

DIOVANI RAFAEL SANS

**Identificação de Propriedade em Imagens com Marcas d'Água
no Domínio da Transformada Wavelet**

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

2008

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	iv
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE ALGORITMOS	ix
LISTA DE TABELAS	xi
RESUMO	xii
ABSTRACT	xiii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	2
1.2 Justificativa	2
1.3 Organização da Dissertação	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Histórico	4
2.2 Classificação das Abordagens	7
2.3 Transformadas	9
2.3.1 Transformada Discreta de Fourier	9
2.3.2 Transformada Discreta do Cosseno	11
2.3.3 Transformadas Discretas Wavelets	15
2.4 Áreas de Aplicação	19
2.4.1 Monitoração de Transmissão	20
2.4.2 Identificação de Propriedade	21
2.4.3 Prova de Propriedade	23
2.4.4 Rastreamento de Transação	24

2.4.5	Autenticação de Conteúdo	25
2.4.6	Segurança Médica	26
2.4.7	Controle de Cópias	26
2.4.8	Controle de Dispositivo	27
2.4.9	Filtragem e Classificação	27
2.4.10	Ativação Remota	28
2.4.11	Indexação	28
2.5	Propriedades	28
2.5.1	Ataques	29
2.6	Sistemas de Marcas d'água	30
2.6.1	Marcas Visuais	31
2.6.2	Marcas de Ruído	31
2.7	Redundância de Dados	32
3	METODOLOGIA	34
3.1	Escolha de Domínio	35
3.2	Seleção das Famílias Wavelets	35
3.3	Seleção dos Blocos	36
3.4	Inserção da Marca	39
3.4.1	Inserção Pseudoaleatória	40
3.4.2	Inserção em Blocos de Textura e Luminosidade	41
3.5	Resistência a Ataques	42
3.6	Extração da Marca	46
4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	49
4.1	Seleção dos Blocos	51
4.2	Seleção dos Filtros Wavelets	52
4.3	Resistência a Ataques	54
4.3.1	Compressão	55
4.3.1.1	Qualidade de 90%	56

4.3.1.2	Qualidade de 60%	57
4.3.1.3	Qualidade de 35%	57
4.3.1.4	Considerações sobre a compressão	61
4.3.2	Filtros	63
4.3.2.1	Filtro da média	63
4.3.2.2	Filtro Gaussiano	66
4.3.2.3	Filtro de movimento	67
4.3.2.4	Filtro de disco	71
4.3.2.5	Considerações sobre os filtros	72
4.3.3	Ruído	74
4.3.3.1	Ruído Gaussiano	74
4.3.3.2	Ruído <i>Speckle</i>	77
4.3.3.3	Ruído Poisson	78
4.3.3.4	Ruído sal e pimenta	78
4.3.3.5	Considerações sobre inserção de ruído	84
4.3.4	Cortes	84
4.3.4.1	Corte tipo 1	84
4.3.4.2	Corte tipo 2	87
4.3.4.3	Corte tipo 3	89
4.3.4.4	Considerações sobre ataques de corte	90
4.3.5	Rotação, Escala e Translação	90
4.4	Resultados da Recuperação com Variação nas Marcas d'Água	92
4.5	Discussão dos Resultados	94
4.5.1	Propriedades	95
4.5.2	Filtros e Marcas	96
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	98
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102
	APÊNDICE A FILTROS PARA TRANSFORMADAS WAVELETS	111

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	<i>Alternating Current</i>	Corrente Alternada
CD	<i>Compact Disc</i>	Disco Compacto
DC	<i>Direct Current</i>	Corrente Contínua
DCT	<i>Discret Cosine Transform</i>	Transformada Discreta do Cosseno
DFT	<i>Discret Fourier Transform</i>	Transformada Discreta de Fourier
DICOM	<i>Digital Imaging and Communications in Medicine</i>	Imagens e Comunicações Digitais na Medicina
DT-CWT	<i>Dual-Tree Complex Wavelet Transform</i>	Transformação Wavelet Complexa de Árvore Dual
DVD	<i>Digital Versatile Disc ou Digital Video Disc</i>	Disco Versátil Digital ou Disco de Vídeo Digital
DWT	<i>Discret Wavelet Transform</i>	Transformada Discreta Wavelet
FMT	<i>Fourier Mellin Transform</i>	Transformada Fourier Mellin
HVS	<i>Human Visual System</i>	Sistema Visual Humano
JPEG	<i>Joint Photographic Experts Group</i>	Grupo Conjunto de Especialistas em Fotografia
LPM	<i>Log Polar Mapping</i>	Mapeamento Logaritmo Polar
LSB	<i>Least Significant Bit</i>	Bit Menos Significativo
MTF	<i>Modulation Transfer Function</i>	Função de Transferência de Modulação
MTWC	<i>Multi-Threshold Wavelet Codec</i>	Codificador Wavelet Multi-Limiar
PSNR	<i>Peak Signal to Noise Ratio</i>	Relação Sinal-Ruído de Pico
P2P	<i>Peer to Peer</i>	Par-a-Par
QSWT	<i>Qualified Significant Wavelet Tree</i>	Árvore Wavelet Significativamente Qualificada
RDWT	<i>Redundant Discret Wavelet Transform</i>	Transformada Discreta Wavelet Redundante

RST	<i>Rotation, Scale and Translation</i>	Rotação, Escala e Translação
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i>	Radar de Abertura Sintética
SIFT	<i>Scale Invariant Feature Transform</i>	Transformação de Características Invariantes à Escala

LISTA DE FIGURAS

2.1	Representação dos conjuntos de esteganografia e marcas d'água.	5
2.2	Exemplo de inserção de marcas d'água visíveis e invisíveis	6
2.3	Modelo de uso de marcas d'água.	7
2.4	Resultado da utilização da transformada DCT utilizando blocos de 8x8 pixels .	12
2.5	Movimentação dentro da matriz DCT de um algoritmo <i>zig-zag</i>	13
2.6	Regiões de frequência da DCT, sendo F_L , F_M e F_H , as frequências baixa, média e alta, respectivamente	14
2.7	Exemplos de wavelets mães.	17
2.8	Modelos de decomposição de imagem em níveis de detalhe.	17
2.9	Decomposição wavelet em três níveis de detalhe.	18
2.10	Modelo de decomposição de imagem em quatro níveis de detalhe.	24
2.11	Tipos de ataques comuns em imagens para inutilizar marcas d'água.	30
2.12	Diferença entre imagem original e imagem marcada com ruído, após ajuste de contraste.	32
3.1	Imagem Lena divide em blocos de 32x32 pixels e reordenada pela textura e luminosidade de cada bloco.	38
3.2	Diagrama do método proposto para a inserção pseudoaleatória da marca. . . .	42
3.3	Diagrama do método proposto para a inserção nos blocos classificados por textura e luminosidade.	44
3.4	Visualização em profundidade de parte de uma linha da imagem.	45
3.5	Diagrama do método proposto para a extração das marcas d'água.	47
4.1	Imagens utilizadas para a inserção das marcas d'água.	50
4.2	Marca d'água utilizada para os experimentos.	50
4.3	Marcas recuperadas variando o tamanho dos blocos.	52
4.4	Imagens de teste após compressão JPEG com qualidade de 90%.	56

4.5	Marcas recuperadas após compressão JPEG com qualidade de 90%.	57
4.6	Imagens de teste após compressão JPEG com qualidade de 60%.	59
4.7	Marcas recuperadas após compressão JPEG com qualidade de 60%.	59
4.8	Imagens de teste após compressão JPEG com qualidade de 35%.	61
4.9	Marcas recuperadas após compressão JPEG com qualidade de 35%.	63
4.10	Imagens de teste após aplicação de filtro da média.	64
4.11	Marcas recuperadas após filtro da média.	66
4.12	Imagens de teste após aplicação de filtro Gaussiano.	67
4.13	Marcas recuperadas após filtro Gaussiano.	67
4.14	Imagens de teste após aplicação de filtro de movimento.	69
4.15	Marcas recuperadas após filtro de movimento.	71
4.16	Imagens de teste após aplicação de filtro de disco.	72
4.17	Marcas recuperadas após filtro de disco.	72
4.18	Imagens de teste após inserção de ruído Gaussiano.	75
4.19	Marcas recuperadas após ruído Gaussiano.	75
4.20	Imagens de teste após ruído <i>Speckle</i>	77
4.21	Marcas recuperadas após ruído <i>Speckle</i>	78
4.22	Imagens de teste após aplicação de ruído Poisson.	80
4.23	Marcas recuperadas após ruído Poisson.	80
4.24	Imagens de teste após aplicação de ruído sal e pimenta.	82
4.25	Marcas recuperadas após ruído sal e pimenta.	82
4.26	Imagens de teste após ataque de corte tipo 1.	85
4.27	Marcas recuperadas após ataque de corte tipo 1.	85
4.28	Imagens de teste após ataque de corte tipo 2.	87
4.29	Marcas recuperadas após ataque de corte tipo 2.	89
4.30	Imagens de teste após ataque de corte tipo 3.	89
4.31	Marcas recuperadas após ataque de corte tipo 3.	90
4.32	Marca com caracteres utilizada nos experimentos.	93
4.33	Marca com símbolo da UFPR utilizada nos experimentos.	93

4.34 Marcas de caracteres recuperadas.	94
4.35 Marcas UFPR recuperadas.	95

LISTA DE ALGORITMOS

1	Algoritmo de inserção pseudoaleatória da marca	41
2	Divisão da imagem em blocos e criação dos vetores de textura e luminosidade .	43
3	Inserção da marca nos blocos escolhidos de textura e luminosidade	44
4	Algoritmo de redução da profundidade da imagem	46
5	Algoritmo de extração das marcas d'água	47

LISTA DE TABELAS

4.1	Tabela de famílias e filtros utilizados.	53
4.2	Tabela de PSNR (db) entre imagens originais e após inserção de marca d'água.	53
4.3	Tabela de PSNR entre imagens marcadas antes e depois do ataque de compressão JPEG com qualidade de 90%.	57
4.4	Tabela de índices Jaccard para o ataque de compressão JPEG com qualidade de 90%.	58
4.5	Tabela de PSNR entre imagens marcadas antes e depois do ataque de compressão JPEG com qualidade de 60%.	59
4.6	Tabela de índices Jaccard para o ataque de compressão JPEG com qualidade de 60%.	60
4.7	Tabela de PSNR entre imagens marcadas antes e depois do ataque de compressão JPEG com qualidade de 35%.	61
4.8	Tabela de índices Jaccard para o ataque de compressão JPEG com qualidade de 35%.	62
4.9	Tabela de PSNR entre imagens marcadas antes e depois do ataque de filtro da média.	64
4.10	Tabela de índices Jaccard para o ataque de filtro da média.	65
4.11	Tabela de PSNR entre imagens marcadas antes e depois do ataque de filtro Gaussiano.	66
4.12	Tabela de índices Jaccard para o ataque de filtro Gaussiano.	68
4.13	Tabela de PSNR entre imagens marcadas antes e depois do ataque de filtro de movimento.	69
4.14	Tabela de índices Jaccard para o ataque de filtro de movimento.	70
4.15	Tabela de PSNR entre imagens marcadas antes e depois do ataque de filtro de disco.	71
4.16	Tabela de índices Jaccard para o ataque filtro de disco.	73

4.17 Tabela de PSNR entre imagens marcadas antes e depois do ataque de adição de ruído Gaussiano.	75
4.18 Tabela de índices Jaccard para o ataque de adição de ruído Gaussiano.	76
4.19 Tabela de PSNR entre imagens marcadas antes e depois do ataque de adição de ruído <i>Speckle</i>	78
4.20 Tabela de índices Jaccard para o ataque de adição de ruído <i>Speckle</i>	79
4.21 Tabela de PSNR entre imagens marcadas antes e depois do ataque de adição de ruído Poisson.	80
4.22 Tabela de índices Jaccard para o ataque de adição de ruído de Poisson.	81
4.23 Tabela de PSNR entre imagens marcadas antes e depois do ataque de adição de ruído sal e pimenta.	82
4.24 Tabela de índices Jaccard para o ataque de adição de ruído sal e pimenta.	83
4.25 Tabela de PSNR entre imagens marcadas antes e depois do ataque de corte tipo 1.	85
4.26 Tabela de índices Jaccard para o ataque de corte tipo 1.	86
4.27 Tabela de PSNR entre imagens marcadas antes e depois do ataque de corte tipo 2.	87
4.28 Tabela de índices Jaccard para o ataque de corte tipo 2.	88
4.29 Tabela de PSNR entre imagens marcadas antes e depois do ataque de corte tipo 3.	90
4.30 Tabela de índices Jaccard para o ataque de corte tipo 3.	91
4.31 Tabela de índices Jaccard das marcas da figura 4.34.	93
4.32 Tabela de índices Jaccard das marcas da figura 4.35.	94

RESUMO

Armazenar e transmitir informações em formato digital é uma realidade presente no cotidiano das pessoas. Porém, em diversos meios utilizados para tal transmissão, nem sempre se conhece a origem ou o autor de determinado trabalho. Buscando atenuar tal questão, no que se refere a imagens digitais, este trabalho propõe um novo método de inserção e recuperação de marcas d'água invisíveis em imagens tons de cinza que permitam identificar ou comprovar o autor da imagem marcada. Transformadas wavelets são utilizadas tanto no processo de inserção quanto de extração das marcas d'água na imagem. Uma das características deste trabalho é a detecção cega ou não informada das marcas. Além disso, métricas do Sistema Visual Humano são utilizadas para assegurar invisibilidade da marca e índices pseudoaleatórios permitem aumentar a resistência das mesmas. Vários testes são realizados para demonstrar a eficiência do método, mesmo após a imagem marcada sofrer algum ataque.

Palavras-chaves: Identificação de Propriedade; Marcas d'Água; Transformadas Wavelets; Imagens Digitais; Ataques a Imagens

ABSTRACT

Information storage and transmission in digital format is a reality in the people's daily lives. However, in several media used for such transmission, the source or author of a certain work is not always known. As an attempt to deal with this issue related to digital images, this dissertation proposes a new method for inserting and retrieving watermarks in gray level images that allows author identification of the marked image. Wavelet transforms are used both in the insertion and extraction of the watermarks in the image. One of the characteristics of this work is its blind detection of watermarks. Furthermore, Human Visual System metrics are used to ensure invisibility of the mark and pseudorandom indices to help increase resistance of them. Several tests are conducted to demonstrate the efficiency of the method.

Keywords: Property Identification; Watermarks; Wavelet Transforms; Digital Images; Image Attacks.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Com o crescente avanço dos meios digitais como forma de armazenamento de informações, cada vez é mais comum a disponibilização de informações sigilosas apenas em formato digital. Como exemplo, pode-se citar uma imagem de diagnóstico médico, uma gravação de câmera de segurança ou cópia de um cheque.

Tais imagens, após capturadas, são armazenadas e, muito provavelmente, necessitam ser transmitidas para um destinatário. A transmissão, também digital, poderá passar, intencionalmente ou não, por intermediários. Ao destinatário restam poucas alternativas para garantir que o arquivo recebido seja uma cópia fidedigna, além de confiar nos intermediários.

Por esse e outros motivos, garantir segurança e autenticidade a uma informação tornou-se uma tarefa árdua, sendo um campo crescente em pesquisas.

Para o exemplo supracitado, no qual existe a transmissão de dados, há duas formas principais para proporcionar segurança. A primeira refere-se à segurança da transmissão, envolvendo sistemas de *firewall*, redes privadas, autenticações, dentre outros. A segunda refere-se à segurança da informação em si e, neste caso, considera-se criptografia de dados, esteganografia e marcas d'água, estas últimas sendo o foco deste trabalho.

Cabe ressaltar, inicialmente, que as marcas d'água abordadas neste trabalho não são as mesmas presentes, por exemplo, em uma cédula de dinheiro, pois essas são facilmente identificadas e visíveis. Ao contrário, o que será explanado aqui refere-se à informação digital inserida em uma imagem, sem alterar o conteúdo visual da mesma.

Apesar de serem um subconjunto da esteganografia, as marcas d'água possuem características próprias como a necessidade de resistir a uma manipulação e o caráter de ferramenta de autenticação. Elas são uma boa alternativa para a segurança de um dado por, primeiramente, estarem ocultas, requerendo ao atacante conhecer, no mínimo, a existência de uma marca no dado. Em segundo, por pertencerem ao código do próprio dado após sua inserção,

torna-se extremamente difícil a extração das marcas.

Neste âmbito, será abordado o uso de transformadas wavelets no domínio de frequência para a inserção e extração das marcas d'água por terem características nativas que tornam as marcas resistentes a alguns ataques, bem como, por utilizar, em sua transformação, bandas distintas de detalhes e de aproximação da imagem, o que torna a imagem marcada pouco diferente da original.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal explorar técnicas de inserção e extração de marcas d'água em imagens digitais. O estudo dos diversos métodos existentes deverá servir como base para o estabelecimento de comparações entre eles, diferenciando principais áreas de atuação e proposição de melhorias.

Os principais pontos de aprofundamento se referem ao estudo do tipo de transformada wavelet a ser considerada, do tipo de marca a ser utilizada e das formas para garantir robustez à marca, incluindo-se novos métodos de inserção de marcas d'água.

O trabalho também inclui o desenvolvimento de uma ferramenta de inserção e extração de marcas d'água com resistência ao maior número possível de ataques, sem causar alterações significativas na imagem, visando a identificação de propriedade de imagens.

1.2 Justificativa

Na área de marcas d'água, vários métodos vêm sendo discutidos para garantir autenticidade a um arquivo digital, cujo conteúdo pode variar desde uma imagem, áudio [27, 33] ou vídeo [20, 47, 72, 74]. Tais métodos variam em função da aplicação a qual irá servir, do domínio utilizado para inserção da marca (espacial, de frequência, temporal, entre outros), do tipo de arquivo e assim por diante.

Porém, apesar do grande número de métodos existentes, é grande também o número de manipulações que os arquivos a serem marcados podem sofrer. Tais manipulações são chamadas de ataques. Por esse motivo, ainda não existe método totalmente resistente a

ataques, existindo apenas aqueles que resistem a determinadas classes de ataques.

Portanto, existe espaço para a proposição de novas técnicas que resistam ao maior número possível de ataques. Especificamente, no domínio de transformadas wavelets, não existe estudo sobre qual a melhor base a ser usada.

1.3 Organização da Dissertação

O restante do trabalho é dividido como segue. O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre esteganografia e marcas d'água. A metodologia de pesquisa é descrita no capítulo 3 e os resultados obtidos no capítulo 4. Finalmente, o capítulo 5 apresenta as conclusões e comentários finais, bem como a citação de trabalhos futuros. O apêndice A traz os filtros wavelet utilizados no desenvolvimento do trabalho.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Histórico

A arte de ocultar informações em uma mensagem é utilizada há muito tempo. Vários trabalhos escritos na área de esteganografia e marcas d'água [3, 18, 19, 28, 38, 51] citam exemplos de tal arte. A Grécia Antiga foi responsável por alguns deles: mensageiros raspavam seus cabelos para escrever um texto em sua cabeça. Esperava-se o cabelo crescer e enviava-se o mensageiro. O destinatário raspava novamente a cabeça do mensageiro e conseguia então ler a mensagem oculta.

Outra forma de ocultar uma mensagem era o uso de tábuas de madeira cobertas por cera. Normalmente, tais tábuas eram usadas para escrever textos na cera, porém escrevendo uma mensagem na própria madeira e, em seguida, recobrando de cera, tem-se aparentemente uma tábua vazia, mas que possui uma mensagem oculta. A utilização de animais também foi utilizada no passado, inserindo textos no interior de um animal (lebres, cães) e o destinatário as removia.

Já em tempos recentes, principalmente durante as duas guerras mundiais, o uso de tintas invisíveis foi prática comum para envio de mensagens escondidas. As tintas mais simples consistiam de produtos orgânicos, como leite, vinagre e concentrados cítricos, cuja visualização era obtida, por exemplo, com o aquecimento para o caso da tinta feita de suco de limão. Já processos mais refinados utilizavam composições químicas, como uma solução de sulfato de cobre para a escrita e vapor de amônia para a visualização.

Todos os exemplos mencionados acima descrevem a técnica de *esteganografia*, palavra derivada do grego *steganós* que significa esconder e *graph* (radical de *graphein*), escrever, na qual a intenção do remetente é enviar uma mensagem a um destinatário sem que os intermediários saibam o conteúdo e até mesmo da existência de tal mensagem.

As marcas d'água, porém, têm por objetivo assegurar algum tipo de validação, de auten-

tividade a determinado documento, podendo ser ou não ocultas, diferindo da esteganografia também por possuírem a característica de robustez contra ataques.

A figura 2.1 ilustra a relação existente entre esteganografia e marcas d'água. Apesar de representar um grupo pequeno, denotado pelo número 3 na figura, existem certas técnicas de marca d'água não totalmente ocultas, como as marcas das cédulas de dinheiro. Portanto, tais marcas não podem ser consideradas como esteganografia. Neste trabalho, o foco será das marcas d'água ocultas ou imperceptíveis a olho nu, subconjunto do grupo de esteganografia.

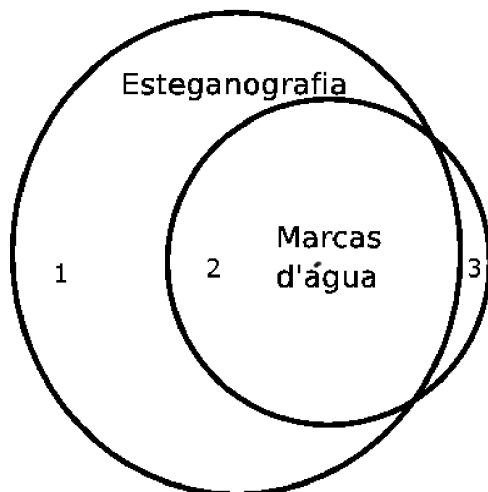


Figura 2.1: Representação dos conjuntos de esteganografia e marcas d'água.

A figura 2.2 ilustra a diferença entre uma marca d'água visível e outra oculta. As melhores técnicas de inserção de marcas d'água alteram a imagem sem causar mudanças perceptíveis a olho nu no conteúdo da mesma.

Historicamente, a utilização de marcas d'água data de 1282, na Itália, onde marcas semi-transparentes eram embutidas nos moldes de papéis [2, 14]. Na área de marcas d'água digitais, onde o documento está em formato digital, é difícil dizer com precisão qual o início das discussões, mas, em 1979, Szepanski [66] descreve um padrão detectável por máquina que pode ser usado em documentos para evitar falsificações.

Com a expansão dos meios digitais de armazenamento e transmissão de dados, como CD's e DVD's, o número de trabalhos na área de marcas d'água digitais aumentou consideravelmente, principalmente a partir de 1995. Hoje é grande o número de pesquisas principalmente na área de direito autoral.

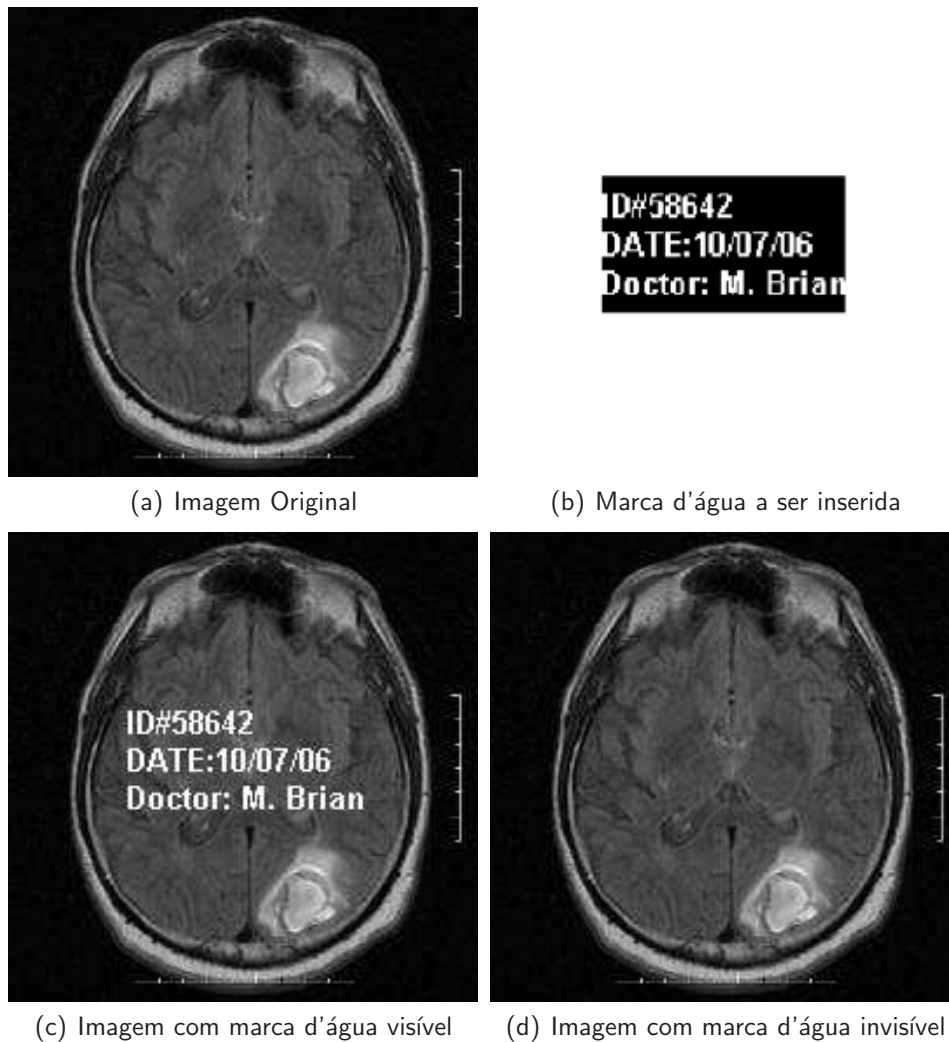


Figura 2.2: Exemplo de inserção de marcas d'água visíveis e invisíveis

A figura 2.3 mostra um sistema genérico de uso de marcas d'água. Tal sistema faz, inicialmente, a inserção de uma marca em uma imagem. A etapa de transmissão refere-se ao caminho percorrido entre a origem e o destino da imagem, podendo ser tanto uma transmissão física quanto digital, com número indeterminado de intermediários. Após chegar ao destino, a imagem marcada passa por um detector ou extrator de marcas d'água. Se a resposta desse detector confirmar a presença de uma marca d'água válida, o destinatário pode utilizar normalmente a imagem sabendo que ela é original. Se a resposta não confirmar a marca, o destinatário adotará medidas de segurança, desde a simples parada da execução até a emissão de um alerta ao dono da imagem sobre a manipulação.

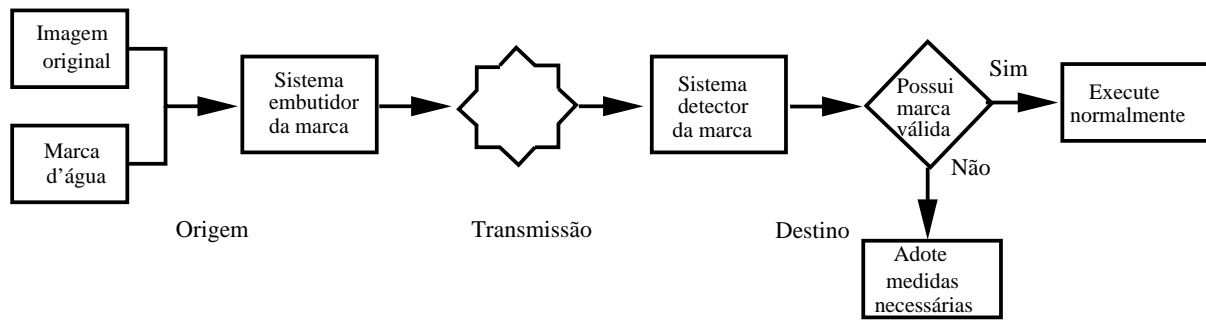


Figura 2.3: Modelo de uso de marcas d'água.

2.2 Classificação das Abordagens

Devido ao grande número de técnicas existentes para criação de marcas d'água, várias classificações podem ser utilizadas para agrupar e diferenciar tais técnicas.

Uma delas, utilizada em [41, 61, 77], classifica as marcas d'água em *frágeis*, *semi-frágeis* e *robustas*, de acordo com a robustez a alterações em características da imagem.

Uma marca d'água robusta, por exemplo, pode resistir a alterações de brilho, rotação, contraste, compressão com perdas em uma imagem. Além disso, uma marca robusta "ideal" apenas poderia ser removida caso a qualidade da imagem sofresse grande alteração, comprometendo qualquer uso da imagem sem a marca. Devido a tal característica, tais marcas podem ser utilizadas para verificação da propriedade de uma imagem (*copyright*).

Por outro lado, marcas d'água frágeis são sensíveis a alterações na imagem, sendo facilmente removidas ou corrompidas. Por esse motivo, podem ser usadas para detectar qualquer edição na imagem, sendo também conhecidas por "marcas d'água de autenticação". Existem ainda as marcas semi-frágeis, cujos métodos de detecção permitem alterações na imagem que não comprometam seu conteúdo, como compressão ou melhoria de contraste.

Ainda segundo Kim [41], é possível subdividir as marcas de autenticação em três categorias: sem chave, com chave pública/privada e com chave secreta. As marcas sem chave detectam alterações não-intencionais na imagem, que ocorrem principalmente devido a erros de transmissão. As marcas com chave pública/privada utilizam criptografia de chave pública para inserir uma assinatura digital na imagem e as marcas de autenticação com chave secreta inserem um código de autenticação na mensagem (chave secreta) conhecido apenas

pelo remetente e pelo destinatário ¹.

Em outra classificação, proposta por Cox et al. [14], as marcas d'água são divididas em modelos cujo detector da marca é baseado em algum tipo de correlação. Tais modelos incluem, segundo [14], a maioria dos sistemas descritos na literatura e podem ser subdivididos em:

1. Modelos de correlação linear, que utilizam funções lineares para detecção da marca d'água e comparam seus resultados com determinados intervalos de valores para verificar a existência da marca;
2. Modelos de correlação normalizada, nos quais a marca de referência utilizada e a marca extraída da imagem são normalizadas para uma mesma unidade, antes de terem seus valores comparados com os intervalos definidos;
3. Modelos baseados em coeficiente de correlação, que, antes de normalizar os vetores utilizados para detecção da marca d'água, fazem a subtração dos vetores de suas médias.

Já segundo Barni e Bartolini [5], as técnicas de ocultação de informações podem ser divididas em quatro categorias, baseadas no domínio utilizado pela aplicação, que são:

1. técnicas baseadas no domínio de dados, tanto espacial quanto temporal;
2. técnicas que operam no domínio de transformadas, normalmente Transformada Discreta do Cosseno (DCT), Transformada Discreta de Fourier (DFT) ou Transformada Discreta Wavelet (DWT);
3. técnicas híbridas, com características tanto dos domínios espacial/temporal quanto de transformadas;
4. técnicas que utilizam o domínio da compressão que, apesar de utilizarem técnicas dos domínios temporal, espacial ou de transformadas, possuem características específicas por manipularem diretamente seqüências de bits comprimidas.

No trabalho de Jain et al. [35], as técnicas de marcas d'água são divididas também no domínio de transformadas e no domínio espacial, porém são incluídas outras técnicas:

¹Maiores detalhes são apresentados na seção 2.4.5.

1. técnicas que utilizam Quantização Vetorial;
2. técnicas com algoritmos genéticos, subdivididas nos domínios espacial e de transformadas [11, 39];
3. sistemas de marcas d'água utilizando redes neurais;
4. sistemas baseados em Criptografia Visual.

2.3 Transformadas

Grande parte das técnicas atualmente utilizadas na área de marcas d'água faz uso de transformadas para extração e inserção. Dentre as mais utilizadas destacam-se a Transformada Discreta de Fourier (DFT), Transformada Discreta do Cosseno (DCT) e Transformada Discreta Wavelet (DWT).

Apesar das transformadas wavelets serem parte do foco deste trabalho, faz-se necessário conhecer as demais técnicas, buscando distinguir seus pontos fortes e fracos quando aplicadas como base dos algoritmos de marcas d'água.

2.3.1 Transformada Discreta de Fourier

A DFT é uma transformação de coordenadas que resulta em componentes pertencentes ao conjunto dos números complexos.

Seja a imagem (vetor de entrada) de valores reais x definida em um plano cartesiano e y o vetor resultante, ambos com N componentes, tal que $0 \leq u < N - 1$ e $0 \leq v < N - 1$, a DFT e sua inversa podem ser definidas respectivamente por:

$$y_{u,v} = \frac{1}{N^2} \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} x_{m,n} e^{-2\pi i(mu+nv)/N} \quad (2.1)$$

$$x_{m,n} = \sum_{v=0}^{N-1} \sum_{u=0}^{N-1} y_{u,v} e^{2\pi i(mu+nv)/N} \quad (2.2)$$

Uma consideração importante sobre a DFT refere-se ao fato da informação da fase ser consideravelmente mais importante do que a informação de amplitude (magnitude) na preservação

do conteúdo visual da imagem. Isso porque uma reconstrução baseada apenas na amplitude não é capaz de reconstruir a correta disposição atômica, enquanto que a reconstrução baseada na fase de dados consegue reconstruir minimamente a informação da imagem [79].

Além disso, a DFT possui algumas propriedades que devem ser mencionadas [79], pois são muito importantes para trabalhos na área de processamento de imagens.

Seja a função $F(u, v)$ a transformação DFT em uma imagem $f(m, n)$. Então,

- Rotação - Uma rotação com ângulo θ aplicada na imagem $f(m, n)$ causará uma mudança de orientação de mesmo ângulo θ sobre o espectro de amplitude de $F(u, v)$.
- Translação - Uma translação (deslocamento) no domínio espacial $f(m, n)$ causará um deslocamento na fase de $F(u, v)$ e o espectro de amplitude não será alterado.
- Escala - Um escalamento no domínio espacial causará uma variação proporcional no domínio de frequência.

No trabalho de Herrigel et al. [31], além de um sistema de chaves públicas e privadas, um modelo padrão é adicionado à transformada de Fourier de uma imagem a ser marcada. Para verificar a marca d'água, a DFT é calculada sobre a imagem marcada, seguida por uma transformação logarítmica polar e, então, o modelo padrão é buscado. O uso da transformada logaritmo polar sobre a DFT permite que mudanças de escala e rotações da imagem marcada sejam expressas como translações, permitindo uma busca simplificada de rotações e escalamentos utilizando técnicas de correlação cruzada. Os componentes de amplitude de cada bloco da transformada de Fourier são modificados utilizando o mesmo padrão em todos os blocos, tornando a marca robusta também a ataques de cortes.

