

Universidade Federal do Pampa

Evaír Borges Severo

Quantificação Automática do Glaucoma Utilizando Imagens de Fundo do Olho

Alegrete

2014

Evaír Borges Severo

Quantificação Automática do Glaucoma Utilizando Imagens de Fundo do Olho

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal do Pampa como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Ciência da Computação.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Welfer

Alegrete

2014

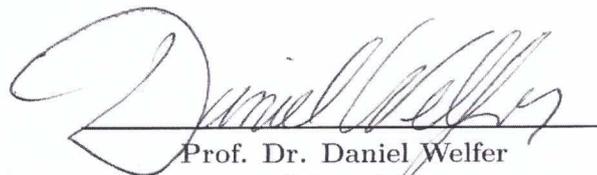
Evaír Borges Severo

Quantificação Automática do Glaucoma Utilizando Imagens de Fundo do Olho

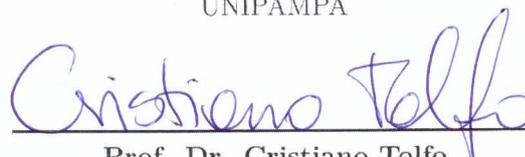
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Graduação em Ciência da Com-
putação da Universidade Federal do Pampa
como requisito parcial para a obtenção do tí-
tulo de Bacharel em Ciência da Computação.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 22 de 01 de 2015

Banca examinadora:


Prof. Dr. Daniel Welfer
Orientador


Prof. Dr. Igor Antonio Cancela
Melnik
UNIPAMPA


Prof. Dr. Cristiano Tolfo
UNIPAMPA

Agradecimentos

Em primeiro lugar e acima de tudo, agradeço a Deus, meu Pai Celestial, por ter me guiado no caminho que me trouxe até aqui. O Deus que me deu a oportunidade de viver nesta terra e, assim, obter conhecimento e me desenvolver como ser humano.

Agradeço também:

À minha família. Especialmente à meus pais, Francisco Silva Severo e Iolanda Borges Severo, pelo imenso amor e dedicação que demonstraram durante toda minha vida. Por terem me proporcionado condições de chegar até aqui.

Ao meu orientador, Professor Daniel Welfer, que através de seu conhecimento, incentivo e experiência, foi decisivo para que esse trabalho se concretizasse.

Ao Professor Claudio Schepke que, mesmo não tendo participação direta no desenvolvimento deste trabalho, muito contribuiu para o meu aprendizado, proporcionando diversas oportunidades acadêmicas.

À minha segunda mãe, Celi Paim, que me acolheu durante todo o tempo da graduação, demonstrando grande carinho e preocupação para comigo.

À todos colegas/amigos que tive a oportunidade de conhecer durante a graduação, pela convivência, apoio e aprendizado que adquiri com todos.

À Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), seus professores, funcionários, direção e todas as pessoas que auxiliam no crescimento da universidade.

Por fim, à todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Obrigado!

*“Education is the power to think clearly,
the power to act well in the world’s work,
and the power to appreciate life.”*

– BRIGHAM YOUNG

Resumo

O glaucoma é uma doença ocular crônica que afeta milhões de pessoas no mundo. Em imagens de fundo do olho, o glaucoma aparece como uma erosão no disco óptico, chamada de escavação. Essa escavação é normalmente detectada e quantificada manualmente pelo oftalmologista. Nesse contexto, o presente trabalho propõe um método automático para detectar e quantificar o grau de severidade vertical e horizontal do glaucoma em imagens de fundo do olho. Para realizar essa tarefa, é necessário detectar o disco óptico e a escavação com maior precisão possível. A detecção dessas estruturas baseia-se em técnicas de morfologia matemática. Nos experimentos, foram utilizados os bancos de imagens DIARETDB1, MESSIDOR e MESSIDOR-2, que são bancos de imagens disponibilizados publicamente. Em adição, foi utilizado um conjunto de imagens obtidas de um hospital local. Como resultados, o método de detecção da escavação obteve médias de sensibilidade e especificidade de 84,06% e 99,95% respectivamente. O método de detecção do disco óptico atingiu 92.92% de sensibilidade e 99.87% de especificidade. Por fim, a quantificação automática do grau de severidade do glaucoma, atingiu uma média de erro de 0.02 para a quantificação vertical e 0.05 na quantificação horizontal.

Palavras-chave: Processamento de imagens, morfologia matemática, glaucoma, escavação, imagens de fundo do olho.

Abstract

Glaucoma is a chronic eye disease that affects millions of people worldwide. In color eye fundus images, glaucoma appears like an erosion in the optic disk, called excavation. Usually this excavation is manually quantified by a expert. This paper proposes a morphologic-based method for detect and quantify the severity of glaucoma using color eye fundus images. To accomplish this task, it is necessary to detect the optical disk and the excavation with highest precision. The detection of these structures is based on mathematical morphology techniques. The proposed method was evaluated using images from the DIARETDB1, MESSIDOR and MESSIDOR-2 databases. In addition, local images were also used. As results, the detection method of the excavation has reached an average sensitivity and specificity of 84.06% and 99.95%, respectively. The detection method of the optic disk has reached average sensitivity and specificity of 92.92% and 99.87%, respectively. Finally, the automatic quantify of the severity of glaucoma, reached an average of error of 0.02 for the vertical quantify and 0.05 for horizontal quantify.

