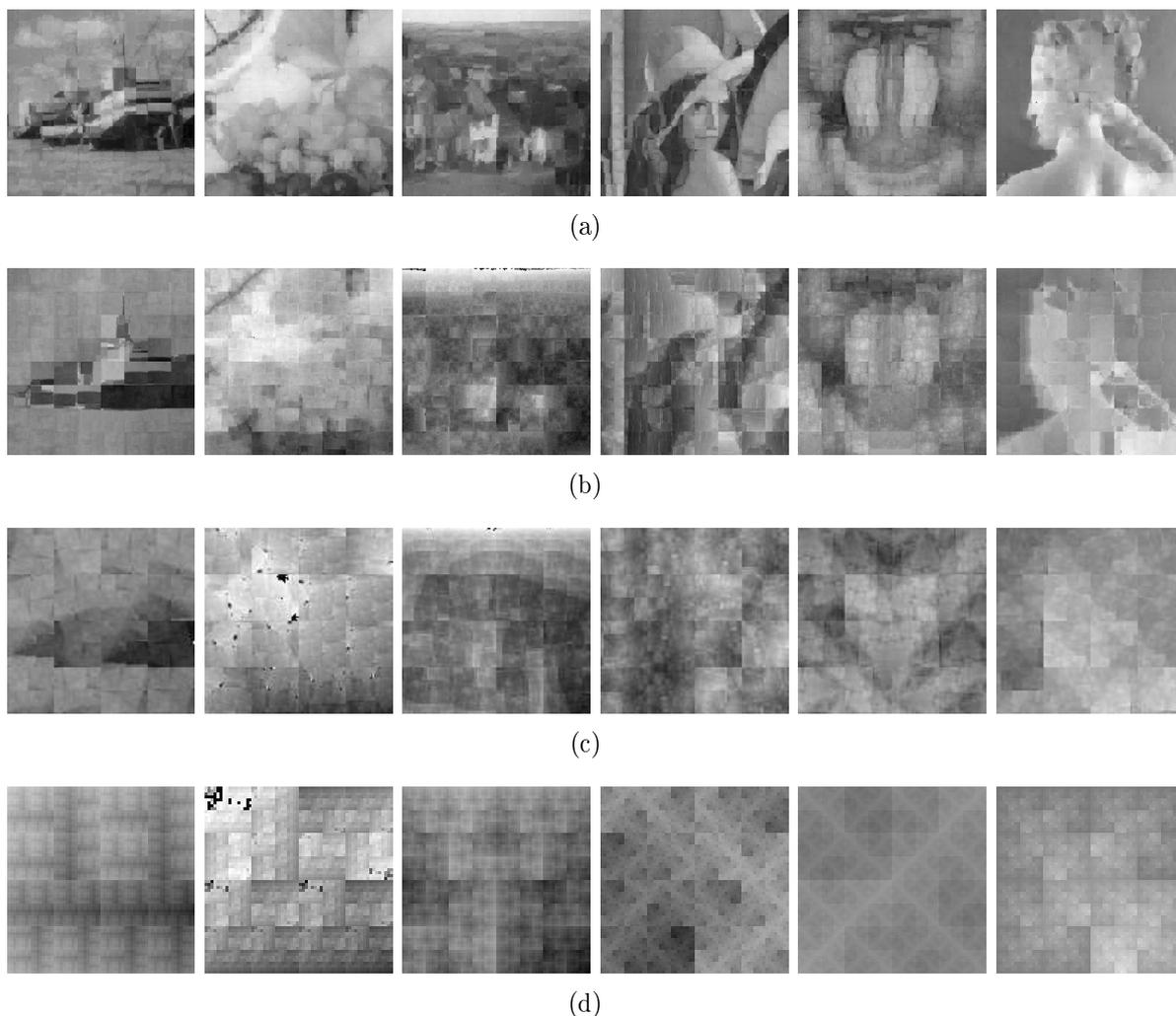


Figura 4.53: Imagens comprimidas com *hash table* e tamanho de bloco  $32 \times 32$  pixels e medida de distância baseada na média. Os respectivos valores dos resultados das imagens estão na mesma sequência da tabela 4.53: (a) imagens com tamanho de bloco  $512 \times 512$  pixels; (b) imagens com tamanho de bloco  $256 \times 256$  pixels; (c) imagens com tamanho de bloco  $128 \times 128$  pixels; (d) imagens com tamanho de bloco  $64 \times 64$  pixels.

### 4.3 Comparação entre Busca Exaustiva e Hash Table

O objetivo desta seção é destacar os melhores resultados na comparação entre os algoritmos de compressão com busca exaustiva e com *hash table*, baseado em quatro itens: tempo de compressão, taxa de compressão, RMSE e PSNR. Os dois algoritmos comprimiram as mesmas imagens e geraram resultados diferentes apresentados na tabela 4.61, mas cada algoritmo foi melhor em determinado item.

Segundo os dados apresentados na tabela 4.61 de análise descritiva, nota-se que o algoritmo que apresentou melhor tempo de compressão no conjunto de dados foi o algoritmo baseado em *hash table*, com o critério da média e tamanho de bloco  $32 \times 32$  pixels. O valor da sua média aritmética é 155,3267 e a mediana de 13,825. O segundo melhor valor é com o algoritmo de busca exaustiva com o critério da média e tamanho de bloco  $32 \times 32$  pixels, com o valor de média aritmética de 180,1792 e mediana de 151,04.

As imagens de resultados do algoritmo *hash table* são mostradas nas figuras 4.54 e os resultados do algoritmo de busca exaustiva são apresentados nas figuras 4.55.

As imagens das figuras 4.54 e 4.55 não apresentam bons resultados visualmente devido ao tamanho do bloco utilizado na compressão de  $32 \times 32$  pixels.

Os resultados dos algoritmos *hash table* e busca exaustiva quanto à taxa de compressão são apresentados na tabela 4.62. Observa-se nesses dados que as taxas de compressão se repetem quando as imagens são comprimidas dentro do mesmo contexto, ou seja, independentemente da medida utilizada (média, desvio padrão, entropia ou as três medidas combinadas), a taxa de compressão é a mesma para cada tamanho de bloco.

Para blocos de tamanho  $4 \times 4$ ,  $8 \times 8$ ,  $16 \times 16$  e  $32 \times 32$ , as taxas de compressão são, respectivamente, 1,9983, 7,979, 31,6755 e 123,1638. Portanto, conclui-se que, independentemente do algoritmo e das medidas utilizadas, o que influencia na alteração da taxa de compressão é o tamanho dos blocos utilizados nos algoritmos.

Os resultados da comparação de qualidade RMSE entre os algoritmos é apresentado na tabela 4.63. A medida RMSE define o menor valor como sendo o que apresenta melhor qualidade. Por isso, o critério da média no algoritmo da busca exaustiva com tamanho de bloco  $4 \times 4$  pixels, com valor de 7,1561, obteve a melhor qualidade de imagem. O

Tabela 4.61: Análise Descritiva - Comparação dos resultados da Busca Exaustiva x Hash Table - Tempo de Compressão

Tempo de Compressão		Média-HT <sub>4</sub>	Desvio Padrão-HT <sub>4</sub>	Entropia-HT <sub>4</sub>	3M-HT <sub>4</sub>	Média-HT <sub>8</sub>	Desvio Padrão-HT <sub>8</sub>	Entropia-HT <sub>8</sub>	3M-HT <sub>8</sub>
Tamanho da amostra =	24	24	24	24	24	24	24	24	24
Mínimo	0,38	0,42	0,91	0,94	0,28	0,31	0,38	0,67	0,67
Máximo	1886,79	1994,04	5400	4080	1434,73	1526,22	3240	3540	3540
Mediana	36,04	39,365	81,43	88,415	36,175	38,47	36,04	88,73	88,73
Média Aritmética	412,7758	429,6017	970,3879	690,6471	248,3029	264,5938	546,84	613,4383	613,4383
<b>Tempo de Compressão</b>	<b>Média-HT<sub>16</sub></b>	<b>Desvio Padrão-HT<sub>16</sub></b>	<b>Entropia-HT<sub>16</sub></b>	<b>3M-HT<sub>16</sub></b>	<b>Média-HT<sub>32</sub></b>	<b>Desvio Padrão-HT<sub>32</sub></b>	<b>Entropia-HT<sub>32</sub></b>	<b>3M-HT<sub>32</sub></b>	<b>3M-HT<sub>32</sub></b>
Tamanho da amostra =	24	24	24	24	24	24	24	24	24
Mínimo	0,12	0,12	0,23	0,24	0,01	0,01	0	0,01	0,01
Máximo	946,12	1005,12	2220	2141,24	849,57	902,34	1999,18	2117,8	2117,8
Mediana	20,145	21,35	46,555	49,27	13,825	14,58	29,73	31,305	31,305
Média Aritmética	197,9121	210,0871	463,6146	445,5521	<b>155,3267</b>	164,405	361,8471	382,4929	382,4929
<b>Tempo de Compressão</b>	<b>Média-EX<sub>4</sub></b>	<b>Desvio Padrão-EX<sub>4</sub></b>	<b>Entropia-EX<sub>4</sub></b>	<b>3M-EX<sub>4</sub></b>	<b>Média-EX<sub>8</sub></b>	<b>Desvio Padrão-EX<sub>8</sub></b>	<b>Entropia-EX<sub>8</sub></b>	<b>3M-EX<sub>8</sub></b>	<b>3M-EX<sub>8</sub></b>
Tamanho da amostra =	24	24	24	24	24	24	24	24	24
Mínimo	2,46	2,6	4,15	4,34	1,75	1,82	3,03	3,18	3,18
Máximo	12180	12720	22800	1317,61	11640	11640	19560	20160	20160
Mediana	387,935	411,205	654,1	78,315	347,46	361,055	593,615	626,465	626,465
Média Aritmética	3212,5971	3371,4646	5374,3588	371,1806	2990,3721	3088,6996	5100,9725	5236,8083	5236,8083
<b>Tempo de Compressão</b>	<b>Média-EX<sub>16</sub></b>	<b>Desvio Padrão-EX<sub>16</sub></b>	<b>Entropia-EX<sub>16</sub></b>	<b>3M-EX<sub>16</sub></b>	<b>Média-EX<sub>32</sub></b>	<b>Desvio Padrão-EX<sub>32</sub></b>	<b>Entropia-EX<sub>32</sub></b>	<b>3M-EX<sub>32</sub></b>	<b>3M-EX<sub>32</sub></b>
Tamanho da amostra =	24	24	24	24	24	24	24	24	24
Mínimo	0,79	0,82	1,37	1,44	0	0	0	0	0
Máximo	1716,14	2063,47	973,66	1400,03	414,02	588,24	31620	16200	16200
Mediana	294,5	304,615	280,75	532,015	151,04	218,88	367,2	382,925	382,925
Média Aritmética	570,76	660,3329	390,7246	602,3083	<b>180,1792</b>	254,6729	5493,8538	4204,1404	4204,1404

Tabela 4.62: Análise descritiva - comparação dos resultados da busca exaustiva x *hash table* - taxa de compressão.

<b>Taxa de Compressão</b>	<i>Média-HT4</i>	<i>Desvio Padrão-HT4</i>	<i>Entropia-HT4</i>	<i>3M-HT4</i>	<i>Média-HT8</i>	<i>Desvio Padrão-HT8</i>	<i>Entropia-HT8</i>	<i>3M-HT8</i>
Tamanho da amostra =	24	24	24	24	24	24	24	24
Mínimo	1,996	1,996	1,996	1,996	7,937	7,937	7,937	7,937
Máximo	1,999	1,999	1,999	1,999	7,999	7,999	7,999	7,999
Mediana	1,999	1,999	1,999	1,999	7,99	7,99	7,99	7,99
Média Aritmética	1,9983	1,9983	1,9983	1,9983	7,979	7,979	7,979	7,979
<b>Taxa de Compressão</b> <th><i>Média-HT16</i></th> <th><i>Desvio Padrão-HT16</i></th> <th><i>Entropia-HT16</i></th> <th><i>3M-HT16</i></th> <th><i>Média-HT32</i></th> <th><i>Desvio Padrão-HT32</i></th> <th><i>Entropia-HT32</i></th> <th><i>3M-HT32</i></th>	<i>Média-HT16</i>	<i>Desvio Padrão-HT16</i>	<i>Entropia-HT16</i>	<i>3M-HT16</i>	<i>Média-HT32</i>	<i>Desvio Padrão-HT32</i>	<i>Entropia-HT32</i>	<i>3M-HT32</i>
Tamanho da amostra =	24	24	24	24	24	24	24	24
Mínimo	31,03	31,03	31,03	31,03	113,777	113,777	113,777	113,777
Máximo	31,984	31,984	31,984	31,984	127,75	127,75	127,75	127,75
Mediana	31,844	31,844	31,844	31,844	125,564	125,564	125,564	125,564
Média Aritmética	31,6755	31,6755	31,6755	31,6755	123,1638	123,1638	123,1638	123,1638
<b>Taxa de Compressão</b> <th><i>Média-EX4</i></th> <th><i>Desvio Padrão-EX4</i></th> <th><i>Entropia-EX4</i></th> <th><i>3M-EX4</i></th> <th><i>Média-EX8</i></th> <th><i>Desvio Padrão-EX8</i></th> <th><i>Entropia-EX8</i></th> <th><i>3M-EX8</i></th>	<i>Média-EX4</i>	<i>Desvio Padrão-EX4</i>	<i>Entropia-EX4</i>	<i>3M-EX4</i>	<i>Média-EX8</i>	<i>Desvio Padrão-EX8</i>	<i>Entropia-EX8</i>	<i>3M-EX8</i>
Tamanho da amostra =	24	24	24	24	24	24	24	24
Mínimo	1,996	1,996	1,996	1,996	7,937	7,937	7,937	7,937
Máximo	1,999	1,999	1,999	1,999	7,999	7,999	7,999	7,999
Mediana	1,999	1,999	1,999	1,999	7,99	7,99	7,99	7,99
Média Aritmética	1,9983	1,9983	1,9983	1,9983	7,979	7,979	7,979	7,979
<b>Taxa de Compressão</b> <th><i>Média-EX16</i></th> <th><i>Desvio Padrão-EX16</i></th> <th><i>Entropia-EX16</i></th> <th><i>3M-EX16</i></th> <th><i>Média-EX32</i></th> <th><i>Desvio Padrão-EX32</i></th> <th><i>Entropia-EX32</i></th> <th><i>3M-EX32</i></th>	<i>Média-EX16</i>	<i>Desvio Padrão-EX16</i>	<i>Entropia-EX16</i>	<i>3M-EX16</i>	<i>Média-EX32</i>	<i>Desvio Padrão-EX32</i>	<i>Entropia-EX32</i>	<i>3M-EX32</i>
Tamanho da amostra =	24	24	24	24	24	24	24	24
Mínimo	31,03	31,03	31,03	31,03	113,777	113,777	113,777	113,777
Máximo	31,984	31,984	31,984	31,984	127,75	127,75	127,75	127,75
Mediana	31,844	31,844	31,844	31,844	125,564	125,564	125,564	125,564
Média Aritmética	31,6755	31,6755	31,6755	31,6755	123,1638	123,1638	123,1638	123,1638

Tabela 4.63: Análise descritiva - comparação dos resultados da busca exaustiva x *hash table* - RMSE.

RMSE	Média-HT4		Desvio Padrão-HT4		Entropia-HT4		3M-HT4		Média-HT8		Desvio Padrão-HT8		Entropia-HT8		3M-HT8		
	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	
Tamanho da amostra =	24	24	38,662	5,34	120,091	6,194	17,031	15,447	17,031	15,447	17,031	15,447	17,031	15,447	17,031	15,447	17,031
Mínimo	2,645	38,662	5,34	120,091	6,194	17,031	15,447	17,031	15,447	17,031	15,447	17,031	15,447	17,031	15,447	17,031	15,447
Máximo	11,98	126,671	47,748	170,69	27,313	92,197	39,942	23,519	27,313	92,197	39,942	23,519	27,313	92,197	39,942	23,519	27,313
Mediana	8,0605	72,6795	9,7885	135,3255	14,409	44,356	24,8097	14,409	44,356	24,8097	14,409	44,356	24,8097	14,409	44,356	24,8097	14,409
Média Aritimética	<b>7,8244</b>	78,2216	15,4389	141,0315	14,5366	49,212	24,8097	14,5366	49,212	24,8097	14,5366	49,212	24,8097	14,5366	49,212	24,8097	14,5366
<b>RMSE</b>	<b>Média-HT16</b>	<b>Desvio Padrão-HT16</b>	<b>Entropia-HT16</b>	<b>3M-HT16</b>	<b>Média-HT32</b>	<b>Desvio Padrão-HT32</b>	<b>Entropia-HT32</b>	<b>3M-HT32</b>	<b>Média-EX8</b>	<b>Desvio Padrão-EX8</b>	<b>Entropia-EX8</b>	<b>3M-EX8</b>	<b>Média-EX32</b>	<b>Desvio Padrão-EX32</b>	<b>Entropia-EX32</b>	<b>3M-EX32</b>	
Tamanho da amostra =	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	
Mínimo	8,74	16,107	121,702	20,013	13,585	23,517	121,702	20,534	13,585	23,517	121,702	20,534	13,585	23,517	121,702	20,534	
Máximo	34,675	69,822	171,974	76,741	43,47	91,677	171,974	99,014	43,47	91,677	171,974	99,014	43,47	91,677	171,974	99,014	
Mediana	21,378	37,2755	135,965	41,331	29,0885	37,2125	135,965	34,3825	29,0885	37,2125	135,965	34,3825	29,0885	37,2125	135,965	34,3825	
Média Aritimética	21,2495	40,0473	143,0691	45,2563	28,5788	48,3555	143,0691	46,1929	28,5788	48,3555	143,0691	46,1929	28,5788	48,3555	143,0691	46,1929	
<b>RMSE</b>	<b>Média-EX4</b>	<b>Desvio Padrão-EX4</b>	<b>Entropia-EX4</b>	<b>3M-EX4</b>	<b>Média-EX8</b>	<b>Desvio Padrão-EX8</b>	<b>Entropia-EX8</b>	<b>3M-EX8</b>	<b>Média-EX16</b>	<b>Desvio Padrão-EX16</b>	<b>Entropia-EX16</b>	<b>3M-EX16</b>	<b>Média-EX32</b>	<b>Desvio Padrão-EX32</b>	<b>Entropia-EX32</b>	<b>3M-EX32</b>	
Tamanho da amostra =	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	
Mínimo	2,548	9,71	3,491	118,759	4,692	8,018	5,363	12,453	4,692	8,018	5,363	12,453	4,692	8,018	5,363	12,453	
Máximo	11,345	110,963	20,888	170,708	22,774	34,078	27,34	118,743	22,774	34,078	27,34	118,743	22,774	34,078	27,34	118,743	
Mediana	7,4205	24,989	10,1275	135,526	13,6505	19,2555	15,6685	119,813	13,6505	19,2555	15,6685	119,813	13,6505	19,2555	15,6685	119,813	
Média Aritimética	<b>7,1561</b>	31,3848	10,2869	141,6096	13,5068	20,2701	15,6255	153,1899	13,5068	20,2701	15,6255	153,1899	13,5068	20,2701	15,6255	153,1899	
<b>RMSE</b>	<b>Média-EX16</b>	<b>Desvio Padrão-EX16</b>	<b>Entropia-EX16</b>	<b>3M-EX16</b>	<b>Média-EX32</b>	<b>Desvio Padrão-EX32</b>	<b>Entropia-EX32</b>	<b>3M-EX32</b>	<b>Média-EX64</b>	<b>Desvio Padrão-EX64</b>	<b>Entropia-EX64</b>	<b>3M-EX64</b>	<b>Média-EX128</b>	<b>Desvio Padrão-EX128</b>	<b>Entropia-EX128</b>	<b>3M-EX128</b>	
Tamanho da amostra =	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	
Mínimo	8,304	12,244	121,702	12,657	13,208	14,249	121,702	14,645	13,208	14,249	121,702	14,645	13,208	14,249	121,702	14,645	
Máximo	35,04	40,073	171,974	70,16	43,47	91,677	171,974	99,014	43,47	91,677	171,974	99,014	43,47	91,677	171,974	99,014	
Mediana	20,9165	23,2575	135,965	25,6175	27,9	30,0655	135,965	29,57	27,9	30,0655	135,965	29,57	27,9	30,0655	135,965	29,57	
Média Aritimética	20,6729	23,4632	143,0691	27,9266	28,2757	41	143,0841	42,0107	28,2757	41	143,0841	42,0107	28,2757	41	143,0841	42,0107	

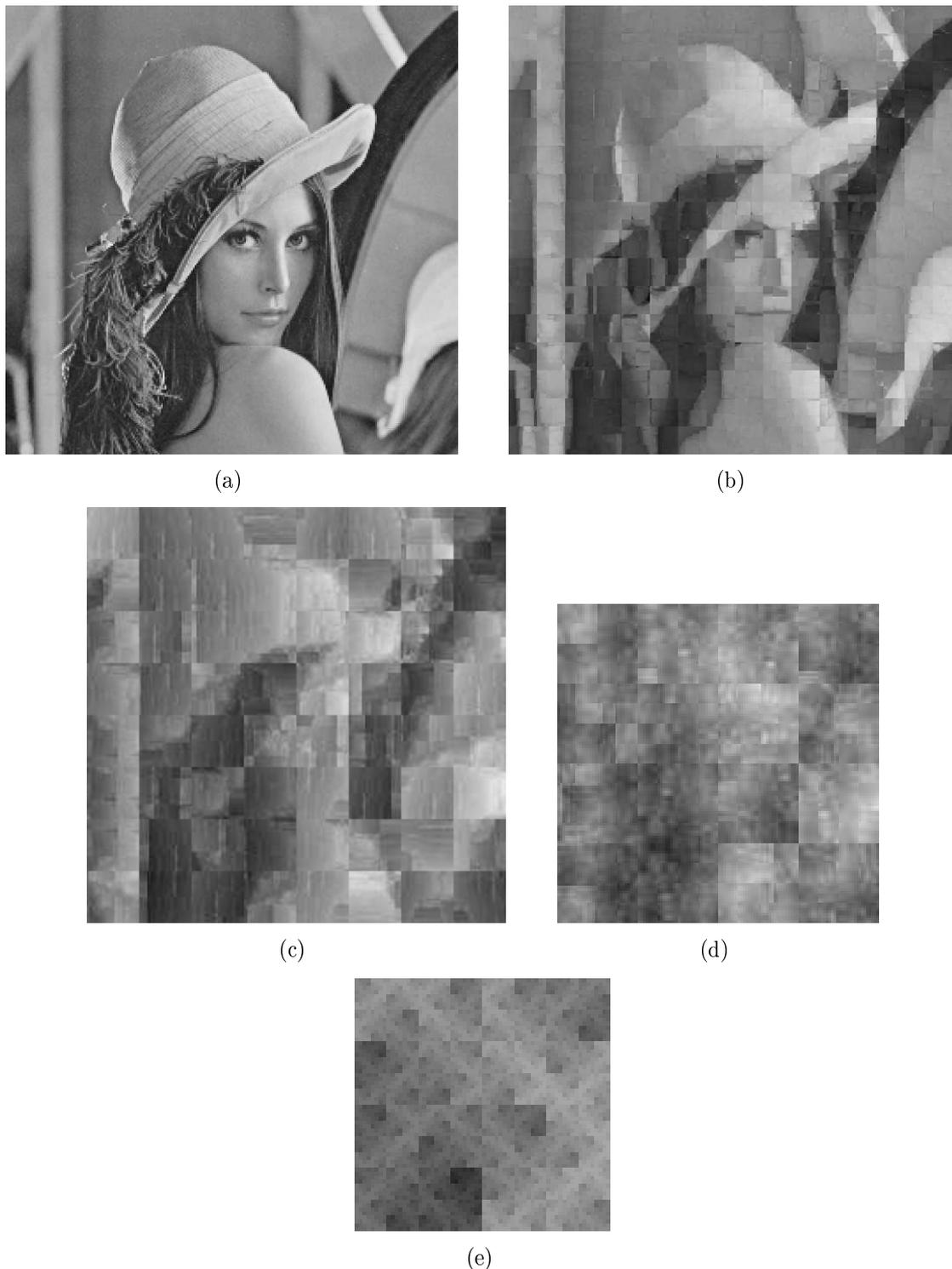


Figura 4.54: Resultados das imagens comprimidas com *hash table* no critério da média e tamanho de bloco  $32 \times 32$  pixels - tempo de compressão: (a) imagem da Lenna com  $512 \times 512$  pixels original; (b) imagem da Lenna com  $512 \times 512$  pixels comprimida; (c) imagem Lenna com  $256 \times 256$  pixels comprimida; (d) imagem Lenna com  $128 \times 128$  pixels comprimida; (e) imagem Lenna com  $64 \times 64$  pixels comprimida.

segundo melhor resultado é do critério média no algoritmo *hash table* com tamanho de bloco  $4 \times 4$  pixels, com valor de 7,8244. As imagens desses resultados são ilustradas nas

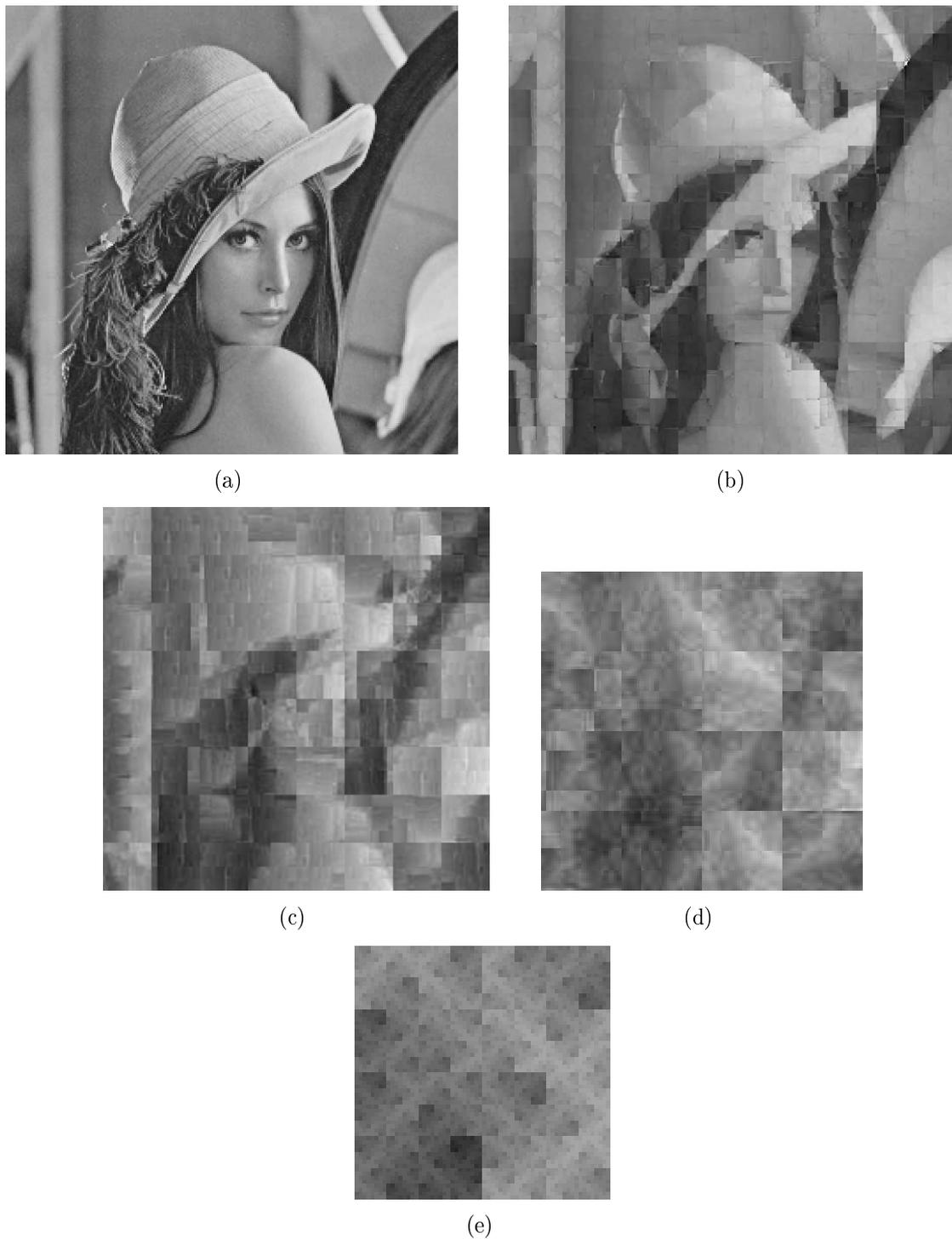


Figura 4.55: Resultados das imagens comprimidas com busca exaustiva no critério da média e tamanho de bloco  $32 \times 32$  pixels - tempo de compressão: (a) imagem da Lenna com  $512 \times 512$  pixels original; (b) imagem da Lenna com  $512 \times 512$  pixels comprimida; (c) imagem Lenna com  $256 \times 256$  pixels comprimida; (d) imagem Lenna com  $128 \times 128$  pixels comprimida; (e) imagem Lenna com  $64 \times 64$  pixels comprimida.

figuras 4.56 4.57.

No contexto apresentado pelos métodos que utilizam *hash table* e busca exaustiva para

Tabela 4.64: Análise descritiva - comparação dos resultados da busca exaustiva x hash table - PSNR.

PSNR	Média-HT4		Desvio Padrão-HT4		Entropia-HT4		3M-HT4		Média-HT8		Desvio Padrão-HT8		Entropia-HT8		3M-HT8	
	Tamanho da amostra =	24	Tamanho da amostra =	24	Tamanho da amostra =	24	Tamanho da amostra =	24	Tamanho da amostra =	24	Tamanho da amostra =	24	Tamanho da amostra =	24	Tamanho da amostra =	24
Mínimo	26,561	6,077	14,552	3,487	19,403	8,836	16,201	3,775	19,403	8,836	16,201	3,775	19,403	8,836	16,201	3,775
Máximo	39,681	16,385	26,117	6,541	32,292	33,581	24,354	15,446	32,292	33,581	24,354	15,446	32,292	33,581	24,354	15,446
Mediana	30,0105	10,909	19,284	5,503	24,959	28,317	20,703	6,585	24,959	28,317	20,703	6,585	24,959	28,317	20,703	6,585
Média Aritmética	<b>30,9068</b>	10,6077	19,903	5,1994	25,4912	25,0462	20,5289	7,216	25,4912	25,0462	20,5289	7,216	25,4912	25,0462	20,5289	7,216
<b>PSNR</b>	<b>Média-HT16</b>	<b>Desvio Padrão-HT16</b>	<b>Entropia-HT16</b>	<b>3M-HT16</b>	<b>Média-HT32</b>	<b>Desvio Padrão-HT32</b>	<b>Entropia-HT32</b>	<b>3M-HT32</b>	<b>Média-HT32</b>	<b>Desvio Padrão-HT32</b>	<b>Entropia-HT32</b>	<b>3M-HT32</b>	<b>Média-HT32</b>	<b>Desvio Padrão-HT32</b>	<b>Entropia-HT32</b>	<b>3M-HT32</b>
Tamanho da amostra =	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
Mínimo	17,331	11,251	3,422	10,43	15,367	8,886	3,422	8,217	15,367	8,886	3,422	8,217	15,367	8,886	3,422	8,217
Máximo	29,3	23,99	6,425	22,104	25,469	20,703	6,425	21,881	25,469	20,703	6,425	21,881	25,469	20,703	6,425	21,881
Mediana	21,5325	16,7025	5,462	15,769	18,8565	16,645	5,462	17,4045	18,8565	16,645	5,462	17,4045	18,8565	16,645	5,462	17,4045
Média Aritmética	22,0609	16,6538	5,081	15,5495	19,3534	15,2044	5,081	15,8953	19,3534	15,2044	5,081	15,8953	19,3534	15,2044	5,081	15,8953
<b>PSNR</b>	<b>Média-EX4</b>	<b>Desvio Padrão-EX4</b>	<b>Entropia-EX4</b>	<b>3M-EX4</b>	<b>Média-EX8</b>	<b>Desvio Padrão-EX8</b>	<b>Entropia-EX8</b>	<b>3M-EX8</b>	<b>Média-EX8</b>	<b>Desvio Padrão-EX8</b>	<b>Entropia-EX8</b>	<b>3M-EX8</b>	<b>Média-EX8</b>	<b>Desvio Padrão-EX8</b>	<b>Entropia-EX8</b>	<b>3M-EX8</b>
Tamanho da amostra =	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
Mínimo	27,035	7,227	21,733	3,486	20,939	17,481	19,395	3,799	20,939	17,481	19,395	3,799	20,939	17,481	19,395	3,799
Máximo	40,008	28,387	37,271	6,637	34,703	30,005	33,224	26,225	34,703	30,005	33,224	26,225	34,703	30,005	33,224	26,225
Mediana	30,7335	20,209	28,109	5,49	24,9795	22,44	24,233	6,7895	24,9795	22,44	24,233	6,7895	24,9795	22,44	24,233	6,7895
Média Aritmética	<b>31,7601</b>	20,0628	28,6208	5,1603	25,7245	22,5408	24,8423	8,7855	25,7245	22,5408	24,8423	8,7855	25,7245	22,5408	24,8423	8,7855
<b>PSNR</b>	<b>Média-EX16</b>	<b>Desvio Padrão-EX16</b>	<b>Entropia-EX16</b>	<b>3M-EX16</b>	<b>Média-EX32</b>	<b>Desvio Padrão-EX32</b>	<b>Entropia-EX32</b>	<b>3M-EX32</b>	<b>Média-EX32</b>	<b>Desvio Padrão-EX32</b>	<b>Entropia-EX32</b>	<b>3M-EX32</b>	<b>Média-EX32</b>	<b>Desvio Padrão-EX32</b>	<b>Entropia-EX32</b>	<b>3M-EX32</b>
Tamanho da amostra =	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
Mínimo	17,239	16,074	3,422	11,209	15,367	8,886	3,422	8,217	15,367	8,886	3,422	8,217	15,367	8,886	3,422	8,217
Máximo	29,745	26,373	6,425	26,084	25,714	25,095	6,425	24,817	25,714	25,095	6,425	24,817	25,714	25,095	6,425	24,817
Mediana	21,725	19,7995	5,462	19,9605	19,219	18,5695	5,462	18,7145	19,219	18,5695	5,462	18,7145	19,219	18,5695	5,462	18,7145
Média Aritmética	22,2918	21,1385	5,081	19,8378	19,4659	17,3369	5,0393	17,2448	19,4659	17,3369	5,0393	17,2448	19,4659	17,3369	5,0393	17,2448



Figura 4.56: Resultados das imagens comprimidas com *hash table* a partir da média e tamanho de bloco  $4 \times 4$  pixels - RMSE e PSNR: (a) imagem da Lenna com  $512 \times 512$  pixels original; (b) imagem da Lenna com  $512 \times 512$  pixels comprimida; (c) imagem Lenna com  $256 \times 256$  pixels comprimida; (d) imagem Lenna com  $128 \times 128$  pixels comprimida; (e) imagem Lenna com  $64 \times 64$  pixels comprimida.

a compressão das imagens, a qualidade PSNR segue o padrão esperado de qualidade. A tabela 4.64 mostra os resultados dos algoritmos quanto à medida PSNR.