Especificamente em marcas d'água, a transformada de Fourier pode ser utilizada em conjunto com outras técnicas, como o mapeamento logarítmico polar (LPM). Essa transformação consiste no mapeamento de pontos de um plano cartesiano (u, v) para pontos em um plano logarítmico polar (ρ, θ) :

$$\begin{cases} \rho = \ln(\sqrt{u^2 + v^2}) \\ \theta = \tan^{-1}\left(\frac{u}{v}\right) \end{cases} \quad (2.3)$$

em que $\rho \in R$ e $0 \leq \theta < 2\pi$.

Outra possibilidade no uso de marcas d'água é a utilização da transformada de Fourier-Mellin (FMT), que consiste na aplicação do mapeamento logarítmico polar sobre uma imagem, seguido da DWT [79].

Na literatura, vários trabalhos utilizam o LPM ou a FMT [40, 46, 48, 56, 78, 80] e possuem como principal vantagem em relação a outros métodos a resistência contra ataques de rotação, escala e translação (RST). Suas metodologias são similares entre si, pois consistem, normalmente, de aprimoramentos de uma mesma “base” de técnica.

O trabalho de O'Ruanaidh et al. [56] possui os seguintes passos para a inserção de marcas d'água:

1. Aplica-se a DFT sobre a imagem original;
2. Aplica-se a FMT sobre a amplitude da DFT da imagem original;
3. Insere-se a marca d'água na resultante do passo 2;
4. Computa-se a FMT inversa utilizando a fase original;
5. Computa-se a DFT inversa utilizando a fase original para obtenção da imagem marcada.

Para a extração, seguem-se os passos:

1. Aplica-se a DFT sobre a imagem marcada;
2. Aplica-se a FMT sobre a amplitude da DFT da imagem marcada;
3. Faz-se a detecção da marca na resultante do passo 2.

2.3.2 Transformada Discreta do Cosseno

A Transformada Discreta do Cosseno (DCT) pode ser considerada uma transformada relacionada à Transformada Discreta de Fourier, pois utiliza apenas a parte real dessa para obtenção de seu núcleo [62].

De modo geral, a DCT é muito utilizada em processamento de imagens, principalmente para compressão de imagens. Como neste trabalho serão abordadas transformações em imagens, as explicações sobre DCT se limitarão à transformação bidimensional, mais especificamente utilizando a DCT-II [34].

A DCT concentra a energia do vetor de entrada nas regiões próximas à origem na matriz de saída, sendo que o ponto (1,1) é conhecido por DC (*direct current*), podendo ser considerado o valor médio do bloco no qual foi feita a transformação. Os demais elementos da matriz são chamados AC (*alternating current*).

A figura 2.4 ² ilustra o primeiro passo de uma transformação DCT utilizando blocos de 8x8 pixels.

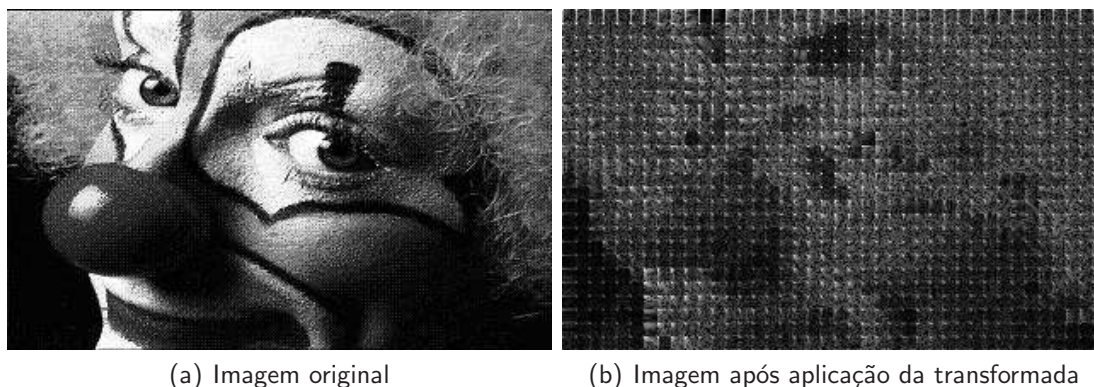


Figura 2.4: Resultado da utilização da transformada DCT utilizando blocos de 8x8 pixels

A fórmula 2.4 é utilizada para a aplicação da DCT-II em uma matriz.

$$K(\alpha) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{N}} & , \text{ se } \alpha < 0 \\ \frac{2}{\sqrt{N}} & , \text{ caso contrário} \end{cases} \quad (2.4)$$

$$y_{u,v} = K(u)K(v) \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} x_{m,n} \cos\left(\frac{\pi(2m+1)u}{2N}\right) \cos\left(\frac{\pi(2n+1)v}{2N}\right)$$

em que,

- N é a ordem da matriz de entrada
- $0 \leq u \leq N - 1$ e $0 \leq v \leq N - 1$

²Extraída de www.rose-hulman.edu/~bryan/ma439/ma439promo.html

- $y_{u,v}$ é o coeficiente DCT nas coordenadas (u, v)
- $x_{m,n}$ é o valor do pixel nas coordenadas (m, n)

O resultado da aplicação da transformação, como mencionado, é a concentração de valores de baixa frequência (valores mais significativos) próximos à origem. Assim, utilizando uma movimentação em *zig-zag* pela matriz, como demonstrado na figura 2.5, os valores percorridos estarão em uma seqüência de frequência, das menores às maiores. Tal procedimento é utilizado para compactação de imagens, pois os coeficientes de alta frequência podem ser “descartados”, através de uma quantização, sem que ocorra grande prejuízo à qualidade da imagem.

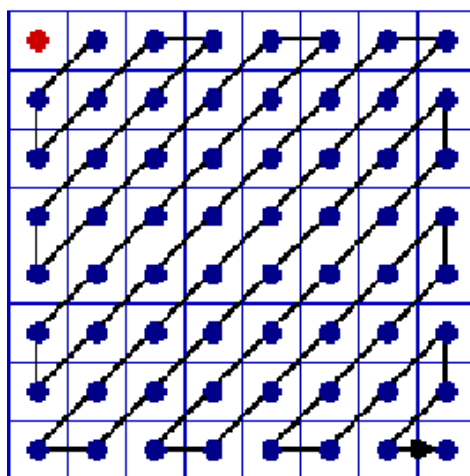


Figura 2.5: Movimentação dentro da matriz DCT de um algoritmo *zig-zag*.

Quando aplicada para uso em marcas d’água, a DCT possui características similares à transformada wavelet, como resistência à compressão e fragilidade às transformações de escala, translação e rotação na imagem marcada.

Grande parte dos métodos utiliza as frequências médias da DCT (figura 2.6) para inserção de marcas, pois alterações nessa região não alteram significativamente o conteúdo visual da imagem e não são tão fáceis de serem removidas após uma compressão JPEG.

Koch et al. [42] propõem dois métodos para inserir marcas d’água em imagens. O primeiro método decompõe uma imagem em blocos de 8x8 pixels e calcula a Transformada Discreta Cosseno de cada um desses blocos. Um subconjunto pseudoaleatório desses blocos é escolhido, e, para cada bloco, uma tripla de frequências é selecionada a partir de 18 triplas pré-determinadas e modificada para que codifique a sua força relativa com valor 1 ou 0. As

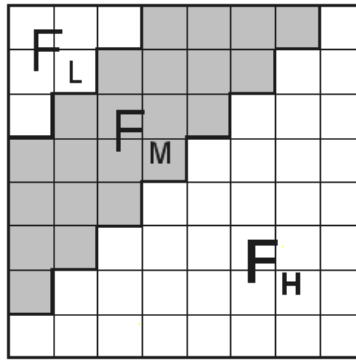


Figura 2.6: Regiões de frequência da DCT, sendo F_L , F_M e F_H , as frequências baixa, média e alta, respectivamente

18 possíveis triplas são compostas por seleções de três das oito frequências pré-determinadas dentro do bloco DCT 8x8. A escolha das 8 frequências a serem alteradas dentro do bloco DCT é baseada no fato de que as frequências médias têm variância moderada, ou seja, têm amplitude semelhante. Essa propriedade é necessária a fim de permitir que a força relativa da frequência da tripla seja alterada sem exigir uma modificação que seria perceptível. Tal experimento demonstrou resistência à compressão JPEG com qualidade pouco abaixo de 50%. Outra proposta de Koch e Zhao [43] utiliza pares de frequências ao invés de triplas, e foi projetada também para garantir robustez contra a compressão JPEG.

Em um segundo método, desenvolvido para imagens preto e branco, nenhuma transformação de frequência é usada. Em vez disso, os blocos selecionados são modificados de modo que a frequência relativa de pixels brancos e pretos codifique o valor final. Ambos os métodos são particularmente vulneráveis a ataques múltiplos. Para melhorar tal deficiência, Zhao e Koch propõem blocos 8x8 distribuídos, criados a partir de uma amostragem aleatória de pixels da imagem. No entanto, o resultado pode gerar uma imagem com diferenças visíveis em relação à original.

Wang et al. [73] descrevem um detector cego de marcas d'água baseado em modulação relativa dos valores dos coeficientes DCT. Em seu método, os valores DC de uma vizinhança 3x3 de blocos de 8x8 pixels são utilizados para estimar os coeficientes AC do bloco central. Em cada grupo de nove blocos 8x8, cinco porções de marca d'água são inseridas, modulando os primeiros cinco coeficientes AC da DCT, no bloco central, com a seguinte regra:

$$AC_i \leftarrow AC'_i + \Delta \text{ para inserir bit } 1$$

$$AC_i \leftarrow AC'_i - \Delta \text{ para inserir bit } 0$$

em que, AC_i e AC'_i são os valores real e estimado dos coeficientes AC, respectivamente. A recuperação da marca d'água é feita pela comparação do AC_i e do seu valor estimado. Se $AC_i > AC'_i$, então o bit extraído é 1, caso contrário, é 0.

No método proposto por Langelaar et al. [44, 45], a imagem é primeiramente dividida em blocos com um tamanho múltiplo de oito. Cada bit da marca será inserido em um bloco escolhido pseudoaleatoriamente. Cada bloco tem um padrão pseudoaleatório P com número igual de 1 e 0 atribuídos. Para inserir um bit com valor 1, um padrão ajustado $k \times P$, no qual k é a força (resistência) mínima da marca d'água, é inserido ao bloco. Para um bit com um valor de 0, um padrão também ajustado é subtraído do bloco. A inserção e extração da marca terão o procedimento a seguir:

Seja I_0 a média de todos os pixels do bloco cujo valor do padrão é zero e seja I_1 a média dos demais pixels. Além disso, seja $D_{high} = I_1 - I_0$ a diferença entre as duas médias e $D_{low} = I'_1 - I'_0$ a diferença das médias após a transformação DCT e subsequente quantização com qualidade Q (representando, na prática, uma compressão). Se um 0 deve ser inserido, o padrão P é subtraído iterativamente do bloco até que ambas as diferenças, D_{high} e D_{low} sejam iguais ou inferiores a zero ou o número máximo de iterações tenha sido atingido. Se um 1 for inserido, o padrão é adicionado ao bloco até que ambas as diferenças, D_{high} e D_{low} forem superiores de um limiar pré-definido ou o número máximo de iterações tenha sido atingido. Para a extração do bit, calcula-se o D_{high} entre as médias I_1 e I_0 . O sinal desta diferença é então utilizado para determinar o bit inserido.

2.3.3 Transformadas Discretas Wavelets

As transformadas wavelets [4, 22, 55] são transformações de sinais aplicadas em diversas áreas de processamento de imagens, como compressão, remoção de ruído, segmentação de imagens, análise de texturas [16]. Sua utilização visa suprir uma deficiência da transformada de Fourier, pois consegue representar e identificar informações de um sinal tanto no espaço quanto no tempo. Portanto, as wavelets são sinais oscilantes e não-nulos num determinado intervalo fechado de tempo [15].

A transformada discreta wavelet pode ser definida como:

$$DWT_{\psi}f(j, k) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\psi_{j,k}(t)dt \quad (2.5)$$

em que $f(t)$ é o sinal ou função de entrada, j e k representam os índices de escala e translação, respectivamente, $\psi_{j,k}$ são as funções da base wavelet e t é o parâmetro de tempo e $DWT_{\psi}f(j, k)$ é o coeficiente da transformada.

As diversas transformadas wavelets podem ser obtidas a partir de conjuntos de funções, composto de escalamentos e translações de uma wavelet mãe [7], conforme mostra a equação 2.6, em que o índice j representa a escala e o índice k a translação. A diferença entre as famílias wavelet existentes (como Daubechies, Haar, Symlet, Coiflets, etc) consiste em como as funções wavelets são definidas [68]. A figura 2.7 mostra alguns exemplos gráficos de wavelets mães.

$$\psi_{j,k} = 2^{j/2}\psi(2^j t - k) \quad (2.6)$$

As funções de wavelet e de escala descrevem as frequências altas e baixas presentes em uma imagem. Através de diferentes deslocamentos e escalamentos das funções, é possível produzir uma análise de multirresolução [50], a qual permite representar e examinar uma imagem em diferentes níveis de detalhes. A análise nos diferentes níveis de resolução é capaz de obter melhor identificação dos detalhes da imagem.

A análise de multirresolução permite a aplicação das transformadas wavelets em diversas áreas como análise de texturas, segmentação, compressão e remoção de ruído.

Na figura 2.8, as sub-bandas LL e HH denotam, respectivamente, as frequências baixas e altas da imagem, enquanto LH e HL descrevem as frequências intermediárias presentes na imagem. Os detalhes da imagem são armazenados nas sub-bandas LH, HL e HH, enquanto que a sub-banda de baixa frequência, LL, representa uma aproximação da imagem em resolução menor. A figura 2.9 demonstra a decomposição de uma imagem em três níveis de detalhe.

Para o cálculo propriamente da transformada discreta wavelet, é comum se utilizar de bancos de filtros, nos quais o filtro passa-alta terá como resultado os detalhes da imagem e o filtro passa-baixa resultará em uma imagem de aproximação, ou seja, uma cópia da imagem

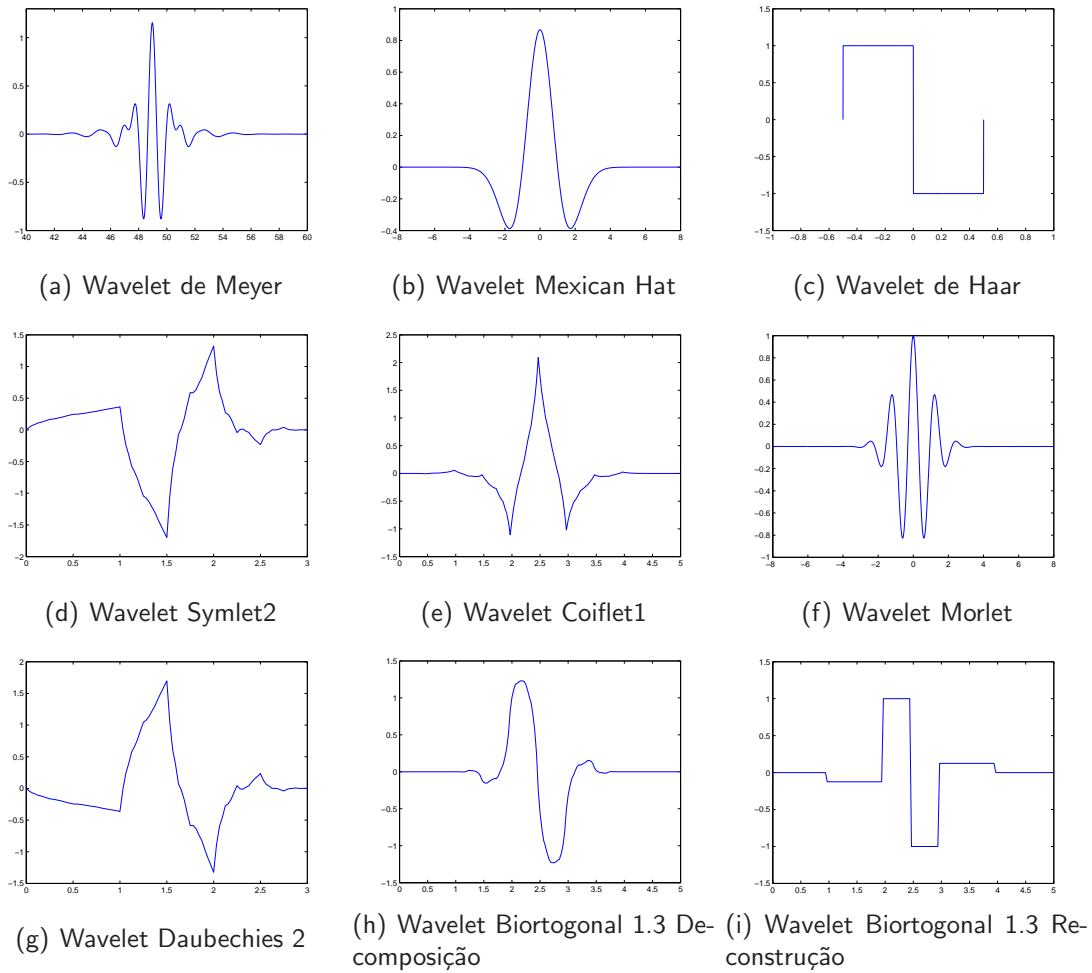
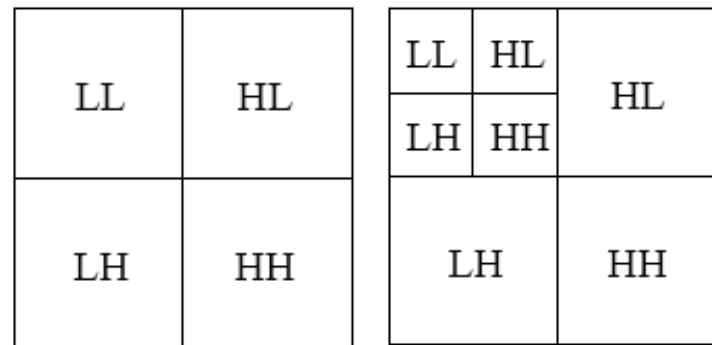


Figura 2.7: Exemplos de wavelets mães.



(a) Decomposição bidimensional em um nível

(b) Decomposição bidimensional em dois níveis

Figura 2.8: Modelos de decomposição de imagem em níveis de detalhe.

original em menor resolução. As equações 2.7 e 2.8 expressam a utilização dos filtros passa-alta

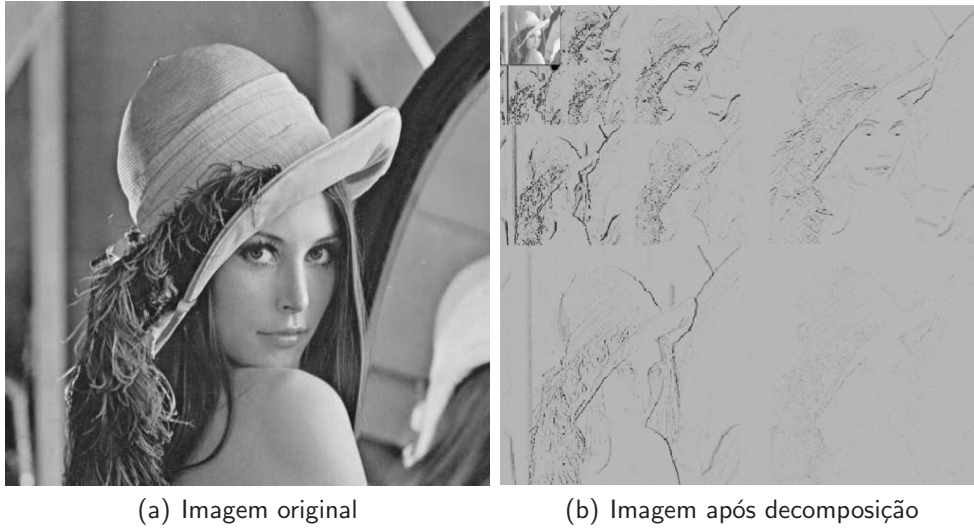


Figura 2.9: Decomposição wavelet em três níveis de detalhe.

$h(k)$ e passa-baixa $l(k)$ nas funções de escala $\phi(t)$ e wavelet $\psi(t)$.

$$\phi(t) = 2^{1/2} \sum_k l(k) \phi(2t - k) \quad (2.7)$$

$$\psi(t) = 2^{1/2} \sum_k h(k) \psi(2t - k) \quad (2.8)$$

Os coeficientes de l e h são dados por

$$l(k) = 2^{1/2} \int_{-\infty}^{\infty} \phi(t) \phi(2t - k) dt \quad (2.9)$$

$$h(k) = 2^{1/2} \int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) \phi(2t - k) dt \quad (2.10)$$

e são relacionados da seguinte forma

$$h(k) = (-1)^k l(n - k - 1) \quad k \in 0, 1, \dots, n - 1 \quad (2.11)$$

sendo n o tamanho do filtro.

O filtro de Haar pode ser considerado um dos filtros wavelets mais simples [64] e possui

os coeficientes para l e h mostrados nas equações 2.12 e 2.13, respectivamente.

$$l = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$h = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Em suas áreas de aplicação, o uso das transformadas wavelets pode variar significativamente, podendo ser utilizadas as análises de multirresolução, as propriedades de momentos [15], dentre outras.

Para a segmentação e análise de texturas, características da imagem que conseguem distinguir classes de objetos são analisadas. O desafio de tais aplicações consiste em identificar bons descritores para as regiões da imagem, utilizando métodos de complexidade elevada, com baixos custos computacionais.

A compressão de imagens também se utiliza dos aspectos de multirresolução da transformada wavelet, possuindo um algoritmo rápido e com capacidade de revelar correlações locais [22]. Para a compressão, efetivamente, os coeficientes com valores muito pequenos, abaixo de um limiar pré-estabelecido, são descartados, reduzindo o número de coeficientes a serem representados [64] e aumentando a quantidade de coeficientes com valor 0. Pode-se, então, aplicar algoritmos de compactação como corrida de bits ou Huffman.

De maneira similar à compressão, os métodos de remoção de ruído que utilizam transformadas wavelets também zeram coeficientes de detalhe menores que limiares [16]. Dessa forma, as informações essenciais do conteúdo da imagem são preservadas.

2.4 Áreas de Aplicação

As marcas d'água digitais podem ser utilizadas em diversos tipos de documentos, como imagens dos mais variados formatos e fontes, arquivos de áudio, vídeos e até mesmo programas e comerciais de TV. Devido a tal diversidade, também são várias as áreas de aplicação [1, 13, 14, 65], destacando-se: monitoração de transmissão, identificação de propriedade, prova

de propriedade, rastreamento de transação, autenticação de conteúdo, controle de cópias, controle de dispositivo, filtragem e classificação, ativação remota e indexação.

2.4.1 Monitoração de Transmissão

Em uma campanha publicitária de determinada empresa que veicula comerciais em diversas TVs de um país, durante um longo período, qual seria o impacto de um comercial não transmitido todos os dias? Ou então, como saber quantos comerciais a empresa concorrente está veiculando? Como então saber quantos comerciais estão sendo exibidos?

A primeira idéia que vem à mente é contratar uma pessoa que acompanhe, 24 horas por dia, a programação de uma TV. Como cada pessoa trabalha em média 8 horas por dia, seriam necessárias três pessoas por dia para cada emissora em que o comercial está sendo veiculado. Isso, obviamente, não é um bom modo de alocação de recursos para apenas contar o número de comerciais. Além disso, e mais importante, tal trabalho estaria fortemente sujeito a falhas humanas.

Um modo mais inteligente é utilizar um computador que possa reconhecer o padrão de cada transmissão e contar o número de ocorrências. Tal técnica é chamada monitoração passiva. Nela, cada transmissão é comparada com uma base de dados com todos os trabalhos realizados na área para que se saiba qual comercial, filme, programa, está sendo transmitido. O grande problema de tal técnica é gerenciar uma base de dados com milhões de entradas e ter uma busca instantânea que possa localizar, nos milhões de bits de cada quadro (*frame*) de informação, a assinatura correspondente à entrada, isso sem mencionar a degradação de sinal que a transmissão pode sofrer.

Uma alternativa é a monitoração ativa, na qual um sinal é transmitido junto com o conteúdo do programa, sendo humanamente imperceptível, mas reconhecido por um computador. Neste ponto entram as marcas d'água, que podem ser embutidas sem que exista grande alteração na transmissão. Várias empresas já fornecem tal serviço de inserção e detecção de marcas d'água para programas de TV.

2.4.2 Identificação de Propriedade

Com a evolução da comunicação digital e da Internet, ter a garantia de que um trabalho (imagem, foto, desenho, música, vídeo) criado para um determinado fim não seja “desviado” e se espalhe, sem a autorização do autor e muito menos o pagamento de qualquer direito autoral, é certamente um desafio da atualidade.

Hoje, não apenas é possível como comum o armazenamento de músicas apenas em formato digital ou fazer uma edição de corte em uma imagem. Portanto, métodos tradicionais de identificação de propriedade, como a inclusão do símbolo © em uma imagem ou ℙ na mídia onde se encontra uma música, tornaram-se insuficientes.

A inserção de uma ou mais marcas d'água em uma imagem ou música torna possível a identificação do autor, mesmo que o arquivo tenha sofrido alterações e edições.

Um dos focos deste trabalho será a criação de um método de identificação de propriedade robusto a ataques e que não comprometa ou altere minimamente o conteúdo visual da imagem marcada.

Na literatura, são vários os trabalhos produzidos nessa área, cada um utilizando diferentes métodos. A seguir são resumidos alguns deles, todos utilizando transformadas wavelets como método para inclusão das marcas d'água.

No trabalho de Hsieh e Wu [32], o HVS (*Human Visual System*) é utilizado como métrica para a inclusão de marcas d'água nos locais que prejudiquem menos a qualidade da imagem com a marca d'água em relação à imagem original. Isso é feito utilizando uma Função de Transferência de Modulação (MTF) [52]. São utilizados também sistemas de correção de código, que permitem, através da repetição da marca d'água na imagem, aumentar a robustez.

Para a implementação da marca, primeiramente é realizada a transformação wavelet na imagem original com três níveis de decomposição e a codificação da marca d'água em um sistema de correção de erro.

Nos coeficientes wavelets, cujo valor absoluto for maior que um limite (limiar) pré-estabelecido haverá a inclusão da marca d'água, já utilizando os parâmetros do HVS. Os novos valores dos coeficientes serão $I'(m, n) = I(m, n) + \alpha \cdot w_i \cdot I(m, n) \cdot W'$, sendo $I'(m, n)$ o coeficiente wavelet modificado, α é o controle do nível de robustez e $w_i = \frac{\int_{WB_i} df_s}{\int_{WB_i} H(f_s) df_s}$,

sendo $H(f_s)$ a MTF e WB_i é a largura da banda da i ésima banda. Finalmente, aplica-se uma transformação wavelet inversa para retornar à imagem. O detector da marca é um detector informado, ou seja, necessita tanto da imagem marcada como da imagem original e, por meio de um critério de similaridade, verifica-se a existência e validade da marca.

Wang e Kuo [71] utilizam o *Multi-Threshold Wavelet Codec* (MTWC) para comprimir imagens, o qual usa uma quantização sub-banda com diferentes intervalos iniciais em cada banda. Tal método ajuda a determinar também os coeficientes para inclusão das marcas d'água. A marca d'água em si é uma entrada dada pelo usuário, a qual é convertida em uma seqüência de bits e, em seguida, em uma seqüência pseudoaleatória de densidade Gaussiana.

No trabalho de Cao et al. [8], a transformada wavelet redundante (RDWT) é utilizada para fornecer uma máscara de correlação para determinar quais os melhores coeficientes para inclusão da marca d'água. Ruído branco Gaussiano é adicionado como marca d'água para verificação da invisibilidade em relação ao HVS.

O sistema proposto por Fullea e Martinez [24] é composto de três módulos: inserção, resincronização e extração. O diferencial deste sistema está no módulo de resincronização, que torna a marca d'água robusta contra ataques. Utilizando-se o fato que transformações do tipo rotação, escala e translação aplicadas em uma imagem produzem o efeito inverso em sua transformada Fourier (DFT), é possível estimar a transformação ocorrida em uma imagem após um ataque, comparando-a com a imagem original.

No trabalho de Paquet [57], a transformada de Haar é utilizada para a decomposição da imagem em coeficientes wavelets. Em seguida é introduzida uma seqüência pseudoaleatória N aos coeficientes das bandas de média e alta freqüência, pois alterações nessas bandas alteram pouco o resultado final da imagem, considerando o HVS. Os novos coeficientes serão: $I'(m, n) = I(m, n) + \alpha \text{abs}(I(m, n)) \cdot N[m, n]$, sendo abs a função absoluto. Para a decodificação, os coeficientes da imagem marcada são comparados com os coeficientes da imagem original para a extração da assinatura (a seqüência pseudoaleatória).

Em seguida, por meio de uma busca em um banco de assinaturas, é localizada aquela correspondente à assinatura da imagem através da correlação, utilizando-se limites para a verificação. Uma segunda etapa de identificação é aplicada, ao comparar novamente a assinatura

do banco com a correlação cruzada (*cross-correlation*) com o primeiro nível de resolução. Caso exista um pico na correlação, a marca é considerada detectada. Caso não exista tal pico, é feita a correlação no segundo nível de resolução. Tal processo se repete até o nono nível até que, em algum deles, ocorra um pico de detecção. Esses dois níveis de detecção permitem um baixo nível de falsos positivos.

Barni et al.[6] utiliza o filtro de Daubechies-6 para decompor uma imagem em quatro níveis de resolução, conforme mostra a figura 2.10. A marca d'água, que consiste de uma seqüência binária pseudoaleatória $x_i \in \{+1, -1\}$ com $i = 0, \dots (3MN - 1)$ sendo $2M \times 2N$ a dimensão da imagem original, é inserida nos três níveis de detalhe do primeiro nível da decomposição, seguindo a fórmula:

$$I_0'^{LH}(i, j) = I_0^{LH} + \alpha w^{LH}(i, j)x_{iN+j} \quad (2.14)$$

$$I_0'^{HL}(i, j) = I_0^{HL} + \alpha w^{HL}(i, j)x_{MN+iN+j} \quad (2.15)$$

$$I_0'^{HH}(i, j) = I_0^{HH} + \alpha w^{HH}(i, j)x_{2MN+iN+j} \quad (2.16)$$

na qual $I_0'^{LH}$, $I_0'^{HL}$ e $I_0'^{HH}$ representam as bandas do primeiro nível de decomposição da imagem marcada, I_0^{LH} , I_0^{HL} e I_0^{HH} representam as bandas do primeiro nível de decomposição da imagem original, α é o controle do nível de robustez e $w(i, j)$ a função de sensibilidade local da imagem a ruído.

A correlação entre os coeficientes DWT marcados e a seqüência binária é comparada com um limiar para detecção da marca, não utilizando a imagem original. A função de robustez é escolhida através do cálculo das áreas na imagem nas quais o olho humano é menos sensível a ruídos; tais áreas são: as áreas de alta resolução e bandas de 45° (sub-banda HH), áreas de brilho intenso e áreas com muita textura.

2.4.3 Prova de Propriedade

Além de identificar o autor de determinada obra, uma marca d'água pode ser capaz de provar que uma pessoa é a criadora original de uma imagem.

Supondo que uma imagem possua tanto o símbolo de *copyright* © quanto uma marca

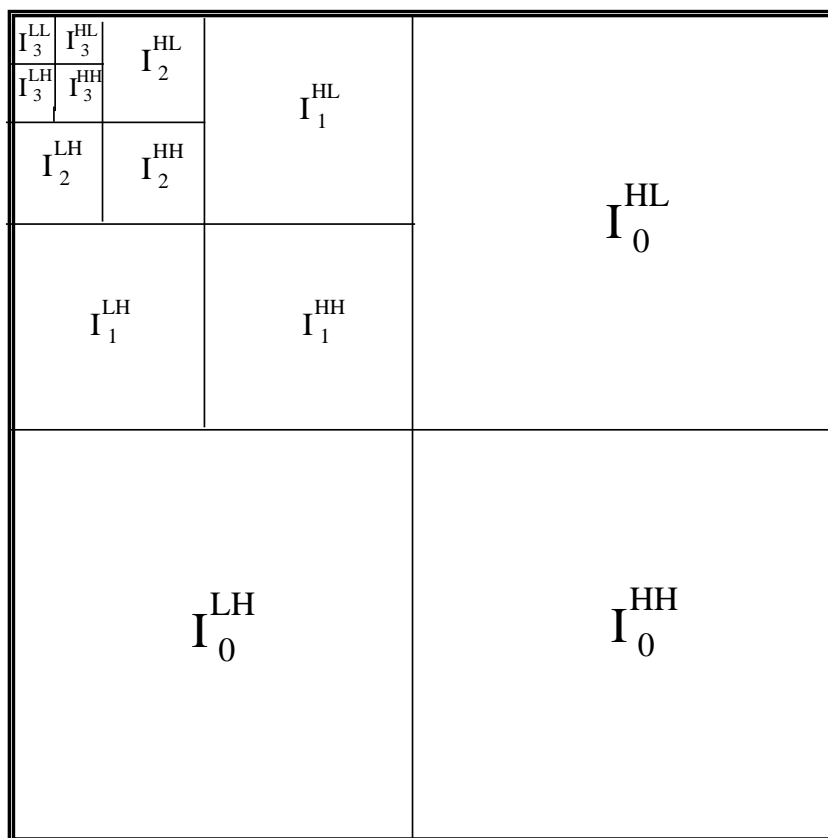


Figura 2.10: Modelo de decomposição de imagem em quatro níveis de detalhe.

d'água contendo o nome de seu criador. Mesmo que o símbolo de *copyright* seja alterado, a marca d'água continuará existindo. Além disso, caso a marca d'água seja corrompida, ela não poderá ser completamente removida, sendo possível ao autor provar, através da imagem original, que a imagem alterada é derivada de sua imagem.

2.4.4 Rastreamento de Transação

Nesta área, as marcas d'água podem ser aplicadas para rastrear a origem de uso indevido de um trabalho. Isso pode ser feito aplicando-se uma marca d'água distinta para cada cópia distribuída e, caso o trabalho seja usado indevidamente, basta que o autor verifique qual a marca presente nas cópias ilegais e descubra quem era seu dono original.

Tal aplicação também inclui exemplos práticos de uso de marcas d'água visíveis, como números de série impressos no molde de documentos. Porém, marcas d'água imperceptíveis são mais indicadas, principalmente por dificultarem alterações e até mesmo a descoberta de sua existência.

2.4.5 Autenticação de Conteúdo

Como mencionado anteriormente, fazer alterações em imagens ou qualquer outro tipo de informação digital é, atualmente, muito simples. Vários trabalhos na literatura disponibilizam técnicas para garantir algum tipo de autenticação.