Key-words: Image processing, mathematical morphology, glaucoma, excavation, eye fundus images.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Imagem da retina com suas principais estruturas.	26
Figura 2 – Diferença entre imagem da retina que apresenta glaucoma e imagem da retina que não apresenta glaucoma.	27
Figura 3 – Principais objetivos do trabalho	28
Figura 4 – Divisão do disco óptico em dez partes iguais.	29
Figura 5 – Exemplos de imagens que apresentam exsudatos.	30
Figura 6 – Imagens resultantes das etapas da detecção da escavação.	43
Figura 7 – Resumo do método proposto para detecção da escavação.	44
Figura 8 – Imagens resultantes das etapas da detecção do disco óptico.	45
Figura 9 – Disco óptico segmentado	46
Figura 10 – Resumo do método proposto para detecção do disco óptico.	47
Figura 11 – Divisão da região do disco óptico e da escavação em dez partes iguais (horizontal e vertical).	48
Figura 12 – Exemplos de detecções da escavação.	52
Figura 13 – Interferência dos vasos sanguíneos na detecção do disco óptico	52
Figura 14 – Comparação entre o grau vertical calculado manualmente e o grau vertical quantificado automaticamente	54
Figura 15 – Comparação entre o grau horizontal calculado manualmente e o grau horizontal quantificado automaticamente	55

Lista de tabelas

Tabela 1 – Comparativo entre os métodos encontrados na literatura, com base nos resultados obtidos na detecção da escavação e do disco óptico.	34
Tabela 2 – Comparativo entre os métodos encontrados na literatura, com base nos resultados obtidos na quantificação automática do grau de severidade do glaucoma	35
Tabela 3 – Resultados obtidos na detecção da escavação e do disco óptico.	51
Tabela 4 – Resultados obtidos na quantificação automática do grau de severidade do glaucoma	53

Lista de abreviaturas

FN Falsos Negativos

FP Falsos Positivos

VN Verdadeiros Negativos

VP Verdadeiros Positivos

Lista de siglas

OMS Organização Mundial da Saúde

Lista de símbolos

δ	Dilatação morfológica
γ	Abertura morfológica
\mathcal{R}	Reconstrução morfológica por dilatação
\mathcal{R}^*	Reconstrução morfológica por erosão
ϕ	Fechamento morfológico
ε	Erosão morfológica
$Hmax$	Filtro <i>H-maxima</i>
$Hmin$	Filtro <i>H-minima</i>
$RMAX$	Operador de máximos regionais
$RMIN$	Operador de mínimos regionais

Sumário

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	Objetivos	26
1.2	Descrição do problema	28
1.3	Estrutura do documento	29
2	TRABALHOS RELACIONADOS	31
2.1	Métodos propostos na literatura para a detecção da escavação e do disco óptico	31
2.2	Comparativo entre trabalhos relacionados	33
2.3	Conclusão	34
3	FUNDAMENTOS DE MORFOLOGIA MATEMÁTICA	37
4	MATERIAIS E MÉTODOS	41
4.1	Materiais	41
4.2	Método proposto para a detecção da escavação	41
4.3	Método proposto para a detecção do disco óptico	44
4.4	Quantificação do Grau de Severidade do Glaucoma	47
4.5	Conclusão	47
5	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	49
5.1	Métricas utilizadas na avaliação dos métodos implementados	49
5.2	Resultados obtidos nos métodos de detecção da escavação e do disco óptico	50
5.3	Resultados obtidos na quantificação do grau de severidade do glaucoma	53
5.4	Conclusão	54
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
	Referências	59
	Índice	61

1 Introdução

O fundo ocular é constituído pela retina, que consiste em uma camada de tecido no qual reveste o interior do olho humano. A [Figura 1](#) mostra uma imagem de retina, onde são informadas as suas principais estruturas.

Diversas doenças oftalmológicas se manifestam na retina, tais como Retinopatia Diabética e Glaucoma ([ABRÀMOFF; GARVIN; SONKA, 2010](#)). Glaucoma é uma doença ocular causada pelo aumento da pressão intraocular, levando à progressiva lesão do nervo óptico. Conforme [Lim e Goldberg \(2010\)](#), o glaucoma é considerado a segunda maior causa de cegueira no mundo, perdendo apenas para a catarata.

Dados da Organização Mundial da Saúde ([OMS](#)) indicam que aproximadamente 65 milhões de pessoas já foram diagnosticadas com glaucoma em todo o mundo. [Quigley e Broman \(2006\)](#) publicaram uma estimativa do número de pessoas com glaucoma no mundo, onde foi previsto que, até 2020, a doença afete cerca de 80 milhões de pessoas.

No Brasil, estima-se que exista em torno de 1 milhão de pessoas com glaucoma. Deste total, 50% não tem conhecimento de sua doença ([ABRAG, 2009](#)). Na Europa, até 2005 o glaucoma já atingia cerca de 5% da população com mais de 65 anos. Cerca de 10% dos europeus com mais de 40 anos encontram-se ainda em risco de vir a contrair esta doença ([SOEIRO, 2010](#)). Um estudo realizado na Austrália, e que procura estimar a prevalência de glaucoma entre 2000 e 2030, prevê uma duplicação do número de pacientes com glaucoma nesse intervalo de tempo ([ROCHTCHINA; MITCHELL, 2000](#)).