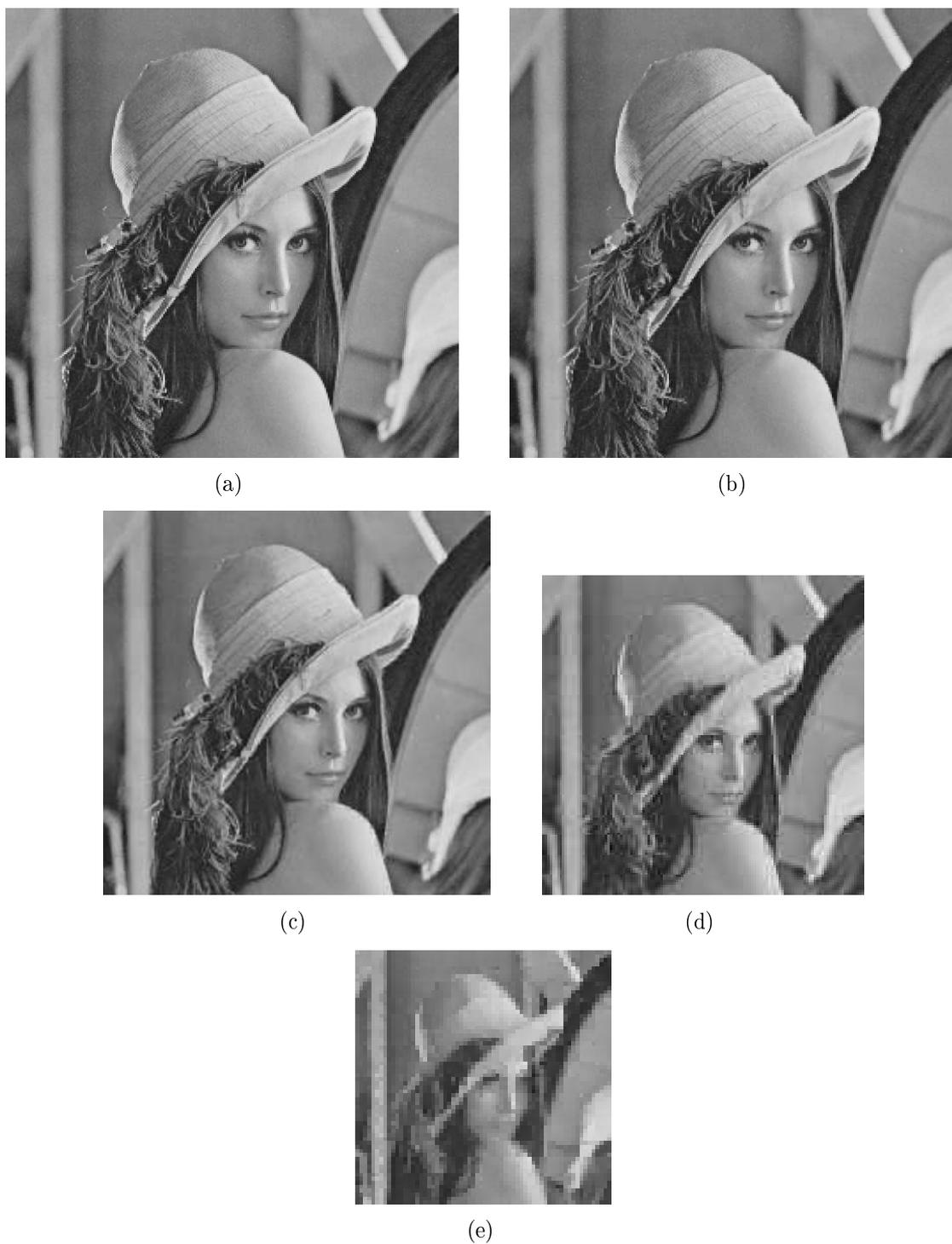


Figura 4.57: Imagens comprimidas com busca exaustiva a partir da média e tamanho de bloco  $4 \times 4$  pixels - RMSE e PSNR: (a) imagem da Lenna com  $512 \times 512$  pixels original; (b) imagem da Lenna com  $512 \times 512$  pixels comprimida; (c) imagem Lenna com  $256 \times 256$  pixels comprimida; (d) imagem Lenna com  $128 \times 128$  pixels comprimida; (e) imagem Lenna com  $64 \times 64$  pixels comprimida.

O critério que atingiu a melhor qualidade é também a média no método de busca exaustiva com tamanho de bloco  $4 \times 4$  pixels, com média aritmética de 31,7601, seguida

pela média no método *hash table* com tamanho de bloco  $4 \times 4$  pixels, com média aritmética de 30,9068. Portanto, conclui-se com esses resultados que o método *hash table* obteve melhor desempenho quanto ao tempo, enquanto a busca exaustiva obteve melhor qualidade.

As imagens de melhor qualidade foram obtidas a partir da busca exaustiva, devido ao seu método de comparação entre os blocos de domínio e blocos moldes, porém, com alto tempo de processamento em todos os tipos de imagem. O contrário ocorre com a *hash table*, que obteve um melhor desempenho diminuindo o tempo de processamento como proposto neste trabalho em todos os tipos de imagens, mas com menor qualidade.

## 4.4 Resultados da Compressão Fractal de Imagens por Quadtree

Esta seção apresenta os resultados obtidos pela técnica de compressão fractal de imagens baseada no particionamento *quadtree*. Os seguintes conjuntos relacionados à profundidade do particionamento da imagem foram definidos: 1T - partição mínima de 4 e partição máxima de 6, 2T - partição mínima de 2 e partição máxima de 6, 3T - partição mínima de 2 e partição máxima de 8, 4T - partição máxima de 4 e partição máxima de 8 para o método baseado em *quadtree* [31].

### 4.4.1 Resultados da Quadtree - 1T

Esta seção apresenta os resultados do método de compressão com particionamento *quadtree* para o conjunto 1T.

#### Tempo de Compressão

O tempo de compressão, mostrado na tabela 4.65, apresenta valores bem diferentes entre as diversas medidas utilizadas no algoritmo.

Segundo a análise descritiva da tabela 4.66, entre essas variações do tempo, a medida que apresenta o melhor tempo de compressão é a entropia com 0,1776s. Essa análise é melhor compreendida quando se visualiza esses dados graficamente na figura 4.58.

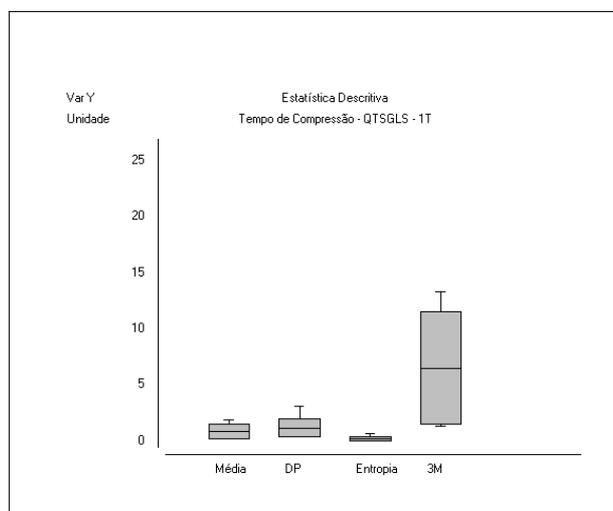


Figura 4.58: Análise descritiva - *quadtree* original- domínio 1T - tempo de compressão.

Tabela 4.65: Compressão fractal de imagens por quadtree sem GLS (QTSGLS) - domínio 1T.

Domínio: 1T	Algoritmo: Quadtree Original																
	Medida: Média 1T				Medida: Desvio Padrão 1T				Medida: Entropia 1T				Medida: 3M 1T				
	Tempo(s)	Taxa	RMSE	PSNR	Tempo(s)	Taxa	RMSE	PSNR	Tempo(s)	Taxa	RMSE	PSNR	Tempo(s)	Taxa	RMSE	PSNR	
Imagem	512x512	0,914	22,488	15,944	24,079	1,287	22,692	15,944	24,079	0,465	384,375	19,712	9,315	21,314	15,555	24,293	
	Fruits	512x512	0,842	22,095	14,185	25,094	1,377	22,277	14,185	25,094	0,576	403,298	22,773	9,265	20,986	13,878	25,284
	Goldhill	512x512	0,820	21,096	12,751	26,020	1,359	21,234	12,751	26,020	0,636	381,023	20,757	9,911	20,781	12,030	26,525
	Lenna	512x512	0,839	21,677	15,489	24,331	1,339	21,945	15,164	24,514	0,434	386,643	25,525	19,992	20,869	14,888	24,674
	Mandrill	512x512	0,581	20,683	19,470	22,343	1,157	20,683	19,470	22,343	0,493	376,103	24,694	7,356	21,021	19,312	22,414
Paolina	512x512	0,847	22,55	10,696	27,547	1,333	23,312	10,684	27,556	0,468	391,844	18,393	8,683	20,690	10,015	28,118	
Boat	256x256	0,308	5,405	17,168	23,436	0,517	5,607	17,160	23,440	0,113	95,672	26,148	2,414	5,271	16,856	23,595	
	Fruits	256x256	0,373	5,351	15,094	24,555	0,475	5,559	15,091	24,557	0,131	98,847	22,203	2,374	5,229	14,716	24,775
	Goldhill	256x256	0,371	5,246	13,197	25,721	0,498	5,358	13,199	25,720	0,147	95,255	20,560	2,481	5,161	12,842	25,958
	Lenna	256x256	0,326	5,266	16,900	23,573	0,558	5,525	16,893	23,577	0,227	96,376	24,824	2,248	5,179	16,57	23,751
	Mandrill	256x256	0,228	5,144	20,127	22,055	0,355	5,153	20,127	22,055	0,134	94,979	24,772	1,853	5,165	19,995	22,113
Paolina	256x256	0,314	5,406	11,572	26,683	0,399	6,224	11,574	26,861	0,172	97,669	19,080	2,203	5,150	11,232	27,122	
Boat	128x128	0,410	1,288	16,768	23,641	0,542	1,421	16,729	23,662	0,030	23,506	23,366	20,759	1,552	16,422	23,822	
	Fruits	128x128	0,416	1,301	15,388	24,387	0,449	1,524	15,361	24,402	0,035	23,779	20,086	22,073	1,535	15,135	24,531
	Goldhill	128x128	0,365	1,291	14,320	25,012	0,498	1,389	14,263	25,046	0,038	23,676	18,879	22,611	1,268	14,339	25,000
	Lenna	128x128	0,398	1,306	19,118	22,502	0,517	1,498	19,080	22,519	0,035	23,988	23,553	20,690	1,271	19,445	22,355
	Mandrill	128x128	0,302	1,265	15,945	24,078	0,442	1,29	15,995	24,051	0,034	23,239	19,005	22,553	1,314	17,935	23,057
Paolina	128x128	0,360	1,426	13,620	25,447	0,374	1,899	13,499	25,525	0,036	24,165	17,852	23,097	1,286	13,579	25,473	
Boat	64x64	1,902	0,65	136,621	5,420	2,107	0,756	111,167	7,176	0,009	5,962	28,621	13,305	0,649	136,621	5,420	
	Fruits	64x64	1,834	0,652	171,563	3,442	2,181	0,743	145,278	4,887	0,009	6,159	35,726	17,071	0,649	171,563	3,442
	Goldhill	64x64	1,856	0,649	121,702	6,425	3,067	0,746	103,171	7,860	0,010	6,023	21,389	21,527	0,649	121,702	6,425
	Lenna	64x64	1,838	0,665	131,646	5,743	2,222	0,737	112,224	7,129	0,010	5,927	29,638	18,694	0,649	5,743	131,646
	Mandrill	64x64	1,844	0,649	134,008	5,588	2,530	0,694	123,844	6,273	0,009	6,059	24,137	20,477	0,649	134,008	5,588
Paolina	64x64	1,846	0,65	160,192	4,038	1,826	0,838	131,091	5,779	0,011	6,196	30,151	18,545	0,649	160,192	4,038	

Tabela 4.66: Análise descritiva - *quadtree* original - domínio 1T - tempo de compressão.

<b>Tempo de Compressão - QTSGLS - 1T</b>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Entropia</i>	<i>3M</i>
Tamanho da amostra =	24	24	24	24
Mínimo	0,228	0,355	0,009	1,314
Máximo	1,902	3,067	0,636	13,305
Mediana	0,4985	0,8575	0,0755	4,9185
Média Aritmética	0,8389	1,142	0,1776	6,5123

Com a análise de variância é possível verificar se esses tempos diferentes apresentados pela análise descritiva se diferem entre os tipos de medidas de distância.

Tabela 4.67: Análise de variância - *quadtree* original- domínio 1T - tempo de compressão: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas.

<b>Tempo de Compressão - QTSGLS - 1T</b>	<i>Resultados</i>	- 2 -
H =	63,2898	
Graus de liberdade =	3	
(p) Kruskal-Wallis =	0	
R 1 (posto médio) =	43,2917	
R 2 (posto médio) =	52,7917	
R 3 (posto médio) =	17,3333	
R 4 (posto médio) =	80,5833	
Comparações Student-Newman-Keuls	Dif. Postos	p-valor
Grupos ( 1 e 2) =	9,5	0,2375
Grupos ( 1 e 3) =	25,9583	0,0012
Grupos ( 1 e 4) =	37,2917	< 0,0001
Grupos ( 2 e 3) =	35,4583	< 0,0001
Grupos ( 2 e 4) =	27,7917	0,0005
Grupos ( 3 e 4) =	63,25	< 0,0001

A análise de variância da tabela 4.67 mostra que apenas entre a média e desvio padrão não há diferenças significativas, entretanto, as outras medidas apresentam grandes diferenças estatísticas.

Com o gráfico da análise de variância na figura 4.59, conclui-se que a medida de melhor tempo é a entropia, seguida da média, desvio padrão e as três medidas combinadas.

## Taxa de Compressão

Os valores da taxa de compressão diminuem à medida que o tamanho das imagens também diminui, conforme os valores da tabela 4.65.

Segundo a análise descritiva na tabela 4.68, a medida que obteve a melhor taxa de compressão é a entropia, 128,3651, com grande diferença para as outras medidas. Essa

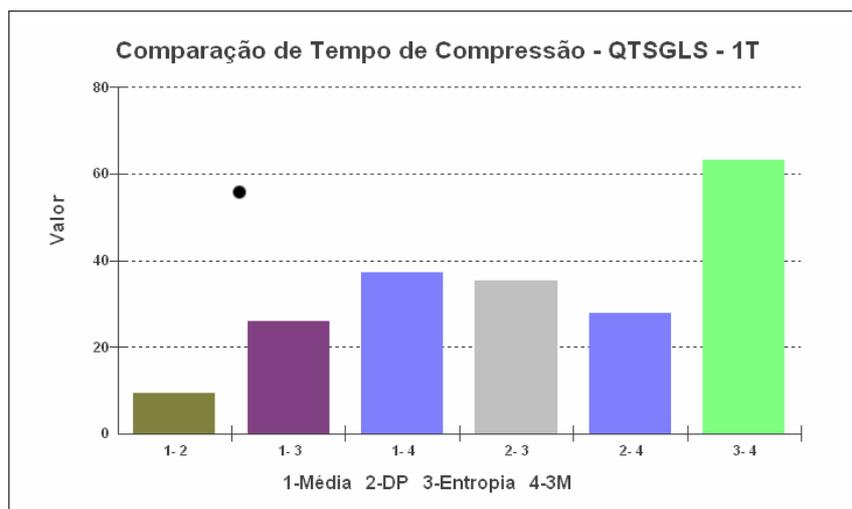


Figura 4.59: Análise de variância - *quadtree* original - domínio 1T - tempo de compressão.

Tabela 4.68: Análise descritiva - *quadtree* original - domínio 1T - taxa de compressão.

Taxa de Compressão - QTSGLS - 1T	Média	Desvio Padrão	Entropia	3M
Tamanho da amostra =	24	24	24	24
Mínimo	0,649	0,694	5,927	0,649
Máximo	22,55	23,312	403,298	21,314
Mediana	3,285	3,526	59,572	3,218
Média Aritmética	7,2577	7,4627	128,3651	7,0135

diferença torna-se mais evidente ao verificar esses valores no gráfico da figura 4.60.

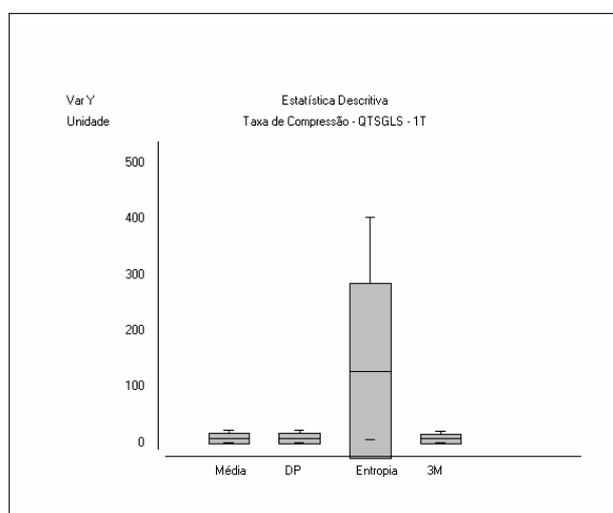


Figura 4.60: Análise descritiva - *quadtree* original - domínio 1T - taxa de compressão.

Essa diferença entre a entropia e as demais medidas é ressaltada na análise de variância apresentada na tabela 4.69, em que se verifica que a entropia tem resultados diferentes de todas as outras medidas.

O gráfico da análise de variância da figura 4.61 auxilia concluir que a entropia é a medida que possui maior taxa de compressão, além de ser a única medida que apresenta

Tabela 4.69: Análise de variância - *quadtree* original - domínio 1T - taxa de compressão: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas

Taxa de Compressão - QTSGLS - 1T	Resultados	- 2 -
H =	41,4587	
Graus de liberdade =	3	
(p) Kruskal-Wallis =	0	
R 1 (posto médio) =	38,0625	
R 2 (posto médio) =	42,6458	
R 3 (posto médio) =	79,7083	
R 4 (posto médio) =	33,5833	
Comparações Student-Newman-Keuls	Dif. Postos	p-valor
Grupos ( 1 e 2) =	4,5833	0,5687
Grupos ( 1 e 3) =	41,6458	< 0,0001
Grupos ( 1 e 4) =	4,4792	0,5775
Grupos ( 2 e 3) =	37,0625	< 0,0001
Grupos ( 2 e 4) =	9,0625	0,2598
Grupos ( 3 e 4) =	46,125	< 0,0001

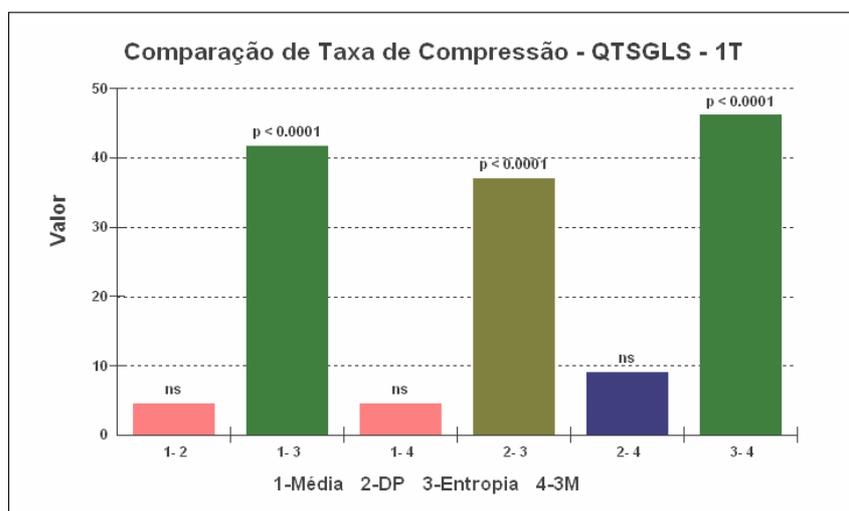


Figura 4.61: Análise de variância - *quadtree* original - domínio 1T - taxa de compressão.

diferenças estatísticas significativas em relação às outras medidas.

## RMSE

Os valores resultantes de qualidade RMSE são bem diferentes entre as medidas, segundo a tabela 4.65. O padrão identificado em algumas medidas é a perda de qualidade quando a imagem tem tamanho  $64 \times 64$  pixels.

Segundo a análise descritiva apresentada na tabela 4.70, a medida que apresenta melhor qualidade é a entropia, seguida do desvio padrão, média e as três medidas combinadas. Esses valores estão ilustrados no gráfico da figura 4.62.

Tabela 4.70: Análise descritiva - *quadtree* original - domínio 1T - RMSE.

<b>RMSE - QTSGLS - 1T</b>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Entropia</i>	<i>3M</i>
Tamanho da amostra =	24	24	24	24
Mínimo	10,696	10,684	17,852	5,743
Máximo	171,563	145,278	35,726	1657
Mediana	16,3565	16,362	23,4595	15,9885
Média Aritmética	47,2285	41,831	23,6871	110,2085

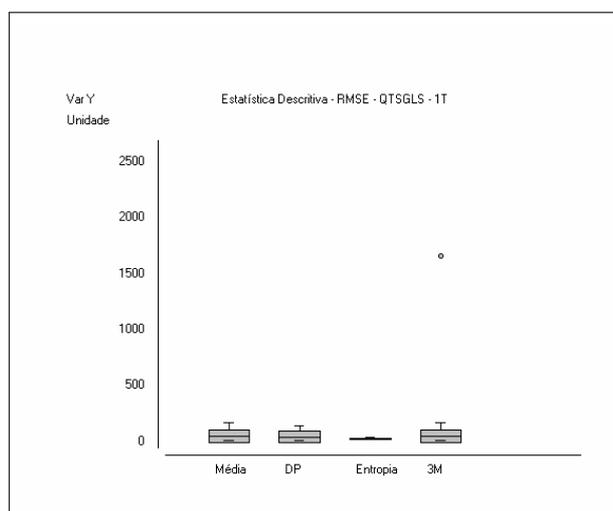


Figura 4.62: Análise Descritiva - Quadtree original - Domínio 1T - RMSE.

Tabela 4.71: Análise de variância - *quadtree* original - domínio 1T - RMSE: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas.

<b>RMSE - QTSGLS - 1T</b>	<i>Resultados</i>	<i>- 2 -</i>
H =	10,6648	
Graus de liberdade =	3	
(p) Kruskal-Wallis =	0,0137	
R 1 (posto médio) =	44,4583	
R 2 (posto médio) =	42,6667	
R 3 (posto médio) =	64,5208	
R 4 (posto médio) =	42,3542	
Comparações Student-Newman-Keuls	Dif. Postos	p-valor
Grupos ( 1 e 2) =	1,7917	0,8237
Grupos ( 1 e 3) =	20,0625	0,0126
Grupos ( 1 e 4) =	2,1042	0,7936
Grupos ( 2 e 3) =	21,8542	0,0066
Grupos ( 2 e 4) =	0,3125	0,969
Grupos ( 3 e 4) =	22,1667	0,0058

Segundo a análise de variância da tabela 4.71, verifica-se que a medida entropia é a única que apresenta diferenças estatísticas com outras medidas.

Portanto, com base na análise descritiva e de variância, conclui-se que há diferenças significativas somente entre a entropia e a demais medidas. No entanto, a análise de variância mostra que não há diferenças significativas nas outras medidas (figura 4.63).

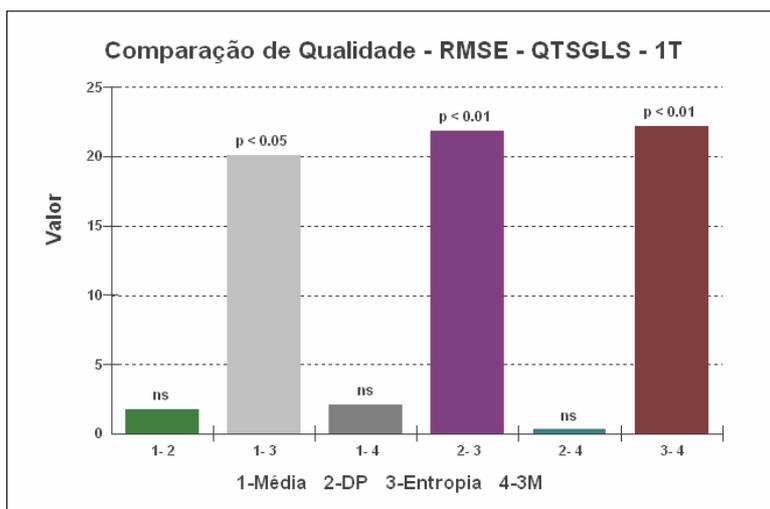


Figura 4.63: Análise de variância - *quadtree* original - domínio 1T - RMSE.

## PSNR

O comportamento dos valores resultantes da medida PSNR são mostrados na tabela 4.72.

Tabela 4.72: Análise descritiva - *quadtree* original - domínio 1T - PSNR.

PSNR - QTSGLS - 1T	Média	Desvio Padrão	Entropia	3M
Tamanho da amostra =	24	24	24	24
Mínimo	3,442	4,887	17,071	3,442
Máximo	27,547	27,556	23,097	131,646
Mediana	23,8595	23,857	20,7245	24,0575
Média Aritmética	19,6317	20,005	20,7727	24,9758

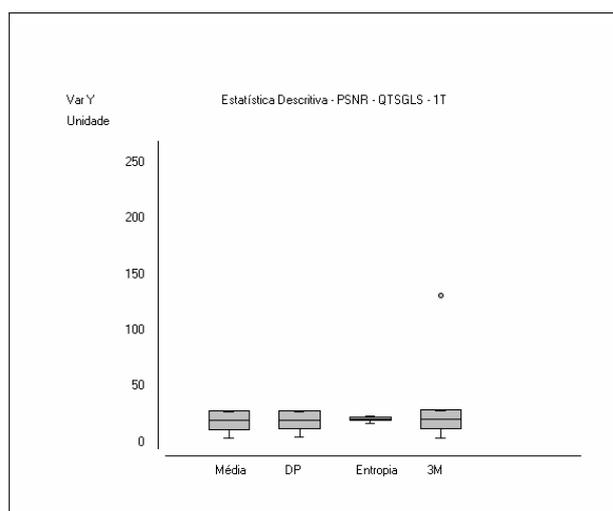


Figura 4.64: Análise descritiva - *quadtree* original - domínio 1T - PSNR.

Os valores da análise descritiva, ilustrados no gráfico da figura 4.64, exibem as medidas com muitas semelhanças.

Tabela 4.73: Análise de variância - *quadtree* original - domínio 1T - PSNR: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas.

PSNR - QTSGLS - 1T	Resultados	- 2 -
H =	12,2856	
Graus de liberdade =	3	
(p) Kruskal-Wallis =	0,0065	
R 1 (posto médio) =	52	
R 2 (posto médio) =	53,875	
R 3 (posto médio) =	31,4792	
R 4 (posto médio) =	56,6458	
Comparações Student-Newman-Keuls	Dif. Postos	p-valor
Grupos ( 1 e 2) =	1,875	0,8156
Grupos ( 1 e 3) =	20,5208	0,0107
Grupos ( 1 e 4) =	4,6458	0,5634
Grupos ( 2 e 3) =	22,3958	0,0054
Grupos ( 2 e 4) =	2,7708	0,7304
Grupos ( 3 e 4) =	25,1667	0,0018

Com a análise de variância da tabela 4.73 é possível verificar que, entre as medidas, a única que apresenta diferenças estatísticas significativas é a entropia, como também ilustrado no gráfico 4.65.

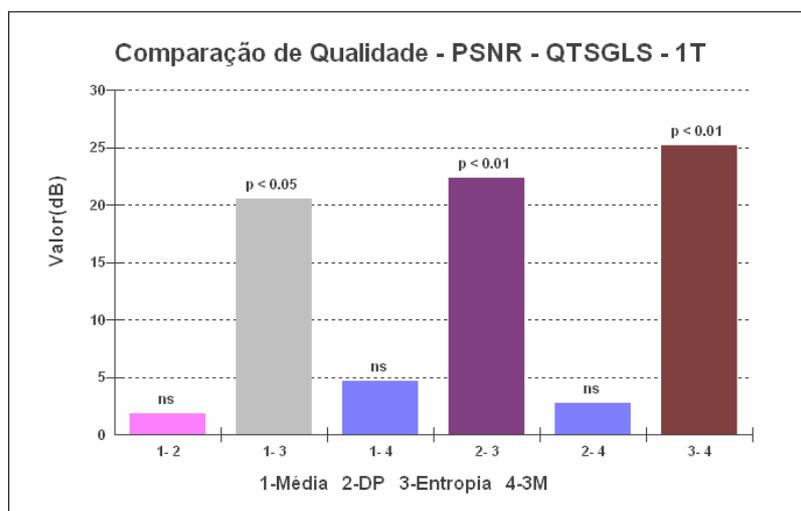


Figura 4.65: Análise de variância - *quadtree* original - domínio 1T - PSNR.

Portanto, conclui-se com estas análises do PSNR que a medida de entropia produz um resultado com muitas diferenças entre as medidas e que as três medidas combinadas foi a medida que obteve melhor qualidade, seguida da entropia, desvio padrão e média.

No entanto, a qualidade das imagens obtidas com a medida da distância da média é superior às outras medidas, porém, a qualidade diminui à medida que as imagens diminuem de tamanho.

## Resultado visual das imagens comprimidas

As imagens comprimidas ilustradas na figura 4.66 são os resultados visuais do processo de compressão fractal do algoritmo *quadtree* sem GLS com configuração de bloco 1T e medida de distância da média. A sequência das imagens é a mesma apresentada na tabela 4.65.

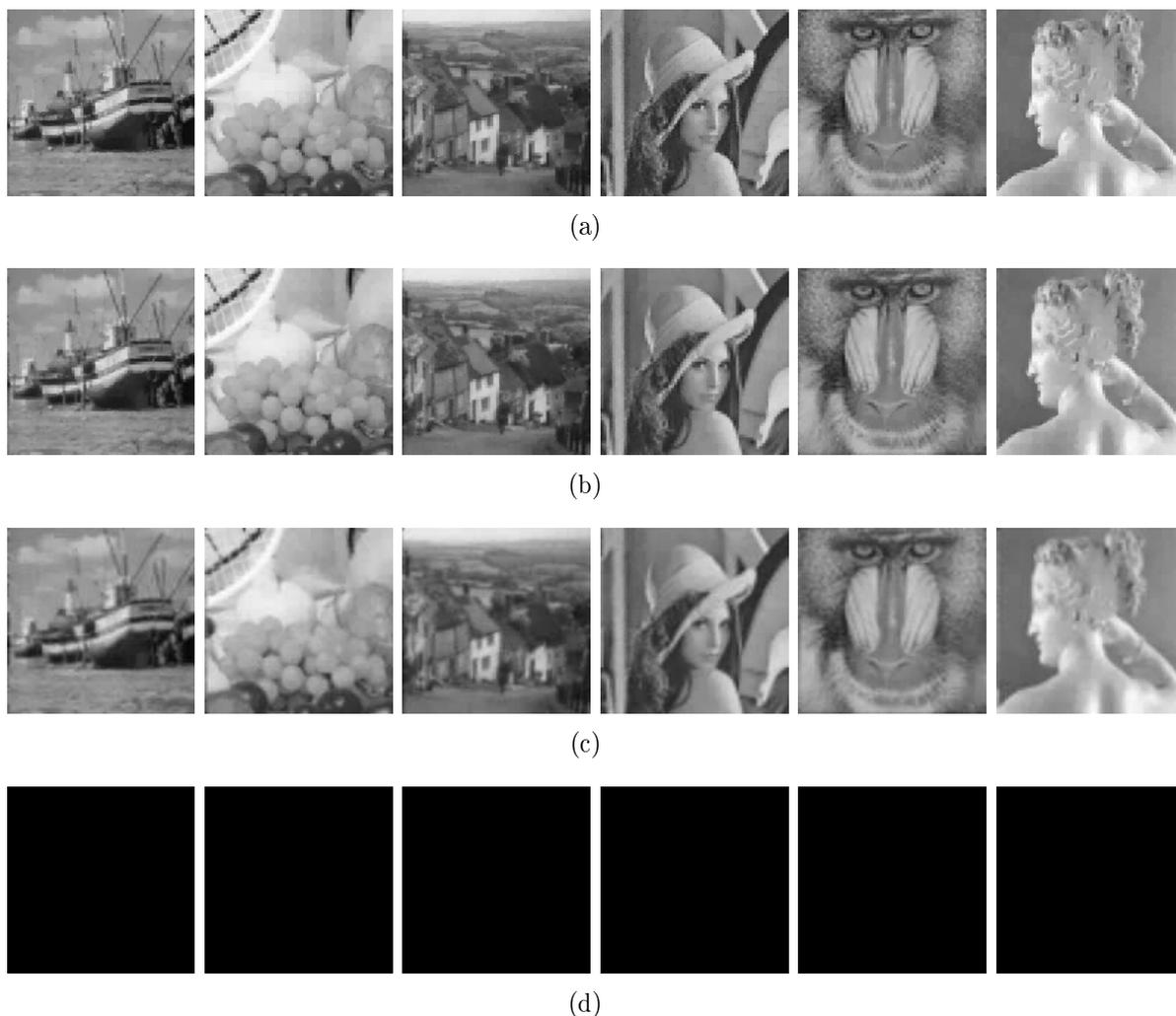


Figura 4.66: Imagens comprimidas com a *quadtree* sem GLS e configuração de bloco 1T e medida de distância da média. Os respectivos valores dos resultados das imagens estão na mesma sequência da tabela 4.65: (a) imagens com tamanho de bloco  $512 \times 512$  pixels; (b) imagens com tamanho de bloco  $256 \times 256$  pixels; (c) imagens com tamanho de bloco  $128 \times 128$  pixels; (d) imagens com tamanho de bloco  $64 \times 64$  pixels.

## 4.4.2 Resultados da Quadtree - 2T

Esta seção apresenta os resultados do método de compressão com particionamento *quadtree* para o conjunto 2T.