Uma das mais conhecidas é a técnica da assinatura digital, na qual uma assinatura da mensagem é criptografada e inserida no contexto da mesma. A assinatura representa um resumo da mensagem e, caso ocorra alguma alteração na mensagem, o resultado da decodificação será diferente. Para utilização de tal técnica de criptografia, há dois métodos mais utilizados: a criptografia de chave simétrica ou chave secreta e a criptografia de chave assimétrica ou chaves pública/privada.

Na primeira técnica, tanto origem quanto destino possuem uma mesma chave de criptografia, com a qual é possível codificar e decodificar uma mensagem. O problema dessa técnica é comunicar a chave em si, mantendo a segurança, pois, caso uma pessoa não-autorizada obtenha a chave, todas as mensagens que utilizaram tal criptografia podem ser consideradas perdidas.

Já a segunda técnica apresenta chaves diferentes para codificar e decodificar uma mensagem, uma chave pública, que pode ser distribuída para “qualquer pessoa” sem comprometer a segurança, e uma chave privada, essa guardada apenas com o destinatário ou emissor da mensagem, dependendo da aplicação. Por ser computacionalmente mais custosa que a criptografia de chave simétrica, mensagens longas dificilmente utilizam essa técnica, transmitindo a mensagem criptografada por chave simétrica e transmitindo apenas a chave secreta pelo sistema de chave assimétrica.

Porém, há vários pontos negativos com relação a tais técnicas. Um deles é que a assinatura deve ser transmitida junto com a mensagem, em um cabeçalho, por exemplo. Assim, não é difícil que tal informação seja simplesmente perdida. As marcas d'água são uma alternativa a tais técnicas de criptografia, pois são embutidas diretamente na mensagem.

Tais marcas d'água são conhecidas por marcas de autenticação e, quando inseridas em um trabalho com o propósito de identificar alterações são chamadas de marcas d'água frágeis. Como mencionado na seção 2.2, tais marcas são sensíveis a qualquer alteração na imagem.

Existem ainda as marcas semi-frágeis que possibilitam algumas alterações como compressão ou melhoria de contraste.

A partir de tais marcas ainda é possível, por exemplo, distinguir qual parte de uma imagem foi alterada. Caso a imagem tenha sido dividida em blocos e cada um tenha sua própria marca d'água, apenas o(s) bloco(s) alterado(s) terá(ão) sua marca d'água alterada.

Jayawardena et al. [36] propõem um algoritmo para embutir imagens marcas d'água binárias em imagens escala de cinza com pixels de 8 bits que resistam a grandes taxas de compressão. Para isso, utilizam-se transformações wavelets para mapear as imagens em imagens multirresolução. Além disso, pode-se ainda incluir alguma criptografia na imagem marca d'água como permutação pseudoaleatória para aumentar a segurança.

2.4.6 Segurança Médica

Outra área correlata às áreas de autenticação de conteúdo e identificação de propriedade é a de segurança médica, mais precisamente, de validação de informações em uma imagem de diagnóstico, armazenado no formato DICOM (*Digital Imaging and Communications in Medicine*), por exemplo.

Tais arquivos possuem um cabeçalho no qual são armazenadas informações sobre o paciente, como nome, idade, identificação, dentre outros [3, 69]. Através da conversão de arquivos, de DICOM para JPEG, por exemplo, tais informações podem ser perdidas. A inserção de marcas d'água em alguns arquivos contendo essas informações pode garantir alguma segurança, tanto ao médico quanto ao paciente, relacionando corretamente a imagem de diagnóstico com o paciente.

2.4.7 Controle de Cópias

O objetivo principal dessa área é prevenir que sejam feitas cópias ilegais de um trabalho através da implantação de uma marca d'água no trabalho e de detectores nos dispositivos capazes de ler o trabalho.

Ao tentar fazer, por exemplo, uma cópia de um DVD que possua uma marca d'água de *não-copie* em um gravador que possua análise de marcas d'água, o gravador não irá fazer tal

cópia. Algo semelhante seria feito para leitores de DVD, os quais poderiam verificar se estão lendo um trabalho original com a marca *não-copie* ou então uma cópia. Apenas o original seria executado.

O principal problema dessa técnica é obrigar os fabricantes implementarem tais sistemas em seus aparelhos e, mais ainda, obrigar os consumidores adquirirem aparelhos que apenas leiam trabalhos originais.

2.4.8 Controle de Dispositivo

O controle de cópias está inserido em uma categoria maior chamada controle de dispositivo. Nessa categoria, muitas outras aplicações são possíveis, nas quais os dispositivos interagem com as marcas d'água.

Exemplos são marcas d'água inseridas em transmissões de rádio, capazes de identificar se o conteúdo atual sendo transmitido é música ou comercial, e, nesse último caso, podendo ser ignorado. Ou, então, marcas inseridas na TV capazes de reagir com determinados brinquedos, de acordo com a programação.

Mais recentemente, um outro exemplo utilizado no sistema da Digimarc's MediaBridge [23] implementa uma marca em imagens de anúncios ou revistas e, quando tais imagens são recapturadas por uma câmera e transmitidas ao computador, um software direciona um navegador para a página associada ao anúncio.

2.4.9 Filtragem e Classificação

Assim como é possível diferenciar comerciais de músicas em uma transmissão de rádio, também é possível implementar outras formas de filtragem, como classificar programas de TV por conteúdo ou faixa etária indicada, impedindo assim que crianças assistam à determinada programação, por exemplo.

Nessa mesma linha, é possível filtrar trabalhos legais de cópias ilegais, ou ainda, ser base para a utilização de sistemas P2P (*Peer-to-Peer*) legais.

2.4.10 Ativação Remota

Como parte da estratégia de identificação de propriedade e direitos autorais, a ativação remota pode ser utilizada para notificar o proprietário de um trabalho de seu uso. Tal identificação poderia ser feita através de um software de reconhecimento de marcas d'água que, ao localizar uma marca, emitisse uma mensagem pela Internet para um endereço contido na marca. Além de ter controle sobre o uso de seus trabalhos, o proprietário teria meios de saber, quase instantaneamente, caso seu trabalho estivesse sendo usado de maneira ilegal.

Assim como em outras aplicações, o principal problema desse sistema é a obrigatoriedade de sua implementação que, além de utilizar recursos de processamento e banda de transmissão, impedirão os usuários de fazer acesso a qualquer material ilegal.

2.4.11 Indexação

Devido à possibilidade de inserção de textos e/ou comentários em diversos tipos de mídias como imagens, músicas ou vídeos, a inserção de marcas d'água pode ser utilizada para indexação de tais mídias em sistemas de busca. Como a marca d'água não é perceptível na execução, seu uso pode ser uma alternativa para indexação em arquivos da Internet, por exemplo, ou então em uma base de dados de imagens médicas.

2.5 Propriedades

São várias as propriedades [10, 12, 14] que podem ser verificadas ou exigidas em uma marca d'água. O grau de importância e até mesmo a necessidade de cada uma delas dependerá da aplicação em desenvolvimento. A seguir serão apresentadas algumas propriedades presentes na maioria das marcas d'água:

- Invisibilidade: a marca d'água deve ser visualmente imperceptível e produzir a menor distorção possível na imagem original.
- Detecção Confiável: um detector deve localizar uma marca d'água em uma imagem com o máximo de precisão possível.

- Eficiência Computacional: os processos de inserção e detecção de marcas d'água devem ser computacionalmente viáveis, sendo necessária a detecção especialmente rápida se a aplicação envolver monitoração em tempo real.
- Fragilidade: para aplicações de autenticação, a marca d'água deve ser "inutilizada" quando ocorrer qualquer alteração na imagem. Os tipos de alterações permitidas variam de acordo com a aplicação.
- Robustez: em aplicações que necessitam da marca d'água "intacta", como identificação de propriedade ou controle de cópias, a marca d'água deve resistir a ataques e modificações na imagem, ou então, em caso de tentativa de remoção, deixar a imagem inutilizável, através da perda significativa de qualidade.
- Capacidade de armazenamento: propriedade que considera o total de informações que a marca d'água pode armazenar.

2.5.1 Ataques

Uma das principais propriedades que uma marca d'água deve possuir é a robustez. Resistir a ataques não é apenas fundamental para a eficácia da marca d'água como também é um diferencial entre os vários métodos existentes.

Petitcolas et al. [59] apresentam ataques a algumas técnicas de marcas d'água. O ataque *jitter* (tremor) consiste em remover e duplicar certas informações do arquivo sem que seja prejudicado seu conteúdo sob a percepção humana. Em uma imagem, por exemplo, colunas de bits são removidas e outras duplicadas, preservando o tamanho da imagem (algo similar pode ser feito com arquivos de áudio).

A ferramenta StirMark [60] simula erros causados por uma impressão seguida de uma digitalização da imagem, aplica transformações geométricas como rotação, deslocamento, corte em alguns bytes escolhidos aleatoriamente e, em seguida, uma interpolação. Pode-se ainda implementar uma compressão. Os resultados obtidos quebraram grande parte dos softwares de marcas d'água disponíveis, pois tal ferramenta se aproveita do fato de que a maioria das marcas resiste a alguns ataques, mas dificilmente a uma combinação deles.

Outro ataque utilizado é o ataque mosaico, no qual uma imagem é repartida em subimagens menores, mas apresentadas nas mesma posição e ordem que a imagem original em um navegador. Tal ataque quebra sistemas que fazem o *download* de imagens automaticamente da Internet para verificação de *copyright*. A solução é deixar marcas nos menores pedaços possíveis da imagem, possibilitando que ao menos uma subimagem após o ataque contenha a marca.

Ainda podem ser utilizados ataques como equalização de histograma, filtro passa-baixa, inclusão de ruído Gaussiano, inclusão de ruído sal e pimenta, entre outros. A figura 2.11 demonstra alguns ataques comuns em imagens.



Figura 2.11: Tipos de ataques comuns em imagens para inutilizar marcas d'água.

2.6 Sistemas de Marcas d'água

Na literatura existente, vários métodos de inserção de marcas d'água são propostos. No domínio de transformadas, destacam-se duas abordagens para a identificação de propriedade, foco deste trabalho. Uma propõe a inserção de uma imagem de logotipo ou com dados sobre

o proprietário ou autor da imagem a ser marcada [36, 67, 76] e a outra a inserção de uma imagem de ruído Gaussiano de intensidade 0 e variância 1 e que, ao ser comparada através de correlação com uma base de dados de imagens de ruído, irá relacionar a imagem com o autor [6, 8, 29, 32, 57, 71].

Neste trabalho, as marcas d'água de logotipos serão denominadas marcas visuais por possuírem conteúdo visualmente identificável e as marcas de ruído Gaussiano chamadas de marcas de ruído.

2.6.1 Marcas Visuais

Na abordagem que utiliza marcas visuais, o transmissor da imagem aplica alguma seqüência de inserção para marcar determinados pixels. O destinatário faz uso da mesma seqüência para obter os pixels marcados para efetuar a verificação de propriedade.

A principal vantagem desta técnica é a identificação do proprietário da imagem apenas com a extração da marca d'água, pois todos os seus dados estarão contidos na imagem.

Entretanto, um problema do uso de marcas visuais é o tamanho da imagem a ser inserida como marca d'água. Apesar de ser proporcional ao tamanho da imagem original, a relação de *Robustez* \times *Quantidade de Dados* deve ser considerada, pois, caso seja utilizado algum tipo de redundância na inserção da marca, o tamanho máximo da imagem de marca d'água será afetado.

2.6.2 Marcas de Ruído

A inserção de marcas de ruído no domínio de transformadas wavelets tem como principal característica a alteração da imagem principalmente nas áreas de textura intensa ou de bordas, deixando a imagem marcada minimamente alterada, sendo imperceptível ao olho humano. A imagem mostrada na figura 2.12 demonstra tal alteração.

Nesse sistema, a marca d'água é apenas um padrão de ruído sem informações sobre o autor da imagem. A identificação desse apenas é possível através da correlação da marca extraída da imagem em estudo com um banco de dados, que relaciona cada padrão de ruído com um autor ou proprietário.

O método de inserção da marca varia pouco nos trabalhos existentes. As diferenças estão nas definições de limiares para a detecção e nos métodos de redundância (que serão explicadas na seção 2.7).

As definições de limiares são fundamentais para a correta correlação da marca, pois limiares muito altos ocasionarão falsos-negativos e limiares baixos um alto índice de falsos-positivos.



Figura 2.12: Diferença entre imagem original e imagem marcada com ruído, após ajuste de contraste.

2.7 Redundância de Dados

A redundância de dados é uma das melhores alternativas para aumentar a robustez contra ataques. Nos trabalhos existentes, tal redundância é conseguida de diversas formas, como códigos de correção de erro [32], transformadas wavelets redundantes [8] ou a simples repetição da marca em diferentes locais da imagem [57].

Neste trabalho, pretende-se explorar a redundância de dados através da inserção de uma mesma marca em diferentes bandas de detalhe wavelet e também através de métodos distintos de inserção, baseando-se em seqüências pseudoaleatórias e em características estáticas da imagem.

O principal problema do uso de redundância é o possível prejuízo visual da imagem marcada. Quanto maior o número de marcas inseridas, mais partes da imagem precisarão ser alteradas, ou seja, conforme aumenta a redundância na informação, aumenta também a chance da

imagem marcada se tornar diferente da imagem original.

Deve-se, então, ponderar a quantidade de informação a ser inserida em relação à diferença que pode-se causar na imagem. Tal medida é fundamental para aumentar a robustez sem comprometer a qualidade da imagem.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

Neste capítulo é descrita a metodologia para o desenvolvimento de uma ferramenta de identificação de propriedade com marcas d'água em imagens em níveis de cinza. Tal ferramenta deve possibilitar que, mesmo após alterações em uma imagem com a marca d'água, essa ainda seja identificável, ou seja, deve permitir que o autor da imagem seja identificado.

Como a quantidade de famílias de wavelets existentes é grande, elas são utilizadas de maneiras diversas nos trabalhos da literatura, obtendo resultados distintos na área de processamento de imagens. Cada família possui propriedades cuja aplicação melhor se enquadra em determinadas sub-áreas, como por exemplo segmentação de imagens, compressão, remoção de ruído, entre outras. Tal quantidade de famílias cria um conjunto importante para a avaliação de cada método, portanto, como forma de verificar qual melhor se aplica na ferramenta proposta de inserção e recuperação de marcas d'água, serão realizados testes com diversas famílias.

Para garantir qualidade na recuperação da marca e, principalmente, gerar uma imagem marcada sem alterações em relação à imagem original, é necessário utilizar meios para alterar a imagem que o olho humano não perceba. Para isso, serão utilizadas propriedades do Sistema Visual Humano na escolha dos blocos da imagem que receberão a marca d'água.

Outro grande desafio na implementação de marcas robustas para identificação de propriedade é garantir resistência a ataques. Para tanto serão explicados os métodos utilizados para proporcionar tal resistência.

Após a análise dos resultados das etapas preliminares, será descrita a ferramenta propriamente para inserção e detecção de marcas d'água, bem como os parâmetros que devem ser utilizados nos compromissos entre tamanho de marca e tamanho de imagem, robustez e similaridade das imagens.

Por fim, o resultado do método final será exposto a ataques para verificar sua resistência e

a cálculos de similaridade de imagens, para analisar as alterações visuais que ocorreram entre as imagens originais e marcadas.

Nas próximas seções são descritas as etapas utilizadas no desenvolvimento da ferramenta de inserção e extração de marcas d'água.

3.1 Escolha de Domínio

Primeiramente, para o desenvolvimento de uma ferramenta de inserção e extração de marcas d'água, faz-se necessária a escolha de um domínio a ser trabalhado: espacial, de transformadas ou temporal, dentre outros.

Tal escolha é fundamental para o trabalho em razão das características de cada domínio serem completamente distintas, bem como os pontos fortes e deficiências de cada um deles. O domínio escolhido para desenvolvimento é o de transformadas, por ter naturalmente robustez à compressão de dados, ao se aplicar uma marca d'água.

No domínio de transformadas, as mais populares são as Transformadas Discreta do Cosseno (DCT), Discreta de Fourier (DFT) e Discretas Wavelets (DWT). Dentre essas, escolheu-se a transformada wavelet por se tratar do padrão utilizado no formato JPEG 2000 e por ganhar espaço recentemente em termos de pesquisas realizadas.

Como mencionado anteriormente, as transformadas wavelets operam com a decomposição da imagem em níveis de detalhe, cada nível dividido em três bandas. A escolha do número de níveis de decomposição depende do tipo de aplicação com a qual se está trabalhando. Neste trabalho será utilizado apenas um nível de decomposição wavelet.

3.2 Seleção das Famílias Wavelets

Escolhido o domínio para desenvolvimento da ferramenta, faz-se necessário determinar quais famílias wavelets serão utilizadas para determinar aquela que trará melhores resultados na recuperação da marca d'água e na manutenção da similaridade entre as imagens originais e marcadas.

Como são muitas as famílias wavelets existentes, cada uma possuindo características únicas,

serão escolhidas famílias que representam parte significativa dos trabalhos existentes na área de processamento de imagens. E para cada família, será utilizada no mínimo uma base. O apêndice A traz os filtros utilizados no desenvolvimento da metodologia deste trabalho.

O capítulo 4 trará as comparações entre cada filtro utilizado, demonstrando as diferenças verificadas entre eles e definindo qual filtro possui melhor desempenho na inserção e recuperação de marcas d'água.

3.3 Seleção dos Blocos

O Sistema Visual Humano (HVS - *Human Visual System*) é menos sensível a alterações, e até mesmo a determinados tipos de ruído, em determinadas regiões de imagens. Tal fato permite o desenvolvimento de ferramentas e métricas, em diversas áreas, que se aproveitam dessa limitação. As regiões com menor grau de percepção de detalhes e diferenças pelo olho humano são listadas a seguir.

- Regiões de alta frequência - quando esse termo é utilizado para imagens, tratam-se de regiões onde existe intensa variação de tonalidades, principalmente a ocorrência de bordas. Ao utilizar uma transformação wavelet, a imagem é dividida em bandas de aproximação e detalhe e tais bandas de detalhe são exatamente as regiões de alta frequência, sendo a banda HH a de maior frequência;
- Regiões de textura intensa - apesar de ser um conceito difundido, não existe definição formal para textura, mas pode-se dizer que se tratam de áreas com intensa variação nos níveis de cinza ou nas cores.
- Regiões de alta luminosidade: regiões com tons de cinza próximos do limite superior do histograma da imagem ou componente de luminosidade alto quando utilizados modelos de padrões de cores, como o YCbCr e HSI, sendo Y e I, respectivamente, tais componentes.

Quando utilizadas em marcas d'água, tais métricas do HVS podem ser utilizadas de diversas formas, de modo a aumentar a robustez da marca inserida e, ao mesmo tempo, tornar a marca

imperceptível a olho nu.

Neste trabalho, o uso das métricas do HVS se dará pela escolha das regiões nas quais a marca d'água será inserida. Sendo assim, haverá inserções nas bandas de alta frequência, podendo ser utilizadas as bandas HH, HL ou LH (figura 2.8), e serão inseridas marcas nas regiões de textura intensa e alta luminosidade.

Um dos diferenciais da metodologia desenvolvida neste trabalho é a inserção de mais de uma marca d'água, cada uma utilizando um método distinto de inserção, possuindo assim resistência a uma grande quantidade de ataques (seção 3.5).

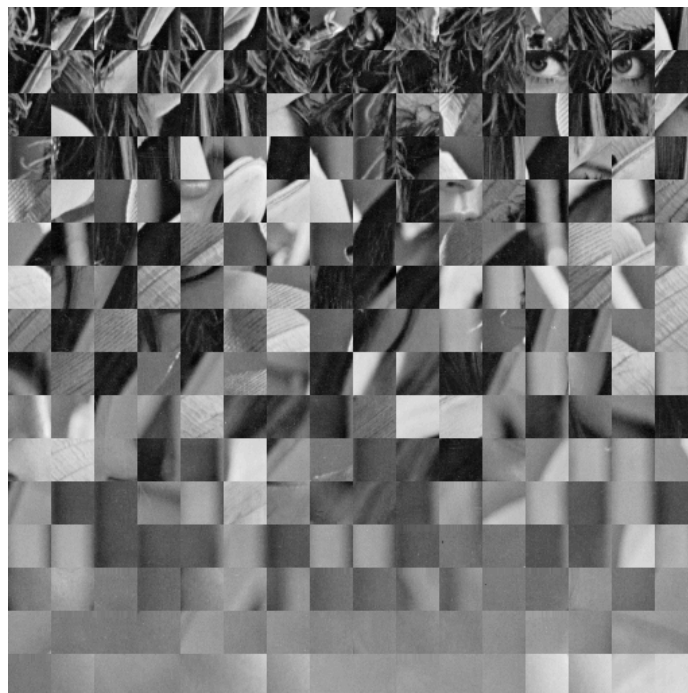
Para tanto, a imagem é dividida em blocos que são ordenados de acordo com determinadas características de luminosidade e textura. É importante ressaltar que serão efetuadas duas divisões da imagem, uma ordenada pela textura dos blocos e outra pela luminosidade. Além disso, um bloco poderá ser receptor de uma marca d'água apenas uma vez, ou pela ordenação de textura ou pela de luminosidade.

A figura 3.1 ilustra a ordenação dos blocos utilizando características de textura e luminosidade, sendo o tamanho do bloco, nesse caso, de 32×32 pixels. O método de inserção de marca d'água utiliza a ordem dos blocos mostrada na figura para inserir a marca (detalhes na seção 3.4), sendo a imagem percorrida da esquerda para a direita, de cima para baixo.

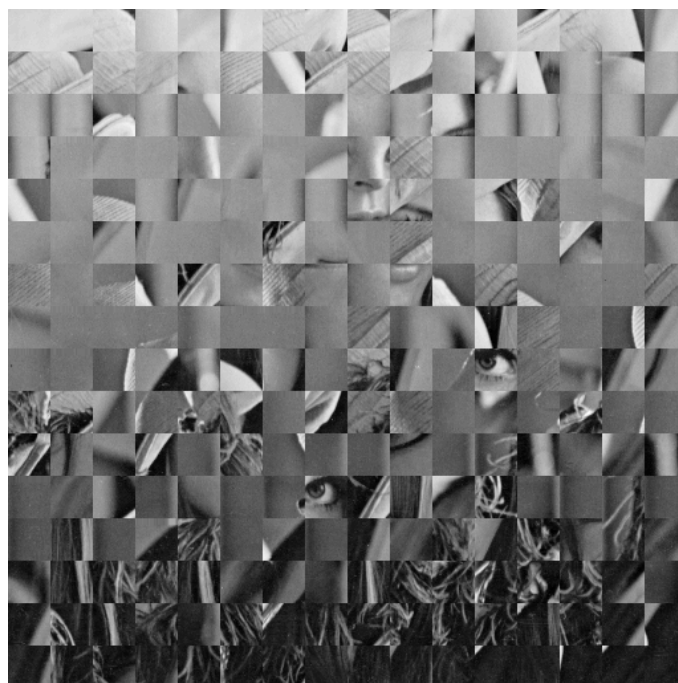
Muitos métodos estão disponíveis para quantificar a medida de textura de cada bloco [15], como entropia, energia, desvio padrão, média, momentos, normas, etc. Dentre eles, optou-se pela utilização do desvio padrão (σ), calculado da forma a seguir:

$$\sigma_i = \sigma_{LLi} + \sigma_{HLi} + \sigma_{LHi} \quad (3.1)$$

em que σ_i é o desvio padrão total do bloco i , σ_{LLi} , σ_{HLi} e σ_{LHi} são o desvio padrão das bandas LL, HL e LH, respectivamente, do primeiro nível de decomposição wavelet do bloco i . Tal cálculo busca identificar a textura dos blocos baseando-se na análise dos coeficientes wavelets, cujos valores tendem a ser menores em regiões de textura suave e maiores em regiões de intensa variação na imagem (bordas). Não é utilizada a banda HH na soma para determinação do desvio total, pois grande parte de seu conteúdo será substituído na inserção da marca, o que



(a) Blocos ordenados seguindo critério de textura



(b) Blocos ordenados seguindo critério de luminosidade

Figura 3.1: Imagem Lena dividida em blocos de 32×32 pixels e reordenada pela textura e luminosidade de cada bloco.

criaria distorções na ordenação dos blocos quando da recuperação da marca d'água.

Para a determinação dos blocos de maior luminosidade, faz-se a soma dos coeficientes da banda LL, a banda de aproximação. Como a metodologia utilizada é para imagens em tons de cinza, os valores maiores indicarão tons de cinza próximos do limite superior do histograma da imagem (normalmente 255), os quais tendem às tonalidades brancas.

3.4 Inserção da Marca

Conhecidos alguns detalhes da implementação, é possível a explicação do método de inserção da marca d'água. Cabe ressaltar que esta seção irá abordar apenas a inserção propriamente da marca, porém várias medidas de aumento de robustez são relacionadas. Como tais medidas podem ser analisadas separadamente e, além disso, o método de inserção funcionaria sem as mesmas, optou-se pelo detalhamento dos meios utilizados para aumento de robustez contra ataques em uma seção separada (seção 3.5).

Como mencionada na seção 3.2, a metodologia desenvolvida neste trabalho faz a inserção da mesma marca mais de uma vez, buscando regiões ou características em cada forma de inserir que se aproveitem de características do Sistema Visual Humano e ainda tenham resistência a ataques.

De forma geral, os passos para a inserção podem ser resumidos da seguinte forma:

1. Fazer a decomposição wavelet da marca d'água W ;
2. Fazer a decomposição wavelet da imagem a ser marcada I ;
3. Inserir a banda LL da marca W na banda LL da imagem I de forma pseudoaleatória;
4. Reconstruir a imagem I ;
5. Dividir a imagem I em blocos;
6. Fazer a decomposição wavelet de cada bloco da imagem I ;
7. Construir e ordenar os vetores de textura e luminosidade;

8. Utilizar os índices dos vetores de textura e luminosidade para determinar quais blocos receberão as bandas da marca W ;
9. Inserir todas as bandas de W na banda HH dos blocos de I , até que a marca W tenha sido inserida por completo;
10. Reconstruir a imagem.

Portanto, é possível dividir o método de inserção em duas partes, ambas independentes entre si, sendo a primeira a inserção baseada em um espalhamento pseudoaleatório da marca e a segunda baseada nos blocos selecionados através de características de textura e luminosidade.

3.4.1 Inserção Pseudoaleatória

A primeira marca d'água a ser inserida tem o objetivo principal de resistir a ataques de corte ou que alterem a posição de elementos na imagem (desde objetos até a troca ou substituição de linhas e colunas na imagem). Esse método pode ser descrito através do algoritmo 1 e da figura 3.2.

Neste passo inicial do método como um todo, apenas é inserida a banda de aproximação (LL) da marca d'água. Tal medida é necessária pois a inserção da marca está sendo efetuada na banda LL da imagem, a qual produz as maiores distorções na imagem quando alterada.

Outra consideração refere-se ao cálculo da média em vizinhança-4. Ao determinar um coeficiente C da banda LL da imagem que será substituído, é feito o cálculo da média de seus vizinhos apenas, não sendo o valor do ponto C considerado. Isso porque o mesmo será substituído pela média dos coeficientes da região somado ao valor do coeficiente da marca d'água. Tal soma garante que o valor do novo coeficiente não será muito distante de seus vizinhos, reduzindo as chances de distorções na imagem após a inserção da marca.

Algoritmo 1: Algoritmo de inserção pseudoaleatória da marca

início

Seja I a imagem original a ser marcada, W a marca d'água e S a semente pseudoaleatória;

Fazer a decomposição Wavelet de I ;

Fazer a decomposição Wavelet de W ;

Seja LL_I a banda LL da decomposição da imagem I ;

Seja LL_W a banda LL da decomposição da marca W ;

Criar a matriz $RND(r, c)$ de valores pseudoaleatórios, utilizando a semente S , de mesmo tamanho que LL_W . Os valores de RND serão referências a coordenadas em LL_I ;

Seja $altura$ e $width$ as dimensões (linhas e colunas, respectivamente) da banda LL_W ;

para cada $r = 1$ até $altura$ **faça**

para cada $c = 1$ até $width$ **faça**

$(x, y) \leftarrow RND(r, c)$;

 Calcular a média M , em vizinhança-4, do ponto $LL_I(x, y)$;

$LL_I(x, y) \leftarrow LL_W(r, c) + M$;

fim

fim

fim

É importante mencionar que a inserção pseudoaleatória exige que tanto a origem (pessoa que inseriu a marca d'água) quanto o destino (receptor da imagem marcada) possuam a semente que origina o vetor pseudoaleatório.

3.4.2 Inserção em Blocos de Textura e Luminosidade

Para a inserção da marca nos blocos de textura e luminosidade é necessária primeiramente a definição e ordenação dos vetores que conterão os blocos. Para isso, é utilizado o algoritmo 2.

Como mencionado na seção 3.3, é utilizado o desvio padrão para quantificação da textura do bloco e a soma dos coeficientes para a luminosidade. Baseado na quantidade de blocos desejável para a imagem, o algoritmo a divide e determina a ordem dos blocos a ser utilizada para a inserção da marca. Todos os blocos são analisados pois, hipoteticamente, é possível utilizar todos os blocos para inserção de uma ou mais marcas d'água. Isso, porém, causaria

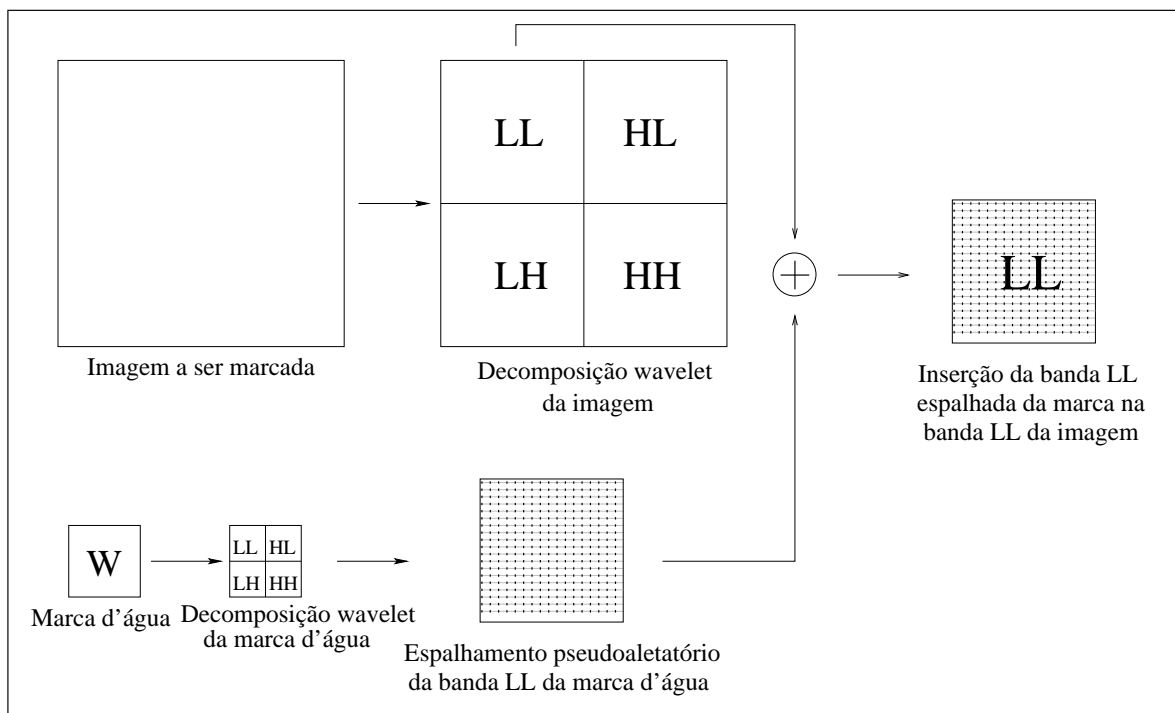


Figura 3.2: Diagrama do método proposto para a inserção pseudoaleatória da marca.

uma diferença perceptual significativa na imagem marcada.

Finalmente, com os blocos já selecionados, é possível efetuar a inserção da marca na imagem. Para isso, a banda HH daqueles blocos é substituída pelas bandas da marca d'água, conforme mostra o algoritmo 3.

Cabe explicar que tal substituição irá comprometer quase totalmente a banda HH dos blocos utilizados, porém, por se tratar de uma banda de detalhes, haverá pouca ou nenhuma diferença na imagem marcada em relação à imagem original, como será mostrado no capítulo 4.

A figura 3.3 ilustra o diagrama completo da inserção da marca utilizando as características de luminosidade e textura da imagem.

3.5 Resistência a Ataques

A descrição da inserção da marca d'água explicada até o momento está completa caso não sejam considerados os ataques à imagem. À exceção do ataque de corte, ao qual a marca poderia resistir devido à inserção pseudoaleatória, o método falharia na manutenção e recuperação da marca d'água para grande parte dos ataques.