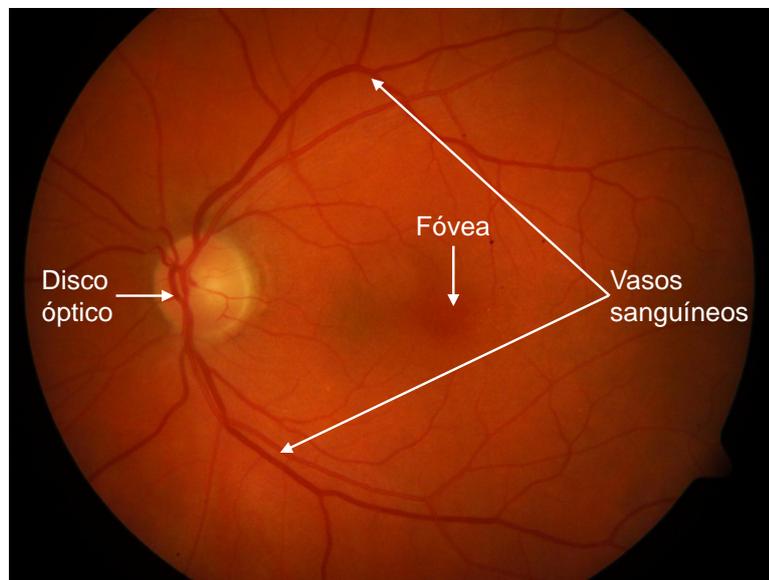
Muitos pacientes com glaucoma não sabem da doença até que ela tenha alcançado um estágio mais avançado. Isso ocorre pois o glaucoma é assintomático em seus estágios iniciais. Assim, a detecção precoce e o subsequente tratamento da doença são fundamentais para retardar a sua progressão ([MICHELSON et al., 2008](#)).

Imagens de fundo do olho são amplamente utilizadas no diagnóstico de várias doenças oculares, incluindo o glaucoma. Nessas imagens, o glaucoma é caracterizado pelo aumento da escavação, localizada no centro do disco óptico, como mostra a [Figura 2\(a\)](#). Através da [Figura 2\(a\)](#) e [Figura 2\(b\)](#) é possível visualizar a diferença de uma retina saudável para uma retina que apresenta glaucoma, ou seja, percebe-se a escavação como uma região de maior intensidade dentro do disco óptico. Na área de oftalmologia, o diagnóstico de diversas doenças implica na análise de um grande número de imagens, mesmo para um único paciente. No diagnóstico do glaucoma, grande parte do processo de análise das imagens ainda é feito manualmente, o que resulta em uma elevada carga de trabalho para os oftalmologistas. Portanto, métodos computacionais que realizam a triagem automática da doença são muito úteis. Por meio destes métodos, é possível reduzir

a carga de trabalho, facilitando o acompanhamento da doença através do diagnóstico automatizado. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo propor um método para detecção e quantificação automática do grau de severidade vertical e horizontal do glaucoma em imagens da retina.

Este capítulo apresenta na [seção 1.1](#) os objetivos gerais e específicos deste trabalho. Na [seção 1.2](#) é feita a descrição do problema da quantificação automática do grau de severidade do glaucoma. Por fim, na [seção 1.3](#) é apresentada uma descrição sucinta dos demais capítulos.

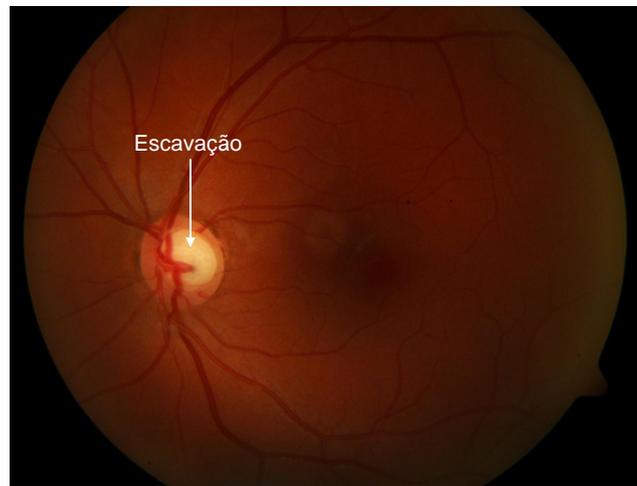
Figura 1 – Imagem da retina com suas principais estruturas.



1.1 Objetivos

O objetivo geral desse trabalho é desenvolver um método automático para quantificar o grau de severidade vertical e horizontal do glaucoma em imagens de fundo do olho. O procedimento padrão, realizado manualmente por oftalmologistas, consiste em calcular uma medida quantitativa do tamanho da escavação em relação ao tamanho do disco óptico (ver mais detalhes na [seção 1.2](#)). Portanto, para se obter essa medida automaticamente a partir de imagens de fundo do olho, a escavação e o disco óptico devem ser primeiramente detectados. A [Figura 3](#) mostra, de forma resumida, os objetivos que pretende-se alcançar neste trabalho. Como objetivos específicos, podem ser citados os seguintes:

Figura 2 – Diferença entre imagem da retina que apresenta glaucoma e imagem da retina que não apresenta glaucoma.



(a)

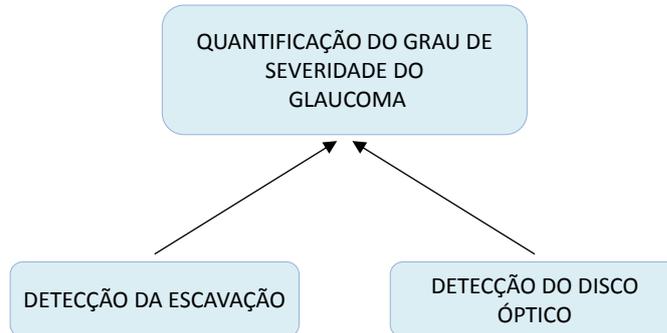


(b)

(a) Retina que apresenta glaucoma (aumento da escavação na região do disco óptico); (b) Retina saudável

- Utilizar imagens de fundo do olho e técnicas de morfologia matemática para detectar automaticamente o disco óptico e a escavação;
- Utilizar bancos de imagens públicos e um conjunto de imagens obtidos de um hospital local para testar o método. Os bancos de imagens são: DIARETDB1 ([KAUPPI et al., 2007](#)), MESSIDOR e MESSIDOR-2;
- Avaliar a precisão dos métodos propostos para detecção da escavação e do disco óptico. Para isso, utilizar medidas de sensibilidade, especificidade, valor preditivo, sobreposição e coeficiente de Dice;
- Avaliar a precisão do diagnóstico automático do grau de severidade do glaucoma.