### Tempo de Compressão

Os resultados apresentados na tabela 4.74 sobre o tempo de compressão de cada imagem apresenta um comportamento diferente entre as medidas.

O comportamento dos resultados é avaliado pela análise descritiva da tabela 4.75. Nesta tabela, observa-se que, no item média aritmética, as duas medidas que obtiveram o melhor tempo de compressão foram a média e a entropia.

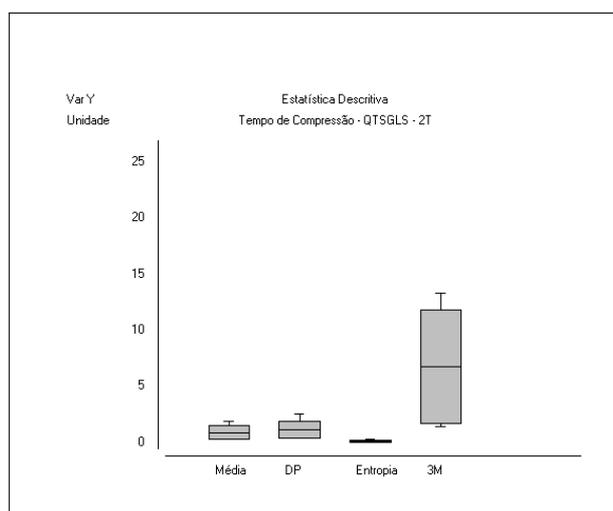


Figura 4.67: Análise descritiva - *quadtree* original - domínio 2T - tempo de compressão.

A figura 4.67 mostra o gráfico da análise descritiva que ilustra graficamente a diferença entre as medidas. Nota-se que as três medidas combinadas apresentam pior tempo.

Com a análise de variância da tabela 4.76, verifica-se que há diferenças significativas entre praticamente todas as medidas, apenas entre a média e o desvio padrão a diferença não é estatisticamente alta.

Portanto, por meio das análises e gráficos como o de análise de variância 4.68, conclui-se que a medida com o melhor tempo de compressão é a entropia, seguida da entropia, desvio padrão e a três medidas combinadas.

Tabela 4.74: Compressão fractal de imagens por *quadtree* sem GLS (QTSGLS) - domínio 2T.

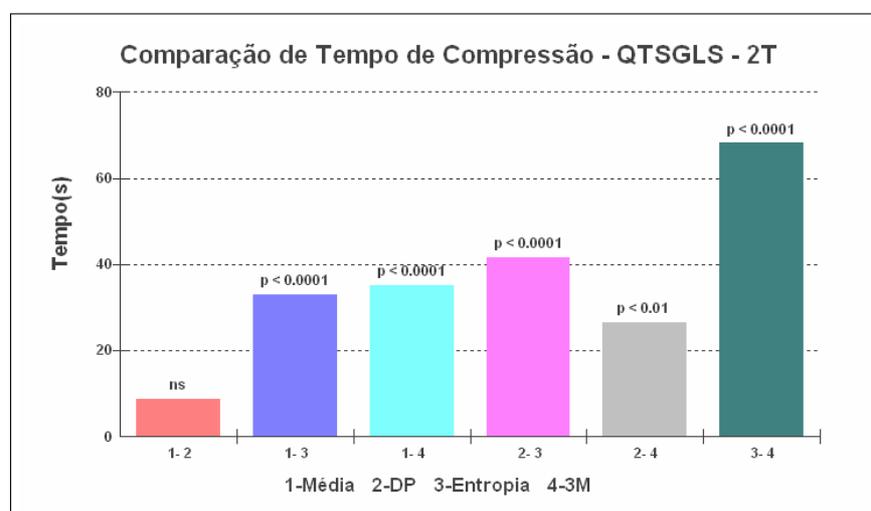
Domínio: 2T	Medida: Média 2T				Algoritmo: Quadtree Original				Medida: Entropia 2T				Medida: 3M 2T				
	Imagem	Tempo(s)	Taxa	RMSE	PSNR	Tempo(s)	Taxa	RMSE	PSNR	Tempo(s)	Taxa	RMSE	PSNR	Tempo(s)	Taxa	RMSE	PSNR
Boat	512x512	0,847	22,468	15,944	24,079	1,390	22,672	15,944	24,079	0,292	6553,6	36,157	16,967	9,976	21,296	15,555	24,283
	512x512	0,922	21,077	14,185	25,094	1,474	22,258	14,185	25,094	0,305	6553,6	33,240	17,698	9,934	20,939	13,878	25,284
	512x512	0,890	21,079	12,751	26,020	1,432	21,217	12,751	26,020	0,294	6393,756	30,549	18,431	10,524	20,765	12,030	26,525
	512x512	0,922	21,659	15,489	24,531	1,420	21,927	15,164	24,514	0,293	6553,6	42,101	15,645	9,945	20,853	14,888	24,674
	512x512	0,647	20,667	19,470	22,343	1,053	20,667	19,470	22,343	0,295	6393,756	33,522	17,624	8,021	21,005	19,312	22,414
Paolina	512x512	0,885	22,53	10,696	27,547	1,373	23,291	10,684	27,556	0,294	6721,641	31,276	18,227	9,307	20,673	10,015	28,118
Boat	256x256	0,391	5,4	17,168	23,436	0,463	5,602	17,160	23,440	0,089	1598,439	36,089	16,983	2,552	5,267	16,856	23,595
	256x256	0,413	5,346	15,094	24,555	0,575	5,554	15,091	24,557	0,075	1598,439	33,209	17,706	2,504	5,224	14,716	24,775
	256x256	0,354	5,242	13,197	25,721	0,519	5,353	13,199	25,720	0,073	1598,439	30,514	18,41	2,663	5,157	12,842	25,958
	256x256	0,340	5,261	16,900	23,573	0,497	5,52	16,893	23,577	0,079	1638,4	42,062	15,653	2,404	5,175	16,557	23,751
	256x256	0,279	5,14	20,127	22,055	0,411	5,149	20,127	22,055	0,079	1638,4	33,571	17,612	2,006	5,161	19,995	22,113
Paolina	256x256	0,378	5,401	11,572	26,863	0,434	6,219	11,574	26,861	0,074	1680,41	30,970	18,312	2,363	5,146	11,232	27,122
Boat	128x128	0,365	1,287	16,768	23,641	0,502	1,42	16,739	23,662	0,018	399,609	33,963	17,511	1,586	1,276	16,422	23,822
	128x128	0,389	1,3	15,388	24,387	0,501	1,523	15,361	24,402	0,018	399,609	31,425	18,185	1,588	1,276	15,135	24,531
	128x128	0,369	1,29	14,320	25,012	0,568	1,388	14,263	25,046	0,018	399,609	29,079	18,859	1,598	1,267	14,339	25,000
	128x128	0,474	1,305	19,118	22,502	0,521	1,497	19,080	22,519	0,024	399,609	40,703	15,938	1,717	1,270	19,445	22,355
	128x128	0,302	1,264	15,945	24,078	0,443	1,289	15,995	24,051	0,027	409,6	29,509	18,732	1,362	1,263	17,935	23,057
Paolina	128x128	0,363	1,425	13,620	25,447	0,358	1,897	13,449	25,525	0,018	420,102	30,346	18,489	1,593	1,285	13,579	25,473
Boat	64x64	1,828	0,649	136,621	5,420	2,096	0,755	111,617	7,176	0,005	102,4	33,941	17,516	13,357	0,648	136,621	5,420
	64x64	1,786	0,651	171,563	3,442	2,199	0,742	145,278	4,887	0,004	99,902	34,549	17,362	13,278	0,648	171,563	3,442
	64x64	1,813	0,648	121,702	6,425	2,178	0,744	103,171	7,860	0,005	102,4	28,759	18,955	13,281	0,648	121,702	6,425
	64x64	1,796	0,649	131,646	5,743	2,209	0,736	112,224	7,129	0,005	99,902	39,924	16,106	13,289	0,648	131,646	5,743
	64x64	1,868	0,648	134,008	5,588	2,549	0,693	123,844	6,273	0,004	102,4	28,193	19,128	13,286	0,648	134,008	5,588
Paolina	64x64	1,874	0,649	160,192	4,038	1,886	0,836	131,091	5,779	0,004	105,025	31,908	18,053	13,318	0,648	160,192	4,028

Tabela 4.75: Análise descritiva - *quadtree* original - domínio 2T - tempo de compressão.

Tempo de Compressão - QTSGLS - 2T	Média	Desvio Padrão	Entropia	3M
Tamanho da amostra =	24	24	24	24
Mínimo	0,279	0,358	0,004	1,362
Máximo	1,874	2,549	0,305	13,357
Mediana	0,5605	0,814	0,05	5,342
Média Aritmética	0,854	1,1267	0,0997	6,7276

Tabela 4.76: Análise de variância - *quadtree* original - domínio 2T - tempo de compressão: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas.

Tempo de Compressão - QTSGLS - 2T	Resultados	- 2 -
H =	73,3772	
Graus de liberdade =	3	
(p) Kruskal-Wallis =	0	
R 1 (posto médio) =	45,75	
R 2 (posto médio) =	54,5	
R 3 (posto médio) =	12,7917	
R 4 (posto médio) =	80,9583	
Comparações Student-Newman-Keuls	Dif. Postos	p-valor
Grupos ( 1 e 2) =	8,75	0,2766
Grupos ( 1 e 3) =	32,9583	< 0,0001
Grupos ( 1 e 4) =	35,2083	< 0,0001
Grupos ( 2 e 3) =	41,7083	< 0,0001
Grupos ( 2 e 4) =	26,4583	0,001
Grupos ( 3 e 4) =	68,1667	< 0,0001

Figura 4.68: Análise de variância - *quadtree* original - domínio 2T - tempo de compressão.

## Taxa de Compressão

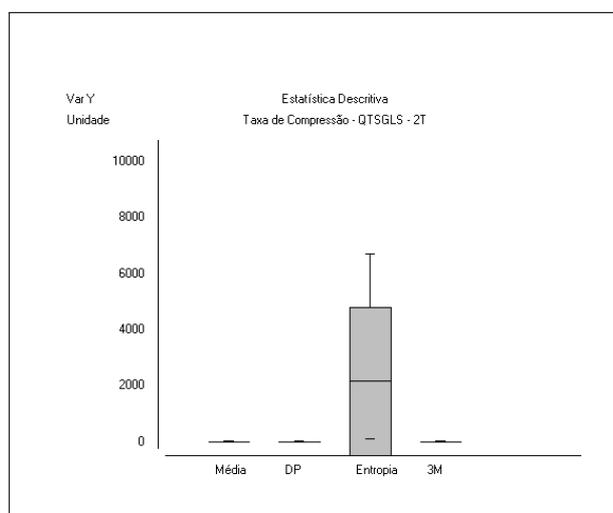
A taxa de compressão segundo a tabela 4.74 apresenta valores com padrões semelhantes, com destaque maior para a medida da entropia.

Segundo a tabela de análise descritiva 4.77, a entropia destaca-se com a maior taxa

Tabela 4.77: Análise descritiva - *quadtree* original - domínio 2T - taxa de compressão.

<b>Taxa de Compressão - QTSGLS - 2T</b>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Entropia</i>	<i>3M</i>
Tamanho da amostra =	24	24	24	24
Mínimo	0,648	0,693	99,902	0,648
Máximo	22,53	23,291	6721,641	21,296
Mediana	3,2825	3,523	1009,2705	3,2155
Média Aritmética	7,2515	7,4562	2165,1103	7,0078

de compressão da imagem, com valor 2165,1103, entre as outras medidas que possuem semelhanças em suas taxas. O gráfico da figura 4.69 ilustra essas diferenças de taxas.

Figura 4.69: Análise descritiva - *quadtree* original - domínio 2T - taxa de compressão.Tabela 4.78: Análise de variância - *quadtree* original - domínio 2T - taxa de compressão: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas.

<b>Taxa de Compressão - QTSGLS - 2T</b>	<i>Resultados</i>	- 2 -
H =	54,6757	
Graus de liberdade =	3	
(p) Kruskal-Wallis =	0	
R 1 (posto médio) =	36,5625	
R 2 (posto médio) =	40,8542	
R 3 (posto médio) =	84,5	
R 4 (posto médio) =	32,0833	
Comparações Student-Newman-Keuls	Dif. Postos	p-valor
Grupos ( 1 e 2) =	4,2917	0,5936
Grupos ( 1 e 3) =	47,9375	< 0,0001
Grupos ( 1 e 4) =	4,4792	0,5775
Grupos ( 2 e 3) =	43,6458	< 0,0001
Grupos ( 2 e 4) =	8,7708	0,2754
Grupos ( 3 e 4) =	52,4167	< 0,0001

Com o auxílio da análise de variância, nota-se que as diferenças significativas existem somente entre a medida de entropia e as demais. As comparações sem a entropia não

apresentam diferenças estatísticas significativas, como ilustrado no gráfico da figura 4.70.

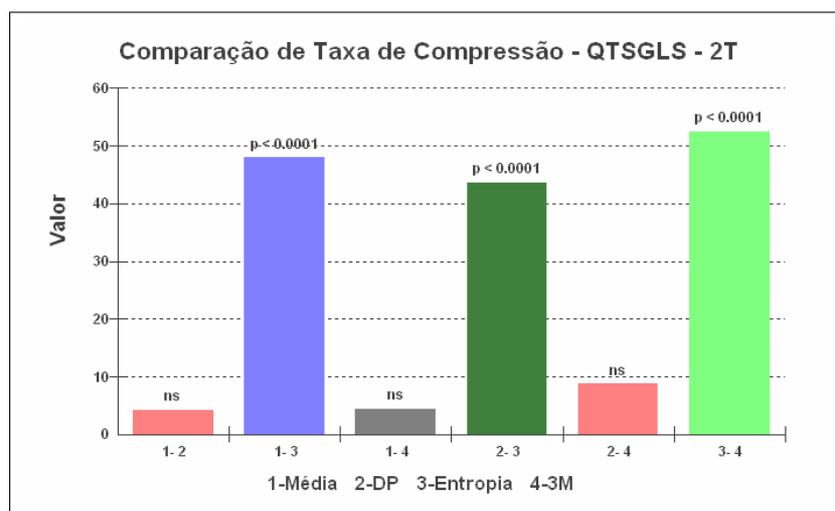


Figura 4.70: Análise de variância - *quadtree* original - domínio 2T - taxa de compressão.

Portanto, conclui-se que a entropia obteve melhor taxa de compressão nesse contexto, seguida pelo desvio padrão, média e as três medidas combinadas.

## RMSE

O comportamento da qualidade das imagens nesse contexto piora à medida que as imagem diminuem de tamanho, exceto na entropia que se mantém na mesma proporção, como apresentado na tabela 4.74.

Tabela 4.79: Análise descritiva - *quadtree* original - domínio 2T - RMSE.

RMSE - QTSGLS - 2T	Média	Desvio Padrão	Entropia	3M
Tamanho da amostra =	24	24	24	24
Mínimo	10,696	10,684	28,193	10,015
Máximo	171,563	145,28	42,101	171,563
Mediana	16,3565	16,362	33,2245	16,4895
Média Aritmética	47,2285	41,848	33,565	47,1026

A análise descritiva apresenta a entropia como a medida que obteve a melhor qualidade, em relação às outras medidas. O resultado desta análise está na tabela 4.79 e ilustrado no gráfico da figura 4.71.

Com a análise de variância da tabela 4.80, pode-se verificar que, entre essas medidas, há algumas diferenças significativas como o gráfico da figura 4.72.

Portanto, conclui-se que a entropia obteve a melhor qualidade entre as medidas e

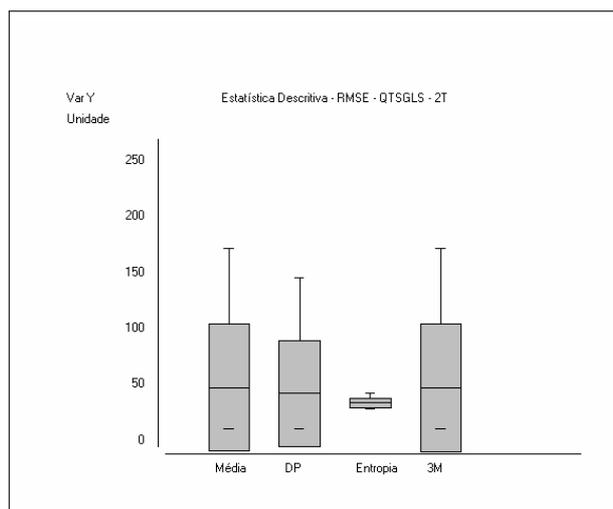


Figura 4.71: Análise descritiva - *quadtree* original - domínio 2T - RMSE.

Tabela 4.80: Análise de variância - *quadtree* original - domínio 2T - RMSE: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas.

RMSE - QTSGLS - 2T	Resultados	- 2 -
H =	13,4187	
Graus de liberdade =	3	
(p) Kruskal-Wallis =	0,0038	
R 1 (posto médio) =	43,4792	
R 2 (posto médio) =	41,5625	
R 3 (posto médio) =	66,5	
R 4 (posto médio) =	42,4583	
Comparações Student-Newman-Keuls	Dif. Postos	p-valor
Grupos ( 1 e 2) =	1,9167	0,8116
Grupos ( 1 e 3) =	23,0208	0,0042
Grupos ( 1 e 4) =	1,0208	0,899
Grupos ( 2 e 3) =	24,9375	0,0019
Grupos ( 2 e 4) =	0,8958	0,9113
Grupos ( 3 e 4) =	24,0417	0,0028

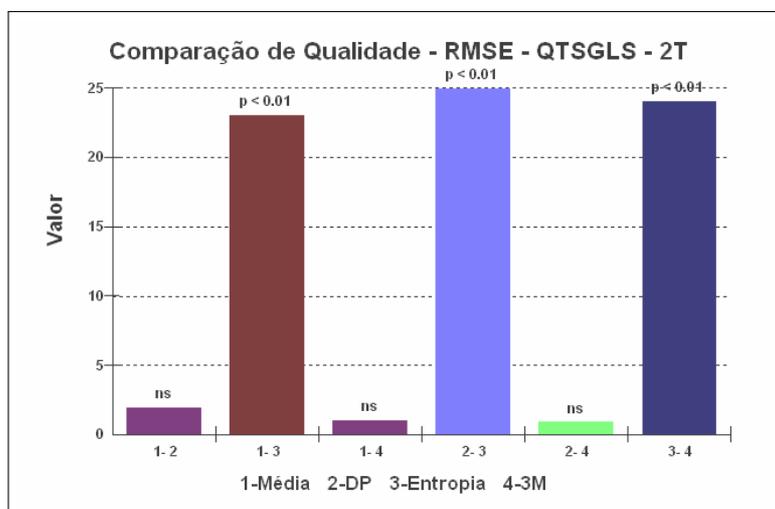


Figura 4.72: Análise de variância - *quadtree* original - domínio 2T - RMSE.

também foi a única medida que obteve diferenças significativas nas comparações de análise de variância.

## PSNR

A tabela 4.74 apresenta os valores de PSNR, com valor mais baixo para a medida de entropia.

Tabela 4.81: Análise descritiva - *quadtree* original - domínio 2T - PSNR.

<b>PSNR - QTSGLS - 2T</b>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Entropia</i>	<i>3M</i>
Tamanho da amostra =	24	24	24	24
Mínimo	3,442	4,887	15,645	3,442
Máximo	27,547	27,556	19,128	28,118
Mediana	23,8595	23,857	17,702	23,7865
Média Aritmética	19,6392	20,005	17,6709	19,7294

A análise descritiva da tabela 4.81, no item média aritmética, mostra os valores obtidos para cada medida. Esses valores estão ilustrados no gráfico da figura 4.73.

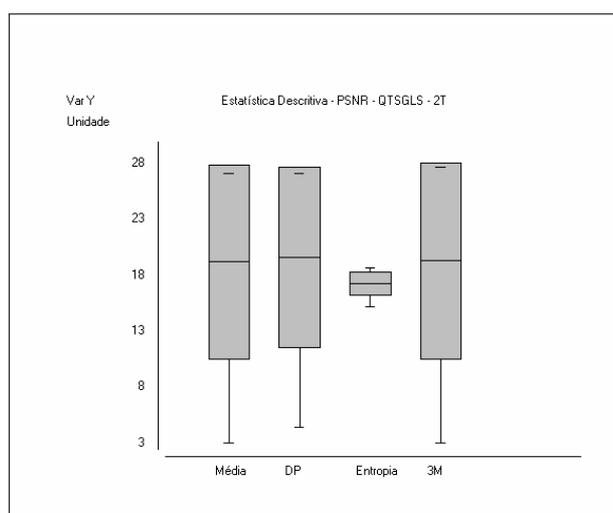


Figura 4.73: Análise descritiva - *quadtree* original - domínio 2T - PSNR.

A análise de variância para as medidas PSNR obtidas são mostradas na tabela 4.82.

O desvio padrão obteve qualidade (medida PSNR) um pouco superior às demais, seguida das três medidas combinadas, média e entropia.

A medida de entropia numericamente obtém o melhor resultado, mas visualmente é muito ruim. Essas diferenças numéricas encontradas que contrastam com os resultados

Tabela 4.82: Análise de variância - *quadtree* original - domínio 2T - PSNR: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas.

PSNR - QTSGLS - 2T	Resultados	- 2 -
H =	13,4173	
Graus de liberdade =	3	
(p) Kruskal-Wallis =	0,0038	
R 1 (posto médio) =	53,5417	
R 2 (posto médio) =	55,4375	
R 3 (posto médio) =	30,5	
R 4 (posto médio) =	54,5208	
Comparações Student-Newman-Keuls	Dif. Postos	p-valor
Grupos ( 1 e 2) =	1,8958	0,8136
Grupos ( 1 e 3) =	23,0417	0,0042
Grupos ( 1 e 4) =	0,9792	0,9031
Grupos ( 2 e 3) =	24,9375	0,0019
Grupos ( 2 e 4) =	0,9167	0,9092
Grupos ( 3 e 4) =	24,0208	0,0028

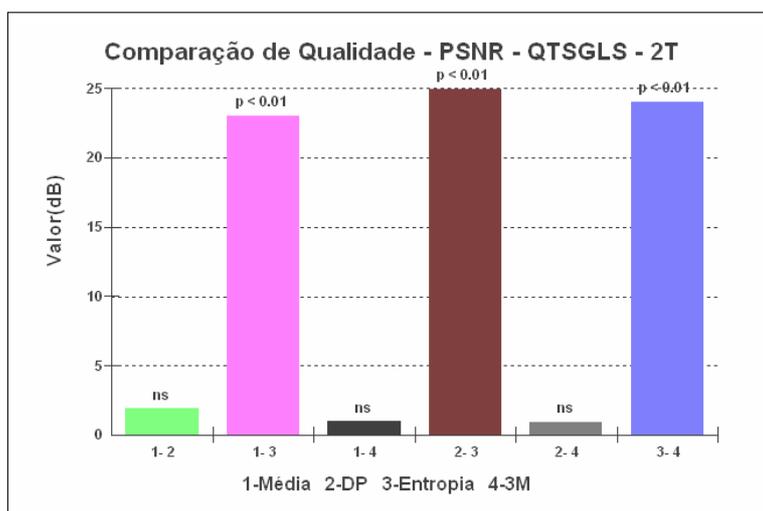


Figura 4.74: Análise de variância - *quadtree* original - domínio 2T - PSNR.

visuais devem-se à variação de valores dentro do conjunto avaliado estatisticamente, pois a medida da média apresenta os melhores resultados visuais de qualidade.

## Resultado visual das imagens comprimidas

As imagens comprimidas, ilustradas na figura 4.75, são os resultados visuais do processo de compressão fractal do algoritmo *quadtree* sem GLS com configuração de bloco 2T e medida de distância baseada na média. A sequência das imagens é a mesma apresentada na tabela 4.74.

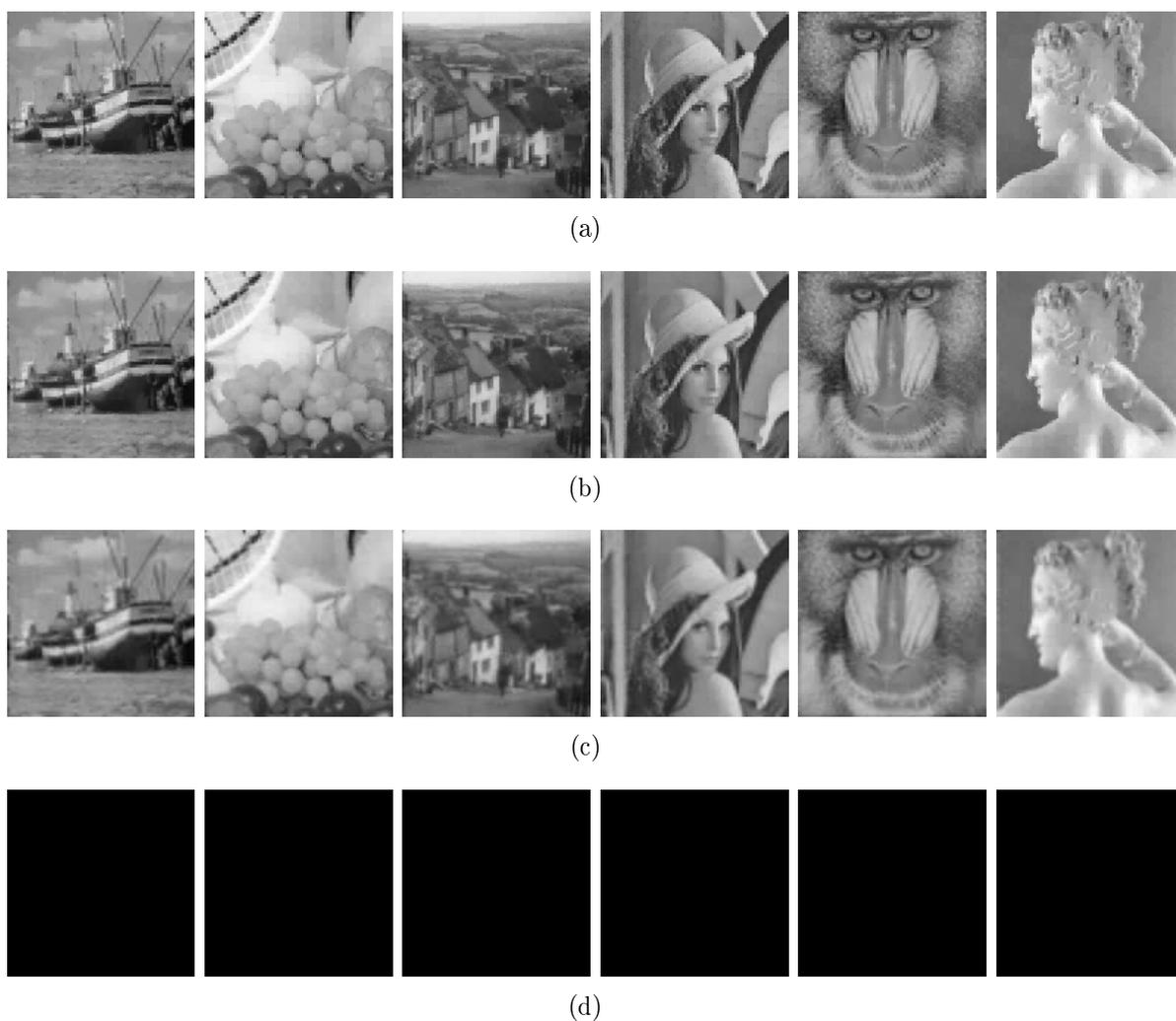


Figura 4.75: Imagens comprimidas com a *quadtree* sem GLS e configuração de bloco 2T e medida de distância da média. Os respectivos valores dos resultados das imagens estão na mesma sequência da tabela 4.74: (a) imagens com tamanho de bloco  $512 \times 512$  pixels; (b) imagens com tamanho de bloco  $256 \times 256$  pixels; (c) imagens com tamanho de bloco  $128 \times 128$  pixels; (d) imagens com tamanho de bloco  $64 \times 64$  pixels.

### 4.4.3 Resultados da Quadtree - 3T

Esta seção apresenta os resultados do método de compressão com particionamento *quadtree* para o conjunto 3T.

#### Tempo de Compressão

O padrão apresentado pelos resultados dos tempos de compressão, segundo a tabela 4.83, mostram que, na maioria das medidas, o tempo aumenta quando o tamanho da imagem é de  $256 \times 256$  pixels.

A análise descritiva ilustra esse comportamento e comprova que a entropia obteve um tempo de compressão muito abaixo das outras medidas nesse contexto, como também ilustrado no gráfico da figura 4.76.

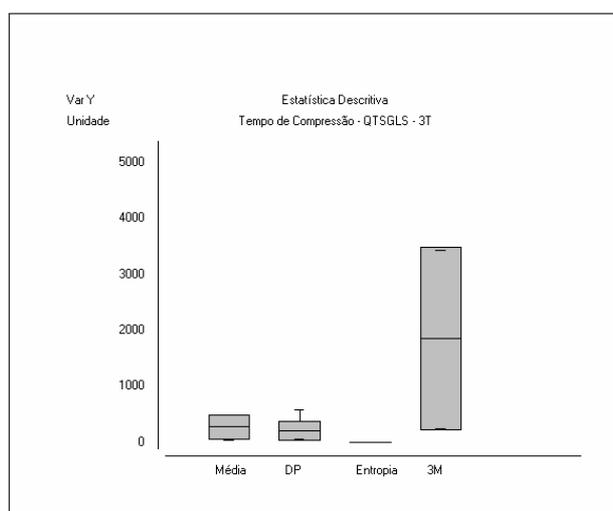


Figura 4.76: Análise descritiva - *quadtree* original - domínio 3T - tempo de compressão

No entanto, a análise de variância indica que, mesmo havendo muita diferença de tempo da medida entropia para as outras medidas, não é apenas esta que se difere em tempo nas comparações, como apresentado na tabela 4.85.

Portanto, conclui-se com o gráfico ilustrado na figura 4.77 e a análise descritiva que a entropia obteve o melhor tempo, seguida do desvio padrão, média e as três medidas combinadas. Além disso, pode-se notar que há diferenças significativas entre a entropia e as demais, bem com entre o desvio padrão e as três medidas combinadas.

Tabela 4.83: Compressão fractal de imagens por *quadtree* sem GLS (QTSGLS) - domínio 3T.

Domínio: 3T Imagem	Média: Média 3T						Algoritmo: Quadtree Original						Média: Entropia 3T						Média: 3M 3T					
	Tempo(s)	Taxa	RMSE	PSNR	Tempo(s)	Taxa	Tempo(s)	Taxa	RMSE	PSNR	Tempo(s)	Taxa	Tempo(s)	Taxa	RMSE	PSNR	Tempo(s)	Taxa	Tempo(s)	Taxa	RMSE	PSNR		
Boat	512x512	60,644	1,171	10,875	27,402	1,404	69,793	10,862	27,412	0,296	6721,641	0,296	6721,641	36,198	16,957	300,343	1,171	10,875	27,402	1,171	10,875	16,957	300,343	
Fruits	512x512	68,017	1,194	9,917	28,203	1,631	77,970	8,378	29,668	0,323	6553,6	0,323	6553,6	33,465	17,639	332,546	1,194	9,917	28,203	1,194	9,917	17,639	332,546	
Goldhill	512x512	46,637	1,169	7,788	30,302	1,314	59,245	7,780	30,311	0,293	6393,756	0,293	6393,756	30,847	18,347	236,967	1,169	7,788	30,302	1,169	7,788	18,347	236,967	
Lenna	512x512	66,722	1,132	10,025	28,109	1,326	81,894	9,841	28,270	0,292	6553,6	0,292	6553,6	42,155	15,634	325,686	1,132	10,025	28,109	1,132	10,025	15,634	325,686	
Mandrill	512x512	48,008	1,113	13,557	25,488	1,455	69,972	13,552	25,491	0,294	6393,756	0,294	6393,756	33,549	17,617	237,488	1,113	13,557	25,488	1,113	13,557	17,617	237,488	
Paolina	512x512	67,353	1,203	7,671	30,433	1,872	52,535	7,657	30,449	0,291	6721,641	0,291	6721,641	31,189	18,251	330,707	1,203	7,671	30,433	1,203	7,671	18,251	330,707	
Boat	256x256	484,024	0,648	137,555	5,361	0,908	381,267	92,070	8,848	0,073	1680,41	0,073	1680,41	36,186	16,960	3424,358	0,648	137,555	5,361	0,648	137,555	16,960	3424,358	
Fruits	256x256	485,584	0,648	171,973	3,422	1,079	228,520	80,822	9,980	0,074	1598,439	0,074	1598,439	33,405	17,655	3416,889	0,648	171,973	3,422	0,648	171,973	17,655	3416,889	
Goldhill	256x256	487,003	0,648	122,268	6,385	0,855	387,915	75,461	10,576	0,078	1638,4	0,078	1638,4	42,129	15,639	3421,274	0,648	122,268	6,385	0,648	122,268	15,639	3421,274	
Lenna	256x256	494,281	0,648	132,449	5,690	0,914	316,160	73,899	10,758	0,074	1638,4	0,074	1638,4	33,633	17,596	3417,276	0,648	132,449	5,690	0,648	132,449	17,596	3417,276	
Mandrill	256x256	481,135	0,648	135,309	5,504	0,725	575,182	111,619	7,176	0,074	1638,4	0,074	1638,4	31,072	18,283	3423,264	0,648	135,309	5,504	0,648	135,309	18,283	3423,264	
Paolina	256x256	486,499	0,648	160,375	4,028	1,242	178,816	75,158	10,611	0,073	1680,41	0,073	1680,41	31,072	18,283	3423,264	0,648	160,375	4,028	0,648	160,375	18,283	3423,264	
Boat	128x128	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	
Fruits	128x128	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	
Goldhill	128x128	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	
Lenna	128x128	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	
Mandrill	128x128	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	
Paolina	128x128	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	
Boat	64x64	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	
Fruits	64x64	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	
Goldhill	64x64	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	
Lenna	64x64	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	
Mandrill	64x64	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	
Paolina	64x64	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	

Legenda

\* Número máximo de partições *quadtree* deve ser reduzido.