Algoritmo 2: Divisão da imagem em blocos e criação dos vetores de textura e luminosidade

início

Seja I a imagem a ser marcada, $T1$ o tamanho de cada bloco no eixo x e $T2$ o tamanho de cada bloco no eixo y ;

$N = 1$;

Inicializar o vetor $BLOCOS$ com número de elementos igual à quantidade de blocos que a imagem terá;

para cada $r = 1$ até $I.altura$ passo $T1$ **faça**

para cada $c = 1$ até $I.comprimento$ passo $T2$ **faça**

 % Cada bloco recebe os próximos $T1$ elementos no eixo X e os $T2$ elementos no eixo y da imagem original;

$BLOCOS(N) \leftarrow I(r : (r + T1 - 1), c : (c + T2 - 1))$;

$N ++$;

fim

fim

% A variável N agora possui o número total de blocos na imagem e, conseqüentemente, o tamanho do vetor $BLOCOS$;

para cada $i = 1$ até N **faça**

 Fazer a decomposição wavelet no bloco $BLOCOS(i)$;

$BLOCOS(i).LL, BLOCOS(i).HL, BLOCOS(i).LH, BLOCOS(i).HH \leftarrow$

 Bandas da decomposição wavelet;

fim

Inicializar os vetores $VETOR_TEXTURA$ e $VETOR_LUMINOSIDADE$, ambos de tamanho N ;

Seja σ o desvio padrão;

para cada $i = 1$ até N **faça**

$VETOR_TEXTURA(i) \leftarrow$

$\sigma(BLOCOS(i).LL) + \sigma(BLOCOS(i).HL) + \sigma(BLOCOS(i).LH)$;

$VETOR_LUMINOSIDADE(i) \leftarrow$

$\sum(BLOCOS(i).LL) + \sum(BLOCOS(i).HL) + \sum(BLOCOS(i).LH)$;

fim

Ordenar de forma decrescente os vetores $VETOR_TEXTURA$ e $VETOR_LUMINOSIDADE$;

fim

Algoritmo 3: Inserção da marca nos blocos escolhidos de textura e luminosidade

início

 Seja a marca d'água W ;

 Fazer a decomposição wavelet de W ;

 $W.LL, W.HL, W.LH, W.HH \leftarrow$ Bandas da decomposição wavelet;

 $N_BLOCOS \leftarrow$ Quantidade de blocos necessária para inserir cada banda da marca, baseada no tamanho dos blocos da imagem e no tamanho de W ;

 Dividir o tamanho das bandas de W em pedaços que caibam nos blocos;

repita
para cada i em $VETOR_TEXTURA$ até N_BLOCOS **faça**
se $BLOCOS(i)$ ainda não utilizado **então**
 $BLOCOS(i).HH \leftarrow W.Banda * \alpha$;

fim
fim
para cada i em $VETOR_LUMINOSIDADE$ até N_BLOCOS **faça**
se $BLOCOS(i)$ ainda não utilizado **então**
 $BLOCOS(i).HH \leftarrow W.Banda * \alpha$;

fim
fim
até Para cada Banda em W ;

fim

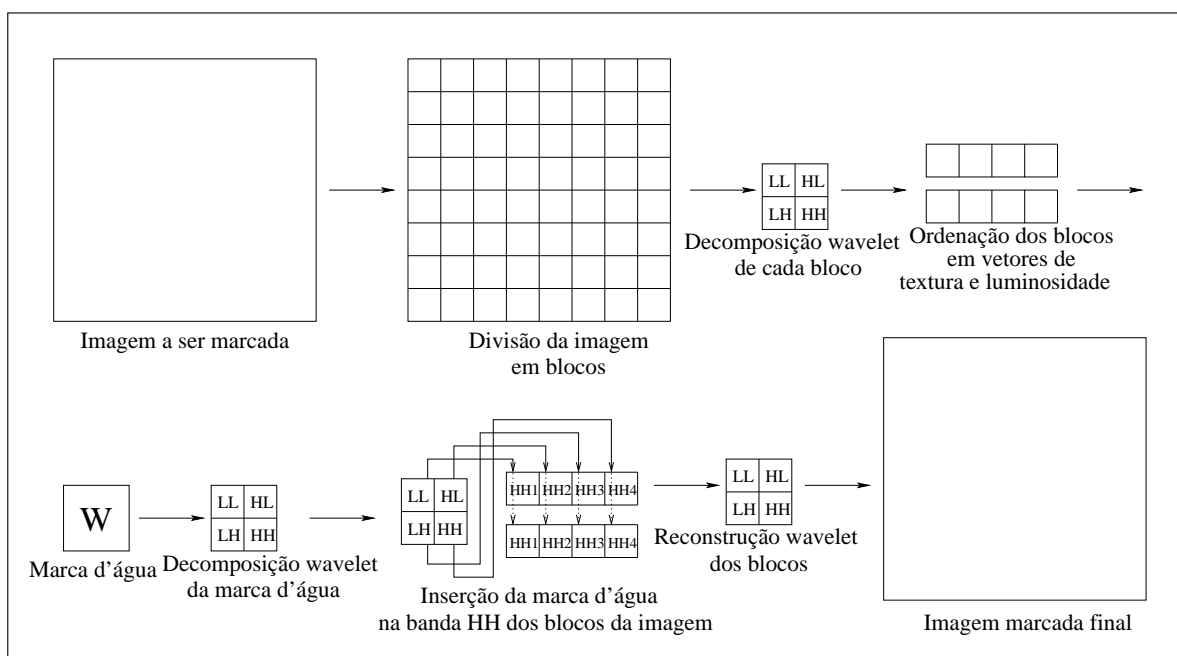


Figura 3.3: Diagrama do método proposto para a inserção nos blocos classificados por textura e luminosidade.

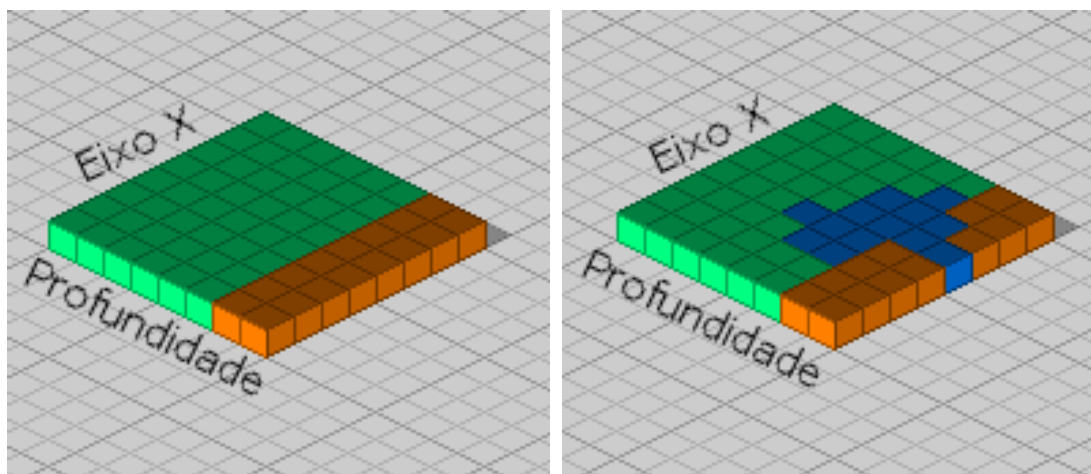
Portanto, para melhorar a robustez da marca d'água, certos melhoramentos devem ser adicionados ao código. O primeiro deles faz uso de uma metodologia semelhante à utilizada na inserção de marcas d'água no domínio espacial com LSB (*Least Significant Bit*) [25, 30, 63].

Nessa técnica, a informação contida no(s) bit(s) menos significativo(s) é substituída pela informação da marca d'água.

Apesar da simples implementação, marcas inseridas utilizando o método LSB tendem a ser frágeis à maioria dos ataques. Porém, a idéia da utilização da informação contida no bit menos significativo para a inserção de marcas pode ser aplicada também aos coeficientes wavelets, com certas modificações.

Primeiramente, a marca d'água não é inserida inteiramente nos bits menos significativos, mas apenas a parte fracionária dos coeficientes wavelets da marca. Tal parte fracionária existe pois, ao substituir coeficientes da banda HH, a reconstrução da imagem acaba utilizando informações não presentes na decomposição wavelet original. Com o uso da técnica, ficam preservadas informações referentes à marca d'água sem necessidade de uso de bits extras para guardar a informação.

Além disso, a informação dos bits menos significativos não utilizados para a marca é mantida. Logo, a imagem possui todos os níveis de profundidade em grande parte de seu conteúdo. A imagem 3.4 ilustra o procedimento, com a visão em profundidade de uma imagem, no qual os cubos verdes representam os níveis considerados para a decomposição wavelet, os blocos laranjas os níveis de cinza não utilizados na decomposição e os blocos azuis representam a marca d'água. O algoritmo 4 resume o processo.



(a) Imagem antes da inserção da marca

(b) Imagem depois da inserção da marca

Figura 3.4: Visualização em profundidade de parte de uma linha da imagem.

Outra modificação efetuada para aumentar a robustez da ferramenta é uma mudança

Algoritmo 4: Algoritmo de redução da profundidade da imagem

início

Seja a imagem de entrada I ;
Armazenar em I' os dois bits de profundidade menos significativos de I ;
Fazer o deslocamento binário para a direita em dois bits de I ;
Utilizar I deslocada como entrada para a inserção das marcas d'água;

Fazer a inserção da marca conforme algoritmos 1 e 3;

Após a inserção da marca em I , fazer a normalização de I para valores entre (0 a 255);
Nos blocos em que não ocorreu inserção de marca, adicionar novamente as profundidades de I' a I ;

fim

simples na marca d'água utilizada. Neste trabalho, são usadas apenas marcas d'água binárias de intensidades 0 e 1; contudo, para a melhoria da recuperação da marca, essa tem suas intensidades alteradas para -1 e 1, facilitando a escolha dos limiares (seção 3.6).

Contudo, a melhoria mais importante para a garantia de recuperação da marca está no fator de força α aplicado na inserção do algoritmo 3. Esse fator é aplicado no momento da substituição dos coeficientes da banda HH dos blocos da imagem pelos coeficientes da marca d'água. Ou seja, antes de ser inserido, cada coeficiente da marca é multiplicado por esse fator de força.

3.6 Extração da Marca

A extração ou recuperação da marca d'água segue, basicamente, os mesmos passos para a inserção. A figura 3.5 e o algoritmo 5 ilustram tais passos.

Diferentemente da inserção, a recuperação da marca não precisa considerar a força aplicada aos coeficientes. Isso porque tal medida visa exclusivamente deixar a marca resistente a ataques. Nesse ponto, a operação inversa, uma divisão do coeficiente pela força, provocaria apenas a perda de informações.

Além disso, se a marca conseguir permanecer na imagem mesmo após um ataque, é provável que os valores de seus coeficientes tenham sofrido alguma alteração. Em virtude disso, é utilizada uma limiarização na marca, que irá reduzir os efeitos do fator de força

aplicado e das possíveis alterações em decorrência de um ataque.

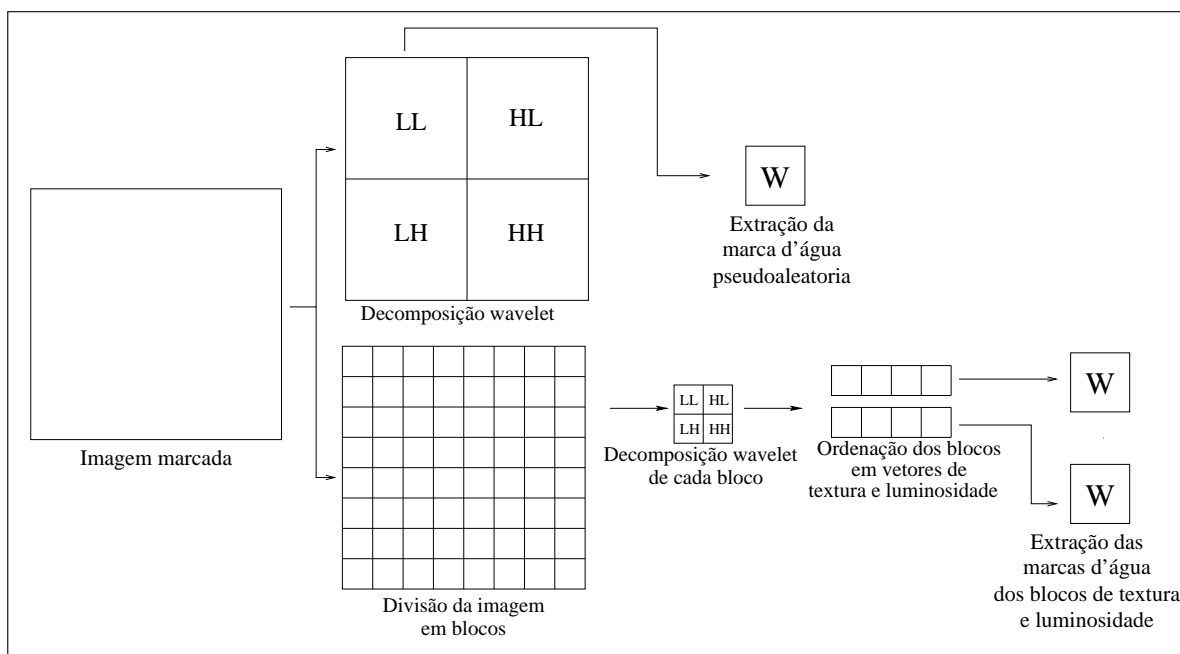


Figura 3.5: Diagrama do método proposto para a extração das marcas d'água.

Algoritmo 5: Algoritmo de extração das marcas d'água

início

Seja I' a imagem marcada e S a semente pseudoaleatória;

$I_s \leftarrow$ Fazer o deslocamento de dois bits em I' ;

Fazer a divisão de blocos utilizando I_s ;

Fazer a decomposição wavelet dos blocos e criar os vetores de textura e luminosidade;

$I.LL \leftarrow$ Fazer a decomposição wavelet utilizando I' e armazene a banda LL;

$W1 \leftarrow$ Utilizando $I.LL$ e S , obter a marca pseudoaleatória;

$W2 \leftarrow$ Utilizando os blocos do vetor de textura, obter a marca de textura;

$W3 \leftarrow$ Utilizando os blocos do vetor de luminosidade, obter a marca de luminosidade;

Efetuar a limiarização em $W1$, $W2$ e $W3$;

fim

Limiarização da marca

Devido às várias transformações wavelets efetuadas tanto na inserção quanto na recuperação da marca e às próprias alterações nos valores originais dos coeficientes das bandas da imagem, a marca d'água recuperada possui um intervalo de valores grande, o que pode ser considerado como um ruído.

Para retornar a marca a um formato binário próximo do original, é necessária uma limiarização. Como, no momento da inserção, a marca d'água foi transformada de seus valores originais 0 e 1 para -1 e 1, aquilo que é recuperado também possui valores positivos e negativos. Portanto, torna-se fácil a escolha do limiar: valores negativos serão convertidos em 0 e valores positivos serão convertidos em 1.

Sendo assim, todas as marcas recuperadas (pseudoaleatória, vetor de textura e vetor de luminosidade) terão valores binários e, caso seja de interesse do usuário da ferramenta, composições entre elas poderão ser efetuadas buscando melhorar detalhes ou comparar resultados.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nesta seção são discutidos os resultados obtidos com a metodologia apresentada. A partir da inserção de marcas d'água em diferentes imagens, procura-se obter o método que apresente melhor resultado em termos de robustez e diferença entre imagens original e marcada.

Os algoritmos foram implementados com o pacote MATLAB [53] versão 7.0.1.24704, no sistema operacional Linux Debian 2.6.18-6-686, em um computador com processador Intel® Pentium® 4 Xeon 3.20GHz, cache L1 de 16 KB e L2 de 1024 KB, 2GB de memória RAM, placa de vídeo MX4000 com 64MB. As imagens utilizadas para receberem as marcas d'água buscaram apresentar conteúdos distintos e que tenham aplicações reais.

A figura 4.1 apresenta as imagens utilizadas para teste. Todas possuem dimensão de 512×512 pixels e são imagens em tons de cinza. Para a marca d'água será usada a figura 4.2, a qual possui tamanho de 64×64 pixels e é binária. Os testes buscarão avaliar a eficiência da ferramenta, validando o método proposto.

Os primeiros resultados referem-se à escolha do melhor tamanho de bloco para a determinação das características de textura e luminosidade, que será a base para a inserção das marcas d'água.

Após a seleção do tamanho de bloco, os testes realizados avaliarão quais as melhores bases wavelets para a inserção de marcas d'água. Sendo assim, foi possível selecionar um subconjunto expressivo de bases que tivesse, nessa etapa dos experimentos, boa recuperação da marca com a menor alteração possível na imagem marcada.

Após a escolha do conjunto de bases wavelets, bem como o tamanho dos blocos a serem utilizados, a ferramenta encontra-se pronta para ser testada em aplicações reais de ataques. Para isso, as imagens da figura 4.1, após a inserção da marca d'água da figura 4.2, serão submetidas à maioria dos ataques utilizados para inutilizar as marcas d'água.

Para demonstrar a eficácia do método, serão mostradas algumas das marcas recuperadas



Figura 4.1: Imagens utilizadas para a inserção das marcas d'água.

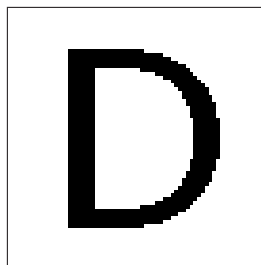


Figura 4.2: Marca d'água utilizada para os experimentos.

após os ataques. Será analisado, ainda, quais as melhores famílias ou filtros wavelets no âmbito de recuperação da marca.

4.1 Seleção dos Blocos

O primeiro passo na determinação dos parâmetros a serem utilizados nos testes de inserções e extrações das marcas d'água é o tamanho do bloco para geração dos vetores de textura e luminosidade.

As opções nos tamanhos dos blocos são muitas, podendo variar desde um único bloco, que seria a própria imagem, até blocos de 4×4 pixels. A utilização de blocos grandes reduz a efetividade do uso das métricas do Sistema Visual Humano, pois não há efetivamente uma seleção de regiões. Por outro lado, muitos blocos pequenos tendem a ter valores muito próximos no momento de ordená-los tanto pela textura como pela luminosidade e, portanto, qualquer pequena alteração na imagem poderia alterar tal ordem, comprometendo e até mesmo impedindo a recuperação da marca.

Portanto, para achar o tamanho ideal de bloco, foram testadas algumas opções e foram verificados quais tamanhos de blocos eram capazes de recuperar a informação da marca d'água após a inserção, sem nenhum ataque.

Os tamanhos de bloco testados foram 64×64 , 32×32 e 16×16 pixels, sendo a imagem dividida em 8, 16 e 32 blocos, respectivamente, em cada eixo x e y .

As marcas recuperadas utilizando a imagem Lena para inserção são mostradas na figura 4.3. Neste ponto, a família wavelet utilizada faz pouca diferença e para todas as utilizadas (haar (haar), Daubechies (db2) e Coiflets (coif1)) os resultados foram muito similares. Portanto, são mostradas, na referida figura, as marcas recuperadas utilizando-se a transformada de haar e coif1. Além disso, são mostradas apenas as marcas de textura e luminosidade, pois as marcas pseudoaleatórias não são influenciadas pelo tamanho dos blocos.

Apesar do filtro de haar se mostrar adequado para bloco de tamanho 32×32 pixels, os outros filtros testados não o foram. Além disso, em experimentos separados, após pequena variação na imagem, nem mesmo o filtro de haar se mostrou eficaz na recuperação da marca. O tamanho de bloco 16×16 pixels não permitiu a recuperação em nenhum filtro.

Sendo assim, o único tamanho de bloco considerado adequado a determinar características de textura e luminosidade e ainda permitir a recuperação da marca é o bloco de tamanho 64×64 pixels, o que permite, nas imagens testadas de 512×512 pixels, um total de 64 blocos.

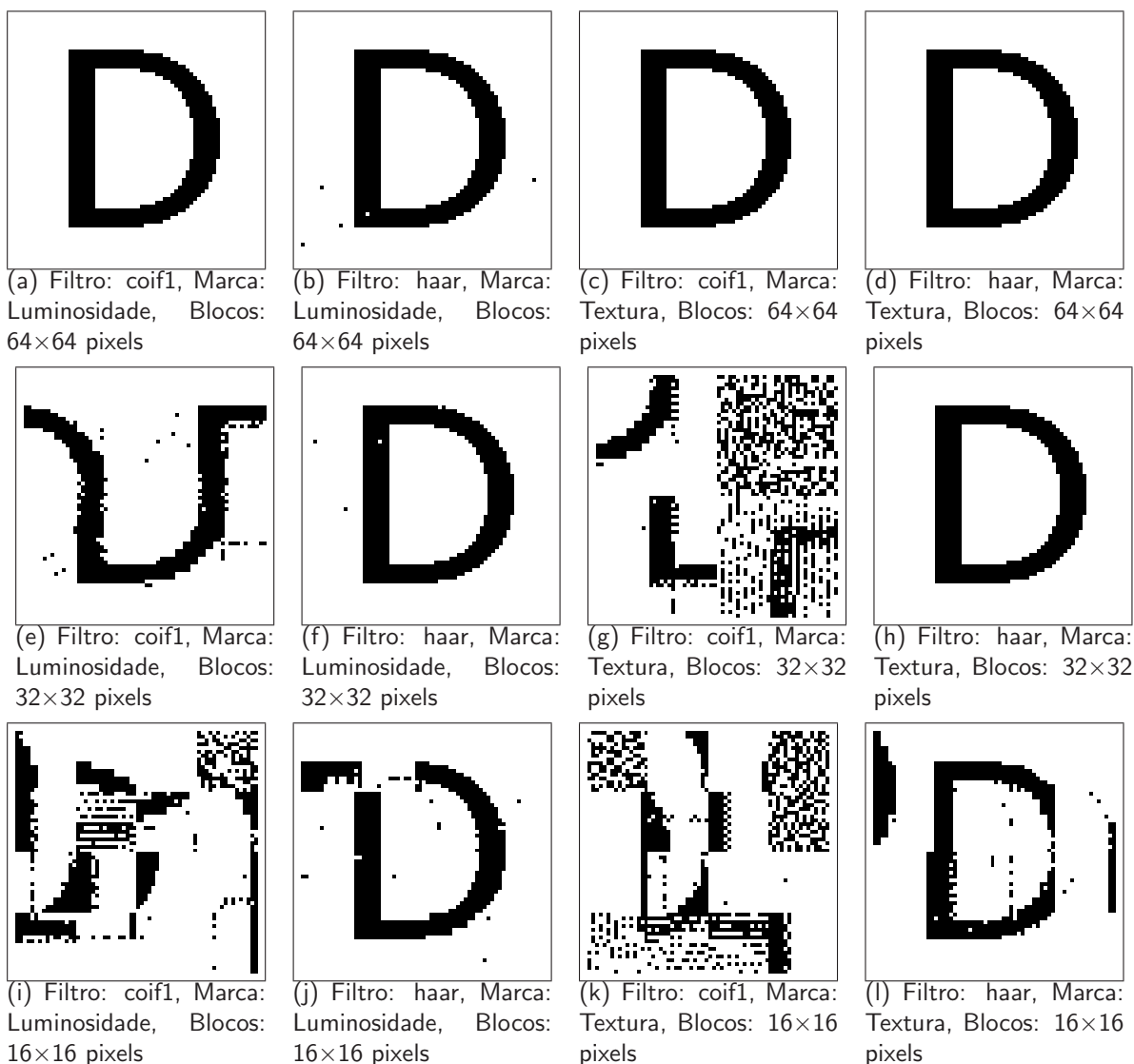


Figura 4.3: Marcas recuperadas variando o tamanho dos blocos.

Nas próximas etapas, portanto, apenas serão utilizados os blocos de 64×64 pixels.

4.2 Seleção dos Filtros Wavelets

A etapa de seleção de filtros wavelets consiste na criação de um subconjunto de filtros que possa representar várias famílias nos experimentos de validação do método.

A tabela 4.1 mostra as famílias e os filtros utilizados nos testes iniciais. Os mesmos têm a finalidade de verificar a invisibilidade da marca, comparando a imagem original com a imagem marcada. Os resultados dessa comparação podem ser observados na tabela 4.2.

Como métrica de comparação foi utilizado o cálculo do PSNR (Peak Signal to Noise Ratio)

Família	Filtros
Daubechies	haar (db1); db2; db8
Coiflets	coif1; coif2
Symlets	sym2; sym5; sym8
Biortogonais	bior1.3; bior2.2; bior3.1
Biortogonais Reversos	rbior.3; rbio2.2; rbio3.1

Tabela 4.1: Tabela de famílias e filtros utilizados.

Wavelet	Lena	Paraquedistas	Cérebro	Sudeste
haar	38,95479	39,35912	39,82814	32,76650
db2	38,24695	38,38436	38,62424	33,26070
db8	38,21943	38,61866	39,06999	32,60281
coif1	38,43785	38,96454	39,47385	33,14885
coif2	38,31692	38,53777	38,71495	33,08367
sym2	38,24695	38,38436	38,62424	33,26070
sym5	38,25350	38,36161	38,76260	32,96953
sym8	38,33640	38,38600	39,05793	33,20577
bior1.3	38,60517	39,24867	39,92219	32,16045
bior2.2	38,78328	39,50053	39,80164	32,48036
bior3.1	37,64162	38,33951	37,98327	29,27274
rbio1.3	38,96904	39,39543	40,18269	33,40974
rbio2.2	38,76976	39,33383	39,96869	33,15428
rbio3.1	35,47962	37,72891	36,91934	28,27310

Tabela 4.2: Tabela de PSNR (db) entre imagens originais e após inserção de marca d'água.

entre as imagens originais e as imagens marcadas com cada filtro. A fórmula utilizada para cálculo do PSNR é expressa em 4.2.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} I(m, n) - I'(m, n)} \quad (4.1)$$

$$PSNR = 20 \log_{10} \frac{b}{RMSE} \text{ dB} \quad (4.2)$$

em que M e N são as dimensões de ambas as imagens I e I' .

O PSNR é uma medida comumente utilizada na área de compressão de imagens [54]. Seu uso neste trabalho faz-se interessante pois tal medida possui uma aproximação do Sistema Visual Humano. Ele é usado como comparação entre duas imagens e quando seu valor é maior que 35 dB, o olho humano dificilmente notará diferença entre as imagens. Por outro

lado, para valores abaixo de 20 dB, as imagens são consideradas visivelmente diferentes. Aplicado a marcas d'água, um valor de PSNR alto, próximo de 40 db, demonstra a capacidade do método em inserir marcas sem alterar significativamente a imagem (propriedade da invisibilidade).

De maneira geral, todos os filtros se mostraram adequados no quesito invisibilidade, com valores muito próximos de PSNR entre si. Dessa forma, os próximos experimentos irão considerar apenas dois tipos de filtros por família (haar, db2, sym2, sym8, coif1, coif2, bior1.3, bior2.2, rbio1.3, rbio3.1).

4.3 Resistência a Ataques

O principal teste a qual um método de inserção e extração de marca d'água deve passar é a resistência a ataques. Nesta etapa, a imagem marcada sofre uma série de ataques e o método de extração deve, ainda assim, recuperar o conteúdo da marca suficientemente para existir a validação da imagem.

Portanto, para a validação final da ferramenta, as imagens da figura 4.1 serão submetidas à inserção da marca e a imagem marcada final sofrerá os ataques mais comuns para a “quebra” da marca. Dentre os ataques possíveis serão utilizados a compressão JPEG, com diversos fatores de qualidade, filtros de suavização, inserção de ruído e ataques geométricos (rotação, translação e escala).

Como parâmetro para recuperação da marca, será utilizado o índice de Jaccard [21], o qual mede a variação de elementos em duas populações binárias, no caso, as marcas binárias. Sua fórmula é mostrada em 4.3. Tal índice pode variar de 0 a 1, sendo que quanto maior for seu valor, maior será a similaridade entre as duas amostras. Experimentalmente, para os casos estudados neste trabalho, verificou-se que valores superiores a 0,75 permitem uma recuperação satisfatória da marca d'água, valores entre 0,65 e 0,75 recuperam parcialmente a informação e abaixo de 0,65 será considerado que a marca não foi recuperada, por mais que exista alguma informação preservada que permita o reconhecimento visual da marca. Cabe explicar que alguns índices Jaccard, apesar de apresentarem valores próximos de 0,75, terão, em uma análise visual, uma marca recuperada de média ou baixa qualidade. Isso porque

tal índice expressa a descrição matemática do resultado na maioria dos casos, porém alguns desvios podem ocorrer, principalmente em imagens originalmente ruidosas.

$$J = \frac{M_{11}}{M_{01} + M_{10} + M_{11}} \quad (4.3)$$

em que, considerando as imagens A quanto B como amostras, J é o índice de similaridade Jaccard, M_{11} é o total de elementos onde o atributo tanto da imagem A e B é igual a 1, M_{01} é o total de elementos onde o atributo da imagem A é igual a 0 e o da imagem B igual a 1, M_{10} é o total de elementos onde o atributo da imagem A é igual a 1 e o da imagem B igual a 0.

Também será utilizado o PSNR para demonstrar numericamente a diferença entre a imagem marcada e a imagem marcada após cada ataque, sendo possível observar o impacto da alteração da imagem na marca recuperada. Como parâmetro para tal cálculo, foram utilizadas as imagens marcadas usando o filtro rbio1.3.

4.3.1 Compressão

O primeiro ataque ao qual a ferramenta deve resistir pode, até mesmo, não ser considerado um ataque devido à quase certeza de sua aplicação sobre a imagem marcada. Trata-se da compressão da imagem, algo extremamente comum em todas as áreas que trabalham com imagens.

Neste trabalho, não será nem mesmo considerada a compressão sem perdas para teste, pois esta deve ser parte obrigatória do método. Portanto, os resultados foram gerados considerando uma compressão com pouca perda (qualidade 90%), uma compressão média (qualidade de 60%) e uma compressão alta (qualidade de 35%). Para taxas de compressão ainda maiores, o método funciona dependendo da imagem a ser marcada e do filtro wavelet utilizado, portanto, os resultados limitam-se, nesse caso, às qualidades de compressão que permitem a recuperação da marca.

Especificamente em marcas d'água, as compressões com perdas alteram coeficientes ou regiões de detalhes nas transformações das imagens, local muito utilizado para a inserção de

marcas. Uma das alterações que tal compressão realiza é o truncamento de coeficientes das bandas de detalhe (HL, LH e HH) de uma transformação wavelet que estejam abaixo de um limiar.

Portanto, é de crucial importância a aplicação do fator de força (α) na marca d'água, conforme apresentado no algoritmo 3, para impedir que a marca seja "confundida" com detalhe pelo algoritmo de compressão.

4.3.1.1 Qualidade de 90%



Figura 4.4: Imagens de teste após compressão JPEG com qualidade de 90%.

A tabela 4.3 mostra o PSNR entre as imagens de teste da figura 4.1 após inserção das marcas em relação às imagens e o ataque de compressão com qualidade de 90% da figura 4.4. A tabela 4.4 mostra os índices Jaccard resultantes da recuperação da marca após o mesmo ataque.

	Lena	Paraquedistas	Cérebro	Sudeste
PSNR	40,00107	43,56593	47,01480	36,70576

Tabela 4.3: Tabela de PSNR entre imagens marcadas antes e depois do ataque de compressão JPEG com qualidade de 90%.

A figura 4.5 mostra algumas marcas recuperadas após um ataque de compressão com qualidade de 90%.

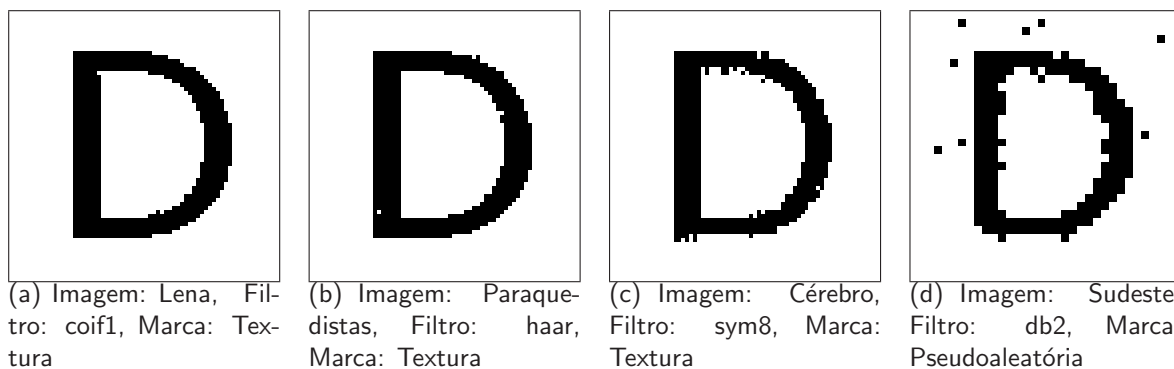


Figura 4.5: Marcas recuperadas após compressão JPEG com qualidade de 90%.

4.3.1.2 Qualidade de 60%

A tabela 4.5 mostra o PSNR entre as imagens de teste da figura 4.1 após inserção das marcas em relação às imagens e o ataque de compressão com qualidade de 60% da figura 4.6. A tabela 4.6 mostra os índices Jaccard resultantes da recuperação da marca após o mesmo ataque.

A figura 4.7 mostra algumas marcas recuperadas após um ataque de compressão com qualidade de 60%.

4.3.1.3 Qualidade de 35%

A tabela 4.7 mostra o PSNR entre as imagens de teste da figura 4.1 após inserção das marcas em relação às imagens e o ataque de compressão com qualidade de 35% da figura 4.8. A tabela 4.8 mostra os índices Jaccard resultantes da recuperação da marca após o mesmo ataque.

Imagem	Wavelet	Textura	Luminosidade	PseudoAleat
Lena	haar	0,96729	0,95923	0,94580
	db2	0,95117	0,96338	0,93066
	sym2	0,95117	0,96338	0,93066
	sym8	0,51245	0,95972	0,88770
	coif1	0,96802	0,95874	0,91748
	coif2	0,94995	0,96118	0,88574
	bior1.3	0,96777	0,95557	0,93457
	bior2.2	0,96875	0,96387	0,88965
	rbio1.3	0,95093	0,96045	0,90918
	rbio3.1	0,89355	0,81934	0,95312
Paraquedistas	haar	0,96802	0,96118	0,93506
	db2	0,96777	0,95044	0,94141
	sym2	0,96777	0,95044	0,94141
	sym8	0,95435	0,96338	0,89307
	coif1	0,95483	0,94458	0,91406
	coif2	0,95312	0,95605	0,88086
	bior1.3	0,96802	0,96069	0,94043
	bior2.2	0,95557	0,95068	0,90820
	rbio1.3	0,95557	0,95825	0,91162
	rbio3.1	0,51099	0,88550	0,95557
Cérebro	haar	0,95142	0,96118	0,91846
	db2	0,51489	0,94824	0,93213
	sym2	0,51489	0,94824	0,93213
	sym8	0,96313	0,95264	0,89990
	coif1	0,95142	0,94897	0,89697
	coif2	0,95215	0,94702	0,89990
	bior1.3	0,95068	0,95044	0,92529
	bior2.2	0,95654	0,95361	0,86523
	rbio1.3	0,94971	0,95142	0,88770
	rbio3.1	0,89893	0,78101	0,91064
Sudeste	haar	0,50342	0,86157	0,92529
	db2	0,87500	0,86523	0,93994
	sym2	0,87500	0,86523	0,93994
	sym8	0,86743	0,86621	0,88232
	coif1	0,93311	0,87256	0,91797
	coif2	0,87134	0,85059	0,88037
	bior1.3	0,50293	0,87842	0,93213
	bior2.2	0,90918	0,88940	0,87500
	rbio1.3	0,86768	0,85645	0,91748
	rbio3.1	0,50513	0,66235	0,93799

Tabela 4.4: Tabela de índices Jaccard para o ataque de compressão JPEG com qualidade de 90%.



Figura 4.6: Imagens de teste após compressão JPEG com qualidade de 60%.

	Lena	Paraquedistas	Cérebro	Sudeste
PSNR	35,66583	38,05927	40,40427	28,14283

Tabela 4.5: Tabela de PSNR entre imagens marcadas antes e depois do ataque de compressão JPEG com qualidade de 60%.