Figura 3 – Principais objetivos do trabalho



1.2 Descrição do problema

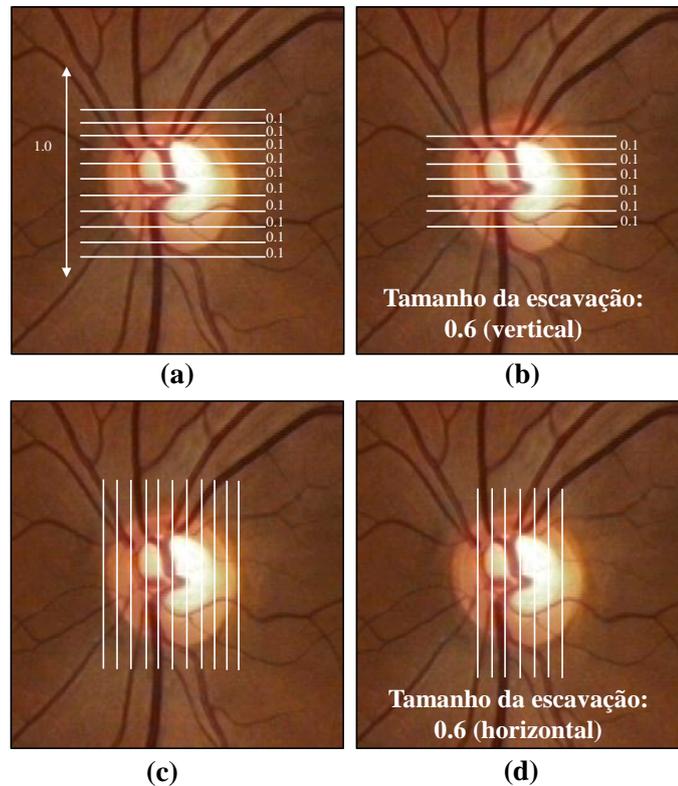
O problema deste trabalho consiste em desenvolver um método automático para quantificar o grau de severidade vertical e horizontal do glaucoma em imagens de fundo do olho. Esse problema exige a resolução de diversos subproblemas, tais como a detecção da escavação e a detecção do disco óptico. Assim, os problemas a serem resolvidos resumem-se em três principais etapas: Detecção da escavação, detecção do disco óptico e, por fim, a quantificação automática do grau de severidade do glaucoma.

O diagnóstico do glaucoma é geralmente realizado nas clínicas de oftalmologia através de procedimentos manuais, sendo calculado o grau de severidade vertical e horizontal (ZHANG et al., 2010). Segundo Wong et al. (2008), o grau de severidade do glaucoma é calculado através da razão entre o disco óptico e a escavação. Para isso, são traçadas 11 retas paralelas sobre a região do disco óptico, dividindo-o em dez partes iguais, tanto verticalmente como horizontalmente, como pode ser visualizado na Figura 4.

Na Figura 4(a)-(b) é possível observar a razão vertical entre o disco óptico e a escavação, onde o resultado calculado é de 0.6 (ou 60% do tamanho do disco óptico). Na Figura 4(c)-(d) é mostrada a razão horizontal, onde o grau também foi quantificado em 0.6.

A detecção do disco óptico e da escavação são tarefas difíceis em função de diversos fatores, como por exemplo, o baixo contraste dessas estruturas em relação ao restante da imagem. Outro fator que dificulta a detecção da escavação e do disco óptico está relacionado com a presença de retinopatias, tais como exsudatos. Os exsudatos são depósitos de lipídio de cor branca ou amarela, que podem aparecer em imagens de fundo do olho como aglomerados, formando regiões cujo tamanho e intensidade de pixels são semelhantes ao disco óptico e da escavação (PATTON et al., 2006). Como visto na Figura 5, os exsudatos

Figura 4 – Divisão do disco óptico em dez partes iguais.



(a) Disco óptico dividido verticalmente; (b) grau de severidade do vertical; (c) Disco óptico dividido horizontalmente (d) grau de severidade do horizontal

são regiões com maior luminosidade, assim como a escavação e o disco óptico.

O disco óptico e a escavação são estruturas vazadas, ou seja, não possuem uma borda fechada pois há vasos sanguíneos que partem do centro do disco óptico, como pode ser visualizado na [Figura 1](#). Assim, eliminar a interferência desses vasos também é um desafio na detecção das bordas da escavação e do disco óptico ([FRITH, 2008](#)). O grau de severidade do glaucoma pode ser quantificado corretamente somente se a detecção da escavação e do disco óptico ocorrer de forma precisa.

1.3 Estrutura do documento

Este documento está estruturado como segue:

Capítulo 2: São discutidos diversos trabalhos relacionados referentes à detecção da escavação e do disco óptico em imagens de fundo do olho.

Capítulo 3: Apresenta os principais fundamentos da morfologia matemática. Esses fundamentos são necessários para o entendimento do trabalho desenvolvido.

Figura 5 – Exemplos de imagens que apresentam exsudatos.



(a)



(b)

(a) - (b) Aglomerados de exsudatos aparecendo próximos à região da fóvea

Capítulo 4: Descreve os materiais utilizados no trabalho e o métodos desenvolvidos para detecção da escavação e do disco óptico, bem como a quantificação do grau de severidade do glaucoma.

Capítulo 5: Apresenta os resultados alcançados através dos métodos propostos, bem como as discussões sobre os mesmos.

Capítulo 6: Apresenta as considerações finais.