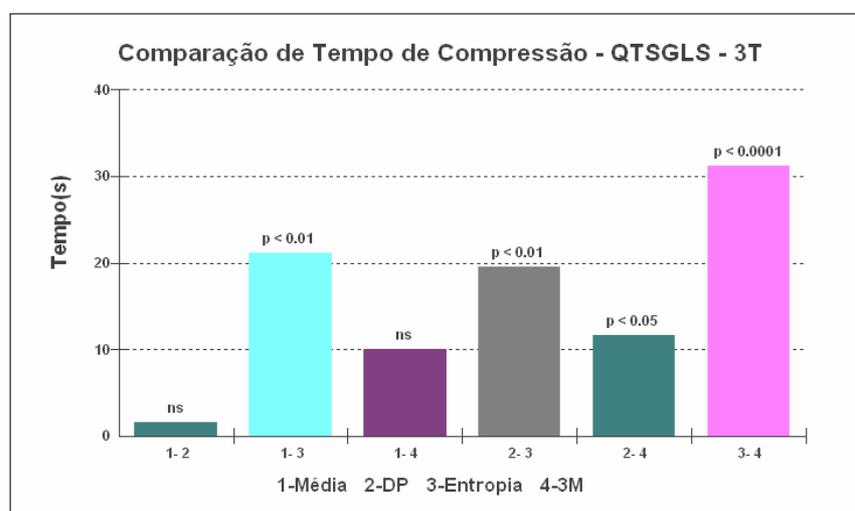
\*\* ERRO.

Tabela 4.84: Análise descritiva - *quadtree* original - domínio 3T - tempo de compressão.

Tempo de Compressão - QTSGLS - 3T	Média	Desvio Padrão	Entropia	3M
Tamanho da amostra =	12	12	12	12
Mínimo	46,637	52,535	0,073	236,967
Máximo	494,281	575,182	0,323	3427,732
Mediana	274,576	130,355	0,1845	1874,7175
Média Aritmética	272,9923	206,606	0,1863	1857,8775

Tabela 4.85: Análise de variância - *quadtree* original - domínio 3T - tempo de compressão: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas.

Tempo de Compressão - QTSGLS - 3T	Resultados	- 2 -
H =	31,3614	
Graus de liberdade =	3	
(p) Kruskal-Wallis =	0	
R 1 (posto médio) =	27,6667	
R 2 (posto médio) =	26,0833	
R 3 (posto médio) =	6,5	
R 4 (posto médio) =	37,75	
Comparações Student-Newman-Keuls	Dif. Postos	p-valor
Grupos ( 1 e 2) =	1,5833	0,7818
Grupos ( 1 e 3) =	21,1667	0,0002
Grupos ( 1 e 4) =	10,0833	0,0777
Grupos ( 2 e 3) =	19,5833	0,0006
Grupos ( 2 e 4) =	11,6667	0,0412
Grupos ( 3 e 4) =	31,25	< 0,0001

Figura 4.77: Análise de variância - *quadtree* original - domínio 3T - tempo de compressão.

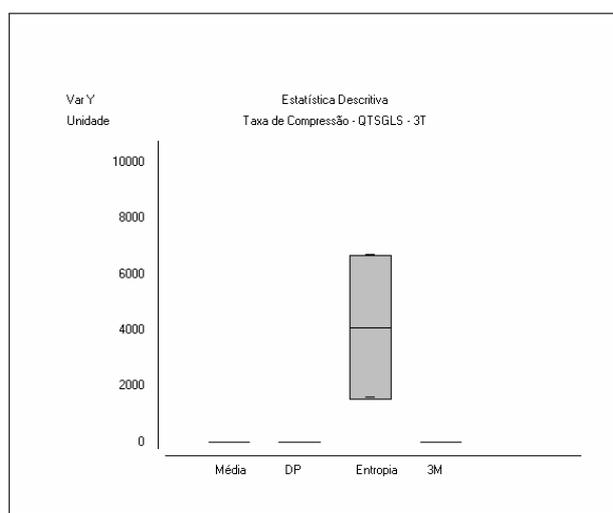
## Taxa de Compressão

A taxa de compressão na tabela 4.83 mostra que, enquanto todas as medidas possuem taxas baixas, a entropia apresenta uma taxa muito alta, conforme também a tabela 4.86 da análise descritiva.

Tabela 4.86: Análise descritiva - *quadtree* original - domínio 3T - taxa de compressão.

Taxa de Compressão - QTSGLS - 3T	Média	Desvio Padrão	Entropia	3M
Tamanho da amostra =	12	12	12	12
Mínimo	0,648	0,725	1598,439	0,648
Máximo	1,203	1,872	6721,641	1,203
Mediana	0,8805	1,1985	4037,083	0,8805
Média Aritmética	0,9058	1,2021	4097,7077	0,9058

O gráfico da figura 4.78 mostra claramente a diferença entre a entropia e as outras medidas nesse contexto.

Figura 4.78: Análise descritiva - *quadtree* original - domínio 3T - taxa de compressão.

A análise de variância da tabela 4.87 também mostra as diferenças entre as medidas.

Tabela 4.87: Análise de variância - *quadtree* original - domínio 3T - taxa de compressão: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas.

Taxa de Compressão - QTSGLS - 3T	Resultados	- 2 -
H =	30,628	
Graus de liberdade =	3	
(p) Kruskal-Wallis =	0	
R 1 (posto médio) =	15,3333	
R 2 (posto médio) =	24,8333	
R 3 (posto médio) =	42,5	
R 4 (posto médio) =	15,3333	
Comparações Student-Newman-Keuls	Dif. Postos	p-valor
Grupos ( 1 e 2) =	9,5	0,0965
Grupos ( 1 e 3) =	27,1667	< 0,0001
Grupos ( 1 e 4) =	0	1
Grupos ( 2 e 3) =	17,6667	0,002
Grupos ( 2 e 4) =	9,5	0,0965
Grupos ( 3 e 4) =	27,1667	< 0,0001

Na tabela de análise de variância, a única medida que apresenta diferenças estatísticas

significativas em comparação com as outras medidas é a entropia. Essas diferenças estão ilustradas no gráfico da figura 4.79.

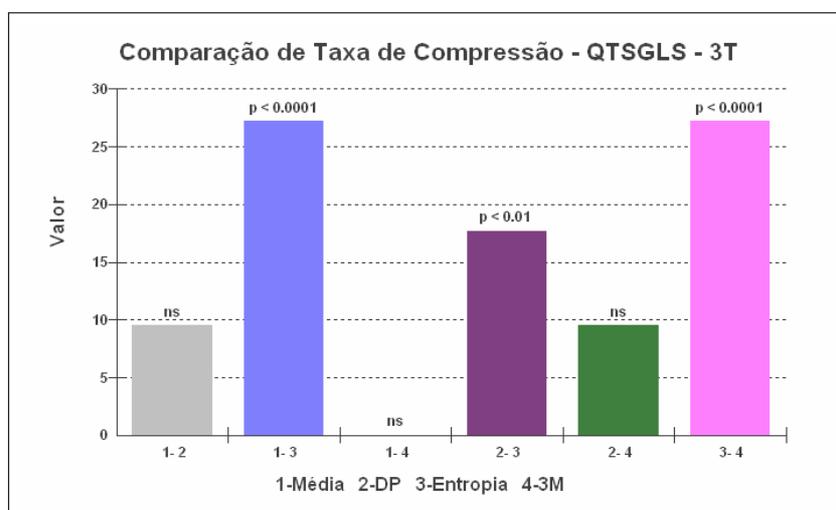


Figura 4.79: Análise de variância - *quadtree* original - domínio 3T - taxa de compressão.

Portanto, conclui-se que a medida que obteve melhor taxa de compressão foi a entropia, seguida do desvio padrão, média e as três medidas combinadas. A entropia também é a única medida que apresenta diferenças significativas entre as medidas.

## RMSE

A medida de qualidade RMSE das imagens piora quando a imagem tem um tamanho de  $256 \times 256$  pixels, como visto nas medidas pela tabela 4.83.

Tabela 4.88: Análise descritiva - *quadtree* original - domínio 3T - RMSE.

RMSE - QTSGLS - 3T	Média	Desvio Padrão	Entropia	3M
Tamanho da amostra =	12	12	12	12
Mínimo	7,671	7,657	30,616	7,671
Máximo	171,973	111,619	42,155	171,973
Mediana	67,9125	43,7255	33,507	67,9125
Média Aritmética	76,6468	47,2583	34,537	76,6468

Na tabela de análise descritiva 4.88, no item média aritmética, verifica-se que a entropia é a medida que obteve melhor qualidade, com o valor 34,537. Esse resultado é ilustrado no gráfico da figura 4.80.

Porém, quando se utiliza a análise de variância entre as medidas de qualidade, não há diferença estatística significativa entre as medidas.

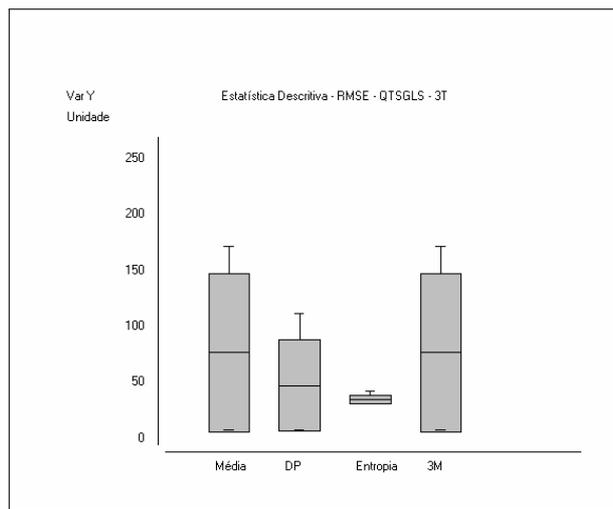


Figura 4.80: Análise descritiva - *quadtree* original - domínio 3T - RMSE.

Tabela 4.89: Análise de variância - *quadtree* original - domínio 3T - RMSE: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas.

RMSE - QTSGLS - 3T	Resultados
H =	1,2355
Graus de liberdade =	3
(p) Kruskal-Wallis =	0,7445

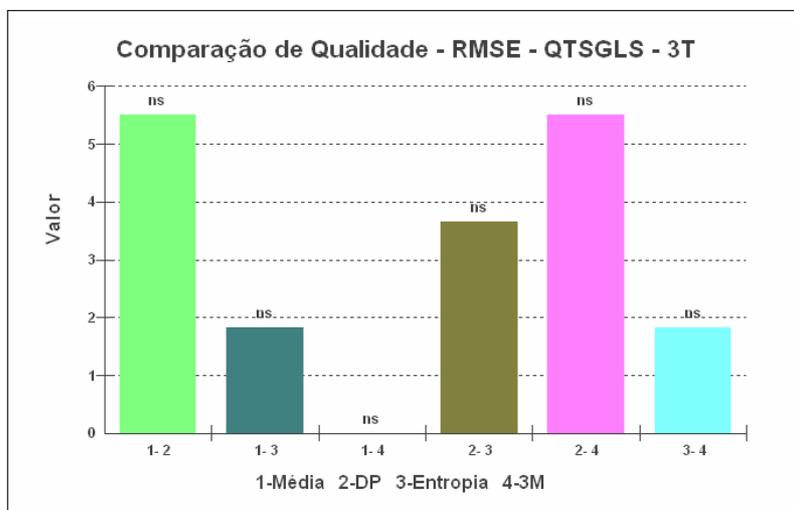


Figura 4.81: Análise de variância - *quadtree* original - domínio 3T - RMSE.

Portanto, conclui-se que a medida de entropia obteve a melhor medida de qualidade, entretanto, entre os conjuntos de imagens comprimidas, não há diferenças estatísticas significativas que comprovem qual das medidas foi a melhor.

## PSNR

De acordo com o comportamento apresentado na medida RMSE, a qualidade das imagens na medida PSNR diminui quando o tamanho é de  $256 \times 256$  pixels, conforme a tabela 4.83.

Tabela 4.90: Análise descritiva - *quadtree* original - domínio 3T - PSNR.

<b>PSNR - QTSGLS - 3T</b>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Entropia</i>	<i>3M</i>
Tamanho da amostra =	12	12	12	12
Mínimo	3,422	7,176	15,634	3,422
Máximo	30,433	30,449	18,412	30,433
Mediana	15,9365	18,1245	17,628	15,9365
Média Aritmética	16,6939	19,1292	17,4158	16,6939

Segundo a tabela de análise descritiva 4.90, o desvio padrão obteve a melhor qualidade nas imagens, como ilustrado no gráfico da figura 4.82.

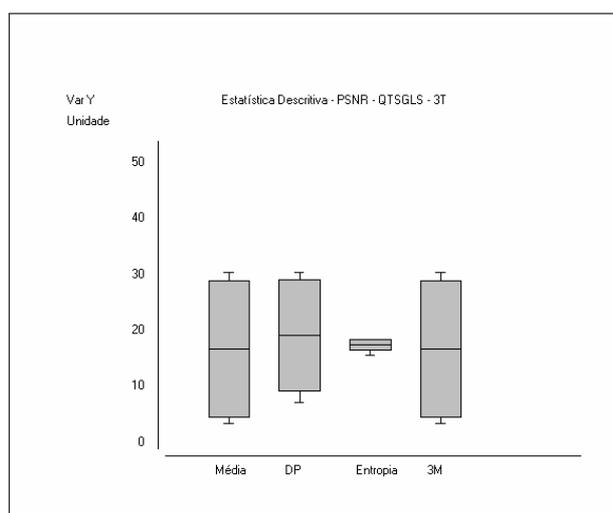


Figura 4.82: Análise descritiva - *quadtree* original - domínio 3T - PSNR.

Tabela 4.91: Análise de variância - *quadtree* original - domínio 3T - PSNR: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas.

<b>PSNR - QTSGLS - 3T</b>	<i>Resultados</i>
H =	1,2355
Graus de liberdade =	3
(p) Kruskal-Wallis =	0,7445

No entanto, quando as medidas são comparadas pela análise de variância, não há diferenças significativas, conforme mostra o resultado de  $p < 0,7445$  do item Kruskal-Wallis da tabela 4.91.

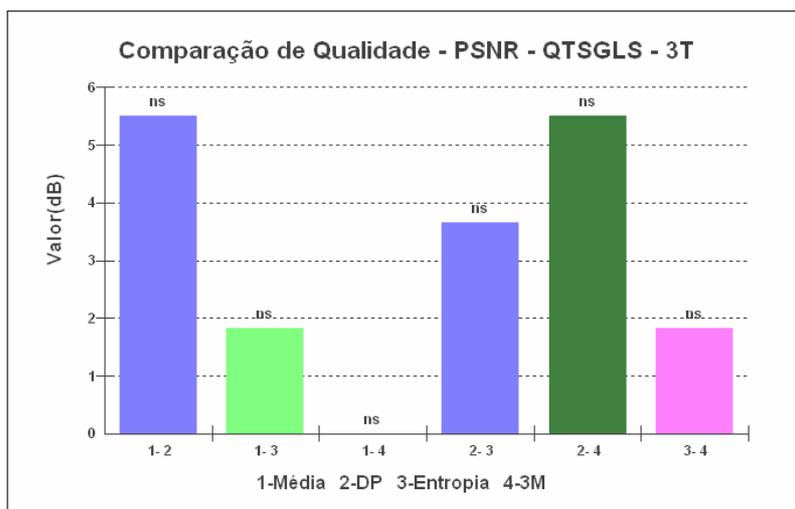


Figura 4.83: Análise de variância - *quadtree* original - domínio 3T - PSNR.

Portanto, verifica-se que a medida com melhor qualidade em termos de valores PSNR é o desvio padrão, seguido pela entropia, média e as três medidas combinadas.

O contexto apresentado no 3T difere em medida dos anteriores (1T e 2T), pois a medida de melhor tempo e qualidade de imagem é o desvio padrão, porém, somente em imagens com tamanho  $512 \times 152$  pixels.

## Resultado visual das imagens comprimidas

As imagens comprimidas ilustradas na figura 4.84 são os resultados visuais do processo de compressão fractal do algoritmo baseado em *quadtree* sem GLS com configuração de bloco 3T e medida de distância baseada na média. A sequência das imagens é a mesma apresentada na tabela 4.83.



Figura 4.84: Imagens comprimidas com a *quadtree* sem GLS e configuração de bloco 3T e medida de distância da média. Os respectivos valores dos resultados das imagens estão na mesma sequência da tabela 4.83: (a) imagens com tamanho de bloco  $512 \times 512$  pixels; (b) imagens com tamanho de bloco  $256 \times 256$  pixels; (c) imagens com tamanho de bloco  $128 \times 128$  pixels; (d) imagens com tamanho de bloco  $64 \times 64$  pixels.

#### 4.4.4 Resultados da Quadtree - 4T

Esta seção apresenta os resultados do método de compressão com particionamento *quadtree* para o conjunto 4T.

#### Tempo de Compressão

A maioria das medidas utilizadas no algoritmo apresenta um aumento do tempo de compressão nesse contexto quando as imagens têm tamanho de  $256 \times 256$  pixels, segundo a tabela 4.92.

A partir da análise descritiva, verifica-se que a entropia foi a medida mais rápida durante a compressão da imagem, de acordo com a tabela 4.93 com o tempo de 0,3116s.

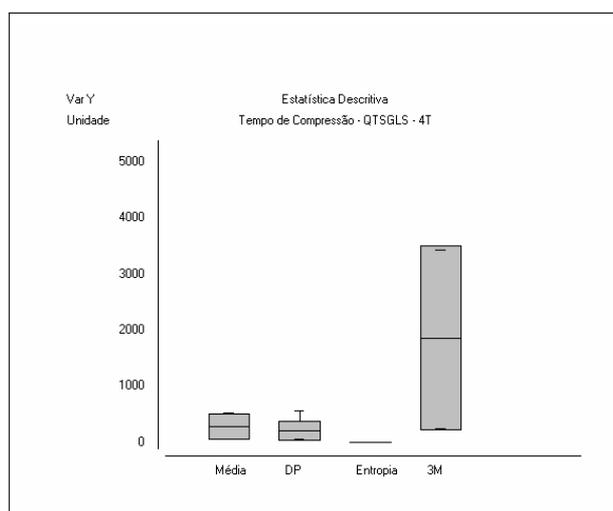


Figura 4.85: Análise descritiva - *quadtree* original - domínio 4T - tempo de compressão.

Com um valor muito superior, as três medidas combinadas apresentam o pior tempo entre as medidas consideradas. Esses resultados são ilustrados no gráfico da figura 4.85.

Quando as medidas são comparadas através da análise de variância, nota-se que somente entre a média e desvio padrão, e média e as três medidas combinadas é que não há diferenças estatísticas significativas. Nas outras comparações, há diferenças estatísticas em relação ao tempo, como visto na tabela 4.94 e ilustrada no gráfico da figura 4.86.

Portanto, conclui-se que a entropia obteve o melhor tempo de compressão, seguida do desvio padrão, média e as três medidas combinadas.

Tabela 4.92: Compressão fractal de imagens por *quadtree* sem GLS (QTSGLS) - domínio 4T.

Domínio: 4T		Medida: Média 4T						Medida: Desvio Padrão 4T						Medida: Entropia 4T						Medida: 3M 4T					
Imagem	Tempo(s)	Taxa	RMSE	PSNR	Tempo(s)	Taxa	RMSE	PSNR	Tempo(s)	Taxa	RMSE	PSNR	Tempo(s)	Taxa	RMSE	PSNR	Tempo(s)	Taxa	RMSE	PSNR					
Boat	60,309	1,171	10,875	27,402	75,596	1,404	10,862	27,412	0,463	385,505	26,628	19,624	299,563	1,171	10,875	27,402	299,563	1,171	10,875	27,402					
Fruits	512x512	68,896	9,917	28,203	63,684	1,631	8,378	29,668	0,541	400,219	22,867	20,947	333,446	1,195	9,917	28,203	333,446	1,195	9,917	28,203					
Goldhill	512x512	47,985	7,788	30,302	58,893	1,314	7,780	30,311	0,541	382,134	20,981	21,694	235,790	1,169	7,788	30,302	235,790	1,169	7,788	30,302					
Lenna	512x512	67,620	1,132	10,025	81,331	1,326	9,841	28,270	0,442	385,505	25,873	19,874	325,922	1,132	10,025	28,109	325,922	1,132	10,025	28,109					
Mandrill	512x512	48,222	1,113	13,557	70,454	1,155	13,552	25,491	0,518	383,812	25,060	20,151	237,373	1,113	13,557	25,488	237,373	1,113	13,557	25,488					
Paolina	512x512	67,032	7,671	30,433	52,181	1,873	7,657	30,449	0,477	380,470	18,503	22,786	330,753	1,203	7,671	30,433	330,753	1,203	7,671	30,433					
Boat	256x256	488,092	0,648	137,555	489,763	0,908	92,070	8,848	0,120	95,394	26,025	19,823	3418,983	0,648	137,555	488,092	3418,983	0,648	137,555	488,092					
Fruits	256x256	489,763	3,422	171,973	228,832	1,079	80,822	9,980	0,140	98,107	22,738	20,996	3436,704	0,648	171,973	489,763	3436,704	0,648	171,973	489,763					
Goldhill	256x256	485,290	0,648	122,268	6,385	0,855	75,461	10,576	0,141	95,117	20,729	21,799	3428,978	0,648	122,268	485,290	3428,978	0,648	122,268	485,290					
Lenna	256x256	495,724	0,648	132,449	5,690	0,915	73,899	10,758	0,116	95,117	25,700	19,932	3436,905	0,648	132,449	495,724	3436,905	0,648	132,449	495,724					
Mandrill	256x256	527,653	0,648	135,309	5,504	0,725	111,619	7,176	0,122	95,394	24,872	20,217	3430,486	0,648	135,309	5,504	3430,486	0,648	135,309	5,504					
Paolina	256x256	492,606	0,648	160,375	4,028	1,242	75,158	10,611	0,118	94,979	18,411	22,829	3435,779	0,648	160,375	4,028	3435,779	0,648	160,375	4,028					
Boat	128x128	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**					
Fruits	128x128	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**					
Goldhill	128x128	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**					
Lenna	128x128	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**					
Mandrill	128x128	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**					
Paolina	128x128	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**					
Boat	64x64	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**					
Fruits	64x64	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**					
Goldhill	64x64	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**					
Lenna	64x64	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**					
Mandrill	64x64	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**					
Paolina	64x64	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**					

Legenda

\* Número máximo de partições *quadtree* deve ser reduzido.

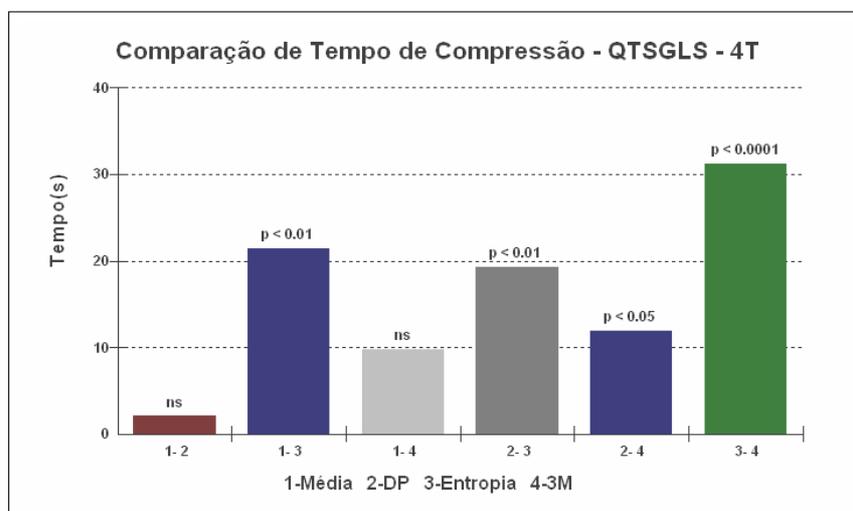
\*\* ERRO.

Tabela 4.93: Análise descritiva - *quadtree* original - domínio 4T - tempo de compressão.

Tempo de Compressão - QTSGLS - 4T	Média	Desvio Padrão	Entropia	3M
Tamanho da amostra =	12	12	12	12
Mínimo	47,985	52,181	0,116	235,79
Máximo	527,653	571,832	0,541	3436,905
Mediana	277,093	135,487	0,2915	1876,2145
Média Aritmética	278,266	205,824	0,3116	1862,3902

Tabela 4.94: Análise de variância - *quadtree* original - domínio 4T - tempo de compressão: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas.

Tempo de Compressão - QTSGLS - 4T	Resultados	- 2 -
H =	31,4107	
Graus de liberdade =	3	
(p) Kruskal-Wallis =	0	
R 1 (posto médio) =	27,9167	
R 2 (posto médio) =	25,8333	
R 3 (posto médio) =	6,5	
R 4 (posto médio) =	37,75	
Comparações Student-Newman-Keuls	Dif. Postos	p-valor
Grupos ( 1 e 2) =	2,0833	0,7155
Grupos ( 1 e 3) =	21,4167	0,0002
Grupos ( 1 e 4) =	9,8333	0,0853
Grupos ( 2 e 3) =	19,3333	0,0007
Grupos ( 2 e 4) =	11,9167	0,0371
Grupos ( 3 e 4) =	31,25	< 0,0001

Figura 4.86: Análise de variância - *quadtree* original - domínio 4T - tempo de compressão.

## Taxa de Compressão

A taxa de compressão apresenta uma variação de resultados diferentes entre as medidas, segundo a tabela 4.92.

Segundo a análise descritiva, a medida que obteve maior taxa de compressão foi a

Tabela 4.95: Análise descritiva - *quadtree* original - domínio 4T - taxa de compressão.

<b>Taxa de Compressão - QTSGLS - 4T</b>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Entropia</i>	<i>3M</i>
Tamanho da amostra =	12	12	12	12
Mínimo	0,648	0,725	94,979	0,648
Máximo	1,203	1,873	400,219	1,203
Mediana	0,8805	1,1985	239,2885	0,8805
Média Aritmética	0,9059	1,2023	240,9794	0,9059

entropia, com valor 240,9794 no item média aritmética da tabela 4.95, como ilustrado na figura 4.87.

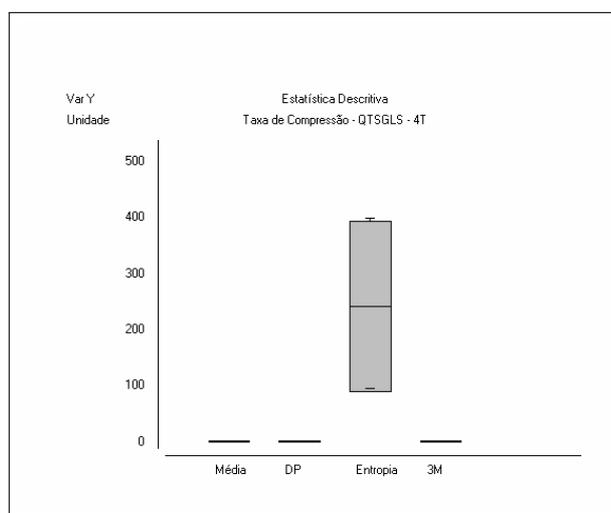


Figura 4.87: Análise Descritiva - Quadtree original - Domínio 4T - Taxa de Compressão.

Tabela 4.96: Análise de variância - *quadtree* original - domínio 4T - taxa de compressão: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas.

<b>Taxa de Compressão - QTSGLS - 4T</b>	<i>Resultados</i>	<i>- 2 -</i>
H =	30,623	
Graus de liberdade =	3	
(p) Kruskal-Wallis =	0	
R 1 (posto médio) =	15,3333	
R 2 (posto médio) =	24,8333	
R 3 (posto médio) =	42,5	
R 4 (posto médio) =	15,3333	
Comparações Student-Newman-Keuls	Dif. Postos	p-valor
Grupos ( 1 e 2) =	9,5	0,0965
Grupos ( 1 e 3) =	27,1667	< 0,0001
Grupos ( 1 e 4) =	0	1
Grupos ( 2 e 3) =	17,6667	0,002
Grupos ( 2 e 4) =	9,5	0,0965
Grupos ( 3 e 4) =	27,1667	< 0,0001

A entropia é a única medida que se difere nas comparações feitas das medidas por meio da análise de variância. Essa análise apresenta seus resultados na tabela 4.96 e no

gráfico da figura 4.88.

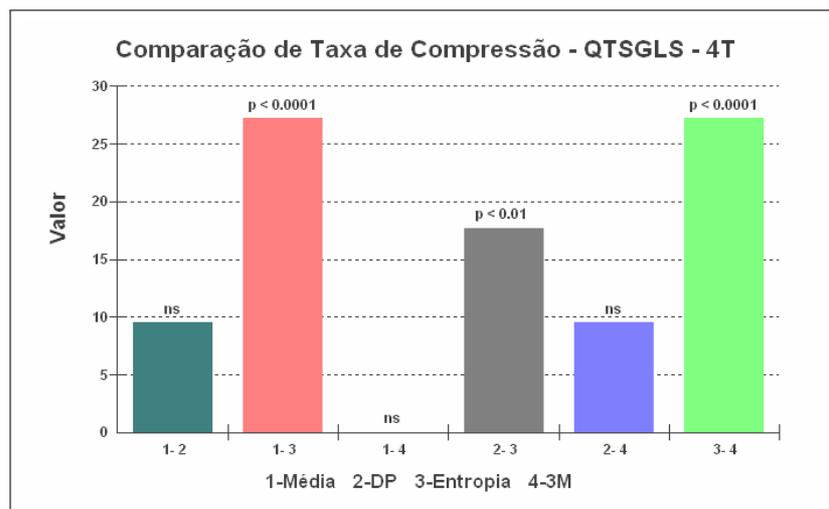


Figura 4.88: Análise de variância - *quadtree* original - domínio 4T - taxa de compressão.

Portanto, conclui-se que a entropia obteve maior taxa de compressão, seguida do desvio padrão, média e as três medidas combinadas.

## RMSE

Os valores RMSE das medidas apresentam variações de qualidade entre as imagens comprimidas, como apresentado na tabela 4.92.

Tabela 4.97: Análise descritiva - *quadtree* original - domínio 4T - RMSE.

RMSE - QTSGLS - 4T	Média	Desvio Padrão	Entropia	3M
Tamanho da amostra =	12	12	12	12
Mínimo	7,671	7,657	18,411	7,671
Máximo	171,973	111,619	26,628	171,973
Mediana	67,9125	43,7255	23,8695	67,9125
Média Aritmética	76,6468	47,2583	23,1989	76,6468

A análise descritiva apresenta, no item média aritmética da tabela 4.97, os valores resultantes dessa análise, que mostra a entropia obteve melhor qualidade nas imagens no seu conjunto. Esses resultados são ilustrados na figura 4.89.

Tabela 4.98: Análise de variância - *quadtree* original - domínio 4T - RMSE: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas.

RMSE - QTSGLS - 4T	Resultados
H =	1,2355
Graus de liberdade =	3
(p) Kruskal-Wallis =	0,7445

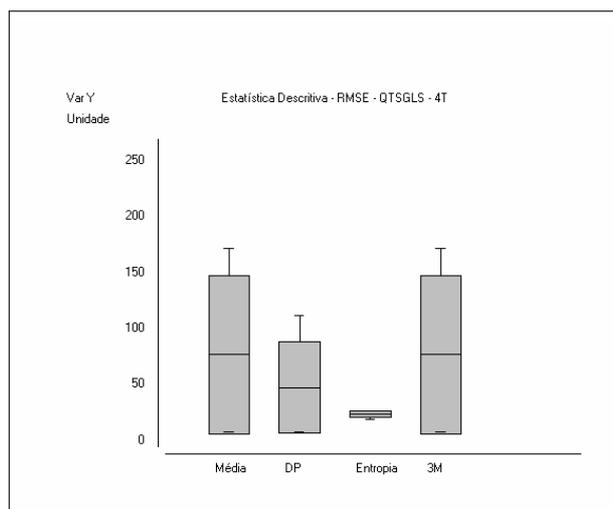


Figura 4.89: Análise descritiva - *quadtree* original - domínio 4T - RMSE.

Com a análise descritiva, verifica-se que a entropia obteve o melhor resultado de qualidade, porém, quando se aplica a análise de variância, nota-se que as diferenças de qualidade não são estatisticamente significativas, como mostra a tabela 4.98 e o gráfico da figura 4.90.

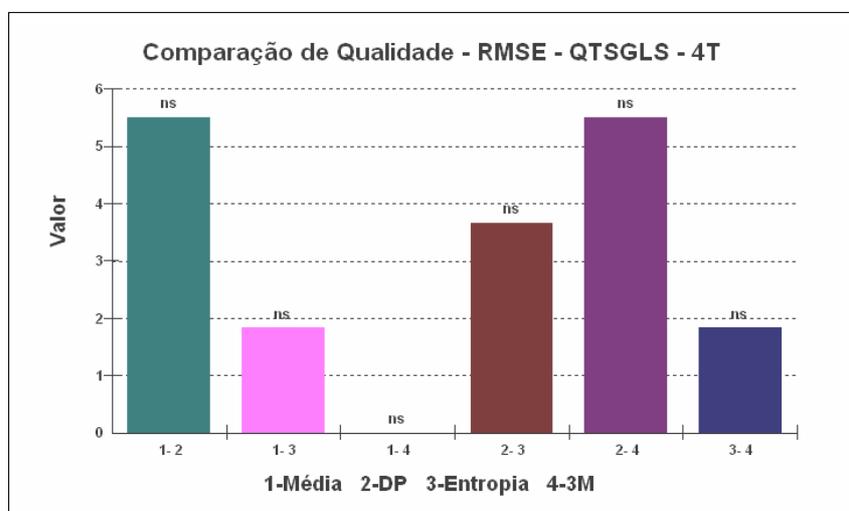


Figura 4.90: Análise de variância - *quadtree* original - domínio 4T - RMSE.

Portanto, conclui-se com a análise descritiva 4.97 que a medida que obteve melhor qualidade foi a entropia, porém, com a análise de variância 4.98 mostra-se que não há diferenças significativas entre os conjuntos de resultados das medidas.

## PSNR

Os resultados da medida PSNR, apresentados na tabela 4.92, mostram de forma geral que as imagens de tamanho maior  $512 \times 512$  possuem melhor qualidade do que as outras imagens.

Tabela 4.99: Análise descritiva - *quadtree* original - domínio 4T - PSNR.

<b>PSNR - QTSGLS - 4T</b>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Entropia</i>	<i>3M</i>
Tamanho da amostra =	12	12	12	12
Mínimo	3,422	7,176	19,624	3,422
Máximo	30,433	30,449	22,829	30,433
Mediana	15,9365	18,1245	20,582	15,9365
Média Aritmética	16,6939	19,1292	20,8893	16,6939

A análise descritiva mostra esse resultado na tabela 4.99, no item média aritmética. O destaque é a medida entropia que obteve melhor qualidade.