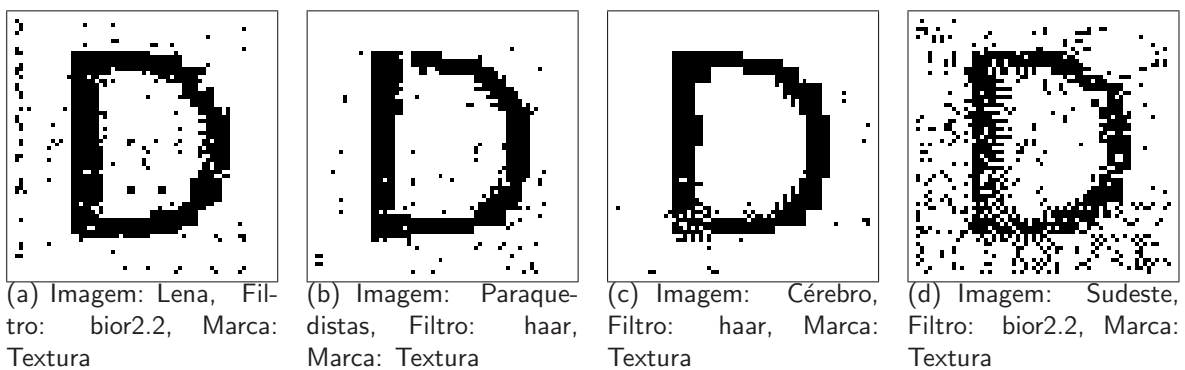


Figura 4.7: Marcas recuperadas após compressão JPEG com qualidade de 60%.

Imagem	Wavelet	Textura	Luminosidade	PseudoAleat
Lena	haar	0,90503	0,85083	0,82520
	db2	0,90967	0,83350	0,78516
	sym2	0,90967	0,83350	0,78516
	sym8	0,90771	0,86450	0,79102
	coif1	0,87622	0,84619	0,77686
	coif2	0,89917	0,65796	0,77197
	bior1.3	0,87354	0,85962	0,81689
	bior2.2	0,92676	0,88501	0,70459
	rbio1.3	0,89478	0,83301	0,79395
rbio3.1	0,66602	0,66699	0,84424	
Paraquedistas	haar	0,93433	0,85156	0,78418
	db2	0,92578	0,82959	0,77393
	sym2	0,92578	0,82959	0,77393
	sym8	0,91553	0,87573	0,78516
	coif1	0,89795	0,86304	0,75635
	coif2	0,92383	0,72632	0,77051
	bior1.3	0,90479	0,86816	0,77539
	bior2.2	0,93237	0,89746	0,69336
	rbio1.3	0,90991	0,83643	0,73975
rbio3.1	0,49951	0,69434	0,73779	
Cérebro	haar	0,93677	0,83594	0,76660
	db2	0,93237	0,84961	0,75049
	sym2	0,93237	0,84961	0,75049
	sym8	0,93506	0,86816	0,80273
	coif1	0,91333	0,84082	0,76270
	coif2	0,93140	0,66333	0,77441
	bior1.3	0,90503	0,87061	0,76465
	bior2.2	0,93457	0,88501	0,63428
	rbio1.3	0,90430	0,82422	0,76025
rbio3.1	0,69824	0,64868	0,72461	
Sudeste	haar	0,82983	0,68994	0,77295
	db2	0,79590	0,69800	0,77441
	sym2	0,79590	0,69800	0,77441
	sym8	0,85034	0,74365	0,77002
	coif1	0,80054	0,73560	0,73047
	coif2	0,80322	0,63721	0,73926
	bior1.3	0,51221	0,68530	0,77783
	bior2.2	0,83862	0,75464	0,65576
	rbio1.3	0,79492	0,72021	0,75244
rbio3.1	0,48950	0,54565	0,89600	

Tabela 4.6: Tabela de índices Jaccard para o ataque de compressão JPEG com qualidade de 60%.

	Lena	Paraquedistas	Cérebro	Sudeste
PSNR	33,89738	36,13700	38,47324	26,33396

Tabela 4.7: Tabela de PSNR entre imagens marcadas antes e depois do ataque de compressão JPEG com qualidade de 35%.



Figura 4.8: Imagens de teste após compressão JPEG com qualidade de 35%.

A figura 4.9 mostra algumas marcas recuperadas após um ataque de compressão com qualidade de 35%.

4.3.1.4 Considerações sobre a compressão

De maneira geral, é possível verificar que a compressão de dados afeta de modo mais crítico as marcas de luminosidade. Isso pode ser explicado pelo fato da compressão atuar principalmente na alteração de coeficientes de regiões de brilho elevado.

Em relação ao fator de compressão, a qualidade da mesma é proporcional à qualidade da

Imagem	Wavelet	Textura	Luminosidade	PseudoAleat
Lena	haar	0, 87354	0, 44653	0, 67822
	db2	0, 86548	0, 49194	0, 66943
	sym2	0, 86548	0, 49194	0, 66943
	sym8	0, 87134	0, 50659	0, 67822
	coif1	0, 85718	0, 49927	0, 67871
	coif2	0, 71753	0, 50610	0, 68408
	bior1.3	0, 86865	0, 45557	0, 69727
	bior2.2	0, 90161	0, 46680	0, 62354
	rbio1.3	0, 86475	0, 49658	0, 68164
	rbio3.1	0, 63696	0, 49902	0, 63721
Paraquedistas	haar	0, 88818	0, 33081	0, 64111
	db2	0, 86719	0, 47754	0, 64795
	sym2	0, 86719	0, 47754	0, 64795
	sym8	0, 87646	0, 52026	0, 67725
	coif1	0, 86670	0, 48950	0, 65283
	coif2	0, 73804	0, 52686	0, 66016
	bior1.3	0, 88379	0, 34546	0, 65479
	bior2.2	0, 89941	0, 42822	0, 60400
	rbio1.3	0, 87476	0, 49414	0, 64258
	rbio3.1	0, 66064	0, 47510	0, 61328
Cérebro	haar	0, 89136	0, 47339	0, 47705
	db2	0, 50903	0, 87256	0, 56104
	sym2	0, 50903	0, 87256	0, 56104
	sym8	0, 88647	0, 49976	0, 67578
	coif1	0, 88281	0, 50024	0, 57031
	coif2	0, 50146	0, 73462	0, 62549
	bior1.3	0, 87622	0, 48560	0, 48682
	bior2.2	0, 91382	0, 46704	0, 45801
	rbio1.3	0, 85645	0, 51465	0, 52881
	rbio3.1	0, 68286	0, 52197	0, 43750
Sudeste	haar	0, 79932	0, 49829	0, 68213
	db2	0, 77417	0, 50610	0, 69824
	sym2	0, 77417	0, 50610	0, 69824
	sym8	0, 79395	0, 50439	0, 68506
	coif1	0, 80371	0, 52222	0, 66357
	coif2	0, 70337	0, 50244	0, 67920
	bior1.3	0, 50122	0, 51709	0, 71680
	bior2.2	0, 85547	0, 50537	0, 61035
	rbio1.3	0, 78809	0, 51538	0, 67822
	rbio3.1	0, 49878	0, 51001	0, 79395

Tabela 4.8: Tabela de índices Jaccard para o ataque de compressão JPEG com qualidade de 35%.

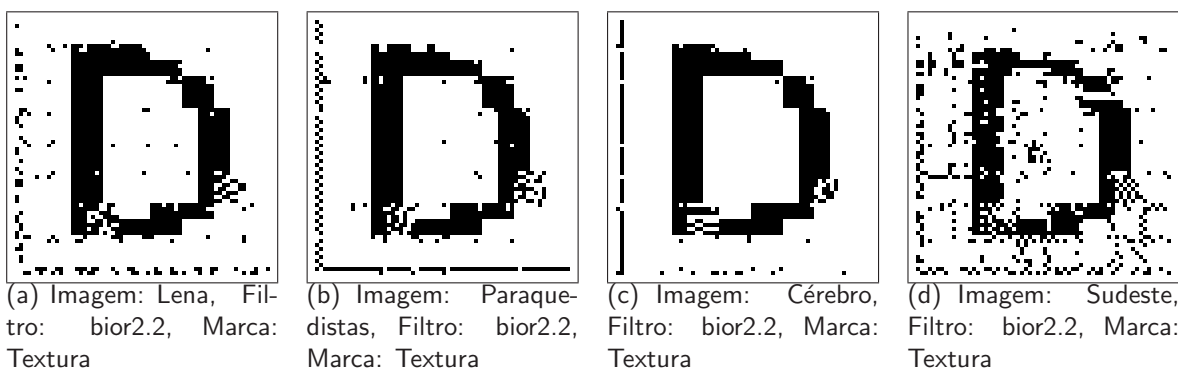


Figura 4.9: Marcas recuperadas após compressão JPEG com qualidade de 35%.

marca recuperada. Ou seja, quanto maior for perda (truncamento) na compressão da imagem, pior será a marca obtida após a extração. Mesmo com baixa qualidade (35%), foi possível a recuperação satisfatória de todas as marcas.

Os filtros bior2.2 e haar merecem destaque na recuperação das marcas de textura, segundo os índices Jaccard, figurando entre os melhores em grande parte dos experimentos.

4.3.2 Filtros

Outra categoria comum em termos de ataques a marcas d'água pertence aos filtros. De maneira geral, os filtros servem para realçar ou suavizar determinadas características nas imagens [26, 58].

Quando aplicados em imagens marcadas, os filtros tendem a eliminar referências utilizadas para localizar as marcas, bem como alterar valores de pixels marcados, prejudicando a recuperação.

Os filtros da média, filtro Gaussiano, filtro de movimento e filtro de disco serão utilizados para a verificação da robustez da marca.

4.3.2.1 Filtro da média

O filtro da média consiste em uma suavização da imagem, atribuindo a cada pixel o valor médio da região onde se encontra. Para os testes realizados, aplicou-se máscara 4.4 para

obtenção do filtro da média.

$$\begin{bmatrix} 0,1111 & 0,1111 & 0,1111 \\ 0,1111 & 0,1111 & 0,1111 \\ 0,1111 & 0,1111 & 0,1111 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$



Figura 4.10: Imagens de teste após aplicação de filtro da média.

A tabela 4.9 mostra o PSNR entre as imagens de teste da figura 4.1 após inserção das marcas em relação às imagens e o ataque de filtro da média da figura 4.10. A tabela 4.10 mostra os índices Jaccard resultantes da recuperação da marca após o mesmo ataque.

	Lena	Paraquedistas	Cérebro	Sudeste
PSNR	31,10540	32,79859	38,25752	23,83576

Tabela 4.9: Tabela de PSNR entre imagens marcadas antes e depois do ataque de filtro da média.

Imagem	Wavelet	Textura	Luminosidade	PseudoAleat
Lena	haar	0,49951	0,68555	0,81104
	db2	0,50073	0,81714	0,80859
	sym2	0,50073	0,81714	0,80859
	sym8	0,50659	0,89136	0,81445
	coif1	0,49756	0,83838	0,79541
	coif2	0,50562	0,87451	0,79541
	bior1.3	0,48828	0,71143	0,82617
	bior2.2	0,49805	0,88306	0,78174
	rbio1.3	0,49390	0,85229	0,77295
	rbio3.1	0,51318	0,55786	0,86084
Paraquedistas	haar	0,49976	0,82056	0,84814
	db2	0,50488	0,89233	0,84082
	sym2	0,50488	0,89233	0,84082
	sym8	0,49585	0,90576	0,84961
	coif1	0,51050	0,89160	0,83203
	coif2	0,50513	0,89746	0,83594
	bior1.3	0,44678	0,84741	0,85449
	bior2.2	0,48169	0,90967	0,82422
	rbio1.3	0,50903	0,88257	0,78516
	rbio3.1	0,50586	0,62842	0,89844
Cérebro	haar	0,76172	0,69873	0,85107
	db2	0,89136	0,83594	0,86035
	sym2	0,89136	0,83594	0,86035
	sym8	0,49756	0,91064	0,86572
	coif1	0,89404	0,85156	0,84229
	coif2	0,93384	0,87769	0,85303
	bior1.3	0,78735	0,73145	0,87256
	bior2.2	0,91333	0,88086	0,82812
	rbio1.3	0,91138	0,85425	0,80811
	rbio3.1	0,55469	0,54712	0,83252
Sudeste	haar	0,49438	0,57153	0,69678
	db2	0,50732	0,64697	0,71631
	sym2	0,50732	0,64697	0,71631
	sym8	0,49927	0,73218	0,70703
	coif1	0,51392	0,65210	0,66699
	coif2	0,49536	0,69678	0,68408
	bior1.3	0,48169	0,56396	0,69727
	bior2.2	0,50024	0,70215	0,64014
	rbio1.3	0,51050	0,67163	0,66650
	rbio3.1	0,49219	0,51270	0,77979

Tabela 4.10: Tabela de índices Jaccard para o ataque de filtro da média.

A figura 4.11 mostra algumas marcas recuperadas após um ataque de filtro da média.

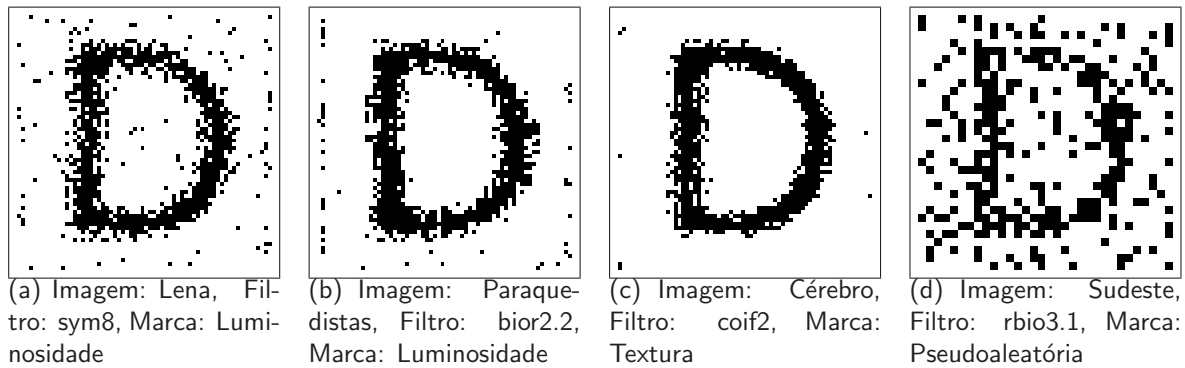


Figura 4.11: Marcas recuperadas após filtro da média.

4.3.2.2 Filtro Gaussiano

O filtro Gaussiano consiste em uma suavização da imagem, porém, diferentemente do filtro da média, ele atribui um peso maior ao ponto (pixel) central da máscara e reduz tal peso conforme se afasta do centro. É muito utilizado para remoção de ruídos e, exatamente por isso, é eficaz na inutilização de marcas d'água. Nos testes realizados, foi aplicado o filtro 4.5 em todas as imagens marcadas.

$$\begin{bmatrix} 0,0361 & 0,1178 & 0,0361 \\ 0,1178 & 0,3846 & 0,1178 \\ 0,0361 & 0,1178 & 0,0361 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

A tabela 4.11 mostra o PSNR entre as imagens de teste da figura 4.1 após inserção das marcas em relação às imagens e o ataque de filtro Gaussiano da figura 4.12. A tabela 4.12 mostra os índices Jaccard resultantes da recuperação da marca após o mesmo ataque.

	Lena	Paraquedistas	Cérebro	Sudeste
PSNR	34,76831	36,34565	40,19400	27,42705

Tabela 4.11: Tabela de PSNR entre imagens marcadas antes e depois do ataque de filtro Gaussiano.

A figura 4.13 mostra algumas marcas recuperadas após um ataque de filtro Gaussiano.



Figura 4.12: Imagens de teste após aplicação de filtro Gaussiano.

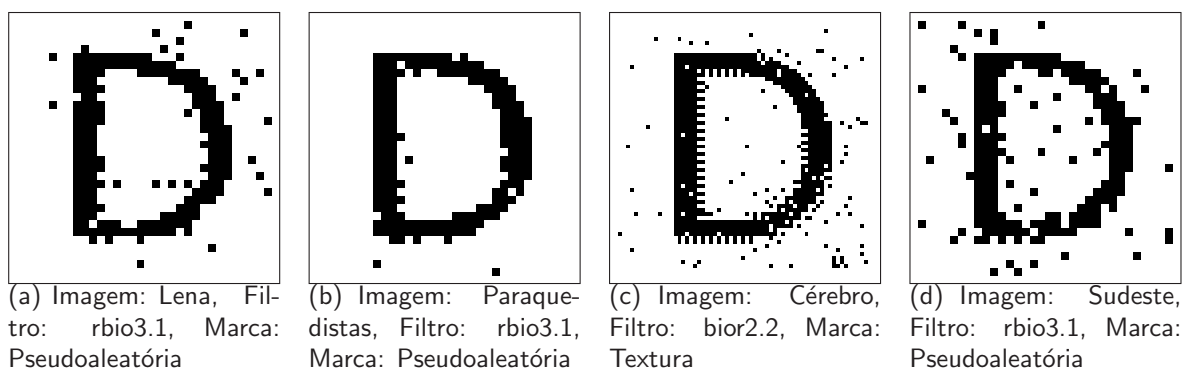


Figura 4.13: Marcas recuperadas após filtro Gaussiano.

4.3.2.3 Filtro de movimento

O filtro de movimento simula o efeito de uma fotografia desfocada ou de um objeto em movimento. Ao ser aplicado sobre uma imagem, tal filtro altera de forma uniforme, porém intensamente, todos os pixels da imagem, atribuindo a determinado pixel o valor médio de

Imagem	Wavelet	Textura	Luminosidade	PseudoAleat
Lena	haar	0,65186	0,66528	0,90234
	db2	0,79858	0,76147	0,90918
	sym2	0,79858	0,76147	0,90918
	sym8	0,50854	0,79980	0,87939
	coif1	0,80225	0,75537	0,88672
	coif2	0,81470	0,78296	0,87549
	bior1.3	0,64111	0,66748	0,90771
	bior2.2	0,88330	0,85132	0,88477
	rbio1.3	0,83350	0,73560	0,88184
rbio3.1	0,51147	0,54321	0,92578	
Paraquedistas	haar	0,49756	0,73022	0,92529
	db2	0,85962	0,79468	0,93359
	sym2	0,85962	0,79468	0,93359
	sym8	0,50879	0,80444	0,89453
	coif1	0,86328	0,78149	0,91064
	coif2	0,51782	0,80054	0,88965
	bior1.3	0,70288	0,74585	0,92676
	bior2.2	0,94043	0,86377	0,91602
	rbio1.3	0,51099	0,78735	0,90869
rbio3.1	0,50293	0,58423	0,94580	
Cérebro	haar	0,73096	0,65161	0,90918
	db2	0,86011	0,75122	0,92578
	sym2	0,86011	0,75122	0,92578
	sym8	0,49121	0,86816	0,91016
	coif1	0,86475	0,77246	0,89404
	coif2	0,90088	0,51758	0,90479
	bior1.3	0,72363	0,66357	0,92432
	bior2.2	0,92847	0,84399	0,90039
	rbio1.3	0,88794	0,76587	0,91162
rbio3.1	0,54077	0,54004	0,90625	
Sudeste	haar	0,48413	0,56665	0,82373
	db2	0,49707	0,62500	0,83789
	sym2	0,49707	0,62500	0,83789
	sym8	0,50146	0,69678	0,81934
	coif1	0,49854	0,61914	0,78369
	coif2	0,49414	0,65845	0,79053
	bior1.3	0,48730	0,57129	0,82910
	bior2.2	0,57983	0,48193	0,77832
	rbio1.3	0,51294	0,60010	0,81738
rbio3.1	0,49707	0,51831	0,90332	

Tabela 4.12: Tabela de índices Jaccard para o ataque de filtro Gaussiano.

parte da linha onde se encontra. O filtro aplicado é mostrado em 4.6.

$$[0,1111 \quad 0,1111 \quad 0,1111 \quad 0,1111 \quad 0,1111 \quad 0,1111 \quad 0,1111 \quad 0,1111 \quad 0,1111] \quad (4.6)$$

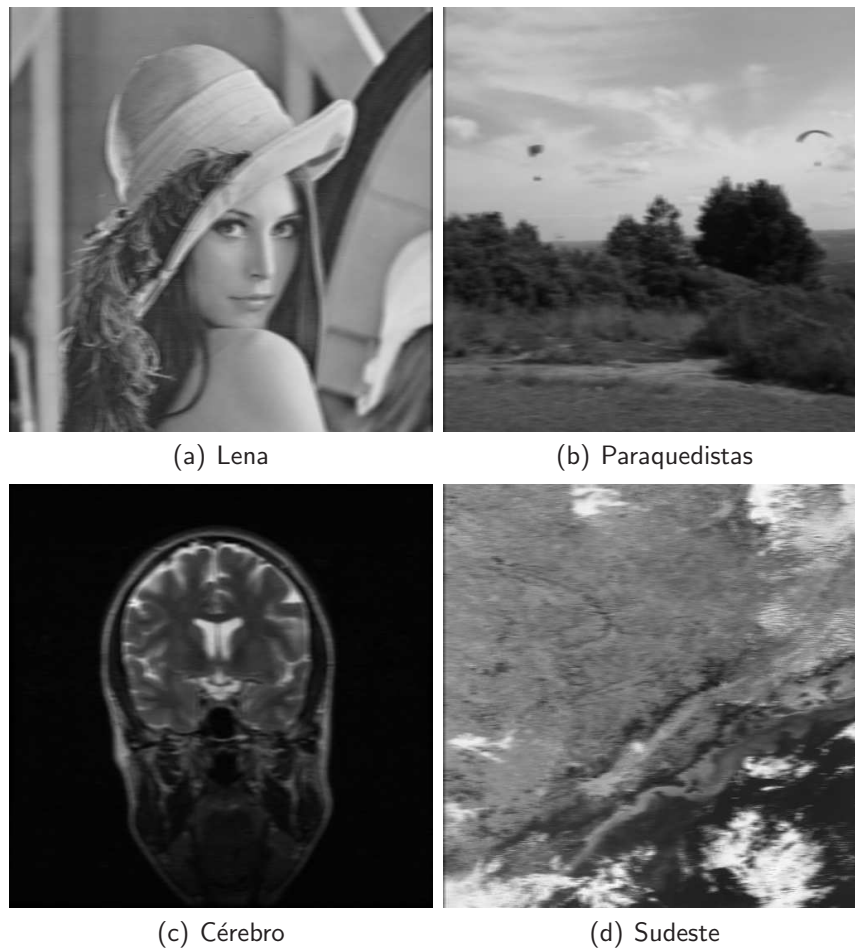


Figura 4.14: Imagens de teste após aplicação de filtro de movimento.

A tabela 4.13 mostra o PSNR entre as imagens de teste da figura 4.1 após inserção das marcas em relação às imagens e o ataque de filtro de movimento da figura 4.14. A tabela 4.14 mostra os índices Jaccard resultantes da recuperação da marca após o mesmo ataque.

	Lena	Paraquedistas	Cérebro	Sudeste
PSNR	25,88917	29,05781	29,99465	22,52709

Tabela 4.13: Tabela de PSNR entre imagens marcadas antes e depois do ataque de filtro de movimento.

A figura 4.15 mostra algumas marcas recuperadas após um ataque de filtro de movimento.

Imagem	Wavelet	Textura	Luminosidade	PseudoAleat
Lena	haar	0,76514	0,71802	0,65381
	db2	0,78564	0,76099	0,61377
	sym2	0,78564	0,76099	0,61377
	sym8	0,50244	0,76050	0,64551
	coif1	0,78931	0,76709	0,67236
	coif2	0,78687	0,76953	0,64355
	bior1.3	0,71777	0,69312	0,64453
	bior2.2	0,76025	0,77588	0,61816
	rbio1.3	0,50562	0,76318	0,63672
	rbio3.1	0,49878	0,56689	0,69385
Paraquedistas	haar	0,47632	0,77148	0,68848
	db2	0,50244	0,76953	0,64355
	sym2	0,50244	0,76953	0,64355
	sym8	0,49561	0,75659	0,67236
	coif1	0,49854	0,77393	0,71680
	coif2	0,50146	0,76953	0,69238
	bior1.3	0,48633	0,75513	0,68945
	bior2.2	0,50439	0,77051	0,63867
	rbio1.3	0,50488	0,76904	0,67871
	rbio3.1	0,49658	0,62915	0,71484
Cérebro	haar	0,77710	0,71436	0,73291
	db2	0,76636	0,76758	0,66162
	sym2	0,76636	0,76758	0,66162
	sym8	0,77661	0,75732	0,70312
	coif1	0,76685	0,76025	0,73389
	coif2	0,52319	0,77148	0,71387
	bior1.3	0,74292	0,70825	0,73340
	bior2.2	0,75879	0,77026	0,64404
	rbio1.3	0,77979	0,74829	0,73584
	rbio3.1	0,56006	0,56055	0,74365
Sudeste	haar	0,49023	0,56714	0,57617
	db2	0,69678	0,63770	0,53174
	sym2	0,69678	0,63770	0,53174
	sym8	0,72437	0,67480	0,53027
	coif1	0,68433	0,63794	0,55371
	coif2	0,70557	0,66650	0,54541
	bior1.3	0,49658	0,56860	0,55029
	bior2.2	0,73828	0,68677	0,53320
	rbio1.3	0,70288	0,64990	0,54395
	rbio3.1	0,49805	0,49561	0,56055

Tabela 4.14: Tabela de índices Jaccard para o ataque de filtro de movimento.

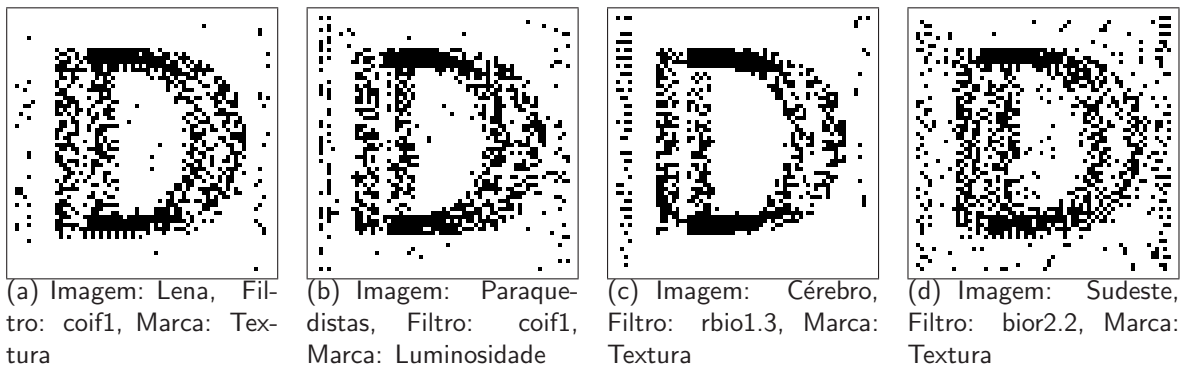


Figura 4.15: Marcas recuperadas após filtro de movimento.

4.3.2.4 Filtro de disco

O filtro de disco, de maneira similar ao filtro Gaussiano, suaviza a imagem atribuindo a determinado pixel o valor de uma média ponderada de sua região, sendo que os valores próximos ao centro da máscara possuem peso maior. A máscara utilizada nas imagens é mostrada em 4.7.

$$\begin{bmatrix} 0,0000 & 0,0170 & 0,0381 & 0,0170 & 0,0000 \\ 0,0170 & 0,0784 & 0,0796 & 0,0784 & 0,0170 \\ 0,0381 & 0,0796 & 0,0796 & 0,0796 & 0,0381 \\ 0,0170 & 0,0784 & 0,0796 & 0,0784 & 0,0170 \\ 0,0000 & 0,0170 & 0,0381 & 0,0170 & 0,0000 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

A tabela 4.15 mostra o PSNR entre as imagens de teste da figura 4.1 após inserção das marcas em relação às imagens e o ataque de filtro de disco da figura 4.16. A tabela 4.16 mostra os índices Jaccard resultantes da recuperação da marca após o mesmo ataque.

	Lena	Paraquedistas	Cérebro	Sudeste
PSNR	29,88861	31,87910	36,39191	23,33365

Tabela 4.15: Tabela de PSNR entre imagens marcadas antes e depois do ataque de filtro de disco.

A figura 4.17 mostra algumas marcas recuperadas após um ataque de filtro de disco.

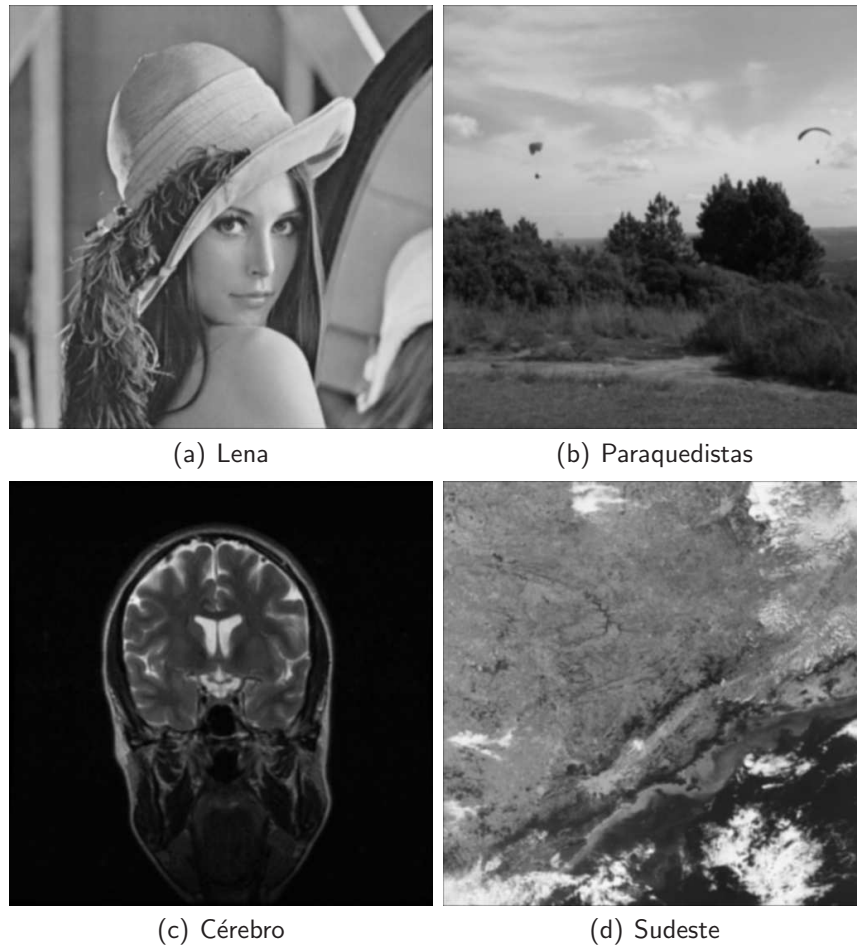


Figura 4.16: Imagens de teste após aplicação de filtro de disco.

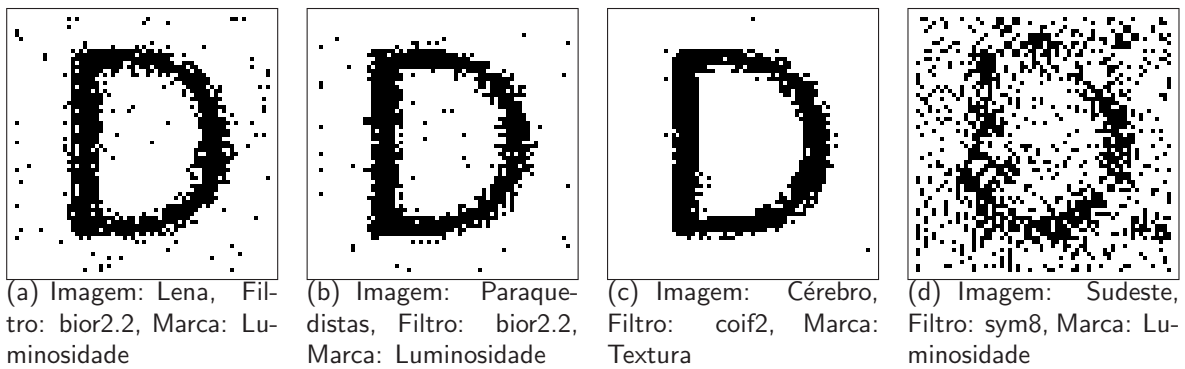


Figura 4.17: Marcas recuperadas após filtro de disco.

4.3.2.5 Considerações sobre os filtros

Com relação aos ataques de filtros, é possível observar que filtros cuja alteração é igual em toda a imagem (não ponderados), como o filtro da média e de movimento, degradam as marcas d'água de maneira mais acentuada se comparados aos filtros cujos índices tem pesos distintos (ponderados), como o filtro Gaussiano e o filtro de disco.

Imagem	Wavelet	Textura	Luminosidade	PseudoAleat
Lena	haar	0,49365	0,76953	0,72119
	db2	0,50195	0,85352	0,71484
	sym2	0,50195	0,85352	0,71484
	sym8	0,50317	0,89941	0,76611
	coif1	0,49927	0,86768	0,75146
	coif2	0,50269	0,88281	0,75000
	bior1.3	0,46338	0,74097	0,74219
	bior2.2	0,49951	0,91919	0,68896
	rbio1.3	0,50024	0,87646	0,68604
	rbio3.1	0,51318	0,57275	0,77783
Paraquedistas	haar	0,49512	0,83276	0,75732
	db2	0,50513	0,89746	0,75146
	sym2	0,50513	0,89746	0,75146
	sym8	0,51636	0,90698	0,80566
	coif1	0,51733	0,90674	0,77393
	coif2	0,51587	0,89331	0,79688
	bior1.3	0,43945	0,86230	0,78223
	bior2.2	0,48950	0,92798	0,73145
	rbio1.3	0,52295	0,89722	0,70410
	rbio3.1	0,50073	0,63696	0,82031
Cérebro	haar	0,80054	0,72949	0,79639
	db2	0,92432	0,87329	0,78809
	sym2	0,92432	0,87329	0,78809
	sym8	0,51929	0,91333	0,83936
	coif1	0,92603	0,86646	0,79785
	coif2	0,95435	0,88281	0,82568
	bior1.3	0,82153	0,74243	0,81445
	bior2.2	0,94434	0,91675	0,74414
	rbio1.3	0,94336	0,87451	0,73535
	rbio3.1	0,55518	0,56152	0,76904
Sudeste	haar	0,47974	0,58813	0,61523
	db2	0,50220	0,68066	0,63770
	sym2	0,50220	0,68066	0,63770
	sym8	0,49854	0,73926	0,62207
	coif1	0,50928	0,68726	0,62549
	coif2	0,47900	0,71777	0,60791
	bior1.3	0,48413	0,57666	0,62500
	bior2.2	0,47388	0,73535	0,58887
	rbio1.3	0,50269	0,71094	0,60986
	rbio3.1	0,49902	0,50879	0,66992

Tabela 4.16: Tabela de índices Jaccard para o ataque filtro de disco.