2 Trabalhos Relacionados

Neste capítulo são apresentados alguns trabalhos existentes que realizam a detecção da escavação e do disco óptico em imagens de fundo do olho, bem como a quantificação do grau de severidade do glaucoma. Na literatura, encontram-se diversos trabalhos que abordam esse assunto. Entretanto, os métodos propostos possuem diferentes formas de tratar os problemas de detecções e diferentes resultados. Sendo assim, este capítulo apresenta um estudo sobre os métodos encontrados na literatura.

Para avaliar e quantificar os resultados obtidos, os autores utilizam, geralmente, imagens fornecidas por hospitais. Em alguns casos, a origem das imagens e os resultados não são apresentados.

A [seção 2.1](#) apresenta cinco trabalhos da literatura relacionados à detecção da escavação e do disco óptico e quantificação do glaucoma em imagens de fundo do olho. A [seção 2.2](#) realiza um comparativo entre os resultados de cada trabalho. Por fim, a [seção 2.3](#) faz o fechamento do capítulo.

2.1 Métodos propostos na literatura para a detecção da escavação e do disco óptico

[Yin et al. \(2012\)](#) propõem um método para segmentação do disco óptico e da escavação baseado em um modelo de contorno ativo e transformada de hough. A primeira etapa consiste na detecção do disco óptico, onde o canal R (vermelho) do espaço de cores RGB é utilizado. No entanto, em imagens que apresentam baixa variação de intensidade de pixels na região do disco óptico, é realizado um pré-processamento que aumenta o contraste do disco. Em sequência, o operador de detecção de bordas Canny é usado para criar o mapa de bordas da imagem. Com isso, a Transformada de hough é aplicada, a fim de se obter o círculo que mais se assemelha com o disco óptico. O disco óptico é então utilizado como uma região de interesse para a segmentação da escavação. Nesta etapa, realiza-se a eliminação dos vasos sanguíneos, que são detectados por meio de *Local Entropy Thresholding*. Por fim, um modelo de contorno ativo é aplicado para extrair o contorno da escavação. O banco de imagens privado ORIGA foi utilizado para testar o método. Os autores quantificaram os resultados por meio do coeficiente de *Dice*, que consiste em uma medida de similaridade. Essa medida resulta em valores de 0 à 1, sendo 1 a similaridade perfeita. As médias do coeficiente de *Dice* para a detecção da escavação e do disco óptico são de 0,81 e 0,92, respectivamente. O trabalho apresenta apenas a quantificação vertical do grau de severidade do glaucoma, onde os autores reportaram

uma média de erro na quantificação de 0.15.

O método proposto por [Cheng et al. \(2013\)](#) realiza a detecção do disco óptico e da escavação usando classificação de superpixel. Na primeira etapa do método, a imagem é dividida em superpixels. Em seguida, as características de cada superpixel são extraídas, tais como cor, localização e textura. Através dessas características, é realizada uma classificação, onde a máquina de vetor suporte LIBSVM é utilizada para determinar quais superpixels pertencem à região do disco óptico. Com isso, é obtido o contorno estimado do disco óptico, onde é aplicado um modelo deformável para refinar a sua segmentação. O processo de segmentação da escavação é similar ao do disco óptico, porém não é aplicado o modelo deformável no contorno estimado da escavação. Para testar o método, foram utilizadas imagens privadas obtidas no *Singapore Malay Eye Study* (SiMES). O disco óptico e a escavação foram manualmente marcados por profissionais treinados. Como resultados, os autores relatam um erro de sobreposição de 9,5% e 24,1% para a segmentação do disco óptico e da escavação, respectivamente. O trabalho apresenta apenas a quantificação vertical do grau de severidade do glaucoma, onde foi calculada uma média de erro na quantificação de 0.08

[Stapor et al. \(2004\)](#) propõem um método para segmentação da região do disco óptico e da escavação baseado em técnicas de morfologia matemática, principalmente em Transformada Watershed e reconstrução geodésica. Na primeira fase, utilizando o canal a do espaço de cores LAB, é aplicado um operador de correção de sombra, a fim de remover as variações lentas do fundo. Após esse processo, a imagem é filtrada, eliminando as grandes variações de nível de cinza na região da escavação, causadas pelos vasos sanguíneos. Na segunda fase é aplicada a Transformada Watershed para detectar os contornos da região da escavação. Na última fase, a região do disco óptico é detectada por meio de operações de reconstrução geodésica. O método foi testado em um conjunto de 50 imagens privadas. Os autores relatam que em 48 imagens foram encontrados o contorno exato da escavação e do disco óptico. No entanto, em duas imagens o algoritmo falhou e o resultado não era aceitável. O trabalho não apresenta a quantificação do grau de severidade do glaucoma.

O método proposto por [Joshi et al. \(2011\)](#) para a segmentação do disco óptico e da escavação se baseia em um modelo de contorno ativo e em evidências anatômicas, tais como curvas de vasos. O primeiro passo consiste em localizar o disco óptico e utilizá-lo como uma região de interesse. Após isso, os segmentos dos vasos sanguíneos são identificados através de uma técnica baseada em curvatura e uma operação morfológica de fechamento. Em seguida, o detector de borda Canny é utilizado, a fim de se obter pontos de borda. Sobre esses pontos, a transformada de Hough circular é aplicada para identificar o disco óptico. Por fim, um modelo de contorno ativo é utilizado para realizar a segmentação do disco óptico. Na região do disco óptico são detectadas as curvas de vasos

relevantes, denominadas *r-bends*. Informações de luminosidade e o conjunto de curvas detectadas são utilizadas para a segmentação da escavação. O método proposto foi testado em um conjunto de imagens obtidas de um hospital. Os autores quantificaram os resultados através do Coeficiente de *Dice*, que resultou em 0,84 para a detecção da escavação e 0,97 para a detecção do disco óptico. O trabalho apresenta apenas a quantificação vertical do grau de severidade do glaucoma, onde foi calculada uma média de erro na quantificação de 0.1.