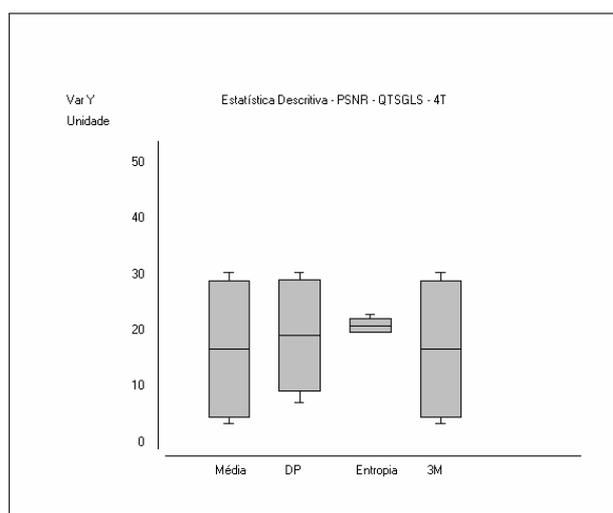


Figura 4.91: Análise descritiva - *quadtree* original - domínio 4T - PSNR.

O gráfico da figura 4.91 ilustra o comportamento semelhante à medida RMSE da figura 4.89.

Tabela 4.100: Análise de variância - *quadtree* original - domínio 4T - PSNR: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas.

<b>PSNR - QTSGLS - 4T</b>	<i>Resultados</i>
H =	1,2355
Graus de liberdade =	3
(p) Kruskal-Wallis =	0,7445

Com a análise de variância da tabela 4.100, verifica-se que não há diferenças significativas entre as medidas, pois elas contribuem de forma semelhante para qualidade das

imagens quando avaliadas em seu conjunto de resultados (figura 4.92).

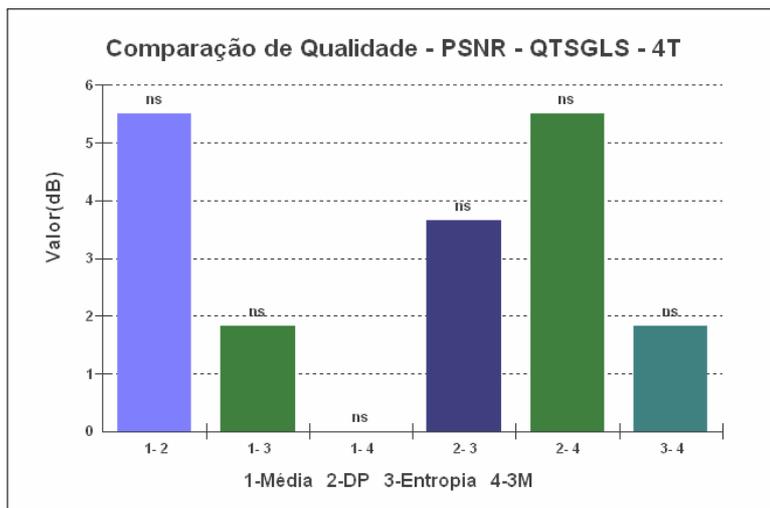


Figura 4.92: Análise de variância - *quadtree* original - domínio 4T - PSNR.

Portanto, conclui-se que a medida que obteve melhor qualidade PSNR foi a entropia, seguida do desvio padrão, média e as três medidas combinadas.

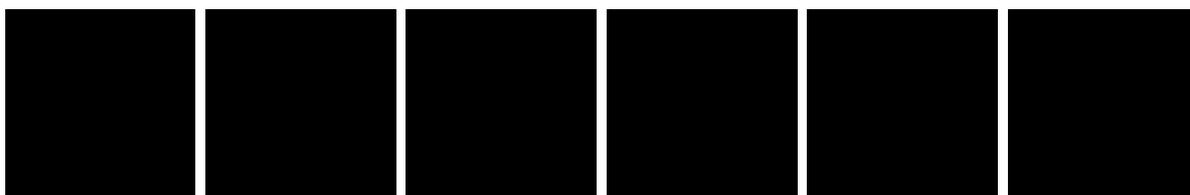
A medida da entropia obteve novamente os melhores resultados nas comparações realizadas nos contextos do grupo 3T e 4T, mas somente em imagens com tamanho  $512 \times 512$  pixels.

## Resultado visual das imagens comprimidas

As imagens comprimidas ilustradas na figura 4.93 são os resultados visuais do processo de compressão fractal com *quadtree* sem GLS com configuração de bloco 4T e medida de distância baseada na média. A sequência das imagens é a mesma apresentada na tabela 4.92.



(a)



(b)

Figura 4.93: Imagens comprimidas com a *quadtree* sem GLS e configuração de bloco 4T e medida de distância da média. Os respectivos valores dos resultados das imagens estão na mesma sequência da tabela 4.92: (a) imagens com tamanho de bloco  $512 \times 512$  pixels; (b) imagens com tamanho de bloco  $256 \times 256$  pixels; (c) imagens com tamanho de bloco  $128 \times 128$  pixels; (d) imagens com tamanho de bloco  $64 \times 64$  pixels.

## 4.5 Resultados da Compressão Fractal de Imagens por Quadtree com GLS

Esta seção apresenta os resultados obtidos pela técnica de compressão fractal de imagens baseada no particionamento *quadtree* com busca local guiada (GLS). Os seguintes conjuntos relacionados à profundidade do particionamento da imagem foram definidos: 1T - partição mínima de 4 e partição máxima de 6, 2T - partição mínima de 2 e partição máxima de 6, 3T - partição mínima de 2 e partição máxima de 8, 4T - partição máxima de 4 e partição máxima de 8 para o método baseado em *quadtree* com GLS.

### 4.5.1 Resultados da Quadtree com GLS - 1T

Esta seção apresenta os resultados do método de compressão com particionamento *quadtree* com busca local guiada (GLS) para o conjunto 1T.

#### Tempo de Compressão

O tempo de compressão apresentado pelo algoritmo nesse contexto de domínio 1T é bastante baixo, com execução em segundos e microssegundos, de acordo com a tabela 4.101. Os tempos possuem variações entre as medidas, com muita diferença para as três medidas combinadas.

A análise descritiva da tabela 4.102 apresenta, no item média aritmética, as medidas média e desvio padrão próximas entre si, mas com diferenças para entropia e principalmente para as três medidas combinadas. Essas diferenças são ilustradas no gráfico da figura 4.94.

Com a análise de variância da tabela 4.103 é possível verificar exatamente as diferenças existentes entre as medidas. Observa-se que, entre os grupos avaliados na tabela, somente a média e o desvio padrão obtiveram tempos que não apresentam diferenças significativas.

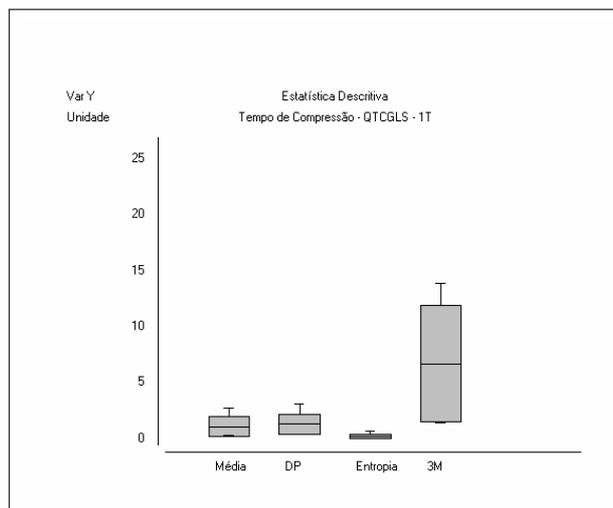
Entretanto, entre as outras comparações, há diferenças significativas entre as medidas. As diferenças são ilustradas na figura 4.95, de modo a auxiliar a conclusão de que a entropia obteve o melhor tempo nesse contexto, seguida da média, do desvio padrão e das

Tabela 4.101: Compressão fractal de imagens por *quadtree* com GLS (QTCGLS) - domínio IT.

Domínio: IT	Medida: Média IT						Medida: Desvio Padrão IT						Medida: Entropia IT						Medida: 3M IT					
	Imagem	Tempo(s)	Taxa	RMSE	PSNR	Tempo(s)	Tempo(s)	Taxa	RMSE	PSNR	Tempo(s)	Tempo(s)	Taxa	RMSE	PSNR	Tempo(s)	Tempo(s)	Taxa	RMSE	PSNR				
Boat	512x512	0,925	22,488	15,944	24,079	1,389	22,692	15,944	24,079	19,712	0,646	384,375	26,359	19,712	9,335	21,314	15,555	24,293						
	Fruits	512x512	0,948	22,095	14,185	25,094	1,467	22,277	14,185	25,094	0,562	403,298	20,757	20,882	9,263	20,956	13,878	25,284						
	Goldhill	512x512	0,920	21,096	12,751	26,020	1,443	21,234	12,751	26,020	0,626	381,023	20,757	21,788	10,108	20,781	12,030	26,525						
	Lenna	512x512	0,910	21,677	15,489	24,331	1,674	21,945	15,164	24,514	0,435	386,643	25,525	19,992	9,317	20,869	14,888	24,674						
	Mandrill	512x512	0,674	20,683	19,470	22,343	1,031	20,683	19,470	22,343	0,524	376,103	24,694	20,279	7,369	21,021	19,312	22,414						
Paolina	512x512	0,898	22,55	10,696	27,547	1,320	23,312	10,684	27,56	0,468	391,844	18,393	22,838	8,700	20,690	10,015	28,118							
Boat	256x256	0,426	5,405	17,168	23,436	0,580	5,607	17,160	23,440	0,114	95,672	26,148	19,782	2,410	5,217	16,856	23,595							
	Fruits	256x256	0,437	5,351	15,094	24,555	0,526	5,559	15,091	24,557	0,137	98,847	22,203	21,203	2,389	5,229	14,716	24,775						
	Goldhill	256x256	0,376	5,246	13,197	25,721	0,550	5,358	13,199	25,720	0,168	95,255	20,560	21,870	2,520	5,161	12,842	25,958						
	Lenna	256x256	0,377	5,266	16,900	23,573	0,510	5,525	16,893	23,577	0,121	96,376	24,824	20,234	2,270	5,179	16,557	23,751						
	Mandrill	256x256	0,259	5,144	20,127	22,055	0,454	5,153	20,127	22,055	0,143	94,979	24,772	20,252	1,882	5,165	19,995	22,113						
Paolina	256x256	0,357	5,406	11,572	26,863	0,495	6,224	11,574	26,861	0,139	97,669	19,080	22,519	2,229	5,150	11,232	27,122							
Boat	128x128	0,574	1,288	16,768	23,641	0,569	1,421	16,729	23,662	0,031	23,506	23,366	20,759	1,595	1,277	16,422	23,822							
	Fruits	128x128	0,457	1,301	15,388	24,387	0,568	1,524	15,361	24,402	0,035	23,779	20,086	22,073	1,605	1,277	15,135	24,531						
	Goldhill	128x128	0,469	1,291	14,320	25,012	0,577	1,389	14,263	25,046	0,041	23,676	18,879	22,611	1,618	1,268	14,339	25,000						
	Lenna	128x128	0,503	1,306	19,118	22,502	0,602	1,498	19,080	22,519	0,035	23,988	23,553	20,790	1,754	1,271	19,445	22,355						
	Mandrill	128x128	0,367	1,265	15,945	24,078	0,492	1,29	15,995	24,051	0,033	23,239	19,005	22,553	1,378	1,264	17,935	23,057						
Paolina	128x128	0,482	1,426	13,620	25,447	0,398	1,899	13,499	25,525	0,036	24,165	17,852	23,097	1,613	1,286	13,579	25,473							
Boat	64x64	2,548	0,65	136,621	5,420	2,679	0,756	111,617	7,176	0,008	5,962	28,621	18,997	13,906	0,649	136,621	5,420							
	Fruits	64x64	2,431	0,652	171,563	3,442	2,700	0,743	145,278	4,887	0,009	6,159	35,736	17,071	13,887	0,649	171,653	3,442						
	Goldhill	64x64	2,449	0,649	121,702	6,425	2,737	0,746	103,71	7,860	0,010	6,023	21,389	21,527	13,841	0,649	121,072	6,425						
	Lenna	64x64	2,727	0,65	131,646	5,743	2,708	0,737	112,224	7,129	0,010	5,927	29,638	18,694	13,899	0,649	131,646	5,743						
	Mandrill	64x64	2,411	0,649	134,008	5,588	3,097	0,694	123,844	6,273	0,040	6,059	24,137	20,477	13,777	0,649	134,008	5,588						
Paolina	64x64	2,393	0,65	160,192	4,038	2,210	0,838	131,091	5,779	0,011	6,196	30,151	18,545	13,915	0,649	160,192	4,038							

Tabela 4.102: Análise descritiva - *quadtree* - domínio 1T - tempo de compressão.

<b>Tempo de Compressão - QTCGLS - 1T</b>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Entropia</i>	<i>3M</i>
Tamanho da amostra =	24	24	24	24
Mínimo	0,259	0,398	0,008	1,378
Máximo	2,727	3,097	0,646	13,915
Mediana	0,624	0,8165	0,0775	4,9445
Média Aritmética	1,0549	1,2823	0,1826	6,6908

Figura 4.94: Análise descritiva - *quadtree* - domínio 1T - tempo de compressão.Tabela 4.103: Análise de variância - *quadtree* - domínio 1T - tempo de compressão: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas.

<b>Tempo de Compressão - QTCGLS - 1T</b>	<i>Resultados</i>	- 2 -
H =	60,3824	
Graus de liberdade =	3	
(p) Kruskal-Wallis =	0	
R 1 (posto médio) =	45,5417	
R 2 (posto médio) =	53,25	
R 3 (posto médio) =	16,625	
R 4 (posto médio) =	78,5833	
Comparações Student-Newman-Keuls	Dif. Postos	p-valor
Grupos ( 1 e 2) =	7,7083	0,3378
Grupos ( 1 e 3) =	28,9167	0,0003
Grupos ( 1 e 4) =	33,0417	< 0,0001
Grupos ( 2 e 3) =	36,625	< 0,0001
Grupos ( 2 e 4) =	25,3333	0,0016
Grupos ( 3 e 4) =	61,9583	< 0,0001

três medidas combinadas com o pior tempo.

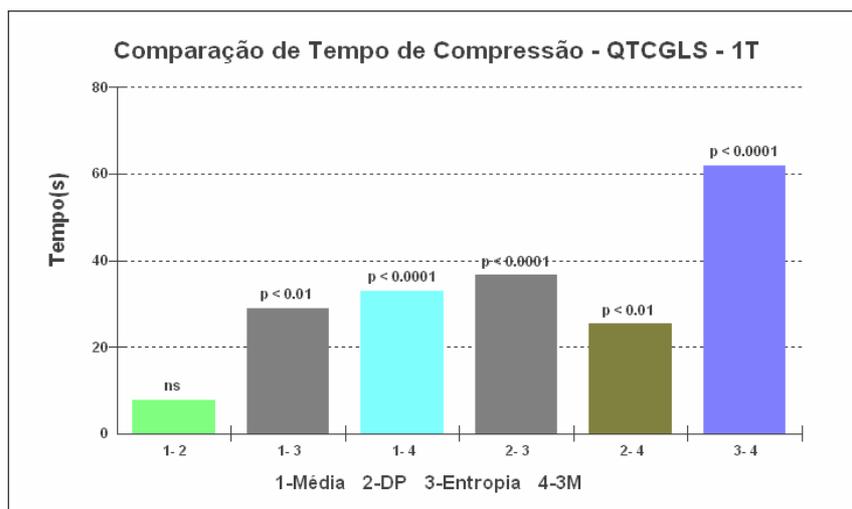


Figura 4.95: Análise de variância - *quadtree* - domínio 1T - tempo de compressão.

## Taxa de Compressão

Segundo a tabela 4.101, as taxas de compressão sofrem variações de acordo com o tipo de medida de distância utilizada no algoritmo. Essas variações são mais perceptíveis quando se avalia os conjuntos de resultados.

Tabela 4.104: Análise descritiva - *quadtree* - domínio 1T - taxa de compressão.

Taxa de Compressão - QTCGLS - 1T	Média	Desvio Padrão	Entropia	3M
Tamanho da amostra =	24	24	24	24
Mínimo	0,649	0,694	5,927	0,649
Máximo	22,55	23,312	403,298	21,314
Mediana	3,285	3,526	59,572	3,218
Média Aritmética	7,2577	7,4627	128,3651	7,0112

A tabela 4.104 apresenta a análise descritiva dos conjuntos avaliados. O item média aritmética indica a medida que obteve maior taxa de compressão, a entropia com valor 128,3651, sendo que os outros valores correspondem a taxas mais próximas. Essas diferenças são ilustradas no gráfico da figura 4.96.

A tabela 4.105 de análise de variância apresenta as diferenças entre as medidas de distância que não são bem evidenciadas pela análise descritiva. Os valores desta tabela mostram que há diferenças somente em três comparações com o  $p < 0.05$ .

As diferenças apontam para a medida de entropia como sendo aquela que se difere de todas as outras medidas nesse contexto, seguida do desvio padrão, da média e das três medidas combinadas (gráfico da figura 4.97).

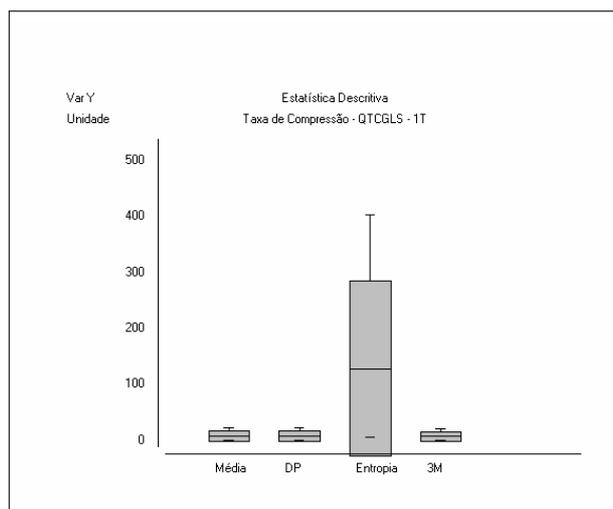


Figura 4.96: Análise descritiva - *quadtree* - domínio 1T - taxa de compressão.

Tabela 4.105: Análise de variância - *quadtree* - domínio 1T - taxa de dompressão: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas.

Taxa de Compressão - QTCGLS - 1T	Resultados	- 2 -
H =	41,4822	
Graus de liberdade =	3	
(p) Kruskal-Wallis =	0	
R 1 (posto médio) =	38,1458	
R 2 (posto médio) =	42,6458	
R 3 (posto médio) =	79,7083	
R 4 (posto médio) =	33,5	
Comparações Student-Newman-Keuls	Dif. Postos	p-valor
Grupos ( 1 e 2) =	4,5	0,5758
Grupos ( 1 e 3) =	41,5625	< 0,0001
Grupos ( 1 e 4) =	4,6458	0,5634
Grupos ( 2 e 3) =	37,0625	< 0,0001
Grupos ( 2 e 4) =	9,1458	0,2554
Grupos ( 3 e 4) =	46,2083	< 0,0001

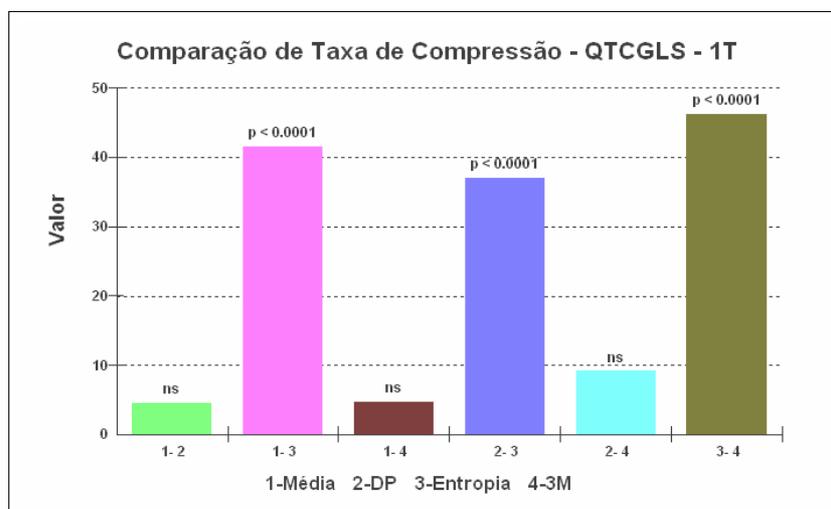


Figura 4.97: Análise de variância - *quadtree* - domínio 1T - taxa de compressão.

## RMSE

Os valores de qualidade da medida RMSE mantêm um comportamento uniforme nas imagens de tamanho maior, mas, com a imagem de menor tamanho  $64 \times 64$  pixels, a qualidade tem uma piora significativa segundo a tabela 4.101.

Tabela 4.106: Análise descritiva - *quadtree* - domínio 1T - RMSE.

RMSE - QTCGLS - 1T	Média	Desvio Padrão	Entropia	3M
Tamanho da amostra =	24	24	24	24
Mínimo	10,696	10,684	17,852	10,015
Máximo	171,563	145,28	35,726	171,653
Mediana	16,3565	16,362	23,4595	16,4895
Média Aritmética	47,2285	41,872	23,6871	47,0801

A análise descritiva da tabela 4.106 mostra que a medida que obteve a melhor qualidade nas imagens, dentro do seu conjunto, foi a entropia. O gráfico da figura 4.98 ilustra a relação de qualidade entre as medidas.

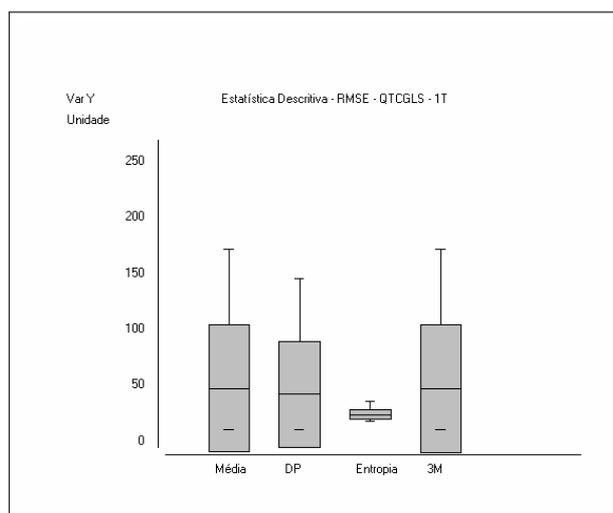


Figura 4.98: Análise descritiva - *quadtree* - domínio 1T - RMSE.

Com a análise de variância apresentada na tabela 4.107, verifica-se que a medida que apresenta diferença significativa estatisticamente com relação às demais é a entropia.

Portanto, a medida que apresenta melhor qualidade com base na análise descritiva 4.106 e na análise de variância (figura 4.99) é a entropia, seguida do desvio padrão, das três medidas combinadas e da média.

Tabela 4.107: Análise de variância - *quadtree* - domínio 1T - RMSE: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas.

<b>RMSE - QTCGLS - 1T</b>	<i>Resultados</i>	- 2 -
H =	10,643	
Graus de liberdade =	3	
(p) Kruskal-Wallis =	0,0138	
R 1 (posto médio) =	44,1458	
R 2 (posto médio) =	42,2083	
R 3 (posto médio) =	64,5208	
R 4 (posto médio) =	43,125	
Comparações Student-Newman-Keuls	Dif. Postos	p-valor
Grupos ( 1 e 2) =	1,9375	0,8096
Grupos ( 1 e 3) =	20,375	0,0113
Grupos ( 1 e 4) =	1,0208	0,899
Grupos ( 2 e 3) =	22,3125	0,0055
Grupos ( 2 e 4) =	0,9167	0,9092
Grupos ( 3 e 4) =	21,3958	0,0078

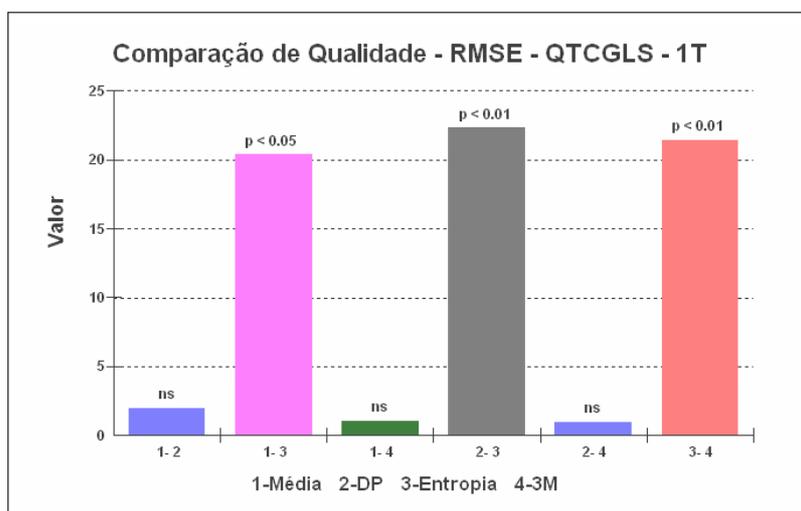


Figura 4.99: Análise de variância - *quadtree* - domínio 1T - RMSE.

## PSNR

Os valores da tabela 4.101 referentes ao PSNR mostram o comportamento semelhante aos valores PSNR. As imagens com tamanho maior apresentam maior qualidade, enquanto que as imagens menores têm menor qualidade.

Tabela 4.108: Análise descritiva - *quadtree* - domínio 1T - PSNR.

<b>PSNR - QTCGLS - 1T</b>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Entropia</i>	<i>3M</i>
Tamanho da amostra =	24	24	24	24
Mínimo	3,442	4,887	17,071	3,442
Máximo	27,547	27,56	23,097	28,118
Mediana	23,8595	23,857	20,7745	23,7865
Média Aritmética	19,6392	20,005	20,7769	19,7298

A partir da análise descritiva consegue-se definir um padrão do comportamento dos conjuntos de valores PSNR das medidas. Segundo a tabela 4.108, no item média aritmética, a medida que apresenta a melhor qualidade é a entropia. A diferença de qualidade desta medida para as outras é ilustrada na figura 4.100.

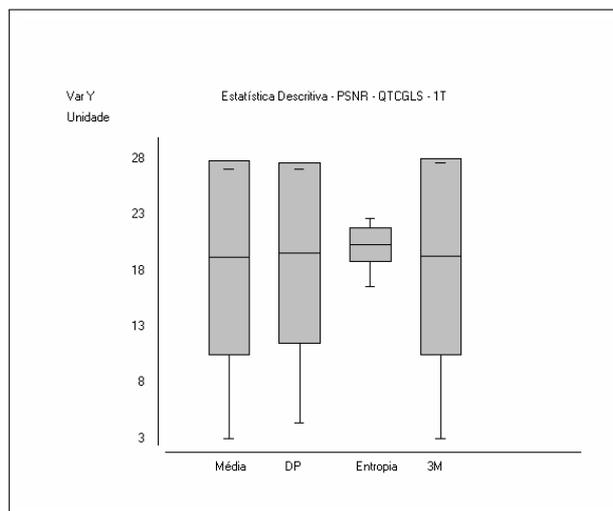


Figura 4.100: Análise descritiva - *quadtree* - domínio 1T - RMSE.

Tabela 4.109: Análise de Variância - Quadtree - Domínio 1T - PSNR: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas

PSNR - QTCGLS - 1T	Resultados	- 2 -
H =	10,6432	
Graus de liberdade =	3	
(p) Kruskal-Wallis =	0,0138	
R 1 (posto médio) =	52,8542	
R 2 (posto médio) =	54,7917	
R 3 (posto médio) =	32,4792	
R 4 (posto médio) =	53,875	
Comparações Student-Newman-Keuls	Dif. Postos	p-valor
Grupos ( 1 e 2) =	1,9375	0,8096
Grupos ( 1 e 3) =	20,375	0,0113
Grupos ( 1 e 4) =	1,0208	0,899
Grupos ( 2 e 3) =	22,3125	0,0055
Grupos ( 2 e 4) =	0,9167	0,9092
Grupos ( 3 e 4) =	21,3958	0,0078

Com a análise de variância correspondente à tabela 4.109, é possível verificar que a medida entropia se difere de todas as outras medidas, com diferenças significativas.

A diferença significativa da entropia também é ilustrada na figura 4.101, o que ajuda a concluir que, para obter melhor qualidade de imagem nesse contexto, deve-se utilizar a medida de entropia.

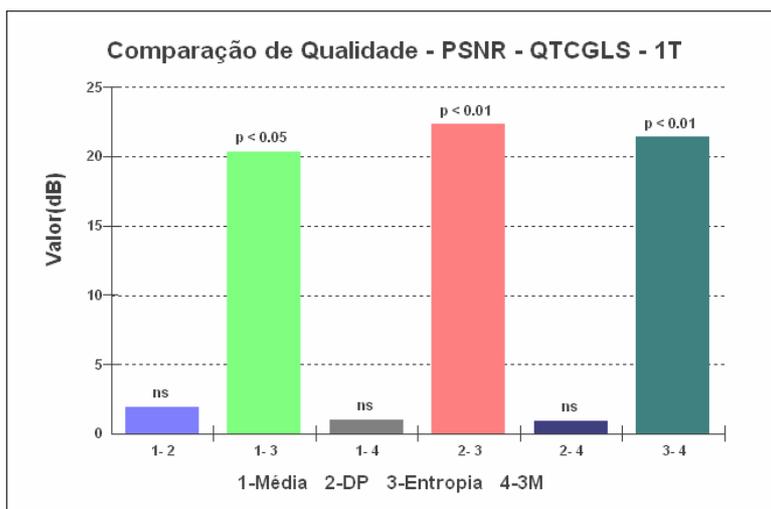


Figura 4.101: Análise de variância - *quadtree* - domínio 1T - PSNR.

O contexto do conjunto 1T do algoritmo *quadtree* com GLS apresenta algumas variações nos resultados. A medida da entropia é indicada como sendo numericamente a melhor imagem, porém em qualidade visual é muito ruim. A medida da média apesar de não apresentar numericamente os melhores resultados, visualmente as imagens são de boa qualidade como ilustrado na figura 4.102.

## Resultado visual das imagens comprimidas

As imagens comprimidas ilustradas, na figura 4.102, são os resultados visuais do processo de compressão fractal baseada no particionamento *quadtree* com GLS, configuração de bloco 1T e medida de distância baseada na média. A sequência das imagens é a mesma apresentada na tabela 4.101.



Figura 4.102: Imagens comprimidas com particionamento *quadtree* com GLS e configuração de bloco 1T e medida de distância baseada na média. Os respectivos valores dos resultados das imagens estão na mesma sequência da tabela 4.101: (a) imagens com tamanho de bloco  $512 \times 512$  pixels; (b) imagens com tamanho de bloco  $256 \times 256$  pixels; (c) imagens com tamanho de bloco  $128 \times 128$  pixels; (d) imagens com tamanho de bloco  $64 \times 64$  pixels.

## 4.5.2 Resultados da Quadtree com GLS - 2T

Esta seção apresenta os resultados do método de compressão com particionamento *quadtree* com busca local guiada (GLS) para o conjunto 2T.

### Tempo de Compressão

O tempo de compressão possui variações entre as medidas utilizadas no algoritmo. A partir desses valores discrepantes (tabela 4.110), não é possível afirmar qual é melhor medida nesse contexto.

A análise descritiva realizada nos conjuntos de tempos de compressão, apresentada na tabela 4.111, item média aritmética, apresenta a medida de entropia como a que obteve o menor tempo, com o valor de 0,1108 segundos.

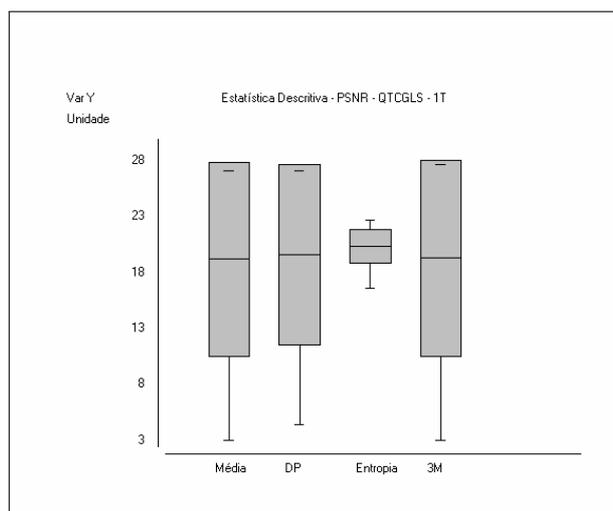


Figura 4.103: Análise descritiva - *quadtree* - domínio 2T - RMSE.

O gráfico da análise descritiva da figura 4.103 ilustra a alta diferença de tempo entre as medidas. No entanto, visualmente é possível verificar que a média e o desvio padrão possuem valores semelhantes.

Com a análise de variância, pode-se verificar de outra forma esses resultados. As medidas possuem diferenças significativas apresentadas na tabela 4.112, demonstradas pelo valor  $p < 0.05$ . As únicas medidas que não apresentam diferenças significativas são a média e o desvio padrão. Essas medidas são ilustradas no gráfico da figura 4.104.

Portanto, conclui-se que a medida que obteve melhor tempo de compressão é a entro-

Tabela 4.110: Compressão fractal de imagens por *quadtree* com GLS (QTCGLS) - domínio 2T.