Os valores dos índices dos filtros impactam de maneira inversamente proporcional a marca extraída. Isso pode ser observado comparando os filtros Gaussiano, com índices menores, em relação ao filtro de disco, com índices maiores. A recuperação após o ataque de filtro Gaussiano apresentou melhores resultados. Cabe observar que o filtro de movimento produziu um deslocamento nas marcas recuperadas, efeito similar ao que causou nas próprias imagens.

Não há destaques em relação a filtros ou marcas de melhor performance, existindo grande variação entre eles. As marcas foram recuperadas após qualquer um dos ataques.

4.3.3 Ruído

Um grande desafio na área de processamento de imagens é a eliminação do ruído. Ele pode ocorrer na maioria dos meios utilizados para captura de imagens digitais.

Portanto, é muito comum uma imagem apresentar ruído. Logo, a adição de ruído a uma imagem pode não ser percebida ou, pelo menos, não causar surpresa a quem a observa. Tal fato torna a adição de ruído um ataque a ser considerado para a inutilização de uma marca d'água pois a alteração de valores de pixels nas imagens pode ser grande e aleatória, comprometendo a recuperação da marca.

Nos experimentos será utilizada a adição de ruído Gaussiano, ruído *Speckle*, ruído Poisson e ruído sal e pimenta.

4.3.3.1 Ruído Gaussiano

O ruído Gaussiano é aquele cuja ocorrência segue uma distribuição Gaussiana.

A tabela 4.17 mostra o PSNR entre as imagens de teste da figura 4.1 após inserção das marcas em relação às imagens e o ataque de adição de ruído Gaussiano da figura 4.18. A tabela 4.18 mostra os índices Jaccard resultantes da recuperação da marca após o mesmo ataque.

A figura 4.19 mostra algumas marcas recuperadas após um ataque de ruído Gaussiano.

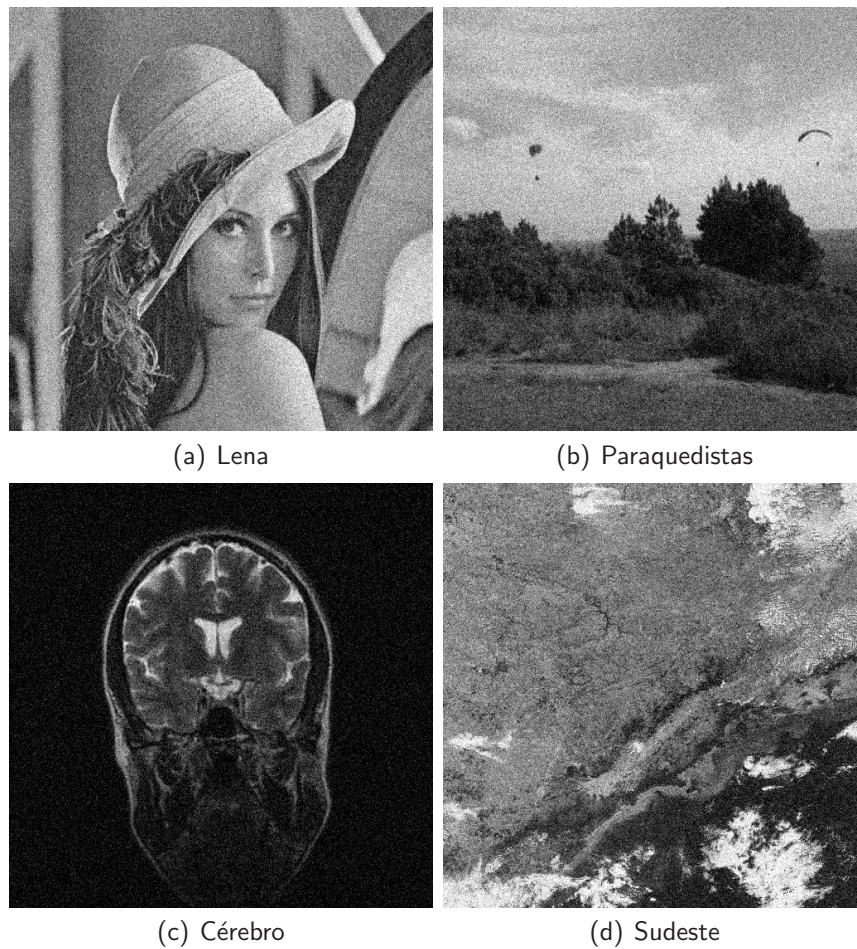


Figura 4.18: Imagens de teste após inserção de ruído Gaussiano.

	Lena	Paraquedistas	Cérebro	Sudeste
PSNR	20,06387	20,22149	21,86573	20,15038

Tabela 4.17: Tabela de PSNR entre imagens marcadas antes e depois do ataque de adição de ruído Gaussiano.

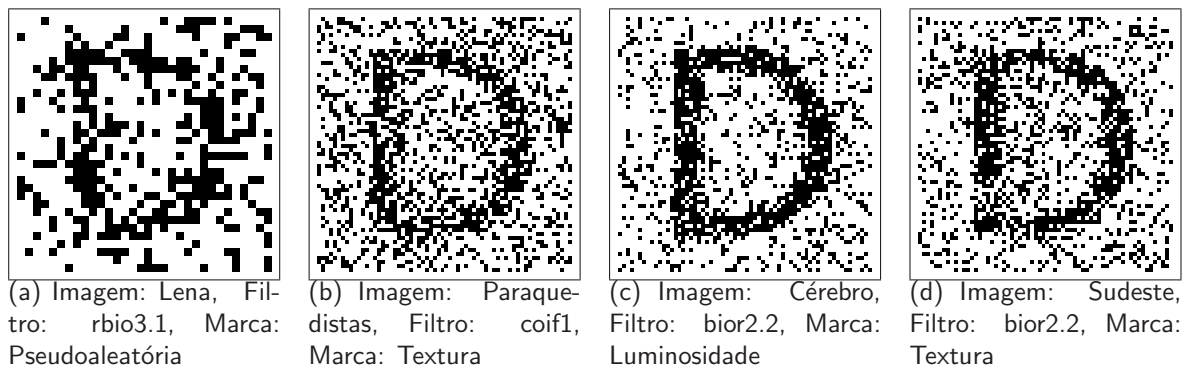


Figura 4.19: Marcas recuperadas após ruído Gaussiano.

Imagem	Wavelet	Textura	Luminosidade	PseudoAleat
Lena	haar	0,72119	0,60791	0,59277
	db2	0,70386	0,62036	0,57275
	sym2	0,71582	0,61426	0,59766
	sym8	0,49390	0,61597	0,55127
	coif1	0,71606	0,61670	0,59326
	coif2	0,71460	0,59912	0,58789
	bior1.3	0,71631	0,61865	0,58984
	bior2.2	0,50171	0,64355	0,54395
	rbio1.3	0,69824	0,60010	0,60107
	rbio3.1	0,59033	0,54492	0,73340
Paraquedistas	haar	0,48560	0,60669	0,60400
	db2	0,50708	0,50146	0,58887
	sym2	0,70435	0,60840	0,58105
	sym8	0,49243	0,60693	0,56738
	coif1	0,70947	0,50342	0,57275
	coif2	0,49780	0,62646	0,57129
	bior1.3	0,70898	0,49585	0,60254
	bior2.2	0,50586	0,63965	0,55762
	rbio1.3	0,49854	0,61475	0,57910
	rbio3.1	0,60254	0,53979	0,70654
Cérebro	haar	0,70459	0,60767	0,54932
	db2	0,70337	0,61182	0,57617
	sym2	0,71533	0,59668	0,56299
	sym8	0,49731	0,69995	0,52148
	coif1	0,69751	0,61206	0,56982
	coif2	0,60571	0,71875	0,56055
	bior1.3	0,71753	0,61621	0,57471
	bior2.2	0,51343	0,78467	0,55127
	rbio1.3	0,58984	0,70312	0,62012
	rbio3.1	0,59302	0,54199	0,67432
Sudeste	haar	0,71899	0,58569	0,62012
	db2	0,69995	0,57837	0,59229
	sym2	0,68555	0,58057	0,60107
	sym8	0,69067	0,58789	0,57275
	coif1	0,68726	0,59229	0,56982
	coif2	0,69092	0,58252	0,58203
	bior1.3	0,50684	0,58374	0,60400
	bior2.2	0,74634	0,60449	0,57666
	rbio1.3	0,67798	0,59009	0,60693
	rbio3.1	0,49976	0,51318	0,71777

Tabela 4.18: Tabela de índices Jaccard para o ataque de adição de ruído Gaussiano.

4.3.3.2 Ruído Speckle

O ruído *Speckle* se manifesta em imagens como um ruído granular e é o resultado de interferências de ondas refletidas por vários espalhadores no meio, sendo observado em quaisquer técnicas de obtenção de imagens que utilizam fontes próprias de radiação, como as produzidas usando laser, sonar, ultra-som e radar de abertura sintética (SAR, *Synthetic Aperture Radar*) [75].

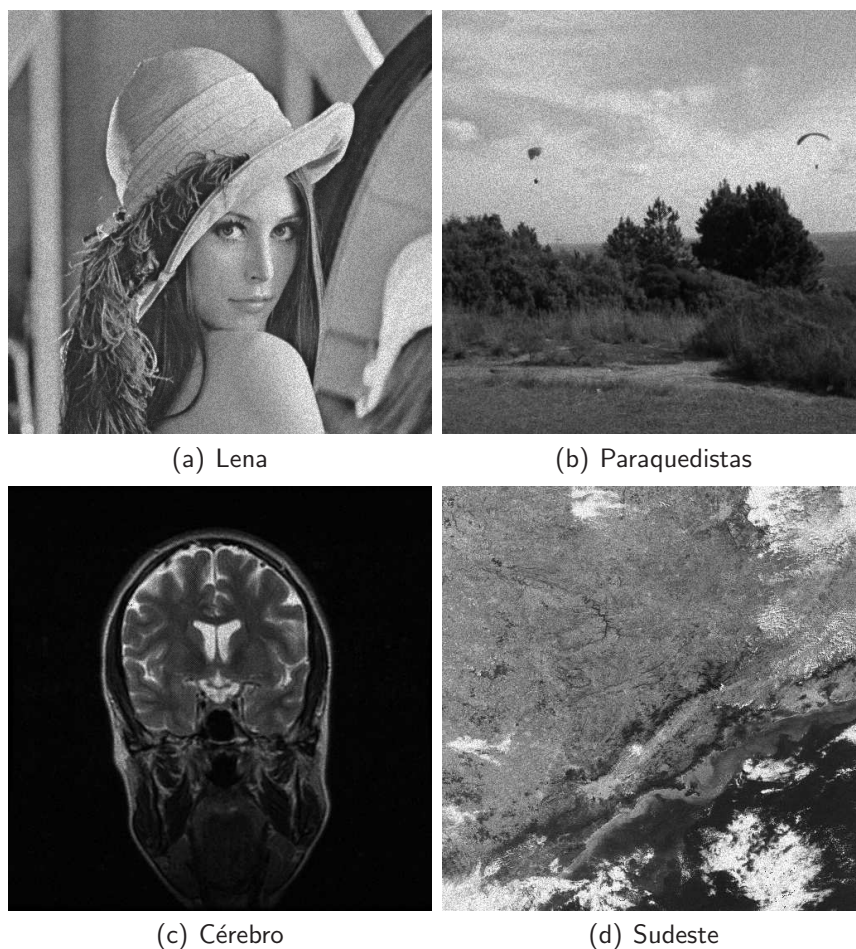


Figura 4.20: Imagens de teste após ruído *Speckle*.

A tabela 4.19 mostra o PSNR entre as imagens de teste da figura 4.1 após inserção das marcas em relação às imagens e o ataque de adição de ruído *Speckle* da figura 4.20. A tabela 4.20 mostra os índices Jaccard resultantes da recuperação da marca após o mesmo ataque.

A figura 4.21 mostra algumas marcas recuperadas após um ataque de adição de ruído *Speckle*.

	Lena	Paraquedistas	Cérebro	Sudeste
PSNR	25,63312	25,32387	35,62680	26,19364

Tabela 4.19: Tabela de PSNR entre imagens marcadas antes e depois do ataque de adição de ruído *Speckle*.

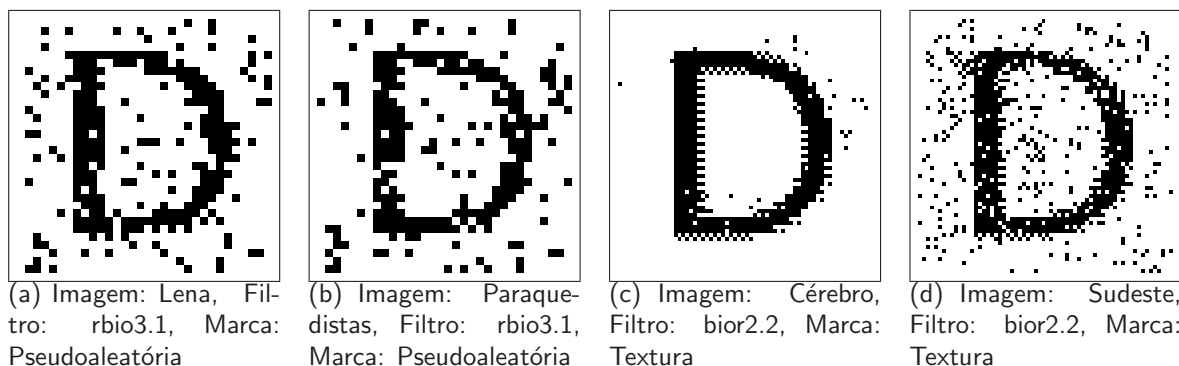


Figura 4.21: Marcas recuperadas após ruído *Speckle*.

4.3.3.3 Ruído Poisson

O ruído de Poisson é aquele que segue uma distribuição de probabilidade de Poisson. A tabela 4.21 mostra o PSNR entre as imagens de teste da figura 4.1 após inserção das marcas em relação às imagens e o ataque de adição de ruído Poisson da figura 4.22. A tabela 4.22 mostra os índices Jaccard resultantes da recuperação da marca após o mesmo ataque.

A figura 4.23 mostra algumas marcas recuperadas após um ataque de adição de ruído Poisson.

4.3.3.4 Ruído sal e pimenta

O ruído sal e pimenta é um dos mais comuns em capturas de imagens e é caracterizado pela presença de pontos de intensidade clara e escura (brancos e pretos). Nos testes utilizados, aproximadamente 0,9% dos pixels das imagens foram afetados.

A tabela 4.23 mostra o PSNR entre as imagens de teste da figura 4.1 após inserção das marcas em relação às imagens e o ataque adição de ruído sal e pimenta da figura 4.24. A tabela 4.24 mostra os índices Jaccard resultantes da recuperação da marca após o mesmo ataque.

A figura 4.25 mostra algumas marcas recuperadas após um ataque de adição de ruído sal

Imagem	Wavelet	Textura	Luminosidade	PseudoAleat
Lena	haar	0,82129	0,65210	0,73340
	db2	0,64282	0,49829	0,69189
	sym2	0,64282	0,49829	0,69189
	sym8	0,64062	0,49072	0,64844
	coif1	0,65576	0,49927	0,67236
	coif2	0,64380	0,48584	0,64062
	bior1.3	0,81836	0,65308	0,72168
	bior2.2	0,70068	0,49536	0,64648
	rbio1.3	0,64429	0,51123	0,70020
	rbio3.1	0,49658	0,56714	0,84717
Paraquedistas	haar	0,76392	0,64136	0,75879
	db2	0,51196	0,49707	0,71191
	sym2	0,51196	0,49707	0,71191
	sym8	0,50635	0,63647	0,64844
	coif1	0,50098	0,49341	0,69092
	coif2	0,49707	0,63965	0,65430
	bior1.3	0,75781	0,50024	0,75488
	bior2.2	0,62476	0,49170	0,68506
	rbio1.3	0,49878	0,63940	0,73633
	rbio3.1	0,63623	0,55835	0,84717
Cérebro	haar	0,91650	0,79858	0,91650
	db2	0,91724	0,79834	0,90527
	sym2	0,91724	0,79834	0,90527
	sym8	0,92041	0,80054	0,83936
	coif1	0,92017	0,80518	0,89111
	coif2	0,92822	0,79468	0,86133
	bior1.3	0,92065	0,80200	0,91162
	bior2.2	0,94360	0,86670	0,87549
	rbio1.3	0,93237	0,79517	0,90430
	rbio3.1	0,76025	0,63647	0,94141
Sudeste	haar	0,84326	0,61230	0,75146
	db2	0,79639	0,61328	0,69531
	sym2	0,79639	0,61328	0,69531
	sym8	0,83545	0,62354	0,66699
	coif1	0,82520	0,61646	0,70703
	coif2	0,79053	0,60132	0,66650
	bior1.3	0,57104	0,48071	0,72119
	bior2.2	0,87573	0,62207	0,65381
	rbio1.3	0,78076	0,60962	0,73047
	rbio3.1	0,50000	0,52710	0,84326

Tabela 4.20: Tabela de índices Jaccard para o ataque de adição de ruído *Speckle*.

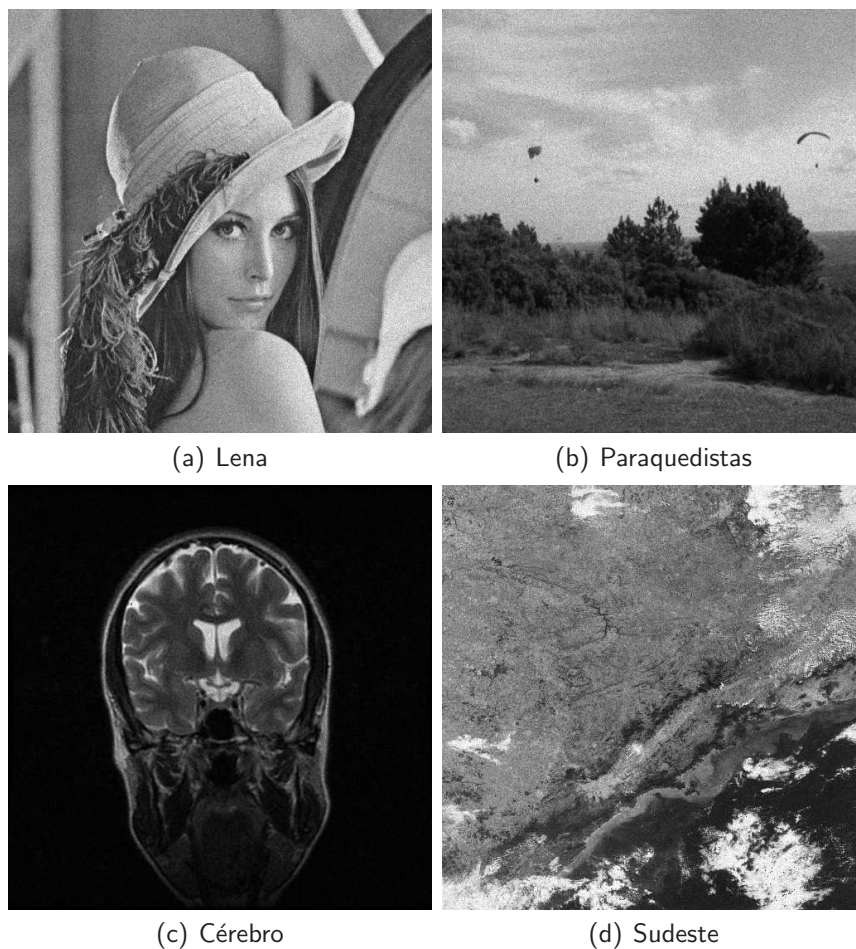


Figura 4.22: Imagens de teste após aplicação de ruído Poisson.

	Lena	Paraquedistas	Cérebro	Sudeste
PSNR	27,14919	27,32252	34,36564	27,49827

Tabela 4.21: Tabela de PSNR entre imagens marcadas antes e depois do ataque de adição de ruído Poisson.

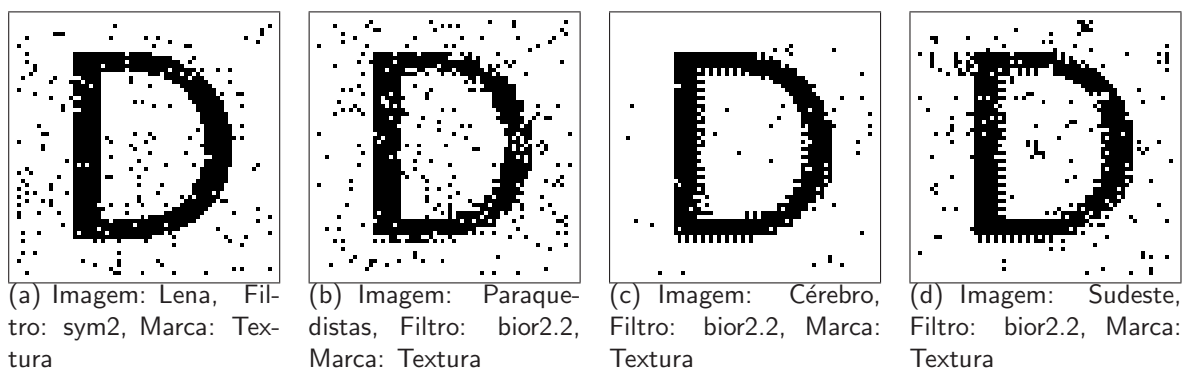


Figura 4.23: Marcas recuperadas após ruído Poisson.

Imagem	Wavelet	Textura	Luminosidade	PseudoAleat
Lena	haar	0,90503	0,70532	0,73242
	db2	0,90088	0,70239	0,70654
	sym2	0,92505	0,70166	0,68945
	sym8	0,52417	0,68408	0,64600
	coif1	0,90967	0,69287	0,68066
	coif2	0,87256	0,70483	0,64355
	bior1.3	0,90723	0,69482	0,72314
	bior2.2	0,50098	0,75195	0,65967
	rbio1.3	0,89380	0,68774	0,70068
	rbio3.1	0,69238	0,58960	0,88037
Paraquedistas	haar	0,85620	0,69458	0,74561
	db2	0,84595	0,49219	0,71289
	sym2	0,82910	0,69287	0,70947
	sym8	0,83301	0,68213	0,64600
	coif1	0,84155	0,50537	0,67480
	coif2	0,83740	0,70630	0,65967
	bior1.3	0,85352	0,68481	0,74756
	bior2.2	0,90845	0,75903	0,68896
	rbio1.3	0,81494	0,69019	0,71875
	rbio3.1	0,71973	0,58618	0,87500
Cérebro	haar	0,91187	0,77954	0,89453
	db2	0,49658	0,86450	0,85498
	sym2	0,91919	0,78125	0,85156
	sym8	0,92139	0,79224	0,76367
	coif1	0,90942	0,79077	0,80518
	coif2	0,91626	0,51025	0,77393
	bior1.3	0,91724	0,79663	0,88525
	bior2.2	0,93896	0,84351	0,81836
	rbio1.3	0,91772	0,78833	0,86865
	rbio3.1	0,73950	0,61841	0,93799
Sudeste	haar	0,51025	0,66724	0,74219
	db2	0,82007	0,67456	0,72461
	sym2	0,81689	0,66431	0,71143
	sym8	0,87354	0,65869	0,67920
	coif1	0,85449	0,67896	0,68848
	coif2	0,81226	0,65259	0,68213
	bior1.3	0,51660	0,66870	0,72510
	bior2.2	0,91162	0,70654	0,66162
	rbio1.3	0,80591	0,66919	0,71924
	rbio3.1	0,50830	0,54980	0,86328

Tabela 4.22: Tabela de índices Jaccard para o ataque de adição de ruído de Poisson.

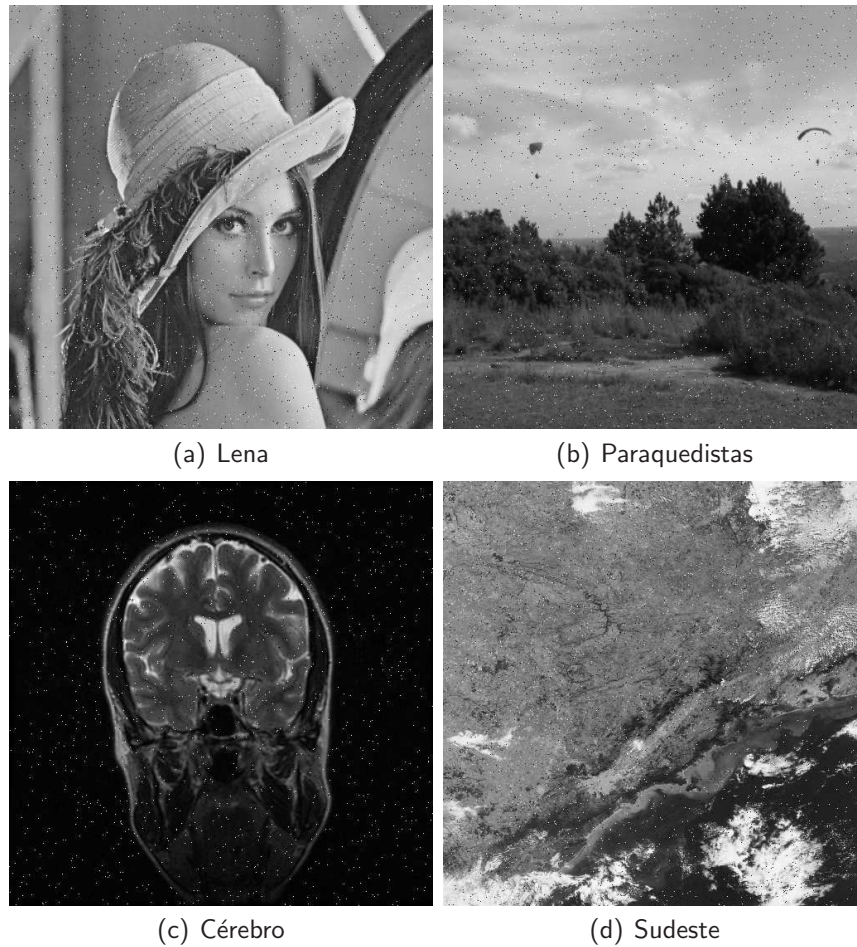


Figura 4.24: Imagens de teste após aplicação de ruído sal e pimenta.

	Lena	Paraquedistas	Cérebro	Sudeste
PSNR	25,90815	25,38195	23,96831	25,67001

Tabela 4.23: Tabela de PSNR entre imagens marcadas antes e depois do ataque de adição de ruído sal e pimenta.

e pimenta.

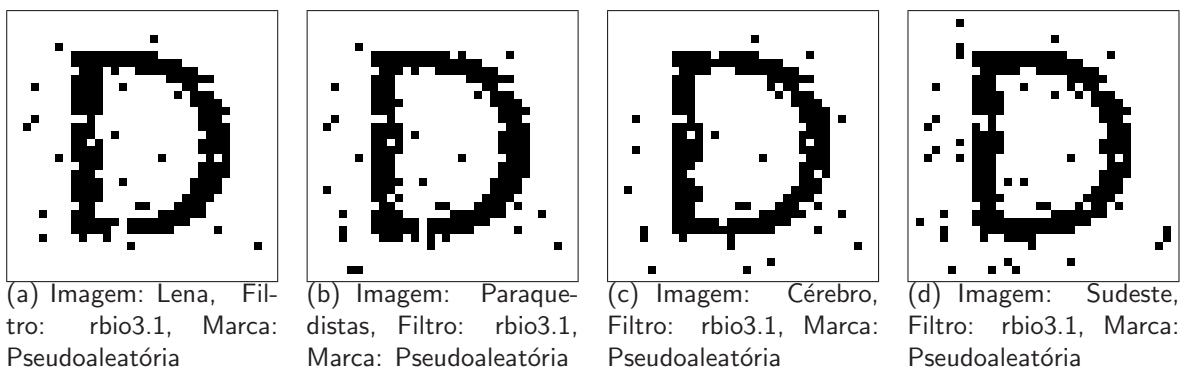


Figura 4.25: Marcas recuperadas após ruído sal e pimenta.

Imagem	Wavelet	Textura	Luminosidade	PseudoAleat
Lena	haar	0,88574	0,91016	0,91553
	db2	0,89136	0,88672	0,90039
	sym2	0,89136	0,88672	0,90039
	sym8	0,88916	0,85132	0,80859
	coif1	0,89526	0,87793	0,86035
	coif2	0,88477	0,86230	0,83252
	bior1.3	0,88696	0,90942	0,90576
	bior2.2	0,90747	0,89551	0,85645
	rbio1.3	0,88647	0,88379	0,89990
	rbio3.1	0,79468	0,78052	0,92383
Paraquedistas	haar	0,49146	0,90894	0,90088
	db2	0,50391	0,86646	0,89307
	sym2	0,50391	0,86646	0,89307
	sym8	0,50659	0,85083	0,79883
	coif1	0,51270	0,88745	0,86133
	coif2	0,50391	0,86890	0,83545
	bior1.3	0,49243	0,90991	0,89844
	bior2.2	0,49780	0,90503	0,87256
	rbio1.3	0,49561	0,89233	0,89502
	rbio3.1	0,50073	0,79199	0,92334
Cérebro	haar	0,46265	0,90283	0,90918
	db2	0,49731	0,88550	0,88086
	sym2	0,49731	0,88550	0,88086
	sym8	0,50098	0,87109	0,81299
	coif1	0,51025	0,87720	0,86475
	coif2	0,50488	0,87402	0,84961
	bior1.3	0,46143	0,90112	0,89062
	bior2.2	0,49121	0,88843	0,87012
	rbio1.3	0,49731	0,88892	0,89844
	rbio3.1	0,79370	0,76392	0,92139
Sudeste	haar	0,49927	0,87085	0,90332
	db2	0,88135	0,80200	0,89404
	sym2	0,88135	0,80200	0,89404
	sym8	0,81055	0,78882	0,81934
	coif1	0,88208	0,81616	0,86816
	coif2	0,84302	0,78003	0,83008
	bior1.3	0,48657	0,49243	0,89014
	bior2.2	0,88574	0,80444	0,86670
	rbio1.3	0,84473	0,82983	0,88672
	rbio3.1	0,49780	0,66943	0,91162

Tabela 4.24: Tabela de índices Jaccard para o ataque de adição de ruído sal e pimenta.

4.3.3.5 Considerações sobre inserção de ruído

A adição de ruído nas imagens causa, primeiramente, valores de PSNR baixos. É possível relacionar tais valores, de modo geral, com a qualidade da marca: quanto menor o PSNR entre as imagens original e atacada, pior a marca recuperada. Excessão à tal regra é o ruído sal e pimenta, pois, devido à marca pseudoaleatória, a recuperação é consideravelmente boa. Se fosse utilizada, contudo, outra marca (textura ou luminosidade) para o mesmo ataque, a marca recuperada seria compatível com o PSNR, ou seja, teria baixa qualidade.

Apesar dos filtros se alternarem entre os melhores, podem ser destacados os filtros bior2.2 e rbio3.1. Esse último principalmente com marcas pseudoaleatórias. O ruído Gaussiano foi o que mais afetou as marcas exatamente por alterar de forma mais intensa as imagens. Houve, contudo, a recuperação da marca em todos os ataques.

4.3.4 Cortes

Os ataques de cortes são extremamente comuns na quebra de sistemas de marcas d'água, pois a quantidade de informação perdida é normalmente grande. Além disso, para muitos usos, não é preciso possuir uma imagem inteira, sendo suficiente apenas parte dela.

O desafio da resistência das marcas a esse tipo de ataque consiste em adicionar redundância suficiente que permita a recuperação mesmo após a perda de grande parte do conteúdo da imagem.

Para facilitar a organização da seção, os cortes serão divididos em três tipos. O corte tipo 1 será um corte quadrado efetuado no canto inferior direito das imagens; o corte tipo 2 será um corte retangular compreendendo toda a lateral esquerda; e o corte tipo 3 será composto de um corte compreendendo a toda a lateral esquerda e toda a parte superior das imagens.

4.3.4.1 Corte tipo 1

A tabela 4.25 mostra o PSNR entre as imagens de teste da figura 4.1 após inserção das marcas em relação às imagens e o ataque de corte tipo 1 da figura 4.26. A tabela 4.26 mostra os índices Jaccard resultantes da recuperação da marca após o mesmo ataque.

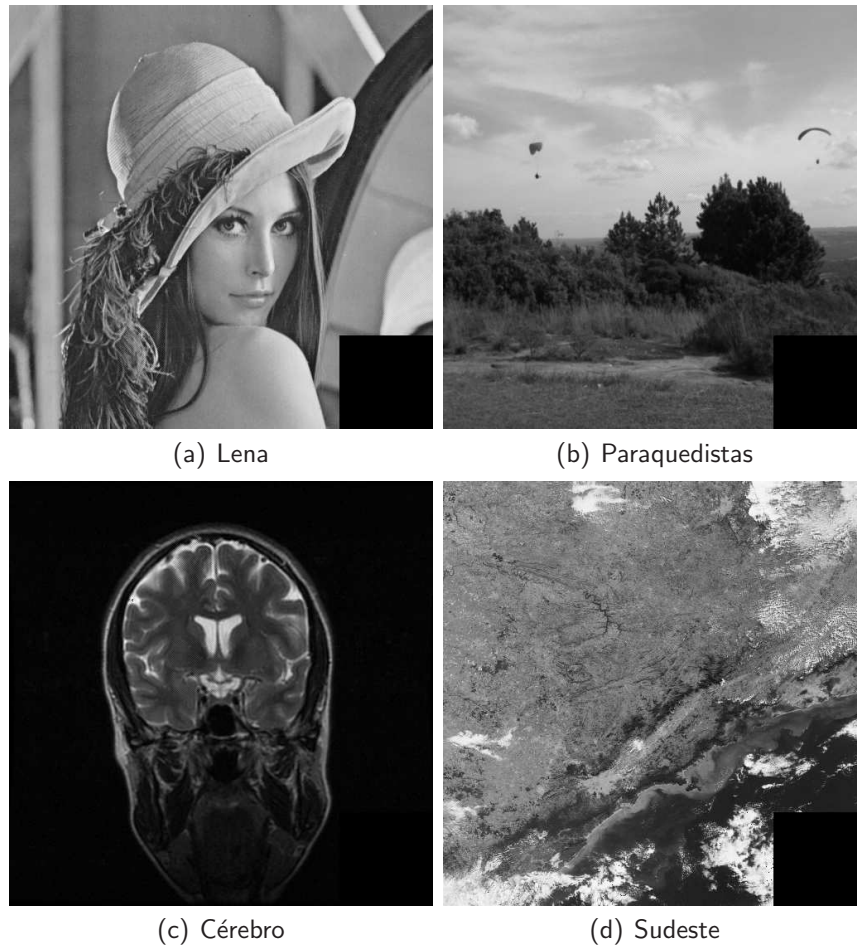
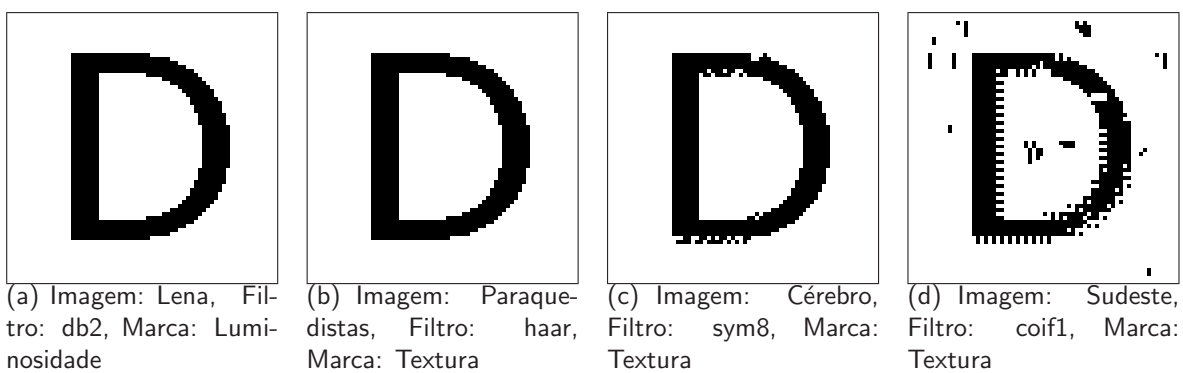


Figura 4.26: Imagens de teste após ataque de corte tipo 1.