Wong et al. (2009) propõem um método para segmentação do disco óptico e da escavação baseado na detecção das curvas de pequenos vasos sanguíneos. Inicialmente, é extraída uma região de interesse que contém o disco óptico. O centro do disco óptico é determinado por um limiar, aplicado no canal vermelho da imagem. Em seguida, um método baseado em *level-set* é utilizado na região de interesse para se obter o contorno do disco óptico. Após a detecção do disco óptico, é aplicado um método de ajuste de elipse, para se obter um contorno estimado da escavação. O operador de Canny é combinado com Transformada Wavelet a fim de identificar as prováveis bordas dos vasos sanguíneos. As curvas de pequenos vasos sanguíneos são então obtidas por meio da análise das bordas dos vasos, sendo posteriormente utilizadas para se obter a segmentação da escavação. Para validar o método, foram utilizadas imagens privadas do *Singapore Eye Research Institute*. Os autores não quantificaram os resultados da detecção da escavação e do disco óptico. Entretanto, a quantificação do grau de severidade vertical do glaucoma foi realizada, onde os autores reportaram uma média de erro na quantificação de 0.093.

2.2 Comparativo entre trabalhos relacionados

A comparação dos trabalhos relacionados é realizada através dos resultados obtidos pelos autores. Para os resultados obtidos pelos métodos de detecção da escavação e do disco óptico propostos neste trabalho, foram calculadas medidas de sensibilidade e especificidade (ver mais detalhes na [Capítulo 5](#)). Além dessas medidas, também foram utilizadas as métricas adotadas nos trabalhos relacionados, a fim de comparar seus resultados com os resultados alcançados nos métodos propostos.

A [Tabela 1](#) sumariza os resultados reportados pelos autores para a detecção da escavação e do disco óptico, bem como as medidas obtidas através dos métodos propostos neste trabalho. Além disso, é especificado se os autores utilizam imagens públicas ou não.

Na [Tabela 2](#) é realizada uma comparação quanto aos resultados obtidos na quantificação do grau de severidade do glaucoma.

Tabela 1 – Comparativo entre os métodos encontrados na literatura, com base nos resultados obtidos na detecção da escavação e do disco óptico.

Autores	Utiliza imagens públicas?	Métricas
Yin et al. (2012)	Não	<u>Coefficiente de Dice</u> Detecção da escavação - 0.81 Detecção do disco óptico - 0.92
Cheng et al. (2013)	Não	<u>Erro de sobreposição</u> Detecção da escavação - 24.1% Detecção do disco óptico - 9.5 %
Stapor et al. (2004)	Não	Não descrito
Joshi et al. (2011)	Não	<u>Coefficiente de Dice</u> Detecção da escavação - 0.84 Detecção do disco óptico - 0.97
Wong et al. (2009)	Não	Não descrito
Este trabalho	Sim	<u>Sensibilidade</u> Detecção da escavação - 84.06% Detecção do disco óptico - 92.92%
		<u>Especificidade</u> Detecção da escavação - 99.95% Detecção do disco óptico - 99.87%
		<u>Erro de sobreposição</u> Detecção da escavação - 25.87% Detecção do disco óptico - 12.64%
		<u>Coefficiente de Dice</u> Detecção da escavação - 0.84 Detecção do disco óptico - 0.92

2.3 Conclusão

De forma geral, a literatura já oferece diversos métodos para detectar a escavação e o disco óptico em imagens da retina. Para realizar essa tarefa, os autores baseiam-se em diferentes abordagens, tais como classificação de pixels e transformada de *Hough*.

É importante observar que a maioria dos trabalhos encontrados na literatura não quantificam seus resultados por meio das medidas de sensibilidade e especificidade, que

Tabela 2 – Comparativo entre os métodos encontrados na literatura, com base nos resultados obtidos na quantificação automática do grau de severidade do glaucoma.

Autores	Quantificação vertical do grau de severidade	Quantificação horizontal do grau de severidade
Yin et al. (2012)	0.15	Não realiza
Cheng et al. (2013)	0.08	Não realiza
Stapor et al. (2004)	Não realiza	Não realiza
Joshi et al. (2011)	0.10	Não realiza
Wong et al. (2009)	0.09	Não realiza
Este trabalho	0.02	0.05

são medidas geralmente utilizadas para testar algoritmos de processamento de imagens. Através das métricas utilizadas pelos autores não é possível analisar com segurança a precisão dos seus métodos. Também foi observado que todos os trabalhos analisados realizam apenas a quantificação vertical do grau de severidade, o que torna-se uma limitação do método.

Outro fator importante é o conjunto de imagens utilizadas para testar os métodos. Muitos autores utilizam imagens privadas (de hospitais, por exemplo). Como não são imagens acessíveis, não é possível replicar os métodos da literatura utilizando as mesmas imagens que os autores.

3 Fundamentos de Morfologia Matemática

Este trabalho é baseado em conceitos de morfologia matemática, onde operadores morfológicos serão utilizados na detecção da escavação e do disco óptico. Neste capítulo são apresentados os conceitos básicos de Morfologia Matemática, bem como os principais operadores morfológicos.

A morfologia matemática foi criada na década de 60 pelos pesquisadores Georges Matheron e Jean Serra, da *École Supérieure des Mines de Paris*, em Fontainebleau, França (FACON, 1996). O princípio básico da morfologia matemática consiste em extrair informações relativas à geometria e à topologia de uma imagem a partir de um elemento estruturante (FILHO; NETO, 1999). De acordo com Facon (1996), o elemento estruturante é um conjunto definido e conhecido quanto à forma e tamanho, que é comparado ao conjunto desconhecido da imagem. Para isso, o elemento estruturante desloca-se sobre cada pixel da imagem, realizando certas operações na vizinhança do pixel analisado. O resultado dessas operações é atribuído ao pixel da nova imagem (MEDEIROS, 2003).