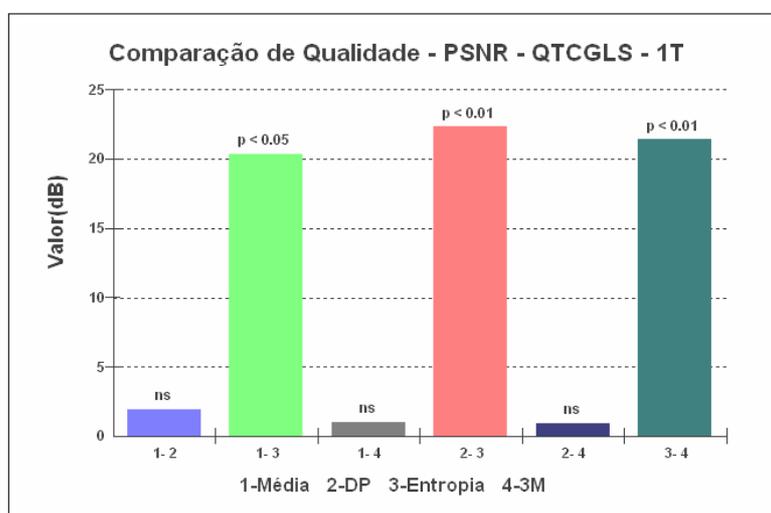
Domínio: 2T	Algoritmo: Aprimoramento da Quadtree Original com GLS																
	Medida: Média 2T					Medida: Entropia 2T					Medida: 3M 2T						
	Imagem	Tempo(s)	Taxa	RMSE	PSNR	Tempo(s)	Taxa	RMSE	PSNR	Tempo(s)	Taxa	RMSE	PSNR	Tempo(s)	Taxa	RMSE	PSNR
Boat	512x512	1,129	22,468	15,944	24,079	1,458	22,672	15,944	24,079	0,293	6553,6	36,157	16,967	9,868	21,296	15,555	24,293
	512x512	0,942	22,077	14,185	25,094	1,526	22,258	14,185	25,094	0,485	6553,6	33,240	17,689	9,904	20,939	13,878	25,284
	512x512	0,957	21,079	12,751	26,020	1,501	21,217	12,751	26,020	0,324	6393,756	30,549	18,431	10,752	20,765	12,030	26,525
	512x512	0,923	21,659	15,489	24,331	1,494	21,927	15,164	24,514	0,301	6553,6	42,101	15,645	9,933	20,853	14,888	24,674
	512x512	0,668	20,667	19,470	22,343	1,084	20,667	19,470	22,343	0,322	6393,756	33,522	17,624	8,005	21,005	19,312	22,414
Paolina	512x512	0,947	22,53	10,696	27,547	1,407	23,291	10,684	27,556	0,296	6721,641	31,276	18,227	9,388	20,673	10,015	28,118
	256x256	0,512	5,4	17,168	23,436	0,515	5,602	17,160	23,440	0,074	1598,439	36,089	16,983	2,559	5,267	16,856	23,595
	256x256	0,455	5,346	15,094	24,555	0,706	5,554	15,091	24,557	0,075	1598,439	33,209	17,706	2,552	5,224	14,716	24,775
	256x256	0,403	5,242	13,197	25,721	0,620	5,353	13,199	25,720	0,074	1598,439	30,514	18,441	2,680	5,157	12,842	25,958
	256x256	0,388	5,261	16,900	23,573	0,533	5,52	16,893	23,577	0,080	1638,4	42,062	15,653	2,430	5,175	16,557	23,751
Mandrill	256x256	0,333	5,14	20,127	22,055	0,412	5,149	20,127	22,055	0,096	1638,4	33,571	17,612	2,033	5,161	19,995	22,113
	256x256	0,450	5,401	11,572	26,863	0,449	6,219	11,574	26,861	0,088	1680,41	30,970	18,312	2,397	5,146	11,232	27,122
	128x128	0,442	1,287	16,768	23,641	0,731	1,42	16,729	23,662	0,019	399,609	33,963	17,511	1,640	1,276	16,422	23,822
	128x128	0,582	1,3	15,388	24,387	0,533	1,523	15,361	24,402	0,018	399,609	31,425	18,185	1,645	1,276	15,135	24,531
	128x128	0,487	1,29	14,320	25,012	0,562	1,388	14,263	25,046	0,022	399,609	29,079	18,859	1,663	1,267	14,339	25,000
Paolina	128x128	0,489	1,305	19,118	22,502	0,564	1,497	19,080	22,519	0,022	399,609	40,703	15,938	1,786	1,270	19,445	22,355
	128x128	0,397	1,264	15,945	24,078	0,498	1,289	15,995	24,051	0,023	409,6	29,509	18,732	1,422	1,263	17,935	23,057
	128x128	0,446	1,425	13,620	25,447	0,441	1,897	13,499	25,525	0,018	420,102	30,346	18,489	1,650	1,285	13,579	25,473
	64x64	2,487	0,649	136,621	5,420	2,616	0,755	111,617	7,176	0,005	102,4	33,941	17,516	13,803	0,648	136,621	5,420
	64x64	2,394	0,651	171,563	3,442	2,729	0,742	145,278	4,887	0,004	99,902	34,549	17,362	13,794	0,648	171,563	3,442
Lenna	64x64	2,440	0,648	121,702	6,425	2,722	0,744	103,171	7,860	0,005	102,4	28,759	18,955	13,904	0,648	121,702	6,425
	64x64	2,594	0,649	131,646	5,743	2,779	0,736	112,224	7,129	0,005	99,902	39,924	16,106	13,835	0,648	131,646	5,743
	64x64	2,637	0,648	134,008	5,588	3,016	0,693	123,844	6,273	0,004	102,4	28,193	19,128	13,790	0,648	134,008	5,588
	64x64	2,462	0,649	160,192	4,038	2,194	0,836	131,091	5,779	0,005	105,025	31,908	18,053	13,859	0,648	160,192	4,038

Tabela 4.111: Análise descritiva - *quadtree* - domínio 2T - tempo de compressão

Tempo de Compressão - QTCGLS - 2T	Média	Desvio Padrão	Entropia	3M
Tamanho da amostra =	24	24	24	24
Mínimo	0,333	0,412	0,004	1,422
Máximo	2,637	3,016	0,485	13,904
Mediana	0,625	0,9075	0,0485	5,3425
Média Aritmética	1,0818	1,2954	0,1108	6,8872

Tabela 4.112: Análise de variância - *quadtree* - domínio 2T - tempo de compressão: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas.

Tempo de Compressão - QTCGLS - 2T	Resultados	- 2 -
H =	69,4056	
Graus de liberdade =	3	
(p) Kruskal-Wallis =	0	
R 1 (posto médio) =	47,4583	
R 2 (posto médio) =	54,3333	
R 3 (posto médio) =	12,9583	
R 4 (posto médio) =	79,25	
Comparações Student-Newman-Keuls	Dif. Postos	p-valor
Grupos ( 1 e 2) =	6,875	0,3926
Grupos ( 1 e 3) =	34,5	< 0,0001
Grupos ( 1 e 4) =	31,7917	< 0,0001
Grupos ( 2 e 3) =	41,375	< 0,0001
Grupos ( 2 e 4) =	24,9167	0,0019
Grupos ( 3 e 4) =	66,2917	< 0,0001

Figura 4.104: Análise de variância - *quadtree* - domínio 2T - tempo de compressão.

pia, seguida da média, do desvio padrão e das três medidas combinadas. Porém, essas medidas apresentam diferenças significativas de tempo, exceto quando se compara a média com o desvio padrão.

## Taxa de Compressão

Os valores da taxa de compressão, apresentados na tabela 4.110, mostram um cenário com a medida de entropia se destacando das demais com valores bem superiores, de acordo com a análise descritiva na tabela 4.113.

Tabela 4.113: Análise descritiva - *quadtree* - domínio 2T - taxa de compressão.

<b>Taxa de Compressão - QTCGLS - 2T</b>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Entropia</i>	<i>3M</i>
Tamanho da amostra =	24	24	24	24
Mínimo	0,648	0,693	99,902	0,648
Máximo	22,53	23,291	6721,641	21,296
Mediana	3,2825	3,523	1009,2705	3,2155
Média Aritmética	7,2515	7,4562	2165,1103	7,0078

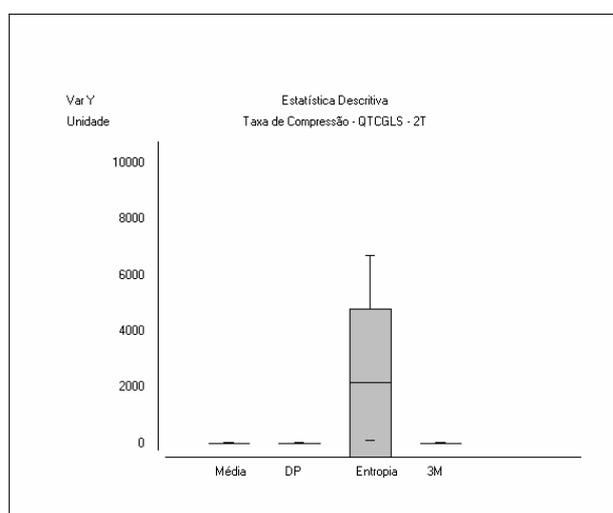


Figura 4.105: Análise descritiva - *quadtree* - domínio 2T - taxa de compressão.

Os valores mostrados na tabela de análise descritiva 4.113 e ilustrados no gráfico da figura 4.105 mostram a entropia como a medida que obteve a maior taxa de compressão, sendo que as demais se mantiveram com valores semelhantes.

A partir da análise de variância da tabela 4.114, verifica-se que apenas a média e as três medidas combinadas, além da média e do desvio padrão não apresentam diferenças estatísticas significativas. O gráfico da figura 4.106 ilustra essas semelhanças e principalmente a diferença da entropia com todas as outras medidas.

Tabela 4.114: Análise de variância - *quadtree* - domínio 2T - taxa de compressão: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas.

Taxa de Compressão - QTCGLS - 2T	Resultados	- 2 -
H =	54,6757	
Graus de liberdade =	3	
(p) Kruskal-Wallis =	0	
R 1 (posto médio) =	36,5625	
R 2 (posto médio) =	40,8542	
R 3 (posto médio) =	84,5	
R 4 (posto médio) =	32,0833	
Comparações Student-Newman-Keuls	Dif. Postos	p-valor
Grupos ( 1 e 2) =	4,2917	0,5936
Grupos ( 1 e 3) =	47,9375	< 0,0001
Grupos ( 1 e 4) =	4,4792	0,5775
Grupos ( 2 e 3) =	43,6458	< 0,0001
Grupos ( 2 e 4) =	8,7708	0,2754
Grupos ( 3 e 4) =	52,4167	< 0,0001

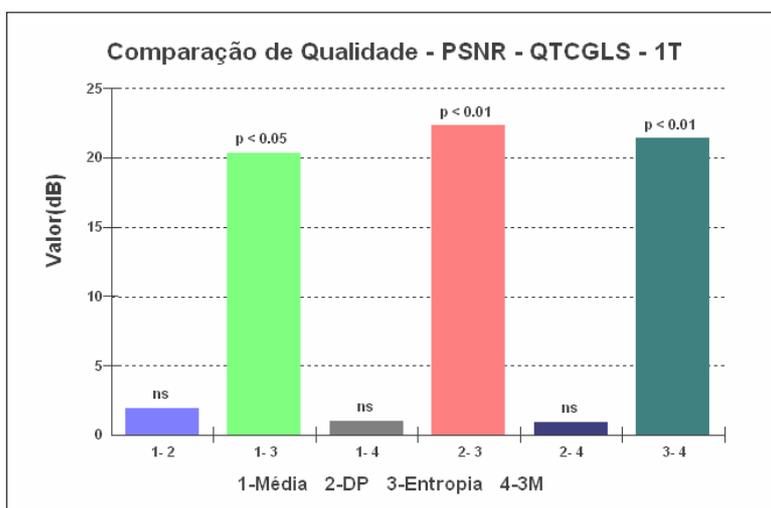


Figura 4.106: Análise de variância - *quadtree* - domínio 2T - taxa de compressão.

## RMSE

Os valores de RMSE são apresentados na tabela 4.110 e indicam que não se obtém boa qualidade com as imagens de dimensões reduzidas.

Tabela 4.115: Análise descritiva - *quadtree* - domínio 2T - RMSE.

RMSE - QTCGLS - 2T	Média	Desvio Padrão	Entropia	3M
Tamanho da amostra =	24	24	24	24
Mínimo	10,696	10,684	28,193	10,015
Máximo	171,563	145,278	42,101	171,563
Mediana	16,3565	16,362	33,2245	16,4895
Média Aritmética	47,2285	41,8498	33,565	47,1026

Os dados da análise descritiva na tabela 4.115 apresentam, no item média aritmética,

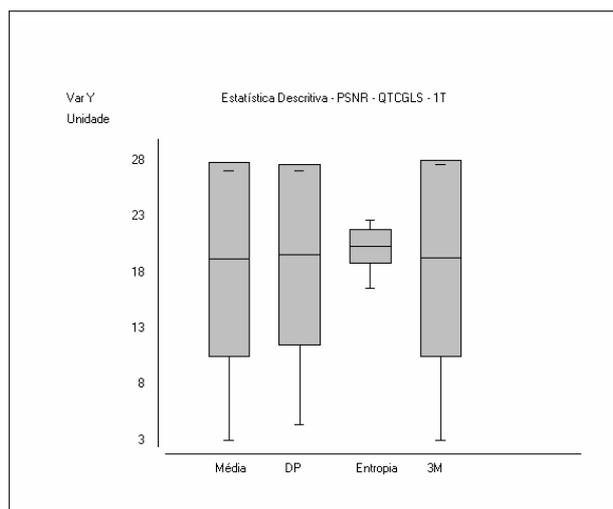


Figura 4.107: Análise descritiva - *quadtree* - domínio 2T - RMSE.

valores altos de RMSE, o que auxilia a conclusão de que, nesse contexto, não se obteve alta taxa de qualidade das imagens. No entanto, a partir do gráfico da figura 4.107 é possível verificar que a medida com qualidade superior às demais foi a entropia.

Tabela 4.116: Análise de variância - *quadtree* - domínio 2T - RMSE: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas.

<b>RMSE - QTCGLS - 2T</b>		<i>Resultados</i>	- 2 -
H =		13,4187	
Graus de liberdade =		3	
(p) Kruskal-Wallis =		0,0038	
R 1 (posto médio) =		43,4792	
R 2 (posto médio) =		41,5625	
R 3 (posto médio) =		66,5	
R 4 (posto médio) =		42,4583	
Comparações Student-Newman-Keuls	Dif. Postos		p-valor
Grupos ( 1 e 2) =		1,9167	0,8116
Grupos ( 1 e 3) =		23,0208	0,0042
Grupos ( 1 e 4) =		1,0208	0,899
Grupos ( 2 e 3) =		24,9375	0,0019
Grupos ( 2 e 4) =		0,8958	0,9113
Grupos ( 3 e 4) =		24,0417	0,0028

A entropia é a única medida que apresenta diferenças estatísticas significativas com relação às demais, segundo a análise de variância da tabela 4.116. O gráfico da figura 4.108 indica que a entropia é a medida que produz melhor qualidade, seguida do desvio padrão, das três medidas combinadas e da média.

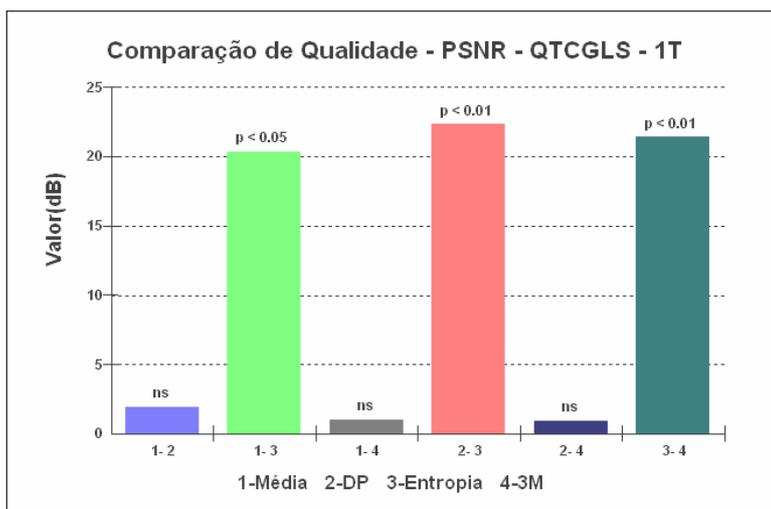


Figura 4.108: Análise de variância - *quadtree* - domínio 2T - RMSE.

## PSNR

Os valores PSNR são apresentados na tabela 4.110, com comportamento análogo aos valores RMSE obtidos pelo método.

Tabela 4.117: Análise descritiva - *quadtree* - domínio 2T - PSNR.

PSNR - QTCGLS - 2T	Média	Desvio Padrão	Entropia	3M
Tamanho da amostra =	24	24	24	24
Mínimo	3,442	4,887	15,645	3,442
Máximo	27,547	27,556	19,128	28,118
Mediana	23,8595	23,857	17,6975	23,7865
Média Aritmética	19,6392	20,005	17,6718	19,7298

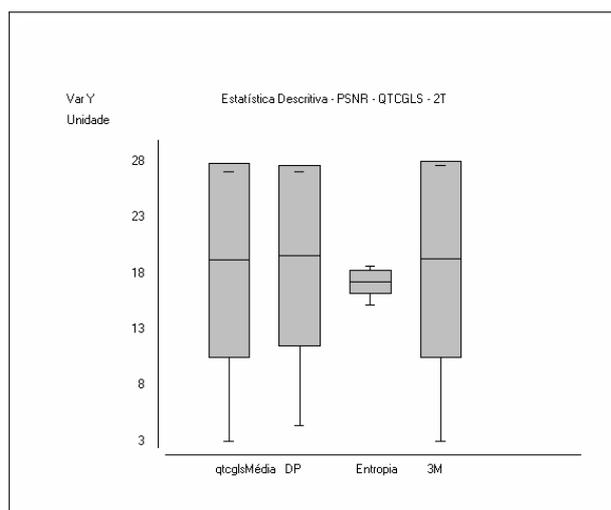


Figura 4.109: Análise descritiva - *quadtree* - domínio 2T - PSNR.

Com os valores da análise descritiva da tabela 4.117 é possível notar que a média aritmética resultante de cada medida apresenta valores próximos, mas o valor da entropia

se destaca por ser inferior, ou seja, de acordo com a relação entre a RMSE e PSNR, o valor de entropia deveria ser superior as outras medidas, entretanto, o conjunto de valores da entropia produz na análise descritiva um valor menor.

Tabela 4.118: Análise de variância - *quadtree* - domínio 2T - PSNR: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas.

PSNR - QTCGLS - 2T		Resultados	- 2 -
H =		13,4187	
Graus de liberdade =		3	
(p) Kruskal-Wallis =		0,0038	
R 1 (posto médio) =		53,5208	
R 2 (posto médio) =		55,4375	
R 3 (posto médio) =		30,5	
R 4 (posto médio) =		54,5417	
Comparações Student-Newman-Keuls		Dif. Postos	p-valor
Grupos ( 1 e 2) =		1,9167	0,8116
Grupos ( 1 e 3) =		23,0208	0,0042
Grupos ( 1 e 4) =		1,0208	0,899
Grupos ( 2 e 3) =		24,9375	0,0019
Grupos ( 2 e 4) =		0,8958	0,9113
Grupos ( 3 e 4) =		24,0417	0,0028

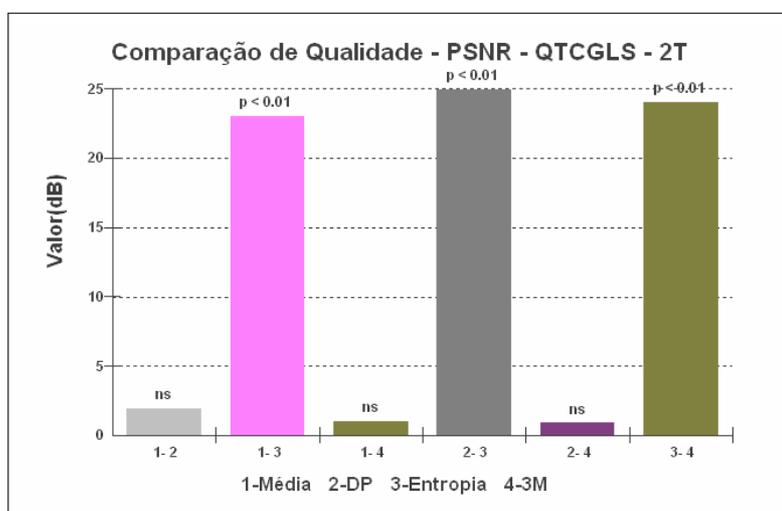


Figura 4.110: Análise de variância - *quadtree* - domínio 2T - PSNR.

Com a análise de variância, verifica-se que a medida de entropia apresenta diferenças significativas em relação às outras medidas, como mostra a tabela 4.118. O gráfico da figura 4.110 ilustra essas diferenças. Portanto, baseado na análise descritiva, a medida de melhor qualidade é o desvio padrão, seguido das três medidas combinadas, da média e da entropia, resultado diferente daquele obtido pela RMSE.

Apesar das diferenças entre as medidas e a indicação da desvio padrão como a melhor medida numericamente, a parte visual da imagem é muito ruim. A medida que apresenta bons resultados visuais e não tão ruins na taxa de compressão e tempo de compressão é a média.

## **Resultado visual das imagens comprimidas**

As imagens comprimidas, ilustradas na figura 4.111, são os resultados visuais do processo de compressão fractal baseada no particionamento com *quadtree* com GLS, configuração de bloco 2T e medida de distância baseada na média. A sequência das imagens é a mesma apresentada na tabela 4.110.

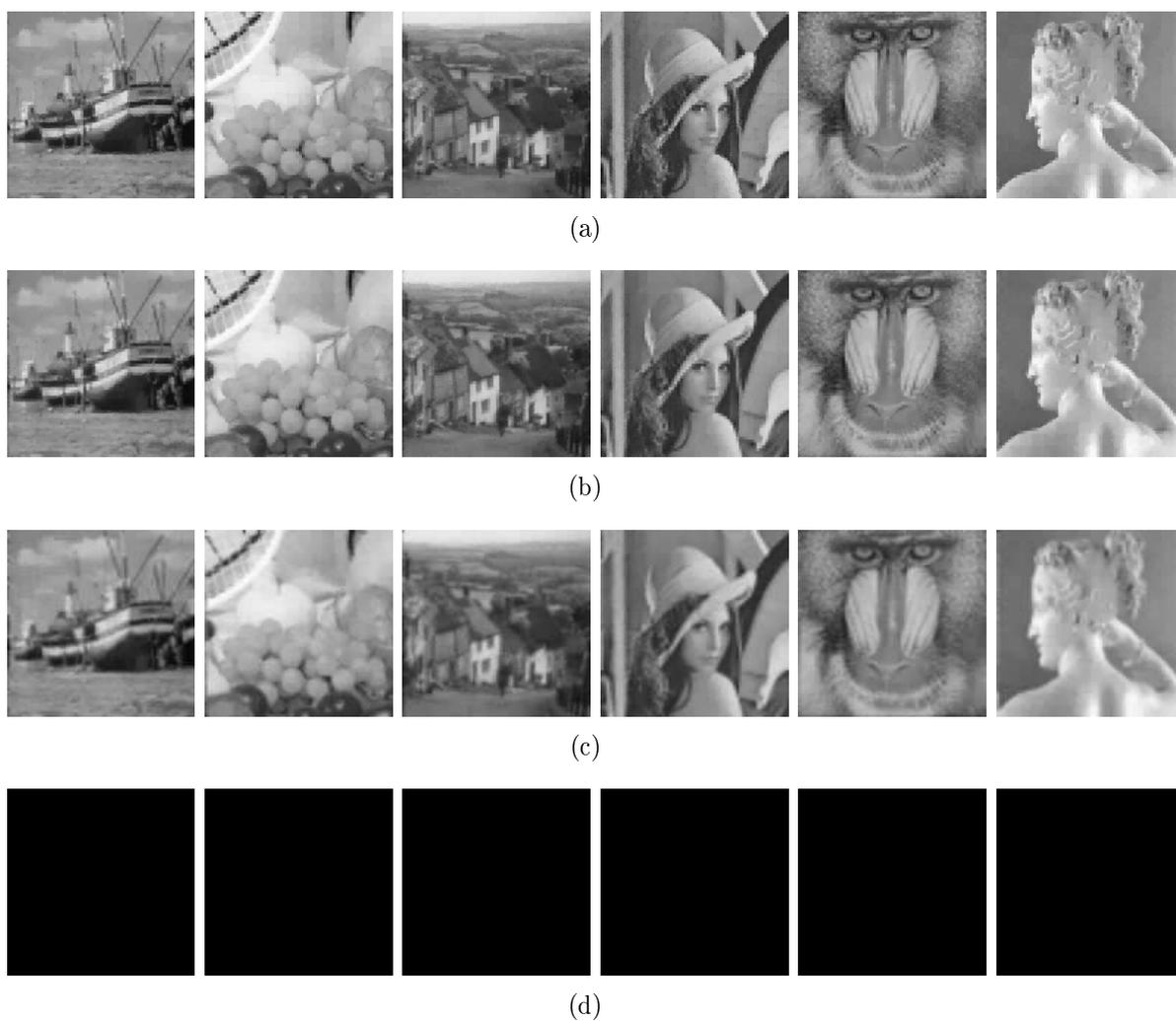


Figura 4.111: Imagens comprimidas com particionamento *quadtree* com GLS, configuração de bloco 2T e medida de distância baseada na média. Os respectivos valores dos resultados das imagens estão na mesma sequência da tabela 4.110: (a) Imagens com tamanho de bloco  $512 \times 512$  pixels; (b) imagens com tamanho de bloco  $256 \times 256$  pixels; (c) imagens com tamanho de bloco  $128 \times 128$  pixels; (d) imagens com tamanho de bloco  $64 \times 64$  pixels.

### 4.5.3 Resultados da Quadtree com GLS - 3T

Esta seção apresenta os resultados do método de compressão com particionamento *quadtree* com busca local guiada (GLS) para o conjunto 3T.

#### Tempo de Compressão

O tempo de compressão possui uma variação muito diferente do tamanho maior de imagem  $512 \times 512$  pixels para  $256 \times 256$  pixels, como visto na tabela 4.119. Essas diferenças apontam para uma dificuldade do algoritmo em comprimir, nesse tipo de contexto, imagens de tamanho menores, visto que para as menores dimensões, as imagens não foram comprimidas.

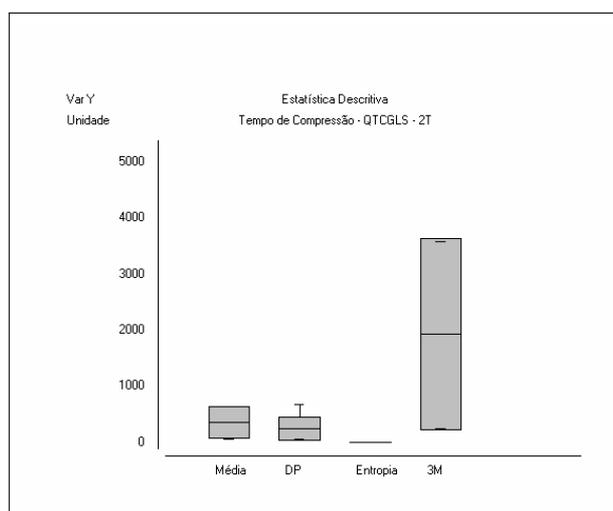


Figura 4.112: Análise descritiva - *quadtree*- domínio 3T - tempo de compressão.

A análise descritiva da tabela 4.120 indica, no item média aritmética, que a medida da entropia obteve o melhor tempo de compressão entre as outras medidas. A diferença em relação às outras medidas é notável, e fica ainda mais claro quando visualizada no gráfico da figura 4.112.

Com a análise de variância, as diferenças estatísticas são visíveis. Observa-se que a entropia se diferencia de todas as outras medidas de distância. Somente entre a média e o desvio padrão e entre a média e as três medidas combinadas não há diferenças estatísticas significativas.

Portanto, conclui-se com as análises e pelo gráfico da análise de variância 4.113 que

Tabela 4.119: Compressão fractal de imagens por *quadtree* com GLS (QTCGLS) - domínio 3T.

Domínio: 3T Imagem	Medida: Média 3T						Medida: Desvio Padrão 3T						Medida: Entropia 3T						Medida: 3M 3T					
	Tempo(s)	Taxa	RMSE	PSNR	Tempo(s)	Taxa	RMSE	PSNR	Tempo(s)	Taxa	RMSE	PSNR	Tempo(s)	Taxa	RMSE	PSNR	Tempo(s)	Taxa	RMSE	PSNR				
Boat	77,956	1,171	10,875	27,402	79,571	1,404	10,862	27,412	0,295	6721,641	36,198	16,957	312,505	1,178	10,875	27,402	312,505	1,178	10,875	27,402				
Fruits	86,848	1,194	9,917	28,203	70,564	1,631	8,378	29,668	0,297	6553,6	33,465	17,639	345,678	1,194	9,917	28,203	345,678	1,194	9,917	28,203				
Goldhill	61,336	1,169	7,788	30,302	66,262	1,314	7,780	30,311	0,291	6393,756	30,847	18,347	245,567	1,169	7,788	30,302	245,567	1,169	7,788	30,302				
Lenna	95,511	1,132	10,025	28,109	90,489	1,326	9,841	28,270	0,290	6553,6	42,155	15,634	339,231	1,132	10,025	28,109	339,231	1,132	10,025	28,109				
Mandrill	64,107	1,113	13,557	25,448	77,871	1,155	13,552	25,491	0,291	6393,756	33,549	17,617	247,535	1,113	13,557	25,448	247,535	1,113	13,557	25,448				
Paolina	87,233	1,203	7,671	30,433	58,829	1,872	7,657	30,449	0,292	6721,641	31,189	18,251	344,254	1,203	7,671	30,433	344,254	1,203	7,671	30,433				
Boat	633,583	0,648	137,555	5,361	448,452	0,908	92,070	8,848	0,073	1680,41	36,186	16,960	3572,743	0,648	137,555	5,361	3572,743	0,648	137,555	5,361				
Fruits	636,517	0,648	171,973	3,422	271,477	1,079	80,822	9,980	0,073	1598,439	33,405	17,655	3552,919	0,648	171,973	3,422	3552,919	0,648	171,973	3,422				
Goldhill	637,957	0,648	122,268	6,385	459,801	0,855	75,461	10,576	0,103	1598,439	30,616	18,412	3556,049	0,648	122,268	6,385	3556,049	0,648	122,268	6,385				
Lenna	629,796	0,648	132,449	5,690	377,143	0,914	73,899	10,758	0,074	1638,4	42,129	15,639	3549,235	0,648	132,449	5,690	3549,235	0,648	132,449	5,690				
Mandrill	630,602	0,648	135,309	5,504	681,683	0,725	111,619	7,176	0,074	1638,4	33,633	17,596	3550,267	0,648	135,309	5,504	3550,267	0,648	135,309	5,504				
Paolina	637,398	0,648	160,375	4,028	212,894	1,242	75,158	10,611	0,074	1680,41	31,072	18,283	3553,751	0,648	160,375	4,028	3553,751	0,648	160,375	4,028				
Boat	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**				
Fruits	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**				
Goldhill	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**				
Lenna	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**				
Mandrill	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**				
Paolina	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**				
Boat	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**				
Fruits	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**				
Goldhill	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**				
Lenna	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**				
Mandrill	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**				
Paolina	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**	*	*	**	**				

Legenda

\* Número máximo de partições *quadtree* deve ser reduzido.

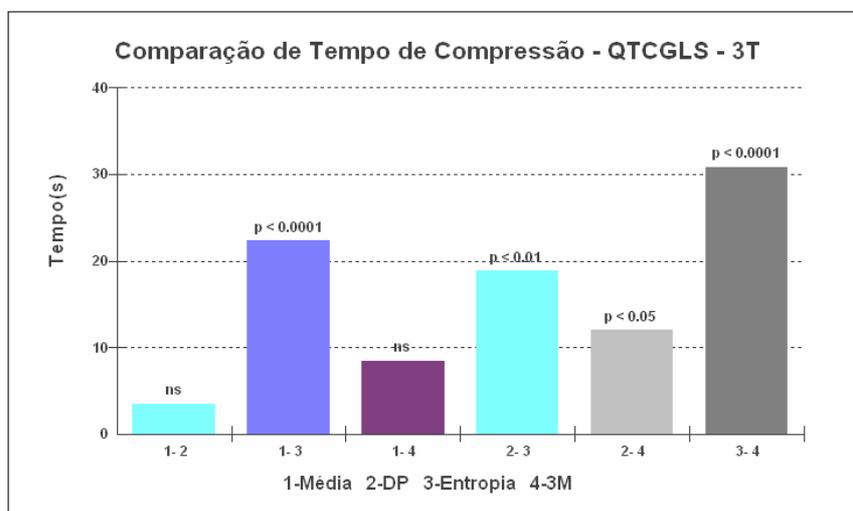
\*\* ERRO.

Tabela 4.120: Análise descritiva - *quadtree* - domínio 3T - tempo de compressão.

Tempo de Compressão - QTCGLS - 3T	Média	Desvio Padrão	Entropia	3M
Tamanho da amostra =	12	12	12	12
Mínimo	61,336	58,829	0,073	245,567
Máximo	637,957	681,683	0,297	3572,743
Mediana	362,6535	151,692	0,1965	1947,4565
Média Aritmética	356,5703	241,253	0,1859	1930,8112

Tabela 4.121: Análise de variância - *quadtree* - domínio 3T - tempo de compressão: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas.

Tempo de Compressão - QTCGLS - 3T	Resultados	- 2 -
H =	31,1173	
Graus de liberdade =	3	
(p) Kruskal-Wallis =	0	
R 1 (posto médio) =	28,8333	
R 2 (posto médio) =	25,3333	
R 3 (posto médio) =	6,5	
R 4 (posto médio) =	37,3333	
Comparações Student-Newman-Keuls	Dif. Postos	p-valor
Grupos ( 1 e 2) =	3,5	0,5403
Grupos ( 1 e 3) =	22,3333	< 0,0001
Grupos ( 1 e 4) =	8,5	0,137
Grupos ( 2 e 3) =	18,8333	0,001
Grupos ( 2 e 4) =	12	0,0358
Grupos ( 3 e 4) =	30,8333	< 0,0001

Figura 4.113: Análise de variância - *quadtree* - domínio 3T - tempo de compressão.

há diferenças entre a maioria das medidas. Além disso, a medida que obteve o melhor tempo dentro do conjunto de valores possíveis foi a entropia seguida, do desvio padrão, da média e das três medidas combinadas.

## Taxa de Compressão

O resultado da taxa de compressão, apresentado na tabela 4.119, mostra um cenário com a entropia sendo a medida de destaque.

Tabela 4.122: Análise descritiva - *quadtree* - domínio 3T - taxa de compressão.

Taxa de Compressão - QTCGLS - 3T	Média	Desvio Padrão	Entropia	3M
Tamanho da amostra =	12	12	12	12
Mínimo	0,648	0,725	1598,439	0,648
Máximo	1,203	1,872	6721,641	1,203
Mediana	0,8805	1,1985	4037,083	0,8805
Média Aritmética	0,9058	1,2021	4097,7077	0,9064

Segundo a análise descritiva 4.122, a medida de entropia obteve a maior taxa de compressão, que é muito superior às outras medidas. O gráfico da análise descritiva da figura 4.114 mostra a discrepância entre a entropia e as demais medidas.