	Lena	Paraquedistas	Cérebro	Sudeste
PSNR	18,86126	25,52358	48,64386	18,83142

Tabela 4.25: Tabela de PSNR entre imagens marcadas antes e depois do ataque de corte tipo 1.

A figura 4.27 mostra algumas marcas recuperadas após um ataque de corte tipo 1.



(a) Imagem: Lena, Filtro: db2, Marca: Luminosidade
 (b) Imagem: Paraquedistas, Filtro: haar, Marca: Textura
 (c) Imagem: Cérebro, Filtro: sym8, Marca: Textura
 (d) Imagem: Sudeste, Filtro: coif1, Marca: Textura

Figura 4.27: Marcas recuperadas após ataque de corte tipo 1.

Imagem	Wavelet	Textura	Luminosidade	PseudoAleat
Lena	haar	0,95508	0,96729	0,91455
	db2	0,95166	0,96875	0,91406
	sym2	0,95166	0,96875	0,91406
	sym8	0,51221	0,96851	0,88672
	coif1	0,96875	0,96875	0,91162
	coif2	0,95190	0,96875	0,90039
	bior1.3	0,95459	0,96851	0,91309
	bior2.2	0,96875	0,96875	0,91309
	rbio1.3	0,52979	0,96826	0,91211
	rbio3.1	0,96045	0,90894	0,90967
Paraquedistas	haar	0,96875	0,96875	0,90820
	db2	0,96875	0,95166	0,91309
	sym2	0,96875	0,95166	0,91309
	sym8	0,95532	0,96875	0,89258
	coif1	0,95508	0,96875	0,91455
	coif2	0,95435	0,96875	0,89795
	bior1.3	0,96875	0,96875	0,91504
	bior2.2	0,95752	0,95166	0,91943
	rbio1.3	0,95508	0,96875	0,91650
	rbio3.1	0,51221	0,92993	0,91357
Cérebro	haar	0,95166	0,96826	0,91260
	db2	0,48730	0,95264	0,91211
	sym2	0,48730	0,95264	0,91211
	sym8	0,97046	0,95483	0,89551
	coif1	0,95117	0,95703	0,90234
	coif2	0,95117	0,95483	0,89307
	bior1.3	0,95117	0,95581	0,91211
	bior2.2	0,95508	0,95605	0,90576
	rbio1.3	0,95215	0,95435	0,91309
	rbio3.1	0,94409	0,90527	0,90869
Sudeste	haar	0,51587	0,47998	0,90283
	db2	0,89429	0,48193	0,91016
	sym2	0,89429	0,48193	0,91016
	sym8	0,88306	0,47974	0,88281
	coif1	0,93384	0,48804	0,91113
	coif2	0,90601	0,50317	0,88770
	bior1.3	0,50317	0,48706	0,90918
	bior2.2	0,93579	0,48462	0,90918
	rbio1.3	0,88818	0,48462	0,90967
	rbio3.1	0,50391	0,49536	0,90576

Tabela 4.26: Tabela de índices Jaccard para o ataque de corte tipo 1.

4.3.4.2 Corte tipo 2

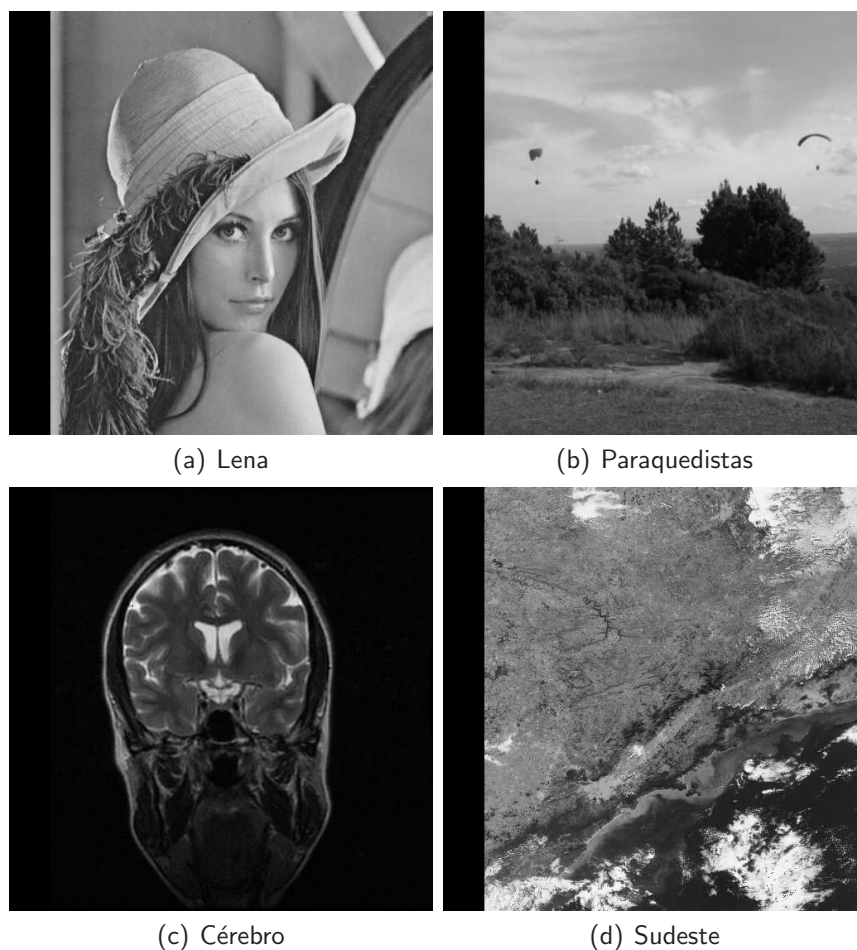


Figura 4.28: Imagens de teste após ataque de corte tipo 2.

A tabela 4.27 mostra o PSNR entre as imagens de teste da figura 4.1 após inserção das marcas em relação às imagens e o ataque de corte tipo 2 da figura 4.28. A tabela 4.28 mostra os índices Jaccard resultantes da recuperação da marca após o mesmo ataque.

	Lena	Paraquedistas	Cérebro	Sudeste
PSNR	15,36234	14,97404	44,91461	14,86250

Tabela 4.27: Tabela de PSNR entre imagens marcadas antes e depois do ataque de corte tipo 2.

A figura 4.29 mostra algumas marcas recuperadas após um ataque de corte tipo 2.

Imagem	Wavelet	Textura	Luminosidade	PseudoAleat
Lena	haar	0,96875	0,96729	0,88525
	db2	0,95166	0,96875	0,87842
	sym2	0,95166	0,96875	0,87842
	sym8	0,51221	0,96851	0,85303
	coif1	0,96875	0,96875	0,87793
	coif2	0,95190	0,96875	0,86572
	bior1.3	0,96875	0,96851	0,87744
	bior2.2	0,96875	0,96875	0,88037
	rbio1.3	0,95166	0,96826	0,87744
	rbio3.1	0,96289	0,90894	0,88037
Paraquedistas	haar	0,96875	0,96875	0,87891
	db2	0,95337	0,95166	0,87793
	sym2	0,95337	0,95166	0,87793
	sym8	0,95752	0,96875	0,86182
	coif1	0,95361	0,96875	0,88232
	coif2	0,49927	0,96875	0,86670
	bior1.3	0,96875	0,96875	0,88037
	bior2.2	0,95508	0,95166	0,88574
	rbio1.3	0,95508	0,96875	0,88086
	rbio3.1	0,28003	0,92993	0,88184
Cérebro	haar	0,95166	0,96826	0,88330
	db2	0,48730	0,95264	0,87891
	sym2	0,48730	0,95264	0,87891
	sym8	0,97046	0,95483	0,86328
	coif1	0,95117	0,95703	0,87256
	coif2	0,95117	0,95483	0,86182
	bior1.3	0,95117	0,95581	0,87842
	bior2.2	0,95508	0,95605	0,87598
	rbio1.3	0,95215	0,95435	0,87891
	rbio3.1	0,94409	0,90527	0,87988
Sudeste	haar	0,51587	0,78687	0,87158
	db2	0,89429	0,78833	0,87354
	sym2	0,89429	0,78833	0,87354
	sym8	0,88306	0,77563	0,85107
	coif1	0,93384	0,80591	0,87842
	coif2	0,90601	0,76440	0,85596
	bior1.3	0,50317	0,78955	0,87061
	bior2.2	0,93579	0,81982	0,87744
	rbio1.3	0,88818	0,78296	0,87305
	rbio3.1	0,50220	0,59131	0,86816

Tabela 4.28: Tabela de índices Jaccard para o ataque de corte tipo 2.

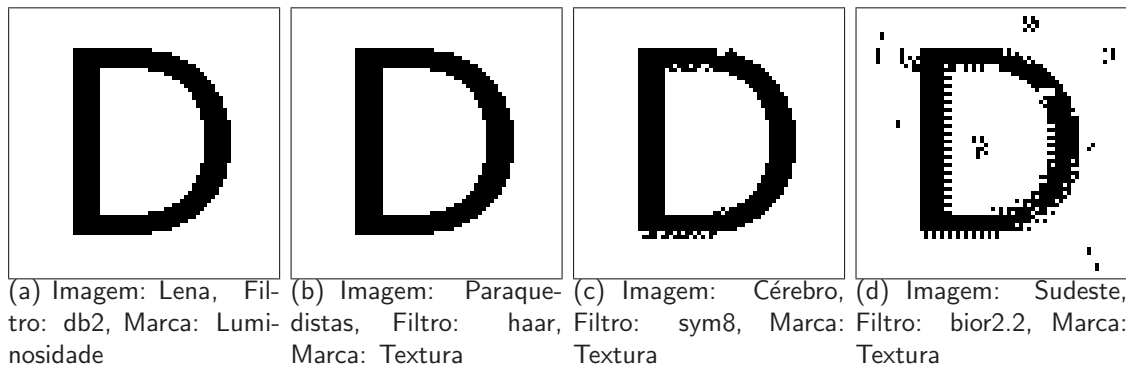


Figura 4.29: Marcas recuperadas após ataque de corte tipo 2.



Figura 4.30: Imagens de teste após ataque de corte tipo 3.

4.3.4.3 Corte tipo 3

A tabela 4.29 mostra o PSNR entre as imagens de teste da figura 4.1 após inserção das marcas em relação às imagens e o ataque de corte tipo 3 da figura 4.30. A tabela 4.30 mostra os índices Jaccard resultantes da recuperação da marca após o mesmo ataque.

A figura 4.31 mostra algumas marcas recuperadas após um ataque de corte tipo 3.

	Lena	Paraquedistas	Cérebro	Sudeste
PSNR	11,53623	9,67427	29,11728	10,77475

Tabela 4.29: Tabela de PSNR entre imagens marcadas antes e depois do ataque de corte tipo 3.

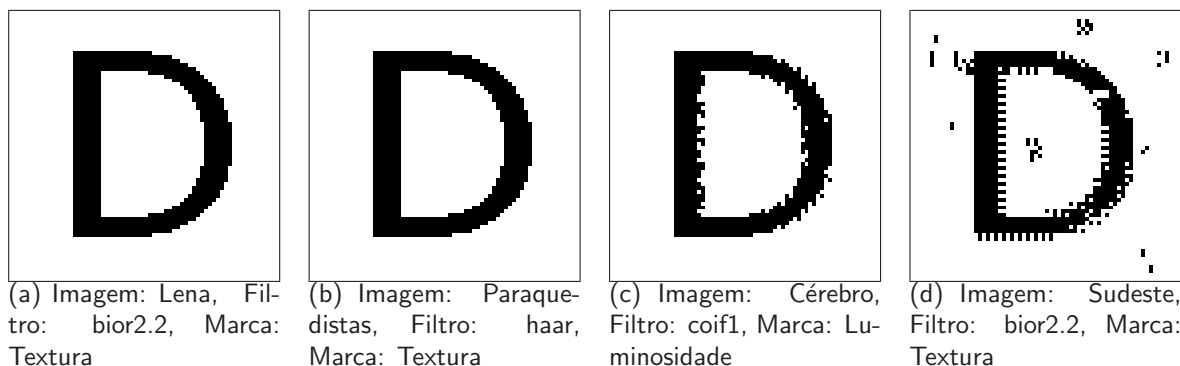


Figura 4.31: Marcas recuperadas após ataque de corte tipo 3.

4.3.4.4 Considerações sobre ataques de corte

Para os ataques de corte testados, as marcas d'água foram recuperadas de maneira satisfatória. Contudo, ao aumentar a região cortada, reduzindo a parte preservada da imagem, a quantidade de informação das marcas pode tornar-se insuficiente para a recuperação. Como solução, faz-se necessário aumentar a quantidade de marcas pseudoaleatórias inseridas, aumentando a chance de preservar as informações para a recuperação.

Não observam-se destaques em filtros ou marcas, havendo uma similaridade de índices Jaccard. Cabe ressaltar, contudo, que ataques de corte podem alterar de maneira muito fácil a disposição das regiões de textura e luminosidade, ordenadas na parte da divisão de blocos do método. Isso pode ser observado na tabela 4.26, para a imagem Sudeste, na qual as marcas de luminosidade foram completamente perdidas. Portanto, apesar de apresentar resultados algumas vezes piores que outras, a marca pseudoaleatória é a mais indicada para a recuperação de maneira geral.

4.3.5 Rotação, Escala e Translação

Para a categoria de ataques que envolvem alterações geométricas na imagem, foi implementado um módulo de casamento de padrões e realinhamento da imagem a seu formato

Imagem	Wavelet	Textura	Luminosidade	PseudoAleat
Lena	haar	0,96875	0,95410	0,79443
	db2	0,95166	0,94824	0,78320
	sym2	0,95166	0,94824	0,78320
	sym8	0,51221	0,95142	0,76074
	coif1	0,96875	0,95435	0,78320
	coif2	0,95190	0,95093	0,77295
	bior1.3	0,96875	0,95361	0,78467
	bior2.2	0,96875	0,95386	0,78564
	rbio1.3	0,95166	0,95410	0,78271
	rbio3.1	0,93042	0,89453	0,79150
Paraquedistas	haar	0,96875	0,96875	0,78857
	db2	0,51270	0,95166	0,78223
	sym2	0,51270	0,95166	0,78223
	sym8	0,51587	0,96875	0,76465
	coif1	0,50269	0,96875	0,78564
	coif2	0,45239	0,96875	0,76904
	bior1.3	0,96875	0,96875	0,78516
	bior2.2	0,50049	0,95166	0,78760
	rbio1.3	0,95654	0,96875	0,78418
	rbio3.1	0,44678	0,92993	0,79199
Cérebro	haar	0,50146	0,61523	0,79346
	db2	0,84106	0,95508	0,78516
	sym2	0,84106	0,95508	0,78516
	sym8	0,80103	0,95483	0,77002
	coif1	0,85425	0,95703	0,77930
	coif2	0,83740	0,95483	0,77051
	bior1.3	0,49976	0,95581	0,78223
	bior2.2	0,85522	0,95605	0,78369
	rbio1.3	0,84448	0,95435	0,78320
	rbio3.1	0,84106	0,90527	0,79004
Sudeste	haar	0,51587	0,70508	0,78174
	db2	0,89429	0,69971	0,77881
	sym2	0,89429	0,69971	0,77881
	sym8	0,88306	0,70264	0,75537
	coif1	0,93384	0,72192	0,78174
	coif2	0,90601	0,70728	0,76318
	bior1.3	0,50098	0,75977	0,77783
	bior2.2	0,93579	0,74902	0,78271
	rbio1.3	0,88818	0,71484	0,77783
	rbio3.1	0,50220	0,56665	0,77832

Tabela 4.30: Tabela de índices Jaccard para o ataque de corte tipo 3.

original. Diferentemente de outros ataques, tal categoria permite que, antes da recuperação da marca, a imagem atacada retorne a seu estado original, desde que sejam conhecidas algumas informações a priori sobre a mesma e que o ataque tenha mantido parte suficiente da imagem.

O sistema utilizado necessita do conhecimento mínimo de duas máscaras da imagem original, contendo os valores dos pixels e posição da máscara em relação à imagem, para que, fazendo o casamento das mesmas na imagem após o ataque, possa efetuar o realinhamento.

Vários experimentos foram realizados, com algumas técnicas de casamento de padrões (máscaras, pontos, linhas, bordas), alterando também tamanho de máscara e número de pontos utilizados. Porém, de maneira geral, o sistema não se mostrou apto a recuperar a imagem ao seu estado pré-ataque. O problema observado para a não recuperação deveu-se às alterações causadas na máscara da imagem atacada devido à interpolação efetuada para a mudança de escala e orientação.

Cabe destacar que o módulo de recuperação implementado foi capaz de efetuar o realinhamento em 100% das imagens testadas para aquelas cuja rotação tenha sido efetuada em múltiplos de 90 graus. Observou-se também a recuperação em grande parte das imagens com rotação em ângulos menores que 12 graus.

4.4 Resultados da Recuperação com Variação nas Marcas d'Água

Esta seção traz os resultados de experimentos adicionais realizados, nos quais a marca d'água foi alterada, buscando características diferentes da marca utilizada anteriormente.

Tais experimentos buscam validar a análise do método, independentemente da marca que se está utilizando. Pode-se observar, contudo, que marcas com maior quantidade de detalhes tem sua recuperação prejudicada, sendo inversamente proporcional a complexidade da marca com a qualidade da recuperação. A marca da figura 4.32 possui dimensão 64×64 pixels e a marca da figura 4.33 possui dimensão 128×64 pixels. Ambas são binárias.

Como é possível observar na figura 4.34, apesar de perder alguns detalhes, o método conseguiu recuperar parte significativa da maioria das marcas. Para essas marcas presentes na imagem, foi usado apenas o filtro wavelet bior2.2 na recuperação, permitindo verificar como

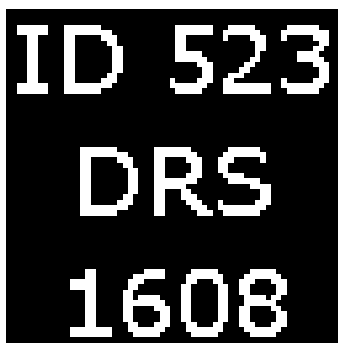


Figura 4.32: Marca com caracteres utilizada nos experimentos.

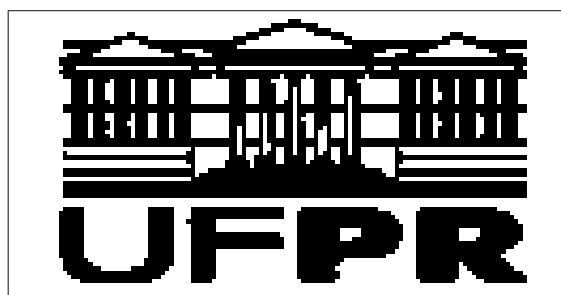


Figura 4.33: Marca com símbolo da UFPR utilizada nos experimentos.

um mesmo filtro se comporta diante de imagens e ataques distintos. O ataque de compressão utilizado foi com qualidade de 60%, o filtro utilizado foi o Gaussiano e o ruído Poisson. A tabela 4.31 mostra os índices Jaccard para as marcas recuperadas.

Ataque	Lena	Paraquedistas	Cérebro	Sudeste
Compressão	0,71387	0,73657	0,72168	0,63745
Filtro	0,70239	0,72144	0,67456	0,63208
Ruído	0,73975	0,72729	0,75317	0,51709

Tabela 4.31: Tabela de índices Jaccard das marcas da figura 4.34.

Para os resultados mostrados na figura 4.35, foi utilizado também apenas um filtro wavelet, dessa vez o *coif1*. O ataque de compressão foi também com qualidade de 60%, o filtro de suavização foi o filtro da média e o ruído adicionado foi o sal e pimenta. Cabe observar que, para a compressão, nas marcas recuperadas das figuras Cérebro e Sudeste, ocorreu uma inversão da marca. Isso porque, como a marca possui dimensão maior, foram utilizados mais blocos para sua inserção. Como descrito na seção 4.1, com um número maior de blocos utilizado, a diferença no cálculo da textura e luminosidade entre cada um deles é pequena e, em caso de ataque, tal variação pode causar a inversão da ordem de alguns blocos. A

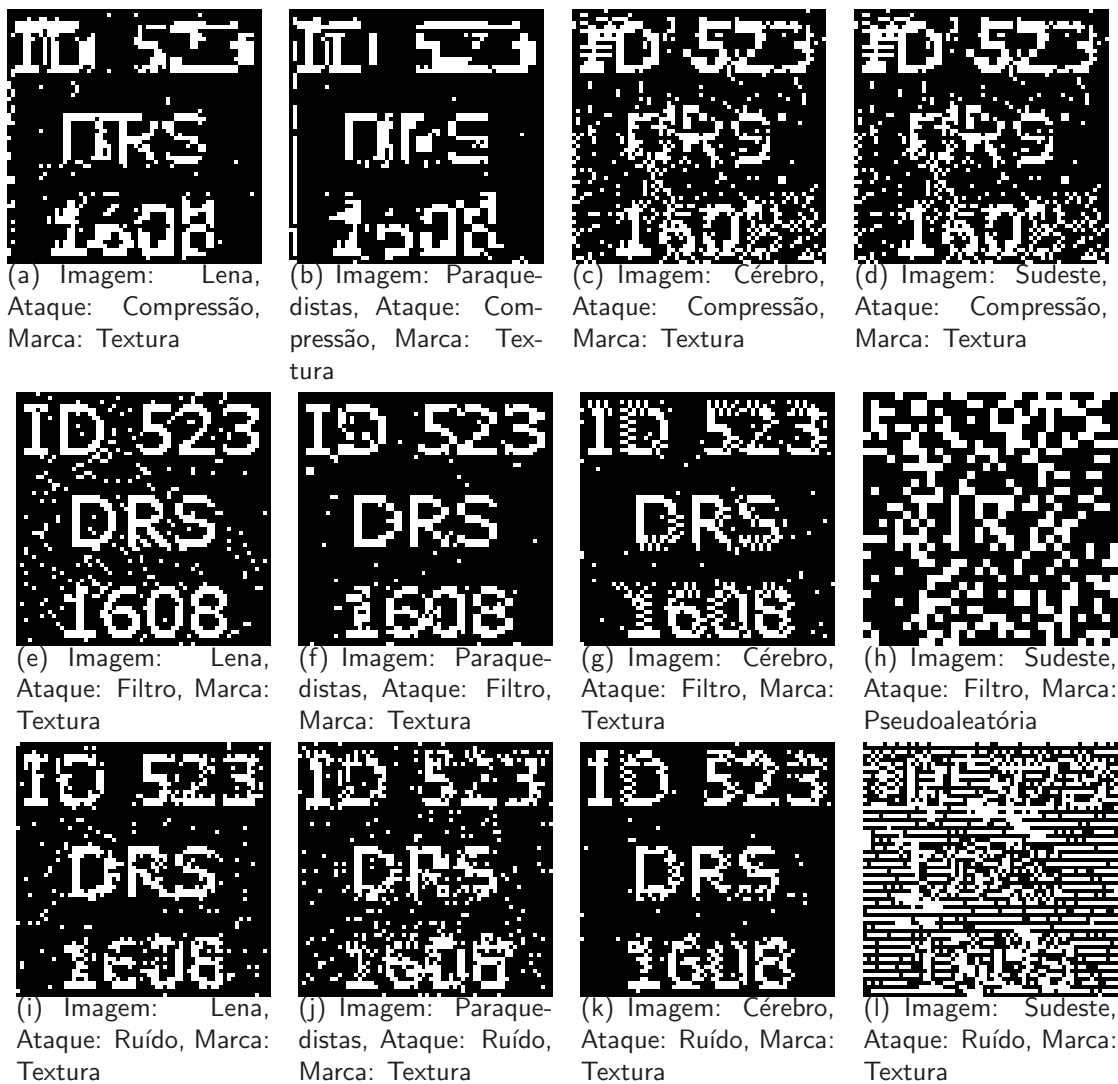


Figura 4.34: Marcas de caracteres recuperadas.

tabela 4.32 mostra os índices Jaccard para as marcas recuperadas.

Ataque	Lena	Paraquedistas	Cérebro	Sudeste
Compressão	0,74109	0,72571	0,73743	0,71106
Filtro	0,63477	0,66089	0,65137	0,66711
Ruído	0,80823	0,80383	0,80090	0,80750

Tabela 4.32: Tabela de índices Jaccard das marcas da figura 4.35.

4.5 Discussão dos Resultados

Esta seção analisa e discute os resultados observados nos experimentos realizados. Sua divisão se dará pelas métricas que podem ser utilizadas para validar sistemas de marca d'água,

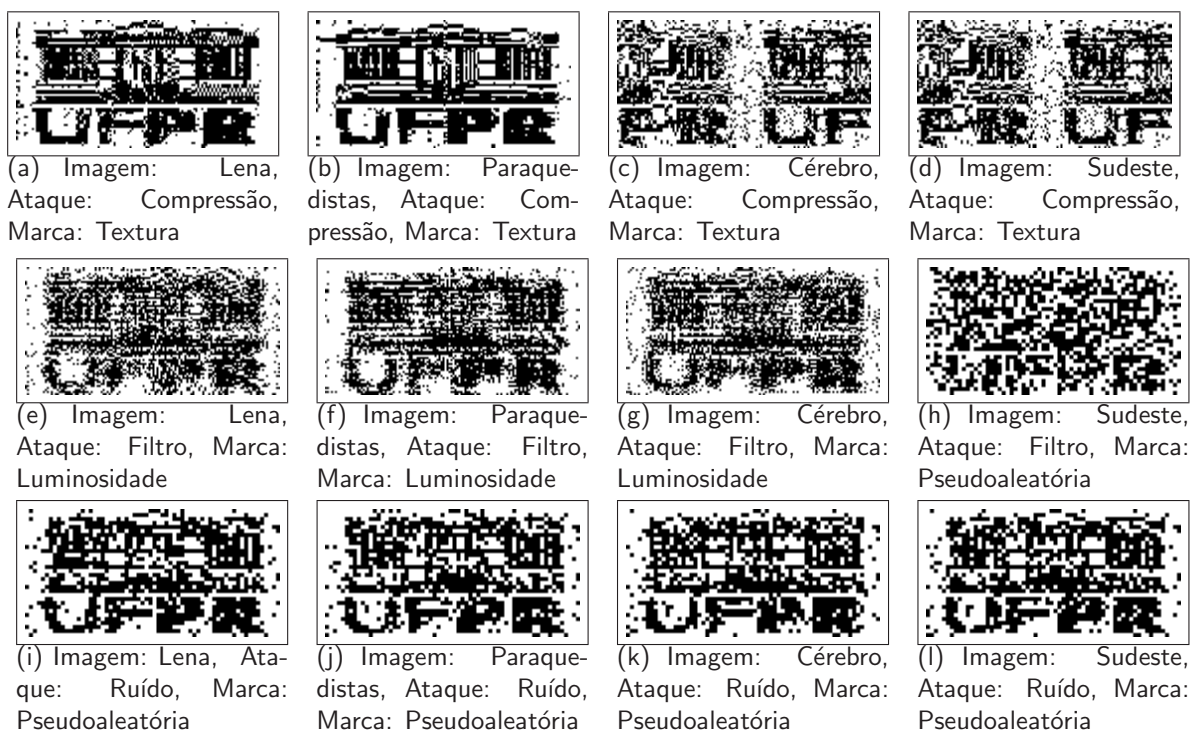


Figura 4.35: Marcas UFPR recuperadas.

bem como pelos critérios que foram estabelecidos na proposição da metodologia.

4.5.1 Propriedades

Como explicado na seção 2.5, as marcas d'água devem possuir determinadas propriedades. Especificamente para a ferramenta desenvolvida, são elas invisibilidade, eficiência computacional, capacidade de armazenamento, robustez e detecção confiável. Como buscou-se desenvolver um método para identificação de propriedade, é a robustez da marca que deve ser considerada e não sua fragilidade, uma vez que essa é usada apenas para aplicações de autenticação.

Invisibilidade

Como pode ser observado na tabela 4.2, a diferença entre as imagens originais e marcadas foi pequena para todos os filtros utilizados. Visualmente também não há alterações perceptíveis entre as mesmas e, portanto, o critério de invisibilidade da marca d'água foi satisfeito, permitindo que uma imagem seja marcada sem que os usuários saibam da existência

da marca.

Eficiência computacional

Nos testes efetuados, a eficiência computacional não foi o critério prioritário para validação do método e, ainda assim, a execução dos processos de inserção e extração de marca levam menos de sessenta segundos na plataforma utilizada. Como não foi o objetivo do método uma detecção em tempo real, a ferramenta mostrou-se adequada para as aplicações consideradas.

Capacidade da armazenamento

As marcas utilizadas possuem dimensão de 64×64 e 128×64 pixels, o que é suficiente para armazenar informações que permitam a identificação de propriedade de uma imagem. É possível, entretanto, aumentar do tamanho da marca d'água, se necessário, porém causará alterações maiores à imagem marcada. Reduções na redundância de dados podem contribuir para que os impactos causados por esse aumento no tamanho da marca sejam minimizados.

Robustez

Como mostrado na seção 4.3, as marcas inseridas nas imagens foram adequadamente recuperadas mesmo após os diversos ataques, salvo exceções da seção 4.3.5. Cabem análises detalhadas no que se refere a cada filtro e a cada tipo de marca inserida. Tais explicações serão realizadas na seção 4.5.2.

4.5.2 Filtros e Marcas

Após todos os experimentos realizados, foi possível observar características interessantes em cada marca e filtro. Primeiramente, cabe analisar os filtros que tiveram melhor desempenho, de maneira geral. Os dados constantes nessa seção referem-se à inserção da marca 4.2 nas imagens da figura 4.1.

Com relação ao aspecto invisibilidade, apesar da homogeneidade dos resultados, destaca-se o filtro rbio1.3, que atingiu valores superiores aos demais para todas as imagens.

Quanto à resistência, o filtro que atingiu maior média de recuperação foi o coif1, com média 0,7819, seguido pelos filtros bior2.2, média de 0,7817, rbio1.3, média 0,7768 e sym2 com média 0,7754. Porém os filtros que apareceram mais vezes com a melhor recuperação foram o bior2.2 e rbio3.1. Tal média foi obtida pela soma dos coeficientes Jaccard de cada filtro, para todas as imagens, para todas as marcas de textura, luminosidade e pseudoaleatórias da figura 4.2 inseridas.

Com relação ao tipo de marca inserido, a classificação da média de índices Jaccard foi: marca de luminosidade com média 75,7957, marca de textura com média 75,0082 e marca pseudoaleatória com média 72,3518.

Devido à metodologia escolhida, principalmente no que refere-se à escolha de regiões de textura, a ferramenta se mostrou pouco mais vulnerável a ataques em imagens muito homogêneas e altamente texturizadas (imagem Sudeste). Tais características estão presentes com maior frequência em imagens de sensoriamento remoto. Para tal grupo de imagens, torna-se interessante o aumento do número de marcas inseridas utilizando-se a semente pseudoaleatória, podendo ser efetuado, inclusive, um aumento de força nos coeficientes alterados. Tal medida justifica-se pois, como a imagem é muito texturizada, o HVS é menos sensível a mudanças na imagem como um todo.

Portanto, o método mostrou-se apto a recuperar as informações das marcas d'água para a maioria dos ataques. Dependendo da aplicação, é possível a alteração de determinados parâmetros como força da marca e número de marcas inseridas, aumentando significativamente a robustez e melhorando o índice de recuperação.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho descreveu o desafio de se prover segurança, autenticação e identificação de propriedade em dados digitais, propondo uma alternativa com o uso de marcas d'água em imagens.

O estudo de transformadas aplicadas a imagens, principalmente wavelets, permitiu o conhecimento de fundamentos essenciais para o desenvolvimento do trabalho.

Com o estudo dos princípios e aplicações de marcas d'água, foi possível observar o vasto universo de possibilidades ao se trabalhar apenas com imagens. Verificou-se que a área de identificação de propriedade é uma das mais pesquisadas e também a que proporcionaria os maiores desafios.

Vários métodos existentes na literatura foram avaliados, sendo possível identificar as vantagens em se aplicar os processos de inserção e de recuperação das marcas d'água no domínio das transformadas wavelets, bem como conhecer as limitações dos atuais métodos.

Assim, buscou-se o desenvolvimento de um algoritmo de inserção e extração de marcas d'água que resista ao maior número de ataques possível, mantendo níveis aceitáveis de esforço computacional, cuja principal aplicação é a identificação de propriedade de uma imagem. Como característica diferencial está o fato da recuperação da marca ser cega ou não-informada, isto é, não é necessário a posse da imagem original para que a marca d'água possa ser recuperada.

Objetivando aliar robustez e invisibilidade, foram pesquisadas métricas do Sistema Visual Humano que permitissem a inserção da marca d'água causando a menor diferença possível na imagem. Descritores de textura e luminosidade foram utilizados para a obtenção das regiões mais propícias à inserção da marca e regiões (bandas) de alta frequência da decomposição wavelet foram utilizadas.