De acordo com ISHIKAWA (2007), a grande potencialidade da morfologia matemática é o elemento estruturante. Portanto, para se obter bons resultados através de operadores morfológicos é necessário escolher adequadamente o elemento estruturante. A forma do elemento estruturante geralmente é escolhida de acordo com algum conhecimento sobre a geometria das estruturas da imagem (SOILLE, 2003).

Os operadores de dilatação e erosão são operações básicas da morfologia matemática, onde a dilatação é denotada por δ e a erosão é denotada por ε . A dilatação de uma imagem f por um elemento estruturante B , em um determinado pixel x da imagem, é o valor máximo da imagem cuja vizinhança foi definida pelo elemento estruturante e está centrada em x (SOILLE, 2003). Essa operação resulta no aumento das regiões de maior intensidade da imagem e é definida de acordo com a Equação 3.1.

$$\delta^B(f)(x) = \max_{b \in B} f(x + b) \quad (3.1)$$

A erosão de uma imagem f , por um elemento estruturante B , em um determinado pixel x , é o valor mínimo da imagem cuja vizinhança foi definida pelo elemento estruturante e está centrada em x (SOILLE, 2003). A operação de erosão resulta no aumento das regiões de menor intensidade da imagem e é definida de acordo com a Equação 3.2.

$$\varepsilon^B(f)(x) = \min_{b \in B} f(x + b) \quad (3.2)$$

A partir dos operadores de dilatação e erosão, é possível definir as operações de

abertura e fechamento morfológico. A abertura morfológica, γ , de uma imagem f , é o resultado da erosão de f seguida de uma dilatação, como mostra a [Equação 3.3](#) (SOILLE, 2003). Já o fechamento morfológico, ϕ , é a operação inversa da abertura, pois primeiro é realizada a dilatação e depois a erosão (SOILLE, 2003). O operador de fechamento é definido na [Equação 3.4](#).

$$\gamma^B = \delta^B(\varepsilon^B(f)) \quad (3.3)$$

$$\phi^B = \varepsilon^B(\delta^B(f)) \quad (3.4)$$

Até aqui foram abordados operadores que utilizam uma imagem de entrada e um elemento estruturante. Entretanto, em morfologia matemática também existem os operadores geodésicos, que utilizam duas imagens de entrada, denominadas imagem marca e imagem máscara (JAHNE; GEISSLER; HAUSSECKER, 1999). Para definir os operadores geodésicos, considere uma imagem marca f e uma imagem máscara g . Assuma também que as operações de dilatação e erosão básicas são denotadas por δ e ε , respectivamente. Com isso, a dilatação geodésica de ordem n é definida na [Equação 3.5](#) e denotada por $\delta_g^{(n)}(f)$, onde $f \leq g$. Já a erosão geodésica de ordem n é definida na [Equação 3.6](#) e denotada por $\varepsilon_g^{(n)}(f)$ onde $f \geq g$ (JAHNE; GEISSLER; HAUSSECKER, 1999).

$$\delta_g^{(n)}(f) = \delta_g^{(1)}(\delta_g^{(n-1)}(f)), \text{ com } \delta_g^{(1)}(f) = \delta^B(f) \wedge g \quad (3.5)$$

$$\varepsilon_g^{(n)}(f) = \varepsilon_g^{(1)}(\varepsilon_g^{(n-1)}(f)), \text{ com } \varepsilon_g^{(1)}(f) = \varepsilon^B(f) \vee g \quad (3.6)$$

onde n representa o número de dilatações ou erosões sucessivas de f em relação a g , \wedge e \vee representam os operadores de mínimo e máximo e B é o elemento estruturante utilizado para a dilatação ou erosão elementar.

Se as operações de dilatação ou erosão geodésica forem realizadas sucessivamente até a estabilidade, é possível obter os operadores de reconstrução morfológica. O operador de reconstrução por dilatação é denotado por $\mathcal{R}_g(f)$ e definido de acordo com a [Equação 3.7](#). Já o operador de reconstrução por erosão é denotado por $\mathcal{R}_g^*(f)$ e definido na [Equação 3.8](#) (JAHNE; GEISSLER; HAUSSECKER, 1999).

$$\mathcal{R}_g(f) = \delta_g^{(i)}(f), \text{ onde } i \text{ é tal que } \delta_g^{(i)}(f) = \delta_g^{(i+1)}(f) \quad (3.7)$$

$$\mathcal{R}_g^*(f) = \varepsilon_g^{(i)}(f), \text{ onde } i \text{ é tal que } \varepsilon_g^{(i)}(f) = \varepsilon_g^{(i+1)}(f) \quad (3.8)$$

Por meio dos operadores de reconstrução por dilatação e erosão, é possível definir os operadores de máximos e mínimos regionais. O máximo regional de uma imagem f , denotado por $RMAX(f)$ e definido na [Equação 3.9](#), é um conjunto de pixels conectados de valor t que são cercados por pixels de valor estritamente menor que t . Já o mínimo regional de uma imagem f , denotado por $RMIN(f)$ e definido de acordo com a [Equação 3.10](#), é um conjunto de pixels conectados de valor t que são cercados por pixels de valor estritamente maior que t ([DOUGHERTY; LOTUFO, 2003](#)) ([JAHNE; GEISSLER; HAUSSECKER, 1999](#)).