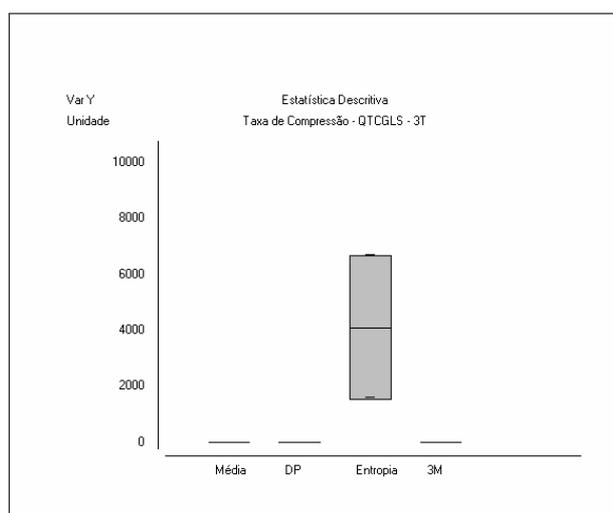


Figura 4.114: Análise descritiva - *quadtree* - domínio 3T - taxa de compressão.

Com o apoio da análise de variância da tabela 4.123, observa-se que a única medida que apresenta diferenças significativas com relação às demais é a entropia, como também é ilustrado no gráfico da figura 4.115.

Portanto, conclui-se que, entre as medidas utilizadas no algoritmo, a que obteve uma melhor taxa de compressão foi a entropia, seguida do desvio padrão, das três medidas combinadas e da média.

Tabela 4.123: Análise de Variância - Quadtree - Domínio 3T - Taxa de Compressão: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas.

Taxa de Compressão - QTCGLS - 3T	Resultados	- 2 -
H =	30,6266	
Graus de liberdade =	3	
(p) Kruskal-Wallis =	0	
R 1 (posto médio) =	15,2917	
R 2 (posto médio) =	24,8333	
R 3 (posto médio) =	42,5	
R 4 (posto médio) =	15,375	
Comparações Student-Newman-Keuls	Dif. Postos	p-valor
Grupos ( 1 e 2) =	9,5417	0,095
Grupos ( 1 e 3) =	27,2083	< 0,0001
Grupos ( 1 e 4) =	0,0833	0,9884
Grupos ( 2 e 3) =	17,6667	0,002
Grupos ( 2 e 4) =	9,4583	0,098
Grupos ( 3 e 4) =	27,125	< 0,0001

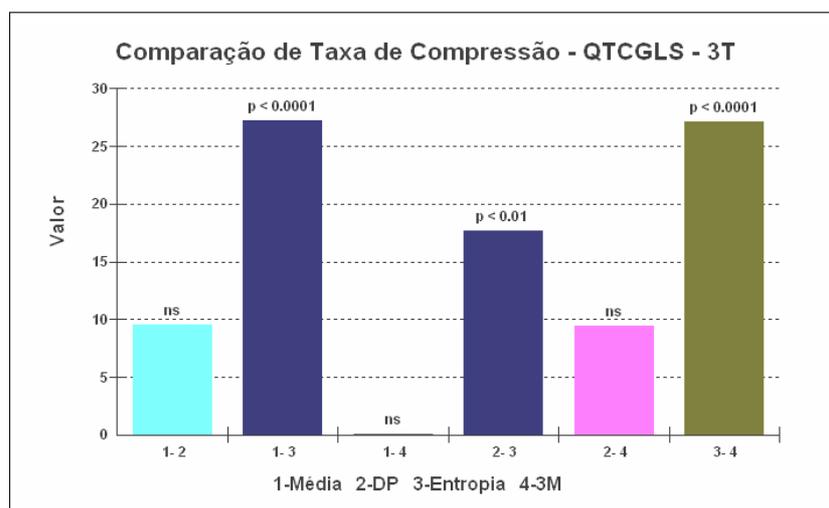


Figura 4.115: Análise de variância - *quadtree* - domínio 3T - taxa de compressão.

## RMSE

O comportamento da medida RMSE, apresentado na tabela 4.119, mostra que, quando a imagem tem tamanho menor, a imagem perde qualidade nesse contexto.

Tabela 4.124: Análise descritiva - *quadtree* - domínio 3T - RMSE.

RMSE - QTCGLS - 3T	Média	Desvio Padrão	Entropia	3M
Tamanho da amostra =	12	12	12	12
Mínimo	7,671	7,657	30,616	7,671
Máximo	171,973	111,619	42,155	171,973
Mediana	67,9125	43,7255	33,507	67,9125
Média Aritmética	76,6468	47,2583	34,537	76,6468

Com a análise descritiva, observa-se no item média aritmética da tabela 4.124 que a

entropia com valor 34,537 obteve a melhor qualidade de imagem.

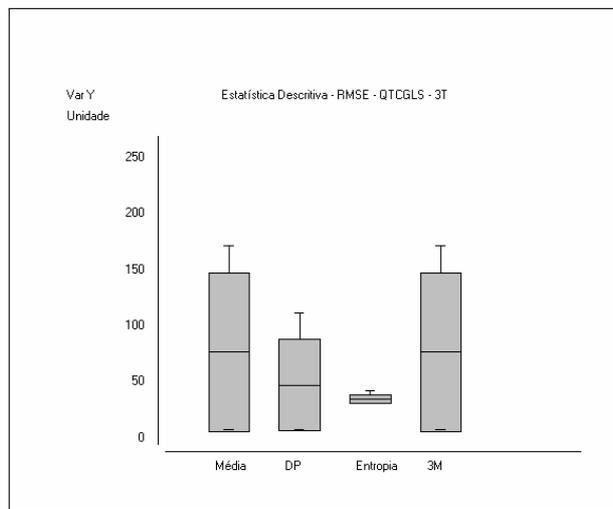


Figura 4.116: Análise descritiva - *quadtree* - domínio 3T - RMSE.

O gráfico da figura 4.116 ilustra a medida entropia se destacando entre as outras medidas, que mantiveram padrões de qualidade semelhantes.

Tabela 4.125: Análise de variância - *quadtree* - domínio 3T - RMSE.

RMSE - QTCGLS - 3T	Resultados
H =	1,2355
Graus de liberdade =	3
(p) Kruskal-Wallis =	0,7445

No entanto, através da análise de variância da tabela 4.125, verifica-se que entre as medidas não há diferenças significativas estatisticamente.

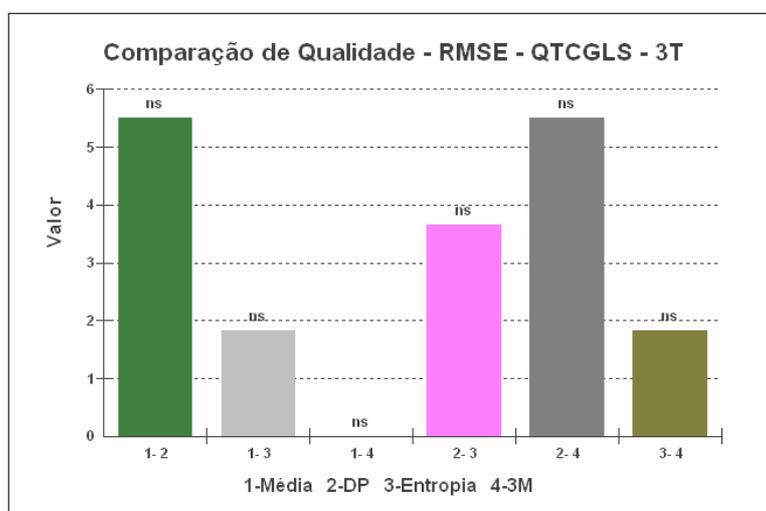


Figura 4.117: Análise de variância - *quadtree* - domínio 3T - RMSE,

Portanto, conclui-se que há semelhanças nos resultados referentes à qualidade obtida

pelas medidas, uma vez que não há diferenças estatísticas segundo a medida de Kruskal-Wallis. Entretanto, a entropia obteve o melhor valor de qualidade, seguida do desvio padrão, da média e das três medidas combinadas, com valores iguais na análise descritiva.

## PSNR

O comportamento apresentado pela medida RMSE com a entropia se destacando em qualidade é apresentado de forma diferente na medida PSNR, conforme a tabela 4.119 e a análise descritiva 4.126.

Tabela 4.126: Análise descritiva - *quadtree* - domínio 3T - PSNR,

<b>PSNR - QTCGLS - 3T</b>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Entropia</i>	<i>3M</i>
Tamanho da amostra =	12	12	12	12
Mínimo	3,422	7,176	15,634	3,422
Máximo	30,433	30,449	18,412	30,433
Mediana	15,9165	18,1245	17,628	15,9365
Média Aritmética	16,6906	19,1292	17,4158	16,6939

A análise descritiva mostra a entropia como a medida que obteve menor qualidade segundo os valores PSNR, conforme ilustrado na figura 4.118.

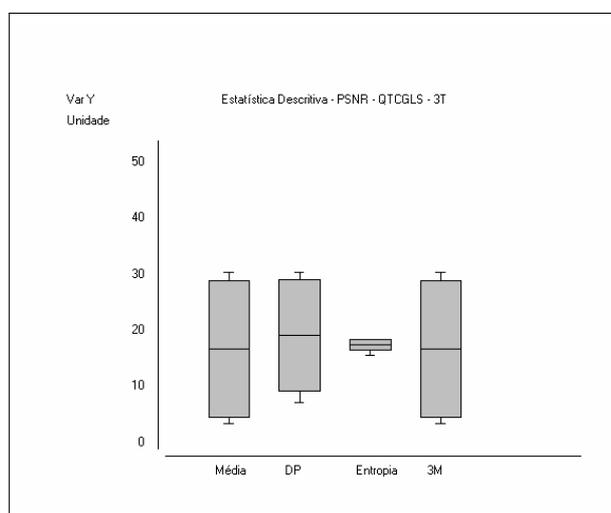


Figura 4.118: Análise descritiva - *quadtree* - domínio 3T - PSNR.

Tabela 4.127: Análise de variância - *quadtree* - domínio 3T - PSNR.

<b>PSNR - QTCGLS - 3T</b>	<i>Resultados</i>
H =	1,2356
Graus de liberdade =	3
(p) Kruskal-Wallis =	0,7445

De acordo com a análise de variância, os conjuntos de valores PSNR não apresentaram diferenças estatísticas significativas. A tabela 4.127 mostra o valor  $p < 0,7445$ , que mostra uma diferença muito pequena entre as medidas.

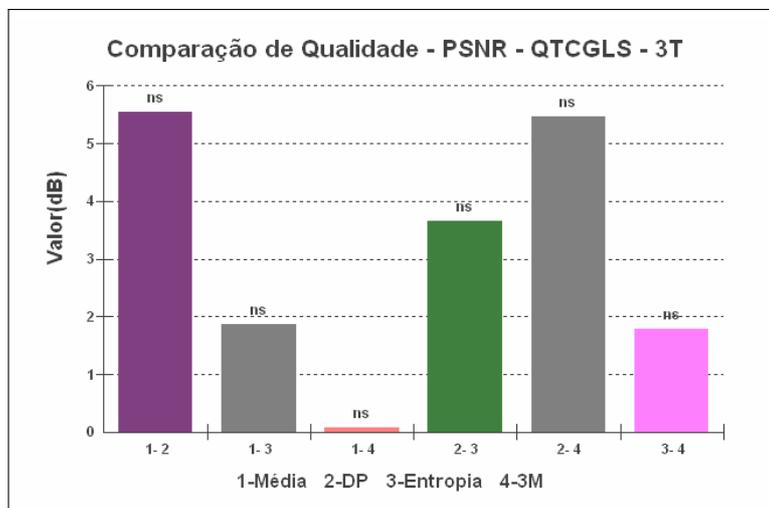


Figura 4.119: Análise de variância - *quadtree* - domínio 3T - PSNR.

O gráfico da figura 4.119 ilustra a relação de diferenças entre as medidas, tal que a entropia obteve um comportamento um pouco diferente do esperado de acordo com os valores RMSE, com melhor qualidade para o desvio padrão, seguido das três medidas combinadas, da média e da entropia.

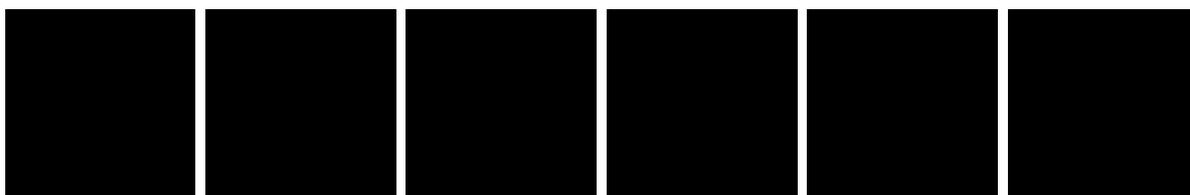
No entanto, a medida que obteve o melhor resultado em qualidade visual e não numericamente é a medida da média. As outras medidas são numericamente melhores devido ao seu conjunto de valores bem diferenciados e pela dificuldade de compressão da imagem.

## Resultado visual das imagens comprimidas

As imagens comprimidas, ilustradas na figura 4.120, são os resultados visuais do processo de compressão fractal baseada no particionamento *quadtree* com GLS, configuração de bloco 3T e medida de distância baseada na média. A sequência das imagens é a mesma apresentada na tabela 4.119.



(a)



(b)

Figura 4.120: Imagens comprimidas com particionamento *quadtree* com GLS, configuração de bloco 3T e medida de distância baseada na média. Os respectivos valores dos resultados das imagens estão na mesma sequência da tabela 4.119: (a) imagens com tamanho de bloco  $512 \times 512$  pixels; (b) imagens com tamanho de bloco  $256 \times 256$  pixels; (c) imagens com tamanho de bloco  $128 \times 128$  pixels; (d) imagens com tamanho de bloco  $64 \times 64$  pixels.

#### 4.5.4 Resultados da Quadtree com GLS - 4T

Esta seção apresenta os resultados do método de compressão com particionamento *quadtree* com busca local guiada (GLS) para o conjunto 4T.

##### Tempo de Compressão

O tempo de compressão, apresentado na tabela 4.128, possui variações entre as medidas. A medida entropia se destaca por possuir um tempo bem menor em relação às demais medidas.

A tabela de análise descritiva 4.129 mostra a entropia com média aritmética de 0,3155s, valor muito menor do que as outras medidas. O desvio padrão é a medida que mais se aproxima da entropia com valor 248.8823s. Os dados da análise descritiva são ilustrados na figura 4.121.

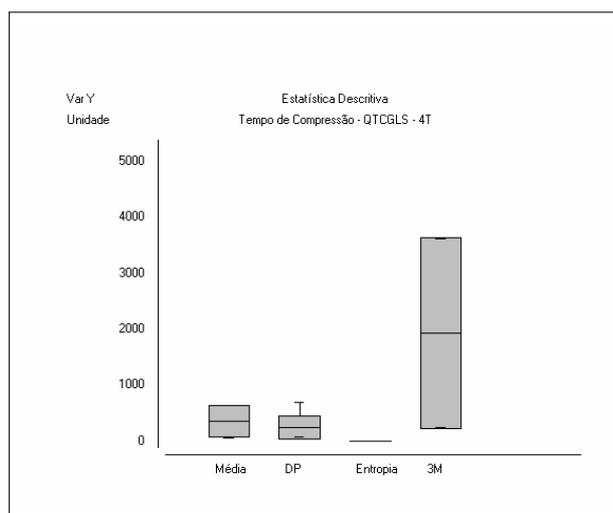


Figura 4.121: Análise descritiva - *quadtree* - domínio 4T - tempo de compressão.

Com a análise de variância apresentada na tabela 4.130, nota-se que há diferenças significativas entre as medidas. As únicas comparações que não apresentaram diferenças são entre a média e o desvio padrão e entre a média e as três medidas combinadas.

As outras comparações apresentaram diferenças no seu conjunto de valores, conforme ilustrado na figura 4.122. Portanto, conclui-se com estas análises que a medida que atingiu o melhor tempo foi a entropia, seguida do desvio padrão, da média e das três medidas combinadas.

Tabela 4.128: Compressão fractal de imagens por *quadtree* com GLS (QTCGLS) - domínio 4T.

Domínio: 4T		Medida: Média 4T						Medida: Desvio Padrão 4T						Medida: Entropia 4T						Medida: 3M 4T					
Imagem	Tempo(s)	Taxa	RMSE	PSNR	Tempo(s)	Taxa	RMSE	PSNR	Tempo(s)	Taxa	RMSE	PSNR	Tempo(s)	Taxa	RMSE	PSNR	Tempo(s)	Taxa	RMSE	PSNR					
Boat	74,934	1,171	10,875	27,402	88,058	1,404	10,862	27,412	0,457	385,505	26,628	19,624	311,922	1,171	10,875	27,402	311,922	1,171	10,875	27,402					
Fruits	512x512	83,666	9,917	28,203	81,508	1,631	8,378	29,668	0,579	400,219	22,867	20,947	345,840	1,195	9,917	28,203	345,840	1,195	9,917	28,203					
Goldhill	512x512	57,556	7,788	30,302	70,727	1,314	7,780	30,311	0,552	382,134	20,981	21,694	245,909	1,169	7,788	30,302	245,909	1,169	7,788	30,302					
Lenna	512x512	82,304	1,132	10,025	100,525	1,326	9,841	28,270	0,442	385,505	25,873	19,874	339,239	1,132	10,025	28,109	339,239	1,132	10,025	28,109					
Mandrill	512x512	60,121	13,557	25,488	85,822	1,155	13,552	25,491	0,515	383,812	25,060	20,151	248,271	1,113	13,557	25,488	248,271	1,113	13,557	25,488					
Paolina	133,035	1,203	7,671	30,433	74,793	1,873	7,657	30,449	0,483	380,470	18,503	22,786	344,760	1,203	7,671	30,433	344,760	1,203	7,671	30,433					
Boat	256x256	638,385	0,648	137,555	5,361	460,903	0,908	92,070	8,848	95,394	26,025	19,823	3611,535	0,648	137,555	5,361	3611,535	0,648	137,555	5,361					
Fruits	256x256	629,744	0,648	171,793	3,422	273,840	1,079	80,822	9,980	98,107	22,738	20,996	3586,127	0,648	171,793	3,422	3586,127	0,648	171,793	3,422					
Goldhill	256x256	631,241	0,648	122,268	6,385	465,101	0,855	75,461	10,576	95,117	20,729	21,799	3592,946	0,648	122,268	6,385	3592,946	0,648	122,268	6,385					
Lenna	256x256	631,263	0,648	132,449	5,690	383,384	0,915	73,899	10,758	95,117	25,700	19,932	3552,859	0,648	132,449	5,690	3552,859	0,648	132,449	5,690					
Mandrill	256x256	631,234	0,648	135,309	5,504	684,774	0,725	111,619	7,176	95,394	24,872	20,217	3549,247	0,648	135,309	5,504	3549,247	0,648	135,309	5,504					
Paolina	256x256	632,818	0,648	160,375	4,028	217,153	1,242	75,158	10,611	94,979	18,411	22,829	3549,902	0,648	160,375	4,028	3549,902	0,648	160,375	4,028					
Boat	128x128	*	**	**	**	*	**	**	**	*	**	**	*	**	**	**	*	**	**	**					
Fruits	128x128	*	**	**	**	*	**	**	**	*	**	**	*	**	**	**	*	**	**	**					
Goldhill	128x128	*	**	**	**	*	**	**	**	*	**	**	*	**	**	**	*	**	**	**					
Lenna	128x128	*	**	**	**	*	**	**	**	*	**	**	*	**	**	**	*	**	**	**					
Mandrill	128x128	*	**	**	**	*	**	**	**	*	**	**	*	**	**	**	*	**	**	**					
Paolina	128x128	*	**	**	**	*	**	**	**	*	**	**	*	**	**	**	*	**	**	**					
Boat	64x64	*	**	**	**	*	**	**	**	*	**	**	*	**	**	**	*	**	**	**					
Fruits	64x64	*	**	**	**	*	**	**	**	*	**	**	*	**	**	**	*	**	**	**					
Goldhill	64x64	*	**	**	**	*	**	**	**	*	**	**	*	**	**	**	*	**	**	**					
Lenna	64x64	*	**	**	**	*	**	**	**	*	**	**	*	**	**	**	*	**	**	**					
Mandrill	64x64	*	**	**	**	*	**	**	**	*	**	**	*	**	**	**	*	**	**	**					
Paolina	64x64	*	**	**	**	*	**	**	**	*	**	**	*	**	**	**	*	**	**	**					

Legenda

\* Número máximo de partições *quadtree* deve ser reduzido.

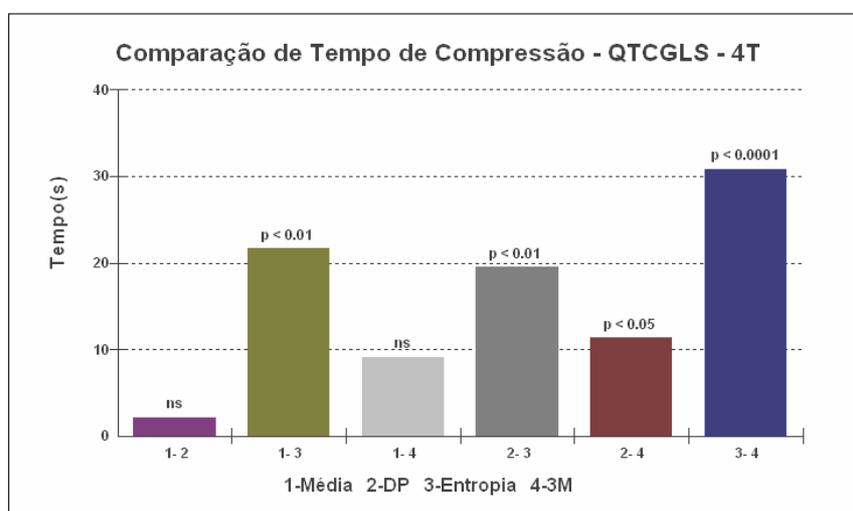
\*\* ERRO.

Tabela 4.129: Análise descritiva - *quadtree* - domínio 4T - tempo de compressão.

Tempo de Compressão - QTCGLS - 4T	Média	Desvio Padrão	Entropia	3M
Tamanho da amostra =	12	12	12	12
Mínimo	57,556	70,727	0,114	245,909
Máximo	638,385	684,774	0,579	3611,535
Mediana	381,3895	158,839	0,299	1947,5435
Média Aritmética	357,1918	248,8823	0,3155	1939,8798

Tabela 4.130: Análise de variância - *quadtree* - domínio 4T - tempo de compressão: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas.

Tempo de Compressão - QTCGLS - 4T	Resultados	- 2 -
H =	30,881	
Graus de liberdade =	3	
(p) Kruskal-Wallis =	0	
R 1 (posto médio) =	28,1667	
R 2 (posto médio) =	26	
R 3 (posto médio) =	6,5	
R 4 (posto médio) =	37,3333	
Comparações Student-Newman-Keuls	Dif. Postos	p-valor
Grupos ( 1 e 2) =	2,1667	0,7046
Grupos ( 1 e 3) =	21,6667	0,0002
Grupos ( 1 e 4) =	9,1667	0,1088
Grupos ( 2 e 3) =	19,5	0,0006
Grupos ( 2 e 4) =	11,3333	0,0474
Grupos ( 3 e 4) =	30,8333	< 0,0001

Figura 4.122: Análise de variância - *quadtree* - domínio 4T - tempo de compressão.

## Taxa de Compressão

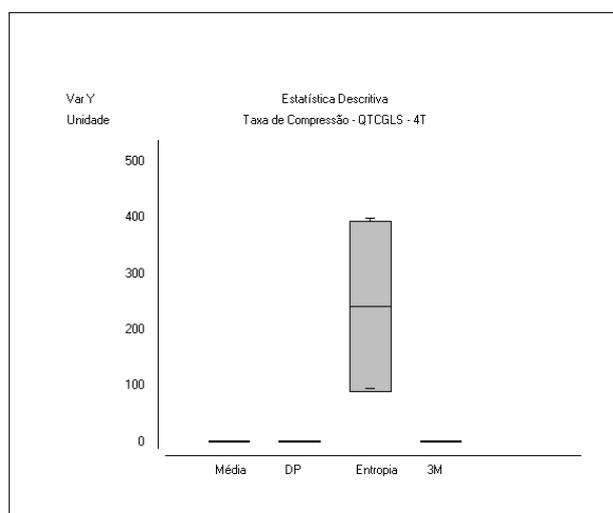
Os valores da taxa de compressão apresentados na tabela 4.128 são semelhantes entre as medidas, exceto pela entropia que se diferencia bastante.

Segundo a análise descritiva, a entropia apresenta alta taxa de compressão 240,9794,

Tabela 4.131: Análise descritiva - *quadtree* - domínio 4T - taxa de compressão.

Taxa de Compressão - QTCGLS - 4T	Média	Desvio Padrão	Entropia	3M
Tamanho da amostra =	12	12	12	12
Mínimo	0,648	0,725	94,979	0,648
Máximo	1,203	1,873	400,219	1,203
Mediana	0,8805	1,1985	239,2885	0,8805
Média Aritmética	0,9059	1,2023	240,9794	0,9059

diferente da média que apresenta o valor 0,9059. O gráfico da análise descritiva 4.123 ilustra essas diferenças, sendo que a entropia se destaca por ter alta taxa.

Figura 4.123: Análise descritiva - *quadtree* - domínio 4T - taxa de compressão.Tabela 4.132: Análise de variância - *quadtree* - domínio 4T - taxa de compressão: 1-Média, 2-Desvio Padrão, 3-Entropia, 4-3 Medidas.

Taxa de Compressão - QTCGLS - 4T	Resultados	- 2 -
H =	30,623	
Graus de liberdade =	3	
(p) Kruskal-Wallis =	0	
R 1 (posto médio) =	15,3333	
R 2 (posto médio) =	24,8333	
R 3 (posto médio) =	42,5	
R 4 (posto médio) =	15,3333	
Comparações Student-Newman-Keuls	Dif. Postos	p-valor
Grupos ( 1 e 2) =	9,5	0,0965
Grupos ( 1 e 3) =	27,1667	< 0,0001
Grupos ( 1 e 4) =	0	1
Grupos ( 2 e 3) =	17,6667	0,002
Grupos ( 2 e 4) =	9,5	0,0965
Grupos ( 3 e 4) =	27,1667	< 0,0001

O recurso da análise de variância auxilia a conclusão sobre as diferenças estatísticas entre as medidas. Por isso, verifica-se na tabela 4.132 que entre a média e desvio padrão

e entre o desvio padrão e as três medidas combinadas não há diferenças significativas. Entretanto, os resultados das medidas se distinguem nas demais comparações.

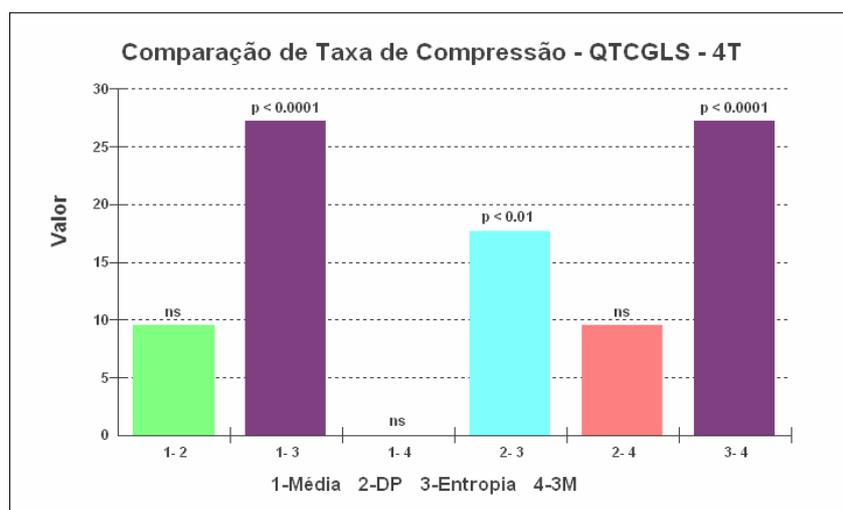


Figura 4.124: Análise de variância - *quadtree* - domínio 4T - taxa de compressão.

Portanto, com a análise descritiva e a ilustração da análise de variância do gráfico da figura 4.124, conclui-se que a medida que obteve maior taxa de compressão foi a entropia, seguida do desvio padrão, média e as três medidas combinadas com médias aritméticas iguais, conforme tabela 4.131.

## RMSE

Os valores, apresentados na tabela 4.128, mostram o RMSE com valores variados, mas que indicam a perda da qualidade para imagens de tamanho  $256 \times 256$  pixels.

Tabela 4.133: Análise descritiva - *quadtree* - domínio 4T - RMSE.

RMSE - QTCGLS - 4T	Média	Desvio Padrão	Entropia	3M
Tamanho da amostra =	12	12	12	12
Mínimo	7,671	7,657	18,411	7,671
Máximo	171,793	111,619	26,628	171,973
Mediana	67,9125	43,7255	23,8695	67,9125
Média Aritmética	76,6318	47,2583	23,1989	76,6468

A análise descritiva na tabela 4.133 mostra que a medida de entropia obteve a melhor qualidade na compressão da imagem nesse contexto, também ilustrado no gráfico da imagem 4.125.

Com a análise de variância da tabela 4.134 verifica-se que mesmo que a entropia tenha

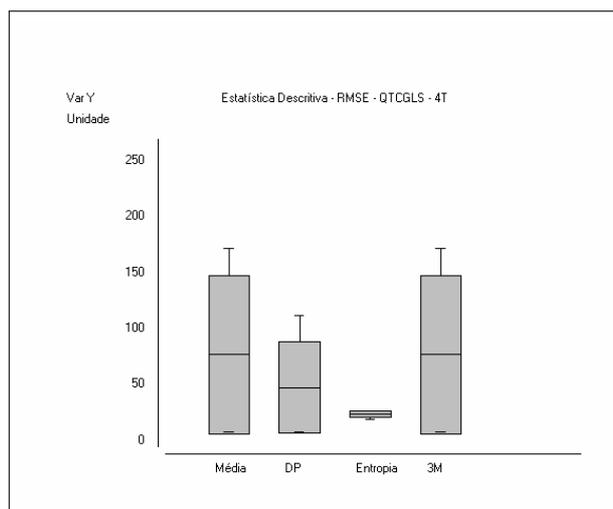


Figura 4.125: Análise descritiva - *quadtree* - domínio 4T - RMSE.

Tabela 4.134: Análise de variância - *quadtree* - domínio 4T - RMSE.

<b>RMSE - QTCGLS - 4T</b>	<i>Resultados</i>
H =	1,2356
Graus de liberdade =	3
(p) Kruskal-Wallis =	0,7445

um valor de destaque, nota-se que, ao comparar todos os conjuntos de valores RMSE das medidas, não há diferença significativa, conforme gráfico da figura 4.126

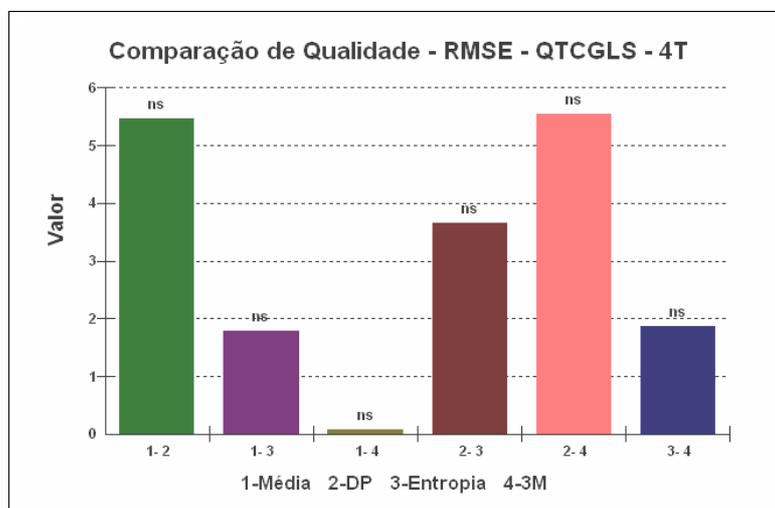


Figura 4.126: Análise de variância - *quadtree* - domínio 4T - RMSE.

Portanto, conclui-se que a entropia obteve valor de melhor qualidade, seguida do desvio padrão, média e das três medidas combinadas. Porém, quando essas medidas são comparadas por seus conjuntos de resultados, verifica-se que não há diferenças estatísticas.

## PSNR

Os valores dos resultados da medida PSNR apresentam uma perda de qualidade quando a imagem tem o tamanho de bloco  $256 \times 256$  pixels, mas com a entropia esse comportamento de perda de qualidade se mantém estável dentro do seu padrão nesse contexto.

Tabela 4.135: Análise descritiva - *quadtree* - domínio 4T - PSNR.

<b>PSNR - QTCGLS - 4T</b>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Entropia</i>	<i>3M</i>
Tamanho da amostra =	12	12	12	12
Mínimo	3,422	7,176	19,624	3,422
Máximo	30,433	30,449	22,829	30,433
Mediana	15,9365	18,1245	20,582	15,9365
Média Aritmética	16,6939	19,1292	20,8893	16,6939

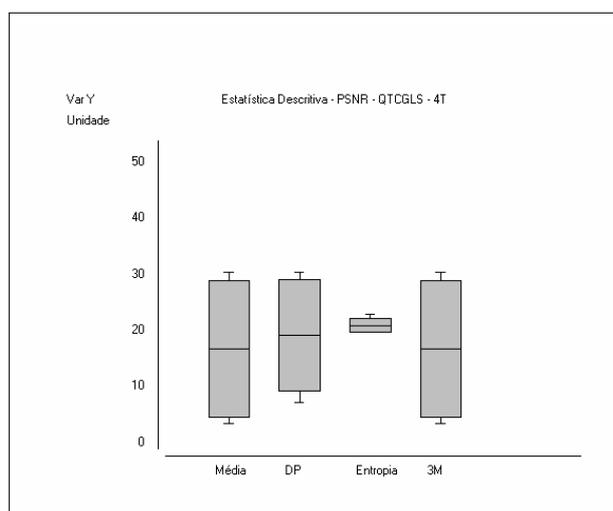


Figura 4.127: Análise descritiva - *quadtree* - domínio 4T - PSNR.

Com a análise descritiva da tabela 4.135 e o gráfico da figura 4.127, verifica-se que a medida que obteve melhor qualidade de imagem foi a entropia com o valor 20,8893, indicado no item média aritmética da tabela de análise descritiva.

Tabela 4.136: Análise de variância - *quadtree* - domínio 4T - PSNR.

<b>PSNR - QTCGLS - 4T</b>	<i>Resultados</i>
H =	1,2355
Graus de liberdade =	3
(p) Kruskal-Wallis =	0,7445

A análise de variância apresenta um cenário diferente e, apesar do destaque da medida de entropia, verifica-se pelo resultado da tabela 4.136 que ao se comparar o conjunto de resultados das medidas não há diferenças significativas.