A utilização de conceitos de marcas d'água LSB de domínio espacial aplicada aos coeficientes wavelets permitiu à ferramenta inovação em alguns aspectos. Tal inovação também

agregou robustez à marca inserida, estando em consonância com as demais medidas adotadas, bem como possibilitou o uso de transformadas wavelets não inteiras, ou seja, cujos coeficientes possuem valores decimais. Apesar de ainda existir arredondamento, a utilização de “bits de profundidade” dos coeficientes wavelets para guardar informações da marca reduziu significativamente a perda de informações ocorrida entre a decomposição e síntese wavelet.

Com a ferramenta desenvolvida, partiu-se para a fase de testes, cujos resultados deveriam validar a metodologia proposta. Após a inserção e recuperação de mais de 5000 marcas d’água, a análise dos resultados permitiu a proposição de algumas conclusões.

Cada filtro wavelet utilizado comportou-se de determinada maneira durante o processo principalmente de recuperação da marca, o que permitiu a criação de tabelas comparando os diversos resultados apresentados. Foi possível, então, observar o destaque dos filtros biortogonais, posicionando vários representantes entre os melhores filtros wavelets para a recuperação. Vale destacar também o filtro `coif1`, o qual apresentou a melhor média de índice Jaccard na recuperação das marcas após os ataques.

A redundância de marcas inseridas em cada imagem resultou em uma melhor recuperação, pois cada uma das categorias de ataques acaba por prejudicar, de maneira mais acentuada, determinado tipo de marca, permitindo que outras fossem extraídas sem grandes alterações.

Deve-se, entretanto, indicar as deficiências do método apresentado, entre elas a vulnerabilidade em relação a ataques geométricos e a menor resistência da marca d’água quando a imagem marcada é homogênea. No primeiro caso, apesar de tentativas de uso de sistemas de casamento de padrões, a ferramenta foi capaz apenas de recuperar marcas cuja imagem tenha sofrido rotações em múltiplos de 90 graus ou ângulos inferiores a 12 graus. Para imagens homogêneas, devido ao sistema de seleção e ordenação dos blocos que recebem a marca, em caso de ataques, os mesmos podem ter a ordem, no momento da extração, trocada. Assim, torna-se um pouco menos precisa a recuperação da marca.

Foi observado também o efeito da aplicação de diferentes tipos de marcas d’água. Apesar de alguns detalhes se perderem, o método continuou recuperando parte substancial das marcas. Além disso, o aumento no tamanho das marcas é totalmente possível, caso seja necessário ou desejável armazenar na marca uma grande quantidade de informações.

Dessa forma, é possível considerar que a ferramenta cumpriu seu objetivo e que pôde contribuir para outras pesquisas, principalmente com a detalhada comparação entre os diversos filtros wavelets, bem como fomentar a geração de novas metodologias que buscarão o estado da arte na área.

Trabalhos Futuros

Durante o desenvolvimento deste trabalho, várias decisões de caminhos a serem seguidos foram efetuadas para permitir a continuidade e convergência do método. Além disso, durante o estudo da literatura existente, diversas alternativas foram analisadas para a melhoria da ferramenta desenvolvida.

Como estudos futuros, portanto, vários pontos podem ser aprofundados. Inicialmente, duas melhorias na inserção das marcas d'água podem já resultar em avanços no código. A primeira refere-se à mudança do descritor de textura utilizado para classificar os blocos. O desvio padrão, apesar de ter se mostrado suficiente para as aplicações testadas, tem algumas limitações principalmente quando as imagens são muito homogêneas ou o número de blocos utilizado é grande. Descritores como energia ou baseados em momentos devem ser melhor estudados, pois seu comportamento na presença de ataques pode ser diferente do observado na utilização do desvio padrão.

A segunda melhoria está na automatização do fator de força aplicado aos coeficientes wavelets da marca inserida. Baseado na textura local e até mesmo em valores de toda a imagem, o aumento de tal fator pode propiciar melhoria significativa na robustez da marca.

Outro ponto a ser explorado é a utilização de mais níveis de decomposição wavelet. A avaliação das alterações causadas na imagem marcada e da resistência a ataques de marcas inseridas em diversos níveis de decomposição deve ser o foco desse estudo.

Como as bases biortogonais mostraram bons resultados, o estudo mais detalhado de suas propriedades pode gerar boas possibilidades de melhoria. O uso de duas ou mais wavelets em um único processo de inserção também deve ser considerado, visto que cada base destaca-se em determinado ataque ou característica de imagem.

Devido às limitações do método desenvolvido para assegurar resistência a transformações

de escala, rotação e translação, este é certamente o tópico que deve ser melhor pesquisado. Durante o desenvolvimento do trabalho iniciou-se o estudo para uso do SIFT (*Scale Invariant Feature Transform*) [37] e implementação em Matlab [70] dentro do módulo de casamento de padrões da ferramenta.

Estudar wavelets com características invariantes à rotação como a DT-CWT (*Dual-Tree Complex Wavelet Transform*) [17, 49] e a QSWT (*Qualified Significant Wavelet Tree*) [9], dentre outras existentes é certamente outro passo importante na consideração dos trabalhos futuros, agregando melhorias à ferramenta e propiciando o desenvolvimento de novas metodologias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ADELSBACH, A. E SADEGHI, A.-R. Zero-knowledge watermark detection and proof of ownership. *Lecture Notes in Computer Science 2137* (2001), 273–289.
- [2] AN, P. Digital Watermarking of Image Project (DWIP), 2000. Honours Thesis, Monash University.
- [3] ANDERSON, R. J. E PETITCOLAS, F. A. P. On The Limits of Steganography. *IEEE Journal of Selected Areas in Communications 16(4)* (1998), 474–481.
- [4] ANTONINI, M., BARLAUD, M., MATHIEU, P. E DAUBECHIES, I. Image Coding Using Wavelet Transform. *IEEE Transactions on Image Processing 1, 2* (1992), 205–220.
- [5] BARNI, M. E BARTOLINI, F. *Watermarking Systems Engineering: Enabling Digital Assets Security and Other Applications*. Marcel Dekker, 2004.
- [6] BARNI, M., BARTOLINI, F., CAPPELLINI, V., LIPPI, A. E PIVA, A. A DWT-based Technique for Spatio-frequency Masking of Digital Signatures. In *SPIE/IS&T International 20 Conference on Security and Watermarking of Multimedia Contents* (1999), pp. 31–39.
- [7] BURRUS, C. S., GOPINATH, R. A. E GUO, H. *Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms*. Prentice Hall, 1998.
- [8] CAO, J.-G., FOWLER, J. E. E YOUNAN, N. H. An Image-adaptive Watermark Based on a Redundant Wavelet Transform. In *Proceedings of International Conference on Image Processing, 2001* (2001), vol. 2, pp. 277–280.
- [9] CHIRAWAT TEMI, S. C. E LASAKUL, A. A Robust Image Watermarking Using Multiresolution Analysis of Wavelet. In *IEEE Int. Symposium on Communications and Information Technologies, (ISCIT 2005)* (2005), pp. 603–606.

- [10] COLLE, F. A. D. E GÓMEZ, J. C. DWT Based Digital Watermarking Fidelity and Robustness Evaluation. *Journal of Computer Science and Technology* 8, 1 (Abril 2008), 15–20.
- [11] CONG, J. E PENG, J. Affine Invariant Watermark Scheme using Genetic Algorithm. *Journal of Computer Science* 4 (2005), 20–26.
- [12] CORINA, N. Filigranage dans le domaine des ondelettes Watermarking in the wavelet domain, 2004. Raport de cercetare (Relatório de investigação), Luniversité Politehnica Timisoara Faculté dElectronique et Télécommunications.
- [13] COX, I. J. E MILLER, M. L. The first 50 years of electronic watermarking. *Journal of Applied Signal Processing* 2 (2002), 126–132.
- [14] COX, I. J., MILLER, M. L. E BLOOM, J. A. *Digital Watermarking*. Morgan Kaufmann Publishers, 2002.
- [15] DA SILVA, R. D. Segmentação de Imagens Baseada em Descritores de Textura Extraídos por Transformadas Wavelets. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, 2008.
- [16] DA SILVA, R. D. E MINETTO, R. Transformadas Wavelets: Teoria e Aplicações em Análise de Imagens Digitais, 2005. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Paraná.
- [17] DAY, M.-L., LEE, S.-Y. E JOU, I.-C. Watermark Re-synchronization Using Sinusoidal Signals in DT-CWT Domain. In *PCM* (3) (2004), pp. 394–401.
- [18] DE ARAÚJO GOIS, M. C. E FRERY, A. C. Mascaramento de Informações: Histórico, Definições e Aplicações. *Revista Eletrônica de Iniciação Científica* 3 (2003), 1–20.
- [19] DE REZENDE ROCHA, A. Desenvolvimento de um Software para Segurança Digital Utilizando Esteganografia, 2003. Projeto de conclusão de curso, Universidade Federal de Lavras.

- [20] DE STRYCKER, L., TERMONT, P., VANDEWEGE, J., HAITSMAN, J., KALKER, A., MAES, M. E DEPOVERE, G. Implementation of a real-time digital watermarking process for broadcast monitoring on a trimedia vliw processor. *Vision, Image and Signal Processing* 147, 4 (2000), 376.
- [21] DEVELOPING DYNAMIC WORK ROLES USING JACCARD SIMILARITY INDICES OF EMPLOYEE COMPETENCY DATA. Casey m. mulqueen and thomas a. stetz and j. matthew beaubien and brian j. o'connell. In *18th Annual Conference of the Society for Industrial/Organizational Psychology* (Orlando, FL, 2003).
- [22] DEVORE, R., JAWERTH, B. E LUCIER, B. Image Compression Through Wavelet Transform Coding. *IEEE Transactions on Image Processing* 38 (Março 1992), 719–746.
- [23] DIGIMARC. www.digimarc.com, Acesso em Fevereiro de 2007.
- [24] FULLEA, E. E MARTINEZ, J. M. Robust Digital Image Watermarking using DWT, DFT and Quality Based Average. In *Multimedia '01: Proceedings of the ninth ACM international conference on Multimedia* (New York, NY, USA, 2001), ACM Press, pp. 489–491.
- [25] GANG, W. E NI-NI, R. A Fragile Watermarking Scheme for Medical Image. In *Proceedings of the 2005 IEEE Engineering in Medicine and Biology 27th Annual Conference* (Shanghai, China, 2005), pp. 3406–3409.
- [26] GONZALEZ, R. C., WOODS, R. E. E EDDINS, S. S. *Digital Image Processing Using MATLAB*. Prentice Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ, Estados Unidos, 2004.
- [27] GUNSEL, B. E KIRBIZ, S. Perceptual audio watermarking by learning in wavelet domain. In *International Conference on Pattern Recognition* (2006), vol. III, pp. 383–386.
- [28] HARTUNG, F. E KUTTER, M. Multimedia Watermarking Techniques. *Proceedings of the IEEE (USA)* 87, 7 (1999), 1079–1107.
- [29] HASSAN, M., ALKUHLANI, S., ALSMADI, L. E TALHOUNI, W. Attacks analysis for keyed blind multiresolution watermarking algorithm. In *ACOS'07: Proceedings of the 6th Conference on WSEAS International Conference on Applied Computer Science* (Stevens

- Point, Wisconsin, USA, 2007), World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS), pp. 458–464.
- [30] HASSAN, M. H. E GILANI, S. A. M. A Semi-Fragile Signature based Scheme for Ownership Identification and Color Image Authentication. In *Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology* (2006), vol. 13, pp. 303–307.
- [31] HERRIGEL, A., RUANAIDH, J. O., PETERSEN, H., PEREIRA, S. E PUN, T. Secure copyright protection techniques for digital images. In *Proceedings of the Second International Workshop on Information Hiding* (London, UK, 1998), Springer-Verlag, pp. 169–190.
- [32] HSIEH, C.-T. E WU, Y.-K. Digital Image Multiresolution Watermark Based on Human Visual System Using Error Correcting Code. *Tamkang Journal of Science and Engineering* 4 (2001), 201–208.
- [33] HWANG, W., KANG, H., HAN, S., KIM, K. E KANG, H. Robust audio watermarking using both dwt and masking effect. In *International Workshop on Digital Watermarking* (2003), pp. 382–389.
- [34] JAHNE, B. *Digital Image Processing*, 5 ed. Springer Verlag, 2002.
- [35] JAIN, L. C., SHIFMAN, M., VAINSHTEIN, A., PAN, J.-S. E HUANG, H.-C. *Intelligent Watermarking Techniques*. World Scientific, 2004.
- [36] JAYAWARDENA, A., MURISON, B. E LENDERS, P. Embedding Multiresolution Binary Images Into Multiresolution Watermark Channels In Wavelet Domain. In *Proceedings of 2000 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2000. ICASSP '00.* (2000), vol. 6, pp. 1983–1986.
- [37] JING, L. E LI, S. Robust zero-watermarking scheme using local invariant keypoints. In *MUSP'07: Proceedings of the 7th WSeAS International Conference on Multimedia Systems & Signal Processing* (Stevens Point, Wisconsin, USA, 2007), World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS), pp. 39–44.

- [38] KAHN, D. The History of Steganography. In *Proceedings of the First International Information-Hiding Workshop* (Berlim, 1996), pp. 1–5.
- [39] KHAN, A. *Intelligent Perceptual Shaping of a Digital Watermark*. PhD thesis, Ghulam Ishaq Khan Institute of Engineering Sciences and Technology, Topi, Pakistan, 2006.
- [40] KIM, B., CHOI, J. E PARK, K. RST-Resistant Image Watermarking Using Invariant Centroid and Reordered Fourier-Mellin Transform. In *International Workshop on Digital Watermarking* (2003), pp. 370–381.
- [41] KIM, H. Y. Projeto e Operadores pela Aprendizagem, Difusão Anisotrópica e Marca d'Água de Autenticação, 2004. Tese de livre-docência, Escola Politécnica, USP.
- [42] KOCH, E., RINDFREY, J. E ZHAO, J. Copyright protection for multimedia data. *Int. Conf. on Digital Media and Electronic Publishing* (1994).
- [43] KOCH, E. E ZHAO, J. Towards robust and hidden image copyright labeling. In *Proceedings of IEEE Workshop of Nonlinear Signal and Image Processing* (1995), pp. 452–455.
- [44] LANGELAAR, G., VAN DER LUBBE, J. E BIEMOND, J. Copy protection for multimedia data based on labeling techniques. In *Proceedings of the 17th Symposium on Information Theory in the Benelux* (Enschede, The Netherlands, 1996), pp. 33–39.
- [45] LANGELAARR, G., VAN DER LUBBE, J. C. E LAGENDIJK, R. L. Robust labeling methods for copy protection of images. In *Proc. SPIE, Storage and Retrieval for Image and Video Databases* (Janeiro 1997), I. K. Sethi and R. C. Jain, Eds., vol. 3022 of *Presented at the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference*, pp. 298–309.
- [46] LIN, C., WU, M., BLOOM, J., COX, I., MILLER, M. E LUI, Y. Rotation, Scale, and Translation Resilient Watermarking for Images. *IEEETIP: IEEE Transactions on Image Processing 10* (2001).
- [47] LIN, Y.-R., HUANG, H.-Y. E HSU, W.-H. An embedded watermark technique in video for copyright protection. In *ICPR '06: Proceedings of the 18th International Con-*

- ference on Pattern Recognition* (Washington, DC, USA, 2006), IEEE Computer Society, pp. 795–798.
- [48] LIU, Y., ZHENG, D. E ZHAO, J. A Rectification Scheme for RST Invariant Image Watermarking. *IEICE Trans Fundam Electron Commun Comput Sci (Inst Electron Inf Commun Eng) 1* (2005), 314–318.
- [49] LOO, P. E KINGSBURY, N. Watermarking Using Complex Wavelets Resistance to Geometric Distortion. In *10th European Signal processing Conference, EUSIPCO 2000* (2000), vol. 3, European Assoc. for Signal, Speech, and Image Processing, pp. 1677–1680.
- [50] MALLAT, S. G. A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis on Machine Intelligence 11*, 7 (Julho 1989), 674–693.
- [51] MANGARAE, A. Steganography FAQ, Março 2006. zone-h.org, Acesso em Fevereiro de 2007.
- [52] MANNOS, J. L. E SAKRISON, D. J. The Effect of a Visual Fidelity Criterion on the Encoding of Images. *IEEE Information Theory IT-20(4)* (1974), 525–535.
- [53] MATHWORKS, T. MATLAB ®- the language of technical computing. <http://www.mathworks.com/products/matlab/>, Acesso em agosto de 2008.
- [54] MCGOWAN'S, J. <http://www.jmcgowan.com/avigloss.html>, Acesso em Agosto de 2008.
- [55] MEYER, F. G., AVERBUCH, A. E STRÖMBERG, J.-O. Fast Adaptive Wavelet Packet Image Compression. *IEEE Transactions on Image Processing 9*, 5 (2000), 792–800.
- [56] O'RUANAIDH, J. E PUN, T. Rotation, Scale and Translation Invariant Spread Spectrum Digital Image Watermarking. *Signal Processing 66*, 3 (May 1998), 303–317.
- [57] PAQUET, A. Multiresolution Watermark Based on Wavelet Transform for Digital images. Tech. rep., Department of Electrical Engineering, University of British Columbia, 2001.

- [58] PEDRINI, H. E SCHWARTZ, W. *Análise de Imagens Digitais: Princípios, Algoritmos e Aplicações*. Editora Thomson Learning, São Paulo, SP, 2007.
- [59] PETITCOLAS, F. A., ANDERSON, R. J. E KUHN, M. G. Attacks on Copyright Marking Systems. In *Information Hiding* (1998), pp. 218–238.
- [60] PETITCOLAS, F. A. P. www.petitcolas.net/fabien/watermarking/stirmark/, Acesso em Abril de 2007.
- [61] REY, C. E DUGELAY, J.-L. A Survey of Watermarking Algorithms for Image Authentication. *EURASIP Journal on Applied Signal Processing* 6 (2002), 613–621.
- [62] SCHWARTZ, W. R. *Transformadas de Imagens: Teoria e Aplicações*, 2003. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Paraná.
- [63] SCHYNDEL, R. G. V., TIRKEL, A. Z. E OSBORNE, C. F. Towards a Robust Digital Watermark. In *Nanyang Technological University Singapore* (1995), pp. 504–508.
- [64] STOLLNITZ, E. J., DEROSE, T. D. E SALESIN, D. H. *Wavelets for Computer Graphics - Theory and Applications*. Morgan Kauffmann Publishers, Inc, San Francisco, California, United States, 1996.
- [65] SUTCU, Y., COSKUN, B., SENCAR, H. E MEMON, N. Tamper Detection Based on Regularity of Wavelet Transform Coefficients. In *ICIP07* (2007), pp. I: 397–400.
- [66] SZEPANSKI, W. A Signal Theoretic Method for Creating Forgery-proof Documents for Automatic Verification. In *1979 Carnahan Conference on Crime Countermeasures* (1979), J. S. Jackson, Ed., pp. 101–109.
- [67] TRAMMANONTIKUL, P. E AMORNRAKSA, T. Enhanced Performance of Spread Spectrum Based Image Watermarking with Small Chip-rates. *Transactions on Electrical Eng., Electronics, and Communications* 5 (Fevereiro 2007), 153–159.
- [68] TSAI, S.-J. S. Power Transformer Partial Discharge (PD) Acoustic Signal Detection using Fiber Sensors and Wavelet Analysis, Modeling, and Simulation. Dissertação de Mestrado, Virginia Polytechnic Institute and State Univeristy, 2002.

- [69] VALGRANDE, A. L. D. E SANS, D. R. Modelagem de Dados Tridimensionais Aplicada à Medicina Utilizando a Biblioteca VTK, 2005. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Paraná.
- [70] VEDALDI, A. SIFT, An open implementation of SIFT, 2006. <http://vision.ucla.edu/vedaldi/code/sift/sift.html>, Acesso em abril de 2008.
- [71] WANG, H.-J. E KUO, C.-C. J. An Integrated Progressive Image Coding and Watermark System. *Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1998. ICASSP '98. Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on* 6 (1998), 3721–3724.
- [72] WANG, J., GAO, X. E ZHONG, J. A video watermarking based on 3-d complex wavelet. In *IEEE International Conference on Image Processing* (2007), pp. V: 493–496.
- [73] WANG, Y. E PEARMAIN, A. Blind image data hiding based on self reference. *Pattern Recogn. Lett.* 25, 15 (2004), 1681–1689.
- [74] WANG, Y. E PEARMAIN, A. Blind mpeg-2 video watermarking robust against geometric attacks: A set of approaches in dct domain. *IEEE transactions on image processing* 15, 6 (June 2006), 1536–1543.
- [75] YI, J. J. Avaliação de desempenho de filtros redutores de speckle em imagens, 1999. Dissertação de conclusão de curso, Universidade Federal de Pernambuco.
- [76] ZHANG, J. E CUI, L. A New Robust Digital Watermark Technique Based on Wavelet Transform. In *Journal of Information & Computational Science* (2006), pp. 137–142.
- [77] ZHAO, Y. Dual Domain Semi-fragile Watermarking for Image Authentication. Dissertação de Mestrado, University of Toronto, 2003.
- [78] ZHENG, D., LIU, Y. E ZHAO, J. RST Invariant Digital Image Watermarking Based on a New Phase-Only Filtering Method. *Signal Process.* 85, 12 (2005), 2354–2370.
- [79] ZHENG, D., LIU, Y., ZHAO, J. E SADDIK, A. E. A Survey of RST Invariant Image Watermarking Algorithms. *ACM Comput. Surv.* 39, 2 (2007), 5.

- [80] ZHENG, D. E ZHAO, J. RST Invariant Digital Image Watermarking: Importance of Phase Information. *Electrical and Computer Engineering, 2003. IEEE CCECE 2003. Canadian Conference on* 2 (2003), 785–788.

APÊNDICE A

FILTROS PARA TRANSFORMADAS WAVELETS

As próximas subsecções mostrarão os filtros de cada base wavelet utilizada no desenvolvimento da ferramenta. Os filtros LD e HD referem-se respectivamente aos filtros passa-baixa e passa-alta para a decomposição. Os filtros LR e HR referem-se respectivamente aos filtros passa-baixa e passa alta para a reconstrução [15].

Haar

$$LD = \begin{bmatrix} 0,707107 \\ 0,707107 \end{bmatrix} \quad HD = \begin{bmatrix} -0,707107 \\ 0,707107 \end{bmatrix} \quad LR = \begin{bmatrix} 0,707107 \\ 0,707107 \end{bmatrix} \quad HR = \begin{bmatrix} 0,707107 \\ -0,707107 \end{bmatrix}$$

Daubechies 2

$$LD = \begin{bmatrix} -0,129410 \\ 0,224144 \\ 0,836516 \\ 0,482963 \end{bmatrix} \quad HD = \begin{bmatrix} -0,482963 \\ 0,836516 \\ -0,224144 \\ -0,129410 \end{bmatrix} \quad LR = \begin{bmatrix} 0,482963 \\ 0,836516 \\ 0,224144 \\ -0,129410 \end{bmatrix} \quad HR = \begin{bmatrix} -0,129410 \\ -0,224144 \\ 0,836516 \\ -0,482963 \end{bmatrix}$$

Daubechies 8

$$LD = \begin{bmatrix} -0,000117 \\ 0,000675 \\ -0,000392 \\ -0,004870 \\ 0,008746 \\ 0,013981 \\ -0,044088 \\ -0,017369 \\ 0,128747 \\ 0,000472 \\ -0,284016 \\ -0,015829 \\ 0,585355 \\ 0,675631 \\ 0,312872 \\ 0,054416 \end{bmatrix} \quad HD = \begin{bmatrix} -0,054416 \\ 0,312872 \\ -0,675631 \\ 0,585355 \\ 0,015829 \\ -0,284016 \\ -0,000472 \\ 0,128747 \\ 0,017369 \\ -0,044088 \\ -0,013981 \\ 0,008746 \\ 0,004870 \\ -0,000392 \\ -0,000675 \\ -0,000117 \end{bmatrix} \quad LR = \begin{bmatrix} 0,054416 \\ 0,312872 \\ 0,675631 \\ 0,585355 \\ -0,015829 \\ -0,284016 \\ 0,000472 \\ 0,128747 \\ -0,017369 \\ -0,044088 \\ 0,013981 \\ 0,008746 \\ -0,004870 \\ -0,000392 \\ 0,000675 \\ -0,000117 \end{bmatrix} \quad HR = \begin{bmatrix} -0,000117 \\ -0,000675 \\ -0,000392 \\ 0,004870 \\ 0,008746 \\ -0,013981 \\ -0,044088 \\ 0,017369 \\ 0,128747 \\ -0,000472 \\ -0,284016 \\ 0,015829 \\ 0,585355 \\ -0,675631 \\ 0,312872 \\ -0,054416 \end{bmatrix}$$

Symlet 2

$$LD = \begin{bmatrix} -0,129410 \\ 0,224144 \\ 0,836516 \\ 0,482963 \end{bmatrix} \quad HD = \begin{bmatrix} -0,482963 \\ 0,836516 \\ -0,224144 \\ -0,129410 \end{bmatrix} \quad LR = \begin{bmatrix} 0,482963 \\ 0,836516 \\ 0,224144 \\ -0,129410 \end{bmatrix} \quad HR = \begin{bmatrix} -0,129410 \\ -0,224144 \\ 0,836516 \\ -0,482963 \end{bmatrix}$$

Symlet 5

$$\begin{aligned}
 \text{LD} = & \begin{bmatrix} 0,027333 \\ 0,029519 \\ -0,039134 \\ 0,199398 \\ 0,723408 \\ 0,633979 \\ 0,016602 \\ -0,175328 \\ -0,021102 \\ 0,019539 \end{bmatrix} &
 \text{HD} = & \begin{bmatrix} -0,019539 \\ -0,021102 \\ 0,175328 \\ 0,016602 \\ -0,633979 \\ 0,723408 \\ -0,199398 \\ -0,039134 \\ -0,029519 \\ 0,027333 \end{bmatrix} &
 \text{LR} = & \begin{bmatrix} 0,019539 \\ -0,021102 \\ -0,175328 \\ 0,016602 \\ 0,633979 \\ 0,723408 \\ 0,199398 \\ -0,039134 \\ 0,029519 \\ 0,027333 \end{bmatrix} &
 \text{HR} = & \begin{bmatrix} 0,027333 \\ -0,029519 \\ -0,039134 \\ -0,199398 \\ 0,723408 \\ -0,633979 \\ 0,016602 \\ 0,175328 \\ -0,021102 \\ -0,019539 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Symlet 8

$$\begin{aligned}
 \text{LD} = & \begin{bmatrix} -0,003382 \\ -0,000542 \\ 0,031695 \\ 0,007607 \\ -0,143294 \\ -0,061273 \\ 0,481360 \\ 0,777186 \\ 0,364442 \\ -0,051946 \\ -0,027219 \\ 0,049137 \\ 0,003809 \\ -0,014952 \\ -0,000303 \\ 0,001890 \end{bmatrix} &
 \text{HD} = & \begin{bmatrix} -0,001890 \\ -0,000303 \\ 0,014952 \\ 0,003809 \\ -0,049137 \\ -0,027219 \\ 0,051946 \\ 0,364442 \\ -0,777186 \\ 0,481360 \\ 0,061273 \\ -0,143294 \\ -0,007607 \\ 0,031695 \\ 0,000542 \\ -0,003382 \end{bmatrix} &
 \text{LR} = & \begin{bmatrix} 0,001890 \\ -0,000303 \\ -0,014952 \\ 0,003809 \\ 0,049137 \\ -0,027219 \\ -0,051946 \\ 0,364442 \\ 0,777186 \\ 0,481360 \\ -0,061273 \\ -0,143294 \\ 0,007607 \\ 0,031695 \\ -0,000542 \\ -0,003382 \end{bmatrix} &
 \text{HR} = & \begin{bmatrix} -0,003382 \\ 0,000542 \\ 0,031695 \\ -0,007607 \\ -0,143294 \\ 0,061273 \\ 0,481360 \\ -0,777186 \\ 0,364442 \\ 0,051946 \\ -0,027219 \\ -0,049137 \\ 0,003809 \\ 0,014952 \\ -0,000303 \\ -0,001890 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Coiflets 1

$$\begin{aligned}
 \text{LD} = & \begin{bmatrix} -0,015656 \\ -0,072733 \\ 0,384865 \\ 0,852572 \\ 0,337898 \\ -0,072733 \end{bmatrix} &
 \text{HD} = & \begin{bmatrix} 0,072733 \\ 0,337898 \\ -0,852572 \\ 0,384865 \\ 0,072733 \\ -0,015656 \end{bmatrix} &
 \text{LR} = & \begin{bmatrix} -0,072733 \\ 0,337898 \\ 0,852572 \\ 0,384865 \\ -0,072733 \\ -0,015656 \end{bmatrix} &
 \text{HR} = & \begin{bmatrix} -0,015656 \\ 0,072733 \\ 0,384865 \\ -0,852572 \\ 0,337898 \\ 0,072733 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Coiflets 2

$$\begin{aligned}
 \text{LD} = & \begin{bmatrix} -0,000721 \\ -0,001823 \\ 0,005611 \\ 0,023680 \\ -0,059434 \\ -0,076489 \\ 0,417005 \\ 0,812724 \\ 0,386110 \\ -0,067373 \\ -0,041465 \\ 0,016387 \end{bmatrix} &
 \text{HD} = & \begin{bmatrix} -0,016387 \\ -0,041465 \\ 0,067373 \\ 0,386110 \\ -0,812724 \\ 0,417005 \\ 0,076489 \\ -0,059434 \\ -0,023680 \\ 0,005611 \\ 0,001823 \\ -0,000721 \end{bmatrix} &
 \text{LR} = & \begin{bmatrix} 0,016387 \\ -0,041465 \\ -0,067373 \\ 0,386110 \\ 0,812724 \\ 0,417005 \\ -0,076489 \\ -0,059434 \\ 0,023680 \\ 0,005611 \\ -0,001823 \\ -0,000721 \end{bmatrix} &
 \text{HR} = & \begin{bmatrix} -0,000721 \\ 0,001823 \\ 0,005611 \\ -0,023680 \\ -0,059434 \\ 0,076489 \\ 0,417005 \\ -0,812724 \\ 0,386110 \\ 0,067373 \\ -0,041465 \\ -0,016387 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Biortogonal 1.3

$$\begin{aligned}
 \text{LD} = & \begin{bmatrix} -0,088388 \\ 0,088388 \\ 0,707107 \\ 0,707107 \\ 0,088388 \\ -0,088388 \end{bmatrix} &
 \text{HD} = & \begin{bmatrix} -0,000000 \\ 0,000000 \\ -0,707107 \\ 0,707107 \\ -0,000000 \\ 0,000000 \end{bmatrix} &
 \text{LR} = & \begin{bmatrix} 0,000000 \\ 0,000000 \\ 0,707107 \\ 0,707107 \\ 0,000000 \\ 0,000000 \end{bmatrix} &
 \text{HR} = & \begin{bmatrix} -0,088388 \\ -0,088388 \\ 0,707107 \\ -0,707107 \\ 0,088388 \\ 0,088388 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Biortogonal 2.2

$$\begin{aligned}
 LD &= \begin{bmatrix} 0,000000 \\ 0,176777 \\ 0,353553 \\ -1,060660 \\ 0,353553 \\ 0,176777 \end{bmatrix} &
 HD &= \begin{bmatrix} 0,000000 \\ 0,353553 \\ 0,707107 \\ 0,353553 \\ 0,000000 \\ 0,000000 \end{bmatrix} &
 LR &= \begin{bmatrix} -0,000000 \\ 0,353553 \\ -0,707107 \\ 0,353553 \\ -0,000000 \\ 0,000000 \end{bmatrix} &
 HR &= \begin{bmatrix} 0,000000 \\ -0,176777 \\ 0,353553 \\ 1,060660 \\ 0,353553 \\ -0,176777 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Biortogonal 3.1

$$\begin{aligned}
 LD &= \begin{bmatrix} -0,353553 \\ 1,060660 \\ 1,060660 \\ -0,353553 \end{bmatrix} &
 HD &= \begin{bmatrix} -0,176777 \\ 0,530330 \\ -0,530330 \\ 0,176777 \end{bmatrix} &
 LR &= \begin{bmatrix} 0,176777 \\ 0,530330 \\ 0,530330 \\ 0,176777 \end{bmatrix} &
 HR &= \begin{bmatrix} -0,353553 \\ -1,060660 \\ 1,060660 \\ 0,353553 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Biortogonal Reversa 1.3

$$\begin{aligned}
 LD &= \begin{bmatrix} 0,000000 \\ 0,000000 \\ 0,707107 \\ 0,707107 \\ 0,000000 \\ 0,000000 \end{bmatrix} &
 HD &= \begin{bmatrix} 0,088388 \\ 0,088388 \\ -0,707107 \\ 0,707107 \\ -0,088388 \\ -0,088388 \end{bmatrix} &
 LR &= \begin{bmatrix} -0,088388 \\ 0,088388 \\ 0,707107 \\ 0,707107 \\ 0,088388 \\ -0,088388 \end{bmatrix} &
 HR &= \begin{bmatrix} 0,000000 \\ -0,000000 \\ 0,707107 \\ -0,707107 \\ 0,000000 \\ -0,000000 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Biortogonal Reversa 2.2

$$\begin{aligned}
 LD &= \begin{bmatrix} 0,000000 \\ 0,000000 \\ 0,353553 \\ 0,707107 \\ 0,353553 \\ 0,000000 \end{bmatrix} &
 HD &= \begin{bmatrix} 0,176777 \\ 0,353553 \\ -1,060660 \\ 0,353553 \\ 0,176777 \\ 0,000000 \end{bmatrix} &
 LR &= \begin{bmatrix} -0,176777 \\ 0,353553 \\ 1,060660 \\ 0,353553 \\ -0,176777 \\ 0,000000 \end{bmatrix} &
 HR &= \begin{bmatrix} 0,000000 \\ -0,000000 \\ 0,353553 \\ -0,707107 \\ 0,353553 \\ -0,000000 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Biortogonal Reversa 3.1

$$\begin{aligned}
 LD &= \begin{bmatrix} 0,176777 \\ 0,530330 \\ 0,530330 \\ 0,176777 \end{bmatrix} &
 HD &= \begin{bmatrix} 0,353553 \\ 1,060660 \\ -1,060660 \\ -0,353553 \end{bmatrix} &
 LR &= \begin{bmatrix} -0,353553 \\ 1,060660 \\ 1,060660 \\ -0,353553 \end{bmatrix} &
 HR &= \begin{bmatrix} 0,176777 \\ -0,530330 \\ 0,530330 \\ -0,176777 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$