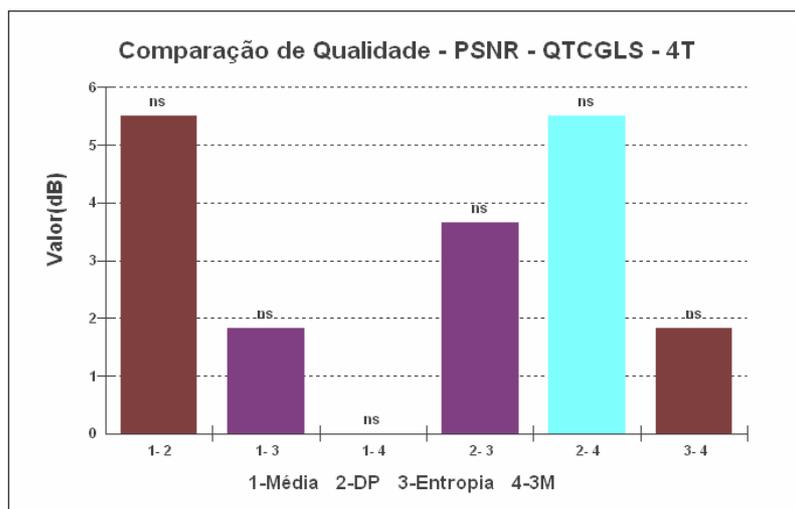


Figura 4.128: Análise de variância - *quadtree* - domínio 4T - PSNR.

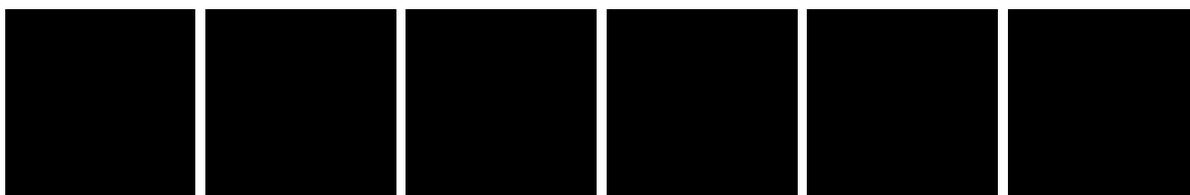
Portanto, conclui-se que a medida que obteve melhor PSNR foi a entropia, seguida do desvio padrão, da média e das três medidas combinadas, com a mesma média aritmética de acordo com a tabela 4.135.

## Resultado visual das imagens comprimidas

As imagens comprimidas ilustradas na figura 4.129 são os resultados visuais do processo de compressão fractal baseada no particionamento *quadtree* com GLS, configuração de bloco 4T e medida de distância baseada na média. A sequência das imagens é a mesma apresentada na tabela 4.128.



(a)



(b)

Figura 4.129: Imagens comprimidas com particionamento *quadtree* com GLS, configuração de bloco 4T e medida de distância baseada na média. Os respectivos valores dos resultados das imagens estão na mesma sequência da tabela 4.128: (a) imagens com tamanho de bloco  $512 \times 512$  pixels; (b) imagens com tamanho de bloco  $256 \times 256$  pixels; (c) imagens com tamanho de bloco  $128 \times 128$  pixels; (d) imagens com tamanho de bloco  $64 \times 64$  pixels.

## 4.6 Comparação entre Quadtree e Quadtree com GLS

O objetivo desta seção é apresentar os melhores resultados da comparação entre os algoritmos de compressão com particionamento *quadtree* convencional e particionamento *quadtree* com a busca local guiada (GLS), a partir de quatro itens: tempo de compressão, taxa de compressão, RMSE, PSNR.

Essas duas abordagens compactaram as mesmas imagens e geraram resultados diferentes (tabela 4.137), o objetivo é destacar os pontos positivos de cada algoritmo com relação aos itens acima.

Segundo os dados apresentados na tabela 4.137 de análise descritiva, nota-se que o método que apresentou melhor tempo de compressão no conjunto de dados é o de *quadtree* sem GLS, com a medida entropia e configuração de bloco 2T. O valor da sua média aritmética é 0,0997 e mediana de 0,05. O segundo melhor valor é da *quadtree* com GLS, com a medida entropia e configuração de bloco 2T, com o valor de média aritmética de 0,1108 e mediana de 0,0485.

As imagens resultantes pelo método *quadtree* com GLS são ilustradas nas figuras 4.130 e as imagens resultantes do método *quadtree* sem GLS são ilustradas nas figuras 4.131.

As imagens resultantes com a medida entropia apresentam degradação, não há percepção visual para essas imagens. O tempo foi melhor com relação às outras compressões, mas não obteve o mínimo de qualidade.

Os resultados dos algoritmos *quadtree* sem GLS e *quadtree* com GLS quanto à taxa de compressão são apresentados na tabela 4.138. Observa-se nestes dados que as taxas de compressão são muito próximas e praticamente se repetem quando as imagens são comprimidas dentro do mesmo contexto, ou seja, no conjunto de cada medida e configuração de bloco, as taxas de compressão são muito próximas. Para a configuração de bloco 1T, a taxa é 128,3651, para blocos 2T a taxa é 2165,1103, para blocos 3T a taxa é 4097,7077 e para blocos 4T a taxa é 240,9794. Portanto, conclui-se que, independentemente do método e das medidas utilizadas, o que influencia a alteração da taxa de compressão é a configuração dos blocos.

Os resultados da comparação de qualidade RMSE entre os métodos são apresentados

Tabela 4.137: Comparação dos resultados da *quadtree* sem GLS e da *quadtree* com GLS - tempo de compressão.

Tempo de Compressão	Média-QTCGLS-1T			Entropia-QTCGLS-1T			3M-QTCGLS-1T			Média-QTCGLS-2T			DP-QTCGLS-2T			Entropia-QTCGLS-2T			3M-QTCGLS-2T		
	24	12	24	24	12	24	24	12	24	24	12	24	24	12	24	24	12	24	24	12	24
Tamanho da amostra =	24	12	24	24	12	24	24	12	24	24	12	24	24	12	24	24	12	24	24	12	24
Mínimo	0,259	0,398	0,398	0,008	0,073	0,008	1,378	1,378	0,333	0,333	0,412	0,004	0,259	0,004	0,259	0,004	0,259	0,004	0,259	0,004	0,259
Máximo	2,727	3,097	3,097	0,646	0,297	0,646	13,915	13,915	2,637	2,637	3,016	0,485	10,752	0,485	10,752	0,485	10,752	0,485	10,752	0,485	10,752
Mediana	0,624	0,8165	0,8165	0,0775	0,1965	0,0775	4,9445	4,9445	0,625	0,625	0,9075	0,0485	1,4835	0,0485	1,4835	0,0485	1,4835	0,0485	1,4835	0,0485	1,4835
Média Aritmética	1,0549	1,2823	1,2823	0,1826	0,1859	0,1826	6,6908	6,6908	1,0818	1,0818	1,2954	0,1108	3,2455	0,1108	3,2455	0,1108	3,2455	0,1108	3,2455	0,1108	3,2455
<b>Tempo de Compressão</b>	<b>Média-QTCGLS-3T</b>			<b>Entropia-QTCGLS-3T</b>			<b>3M-QTCGLS-3T</b>			<b>Média-QTCGLS-4T</b>			<b>DP-QTCGLS-4T</b>			<b>Entropia-QTCGLS-4T</b>			<b>3M-QTCGLS-4T</b>		
Tamanho da amostra =	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Mínimo	61,336	58,829	58,829	0,073	0,073	0,073	245,567	245,567	57,556	57,556	70,727	0,114	245,909	0,114	245,909	0,114	245,909	0,114	245,909	0,114	245,909
Máximo	637,957	681,683	681,683	0,297	0,297	0,297	3572,743	3572,743	638,385	638,385	684,774	0,579	3611,535	0,579	3611,535	0,579	3611,535	0,579	3611,535	0,579	3611,535
Mediana	362,6535	151,6915	151,6915	0,1965	0,1965	0,1965	1947,4565	1947,4565	381,3895	381,3895	158,839	0,299	1947,5435	0,299	1947,5435	0,299	1947,5435	0,299	1947,5435	0,299	1947,5435
Média Aritmética	356,5703	241,253	241,253	0,1859	0,1859	0,1859	1930,8112	1930,8112	357,1918	357,1918	248,8823	0,3155	1939,8798	0,3155	1939,8798	0,3155	1939,8798	0,3155	1939,8798	0,3155	1939,8798
<b>Tempo de Compressão</b>	<b>Média-QTSGLS-1T</b>			<b>Entropia-QTSGLS-1T</b>			<b>3M-QTSGLS-1T</b>			<b>Média-QTSGLS-2T</b>			<b>DP-QTSGLS-2T</b>			<b>Entropia-QTSGLS-2T</b>			<b>3M-QTSGLS-2T</b>		
Tamanho da amostra =	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
Mínimo	0,228	0,355	0,355	0,009	0,009	0,009	1,314	1,314	0,279	0,279	0,358	0,004	0,648	0,004	0,648	0,004	0,648	0,004	0,648	0,004	0,648
Máximo	1,902	3,067	3,067	0,636	0,636	0,636	13,305	13,305	1,874	1,874	2,549	0,305	21,296	0,305	21,296	0,305	21,296	0,305	21,296	0,305	21,296
Mediana	0,4985	0,8575	0,8575	0,0755	0,0755	0,0755	4,9185	4,9185	0,5605	0,5605	0,814	0,05	3,2155	0,05	3,2155	0,05	3,2155	0,05	3,2155	0,05	3,2155
Média Aritmética	0,8389	1,142	1,142	0,1776	0,1776	0,1776	6,5123	6,5123	0,854	0,854	1,1267	0,0997	7,0078	0,0997	7,0078	0,0997	7,0078	0,0997	7,0078	0,0997	7,0078
<b>Tempo de Compressão</b>	<b>Média-QTSGLS-3T</b>			<b>Entropia-QTSGLS-3T</b>			<b>3M-QTSGLS-3T</b>			<b>Média-QTSGLS-4T</b>			<b>DP-QTSGLS-4T</b>			<b>Entropia-QTSGLS-4T</b>			<b>3M-QTSGLS-4T</b>		
Tamanho da amostra =	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Mínimo	46,637	52,535	52,535	0,073	0,073	0,073	236,967	236,967	47,985	47,985	52,181	0,116	235,79	0,116	235,79	0,116	235,79	0,116	235,79	0,116	235,79
Máximo	494,281	575,182	575,182	0,323	0,323	0,323	3427,732	3427,732	527,653	527,653	571,832	0,541	3436,905	0,541	3436,905	0,541	3436,905	0,541	3436,905	0,541	3436,905
Mediana	274,576	130,355	130,355	0,1845	0,1845	0,1845	1874,7175	1874,7175	277,093	277,093	135,487	0,2915	1876,2145	0,2915	1876,2145	0,2915	1876,2145	0,2915	1876,2145	0,2915	1876,2145
Média Aritmética	272,9923	206,6058	206,6058	0,1863	0,1863	0,1863	1857,8775	1857,8775	278,266	278,266	205,8242	0,3116	1862,3902	0,3116	1862,3902	0,3116	1862,3902	0,3116	1862,3902	0,3116	1862,3902







Figura 4.130: Imagens comprimidas com *quadtree* com GLS e modelo 2T: (a) imagem da Lenna com  $512 \times 512$  pixels original; (b) imagem da Lenna com  $512 \times 512$  pixels comprimida. (c) imagem Lenna com  $256 \times 256$  pixels comprimida; (d) imagem Lenna com  $128 \times 128$  pixels comprimida; (e) imagem Lenna com  $64 \times 64$  pixels comprimida.

na tabela 4.139. A medida RMSE define o menor valor como sendo o que apresenta melhor qualidade. Por isso, o método *quadtree* sem GLS com as três medidas combinadas e configuração de bloco 4T com valor de 12,8243 obteve a melhor qualidade de imagem.



Figura 4.131: Imagens comprimidas com *quadtree* sem GLS e modelo 2T: (a) imagem da Lenna com  $512 \times 512$  pixels original; (b) imagem da Lenna com  $512 \times 512$  pixels comprimida; (c) imagem Lenna com  $256 \times 256$  pixels comprimida; (d) imagem Lenna com  $128 \times 128$  pixels comprimida; (e) imagem Lenna com  $64 \times 64$  pixels comprimida.

O segundo melhor resultado é da medida entropia do método *quadtree* com GLS com a configuração de bloco 4T com valor de 23,1989. As imagens desses resultados são ilustradas nas figuras 4.132 e 4.133.

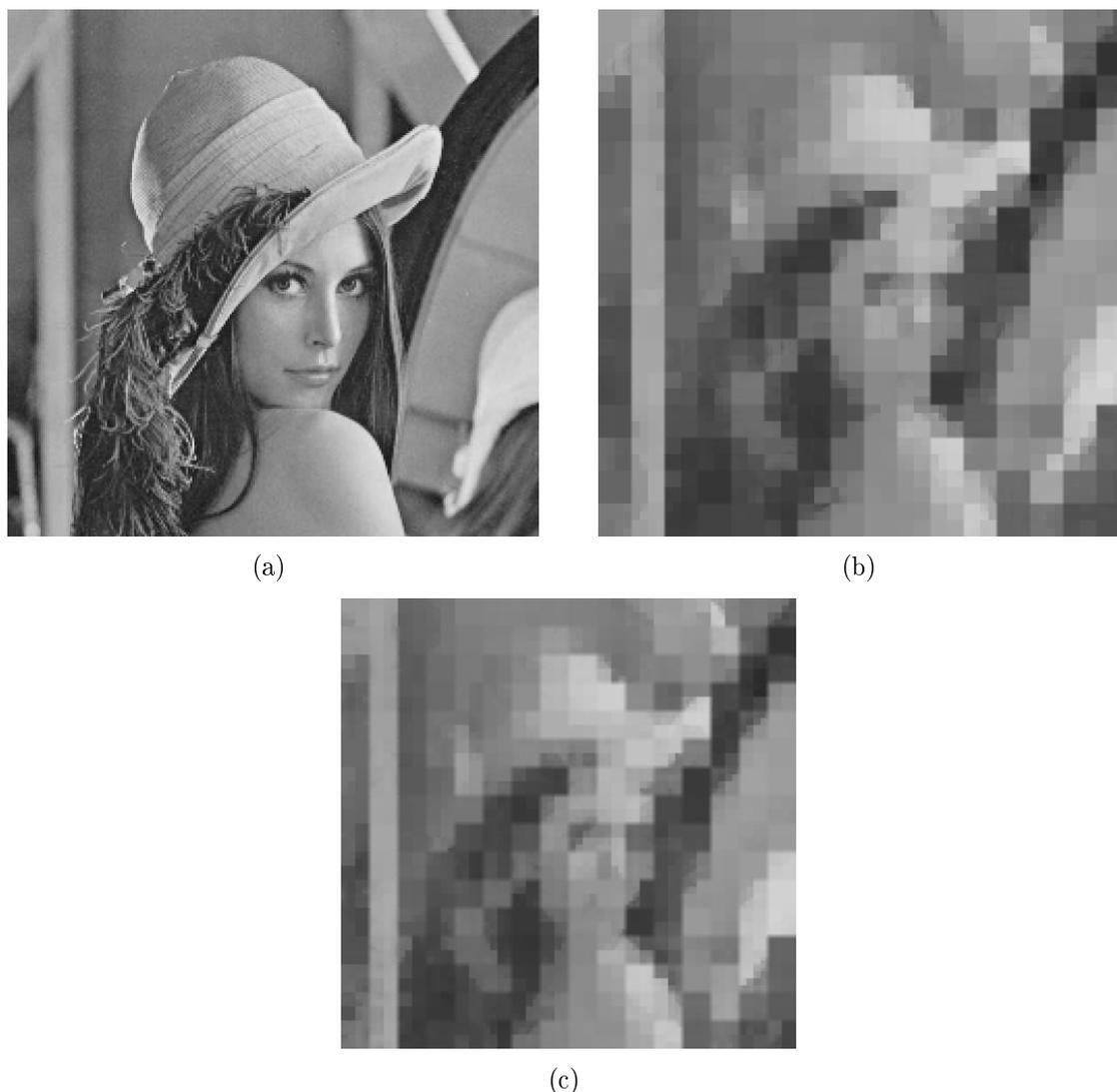


Figura 4.132: Imagens comprimidas com *quadtree* com GLS e modelo 4T: (a) imagem da Lenna com  $512 \times 512$  pixels original; (b) imagem da Lenna com  $512 \times 512$  pixels comprimida; (c) imagem Lenna com  $256 \times 256$  pixels comprimida.

Os algoritmos da *quadtree* com e sem GLS apresentam problemas em algumas configurações de blocos, especialmente na configuração 3T e 4T. Esses problemas ocorrem devido aos parâmetros dos algoritmos que são ultrapassados, impossibilitando a compressão de determinadas imagens.

No contexto apresentado pelos métodos o *quadtree* e *quadtree* com GLS, a qualidade PSNR não segue totalmente a medida RMSE. A tabela 4.140 mostra os resultados dos métodos quanto à medida PSNR. Os melhores valores de qualidade são obtidos com as três medidas combinadas da *quadtree* sem GLS na configuração de bloco 1T com valor de 24,9758, não sendo a mesma medida do resultado RMSE. O segundo melhor resultado



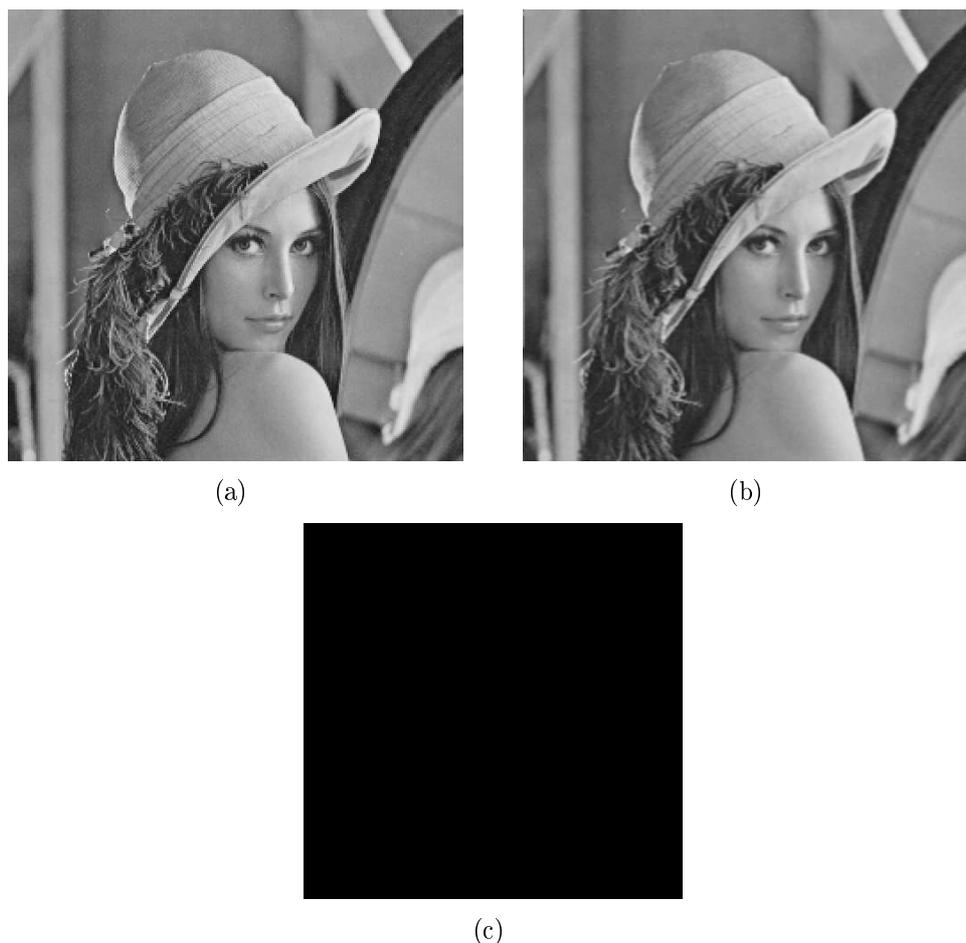


Figura 4.133: Imagens comprimidas com Quadtree e modelo 4T: (a) Imagem da Lenna com  $512 \times 512$  pixels original; (b) Imagem da Lenna com  $512 \times 512$  pixels comprimida; (c) Imagem Lenna com  $256 \times 256$  pixels comprimida.

PSNR foi a entropia da *quadtree* com GLS na configuração de bloco 4T com valor de 20,8893. As imagens resultantes da medida PSNR são ilustradas na figura 4.134.

Portanto, conclui-se a partir desses resultados que a técnica heurística de busca local guiada não proporciona melhores resultados à técnica *quadtree*.

A heurística da busca local guiada para este tipo de problema não contribui para a resolução do problema, pois a aplicação das funções de penalidades e custo da função não conseguem determinar exatamente os locais mínimos e globais mínimos.



Figura 4.134: Imagens comprimidas com *quadtree* sem GLS e modelo 1T: (a) imagem da Lenna com  $512 \times 512$  pixels original; (b) imagem da Lenna com  $512 \times 512$  pixels comprimida; (c) imagem Lenna com  $256 \times 256$  pixels comprimida; (d) imagem Lenna com  $128 \times 128$  pixels comprimida; (e) imagem Lenna com  $64 \times 64$  pixels comprimida.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A compressão fractal de imagens tem o objetivo de obter altas taxas de compressão, redução do esforço computacional e reconstrução de imagens de boa qualidade.

Este trabalho apresentou a compressão fractal de imagens com o objetivo de avaliar os algoritmos baseados em *quadtree* e busca exaustiva e propor a aplicação da heurística busca local guiada no algoritmo da *quadtree* e a estrutura de dados *hash table* no algoritmo da busca exaustiva, procurando melhorar o desempenho dos algoritmos em relação ao tempo de compressão.

Na abordagem com *quadtree*, o processo de classificação dos pixels antes da divisão dos nodos da árvore é feito pela varredura dos pixels da vizinhança em busca de similaridades sem nenhum método heurístico. No algoritmo da busca exaustiva, todos os blocos são comparados uns com os outros para selecionar o melhor bloco.

Para alcançar o objetivo planejado, a metodologia incluiu a implementação do código fractal da *quadtree* padrão e outra versão do código *quadtree* com a busca local guiada para permitir a utilização de um método de busca heurística, bem como a implementação do código de busca exaustiva padrão e outra versão com a *hash table*.

Para avaliar os resultados obtidos, utilizou-se o tempo de compressão, a taxa de compressão e as medidas de qualidade RMSE e PSNR. Além disso, quatro medidas de similaridade entre blocos foram consideradas, a média, o desvio padrão, a entropia e a combinação dessas medidas.

A partir da proposição dos algoritmos e das medidas de similaridade, utilizou-se um conjunto de seis imagens. Cada imagem é utilizada nos algoritmos com quatro dimensões diferentes,  $512 \times 512$ ,  $256 \times 256$ ,  $128 \times 128$  e  $64 \times 64$  pixels.

A avaliação dos resultados obtidos pelos algoritmos foi realizada pelo pacote estatístico BioEstat 5.0.

Após os processos de implementação, compressão das imagens e avaliação dos resultados, conclui-se que a busca local guiada não melhorou o desempenho do algoritmo na avaliação do conjunto total de dados. Ela apresenta um desempenho de microssegundos em algumas compressões, mas no conjunto total de imagens não melhorou o desempenho. Por outro lado, a técnica baseada em *hash table* melhorou de forma significativa o desempenho do algoritmo de busca exaustiva e também contribuiu para melhorar a qualidade das imagens, algo que não era esperado na aplicação dos testes.

A pesquisa apresentada aqui proporciona a possibilidade de aprimoramento da pesquisa, visto que algumas características que necessitam de maiores estudos não foram abordadas.

Propostas para trabalhos futuros incluem o aprimoramento dos algoritmos para comprimir imagens coloridas [56], a implementação de outras heurísticas para acelerar o processo de compressão e o estudo de funções de espalhamento (*hashing*) perfeito para melhorar o processo de busca dos blocos. Finalmente, planeja-se estender os algoritmos para compressão de vídeos e comparação com o método JPEG.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AGOSTINE, L., SILVA, I. E BAMPI, S. *Projeto de arquitetura de codificador de entropia para compressão JPEG para imagens em tons de cinza*. VIII WORKSHOP IBERCHIP, Guadalajara, México, 2002.
- [2] BARNESLEY, M. F. E HURD, L. P. *Fractal image compression*. A. K. Peters, Ltda., Natick, MA, USA, 1993.
- [3] CHANG, Y.-C., SHYU, B.-K. E WANG, J.-S. Region-based fractal image compression with quadtree segmentation. In *ICASSP '97: Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP '97) -Volume 4* (Washington, DC, USA, 1997), IEEE Computer Society, p. 3125.
- [4] CONCI, A. E AQUINO, F. Fractal image coding by multi-scale selection based on block complexity. *Journal for Geometry and Graphics* 3, 1 (1999), 57–65.
- [5] CONCI, A. E AQUINO, F. Fractal coding based on image local fractal dimension. *Computational and Applied Mathematics - Scielo Brazil* 24, 1 (2005), 83–98. ISSN 0101-8205.
- [6] CONCI, A. E AQUINO, F. R. Codificação fractal / fractal coding. <http://www.icuff.br/~aconci/compressao/fractal.htm>, 1998. Acesso em 2 de julho de 2008.
- [7] CORMEN, T., RIVEST, C., RONALD, H. E STEIN, C. *Algoritmos: teoria e prática*, 2 ed. Campus, Rio de Janeiro, 2002.
- [8] CRUZ, A., DA SILVA, F. E ET ALL. Codificação fractal de imagens. *Revista Telecomunicações* 11, 1 (5-2008).
- [9] CURTIS, S. E MARTIN, C. Functional fractal image compression. *6th Symposium on Trends in Functional Programming - TFP 2005* (2005), <http://www.cs.ioc.ee/tfp--icfp--gpce05/tfp--proc/>, acesso em: 3 de março de 2009.

- [10] DE ASSIS, T. A., MIRANDA, J. G. V. E ET AL. Geometria fractal: propriedades e características de fractais ideais. *Revista Brasileira de Ensino de Física - Scielo Brazil* 30, 2-2304 (2008).
- [11] DENG, H., WENG, W., LI, L. E YU, Y. An efficient fractal image compression method. *International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Computational Cybernetics and Simulation IEEE* 5 (Outubro 1997), 4204–4206.
- [12] DVOSDEK, A. *Estrutura de dados e algoritmos em C++*. Pioneira Thomson Learning, São Paulo, 2002.
- [13] EUROPE, T. I. *An introduction to fractal image compression*. [focus.tij.co.jp/jp/lit/an/bpra065/bpra065.pdf](http://focus.tij.co.jp/jp/lit/an/bpra065/bpra065.pdf), acesso em: 2 de fevereiro de 2008, Outubro 1997. Literature Number: BPRA065 - TI Europe.
- [14] FALCONER, K. *Fractal geometry mathematical foundations and application*. John Wiley e Sons, Chichester, 1990.
- [15] FALCONER, K. *Techniques in fractal geometry*. John Wiley e Sons, Chichester, 1997.
- [16] FERRAZ, M. *Codificação de imagens*. Dissertação de mestrado, Instituto de Matemática Pura e Aplicada, Rio de Janeiro-RJ, 1998.
- [17] FISHER, Y. *Fractal image compression*. SIGGRAPH - Course Notes, San Diego, 1992.
- [18] FISHER, Y. *Fractal image compression - theory and application*. Springer-Verlag, New York, 1995.
- [19] FREDMAN, M. E KOMLÓS, J. Storing a sparse table with  $o(1)$  worst case access time. *Journal of the Association for Computing Machinery - Budapest, Hungary* 31, 3 (7-1984), 538–544. ACM 0004-5411/84/0700-0538.
- [20] GIMP. GIMP - The GNU Image Manipulation Program, 2009. <http://www.gimp.org/>, acesso em: 10 de março de 2009.

- [21] GONZALEZ, R. E WOODS, R. *Digital image processing*, vol. 2. Prentice Hall, New Jersey, 2001.
- [22] HASSABALLAH, M. E MAHDY, M. M. Y. A fast fractal image compression method based entropy. *ELCVIA* 5, 1 (2005), <http://elcvia.cvc.uab.es/index.php/elcvia/article/view/82>, acesso em: 4 de abril de 2009.
- [23] KARAM, L. E BOVICK, A. *Handbook of image and video processing*. New York: Academic Press, 2000.
- [24] KOMINEK, J. Algorithm for fast fractal image compression. In *Symposium on Electronic Imaging: Science and Technology in: Proceedings from IS&T/SPIE* (1995), vol. Digital Video Compression: Algorithms and Technologies 2419, pp. 296–305.
- [25] KOROUTCHEV, K. E DORRONSORO, J. Hash-like fractal image compression with linear execution time. *Iberian Conference on Pattern Recognition and Image Analysis - IbPRIA* (2003).
- [26] KOROUTCHEV, K. E DORRONSORO, J. Statistics of natural images using hash fractal image compression. *International Conference on Computer Systems and Technologies - CompSysTech* (2003).
- [27] LEMOS, F. D. Utilização do conjunto de cantor para a resolução da torre de hanoi. *FEUP 030509045* (12-2004).
- [28] LINHARES, G., DINIZ, J. E CORREIA, S. Estudo de algoritmos para compressão de imagens. *II Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica* (2007).
- [29] MORAES, C. R. *Estruturas de dados e algoritmos: uma abordagem didática*. Berkeley, São Paulo, 2001.
- [30] MURR, C. E MELO, F. Fractais: propriedades e construção. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, 2005. Monografia.

- [31] NELSON, R. E SAMET, H. A population analysis of quadtrees with variable node size. *Computer Science TR-1740 - University of Maryland - College Park* (12-1986).
- [32] RIBAS, J. P. I. F. E CARRIJO, G. A. Um modelo de compressão de imagens digitais baseado em codificação fractal e quantização vetorial (vq). *XXX - Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional* (2007).
- [33] SANKARAGOMATHI, B., GANESAN, L. E ARUMUGAM, S. Fractal image compression applied to remote sensing. *Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology. Proc. WASET 21*, ISSN 1307-6884 (2007), 386–391. <http://dblp.uni-trier.de/db/journals/pwaset/pwaset21.html>, acesso em: 2 de fevereiro de 2009.
- [34] SANKARANARAYANAN, V. Fractal image compression, 1998.
- [35] SANTOS, J. A. Dimensão de hausdorff de conjuntos numéricos. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Alagoas, Maceió-AL, 2006. Dissertação de Mestrado.
- [36] SAUPE, D. E HAMZAOU, R. Complexity reduction methods for fractal image compression. *I.M.A. Conf. Proc. on Image Processing J.M. Blackledge* (1994). Oxford University Press.
- [37] SAUPE, D. E HAMZAOU, R. A guided tour of the fractal image compression literature. *ACM SIGGRAPH* (1994).
- [38] SAUPE, D., RUHL, M. E ET ALL. Optimal hierarchical partitions for fractal image compression. *IEEE International Conference on Image Processing - ICIP - Chicago* (10-1998).
- [39] SILVA, A. L. M. *Procedimentos para método híbrido de compressão de imagens digitais utilizando transformadas wavelet e codificação fractal*. Tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, Maio 2005.

- [40] SILVA, J. E FLÔRES, E. Compressão de imagens médicas usando fractais. *VI Workshop de Informática Médica - WIM2006* (2006). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG.
- [41] SOARES, L. Fundamentos de sistemas multimídia: parte 1 - aquisição, codificação e exibição de dados. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica/RJ, Rio de Janeiro-RJ, 2007.
- [42] SOBERANO, L. The mathematical foundation of image compression. *Honors Program in the Department of Mathematic and Statistic* (2000). Universidade da Carolina do Norte-Wilmington, Wilmington, Carolina do Norte.
- [43] STAPLETON, W., MAHMOUD, W. E JACKSON, D. A parallel implementation of a fractal image compression algorithm. *IEEE* (1996). 0-8186-7352-4/96.
- [44] SUCUPIRA, I. R. Métodos heurísticos genéricos: meta-heurísticas e hiper-heurísticas. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 2004.
- [45] TGA. Sample TGA Images, 2009. <http://www.cs.iit.edu/~agam/cs512/data/images/index.html/>, acesso em: 15 de março de 2009.
- [46] THAKUR, N. V. E KAKDE, D. O. G. Color image compression with modified fractal coding on spiral architecture. *Journal of Multimedia* 2, 4 (2007). August 2007.
- [47] TSANG, E. E VOUDOURIS, C. Fast local search and guided local search and their application to british telecom's workforce scheduling problem, 1995. Technical Report CSM-246, Department of Computer Science, University of Essex.
- [48] TSENG, H.-E., WANG, W.-P. E SHIH, H.-Y. Using memetic algorithms with guided local search to solve assembly sequence planning. *Expert Systems with Applications - ScienceDirect - Elsevier* 33 (2007).
- [49] TUDOR, P. Jpeg-2 video compression. *IEE J Langham Thompson Prize: Eletronics and Communication Engineering Journal* (1995). [http://www.bbc.co.uk/rd/pubs/papers/paper\\\_14/paper\\\_14.shtml](http://www.bbc.co.uk/rd/pubs/papers/paper\_14/paper\_14.shtml), acesso em 4 de julho de 2008.

- [50] VOUDOURIS, C. *Guided local search for combinatorial optimisation problems*. Phd thesis, University of Essex, Department of Computer Science - University of Essex, July 1997. Colchester-UK.
- [51] VOUDOURIS, C. E TSANG, E. Guided local search, 1995. Technical Report CSM-247, Department of Computer Science, University of Essex.
- [52] VOUDOURIS, C. E TSANG, E. Guided local search and its application to the traveling salesman problem. *European Journal of Operational Research* 113, 2 (Março 1999), 469–499. <http://ideas.repec.org/a/eee/ejores/v113y1999i2p469-499.html>, acesso em: 3 de novembro de 2008.
- [53] VOUDOURIS, C. E TSANG, E. P. Partial constraint satisfaction problems and guided local search. In *Practical Application of Constraint Technology (PACT'96)* (1996), pp. 337–356.
- [54] WANG, C.-C. E KAO, J.-Y. A fast encoding algorithm for fractal image compression. *IEICE Electronics Express* 1, 12 (2004), 352–357.
- [55] WU, P.-Y. Fast fractal image compression. In *ITCC '00: Proceedings of the The International Conference on Information Technology: Coding and Computing (ITCC'00)* (Washington, DC, USA, 2000), IEEE Computer Society, p. 54.
- [56] ZHANG, Y. E PO, L.-M. Fractal color image compression using vector distortion measure. *IEEE* (1995). 0-8186-7310-9/95.