$$RMAX(f) = f + 1 - \mathcal{R}_{f+1}(f) \quad (3.9)$$

$$RMIN(f) = \mathcal{R}_f^*(f + 1) - f \quad (3.10)$$

Os operadores de reconstrução por dilatação e erosão também definem as Transformadas *H-maxima* e *H-minima*. A Transformada *H-maxima* de uma imagem f , denotada por $Hmax(f)$, remove todos os picos conectados (região de alto contraste) que apresentem um contraste menor que um limiar h . Já a transformada *H-minima* remove todos os vales conectados (regiões de baixo contraste) que apresentam contraste menor que o limiar h ([SOILLE, 2003](#)) ([DOUGHERTY; LOTUFO, 2003](#)). As Transformadas *H-maxima* e *H-minima* são definidas de acordo com a [Equação 3.11](#) e [Equação 3.12](#), respectivamente.

$$Hmax_h(f) = \mathcal{R}_f(f - h) \quad (3.11)$$

$$Hmin_h(f) = \mathcal{R}_f^*(f + h) \quad (3.12)$$

4 Materiais e Métodos

Neste capítulo serão apresentados os materiais utilizados na realização deste trabalho, bem como os métodos desenvolvidos para detecção automática da escavação e do disco óptico e quantificação do grau de severidade do glaucoma.

4.1 Materiais

O objetivo desta seção é apresentar os materiais utilizados para implementar, testar e validar os métodos apresentados neste trabalho.

O métodos propostos foram implementados em MATLAB (MATHWORKS, 1994), onde utilizou-se os operadores morfológicos presentes na biblioteca MMORPH (2008) (DOUGHERTY; LOTUFO, 2003). As imagens utilizadas neste trabalho foram obtidas de três bancos de imagens públicos, sendo eles: DIARETDB1 (KAUPPI et al., 2007), MESSIDOR e MESSIDOR-2. Além destes, também foi utilizado um conjunto de imagens fornecidas por um hospital local.

O DIARETDB1 possui imagens coloridas da retina de 1500 x 1152 pixels. De acordo com Kauppi et al. (2007), as imagens possuem diferentes características em termos de ruído e iluminação. Tais imagens foram capturadas por uma câmera de fundo de olho com campo de visão de 50°. Os bancos de imagens MESSIDOR e MESSIDOR-2 possuem imagens de 2240 x 1488 pixels. As imagens foram obtidas utilizando uma câmera com campo de visão de 45°.

DIARETDB1, MESSIDOR e MESSIDOR-2 possuem poucas imagens que apresentam glaucoma. Todas imagens com glaucoma obtidas desses bancos de imagens, juntamente com as imagens fornecidas pelo hospital, foram utilizadas neste trabalho. Além disso, as regiões da escavação e do disco óptico presentes nas imagens utilizadas foi marcada manualmente. Essa marcação foi utilizada como *ground truth*, a fim de validar os métodos na etapa de testes.

4.2 Método proposto para a detecção da escavação

Por meio da comparação de vários espaços de cores, observou-se que o canal G (verde), do espaço de cores RGB , apresenta maior contraste da região da escavação em relação ao fundo, como pode ser visualizado na Figura 6 (a).

Primeiramente, é aplicado um operador de correção de sombra no canal verde da imagem, a fim de remover as lentas variações do fundo, como é ilustrado na Figura 6 (b).

Esse operador foi inicialmente proposto por [Walter et al. \(2002\)](#) e é definido segundo a [Equação 4.1](#).

$$f_2 = f_1 - ASF(f_1) + k \quad (4.1)$$

onde k é uma constante positiva, f_1 é o canal verde da imagem original ([Figura 6 \(a\)](#)) e

$$ASF(f_1) = \phi^{(nB)}(\dots(\gamma^{(2B)}(\phi^{(B)}(\gamma^{(B)}(f_1))))\dots) \quad (4.2)$$

onde γ e ϕ são operadores de abertura e fechamento, respectivamente. A imagem gerada pelo operador ASF é o resultado de n iterações para um filtro alternado de abertura e fechamento, por um elemento estruturante B de formato circular. Com isso, se obtém uma imagem com as lentas variações do fundo, utilizada na [Equação 4.1](#).

Na segunda etapa, é aplicado o operador morfológico *Toggle*, resultando na imagem f_3 . Conforme descrito na [Equação 4.3](#), esse operador realiza a operação de erosão e a dilatação em tons de cinza, gerando uma imagem realçada ([DOUGHERTY; LOTUFO, 2003](#)). Para isso, foi utilizado um elemento estruturante em forma de cruz, com raio de 12 pixels. O resultado da aplicação do operador *Toggle* pode ser visualizado na [Figura 6 \(c\)](#).

$$f_3(x) = \begin{cases} \varepsilon^B(f_2), & \text{se } f_{2(x,y)} - \varepsilon^B(f_2) \geq \delta^B(f_2) - f_{2(x,y)} \\ \delta^B(f_2), & \text{se } f_{2(x,y)} - \varepsilon^B(f_2) < \delta^B(f_2) - f_{2(x,y)} \end{cases} \quad (4.3)$$

A fim de preencher pequenos buracos na região da escavação, causados pelos processamentos anteriores, é aplicado um operador de fechamento na imagem f_3 , com um elemento estruturante B de formato circular. Com isso, é gerada a imagem f_4 , como mostra a [Equação 4.4](#). A imagem f_4 pode ser visualizada na [Figura 6 \(d\)](#).

$$f_4 = \phi^B = \varepsilon^B(\delta^B(f_3)) \quad (4.4)$$

Na próxima etapa, é utilizada a Transformada *H-maxima*, resultando na imagem f_5 , como definido na [Equação 4.5](#).

$$f_5 = Hmax_h = \mathcal{R}_f(f - h) \quad (4.5)$$

onde h é o limiar usado pela Transformada *H-maxima* e \mathcal{R} é um operador de reconstrução por dilatação. Com a aplicação dessa transformada, os picos da imagem, isto é, as regiões de alto contraste, são removidas. A imagem f_5 pode ser visualizada na [Figura 6 \(e\)](#).

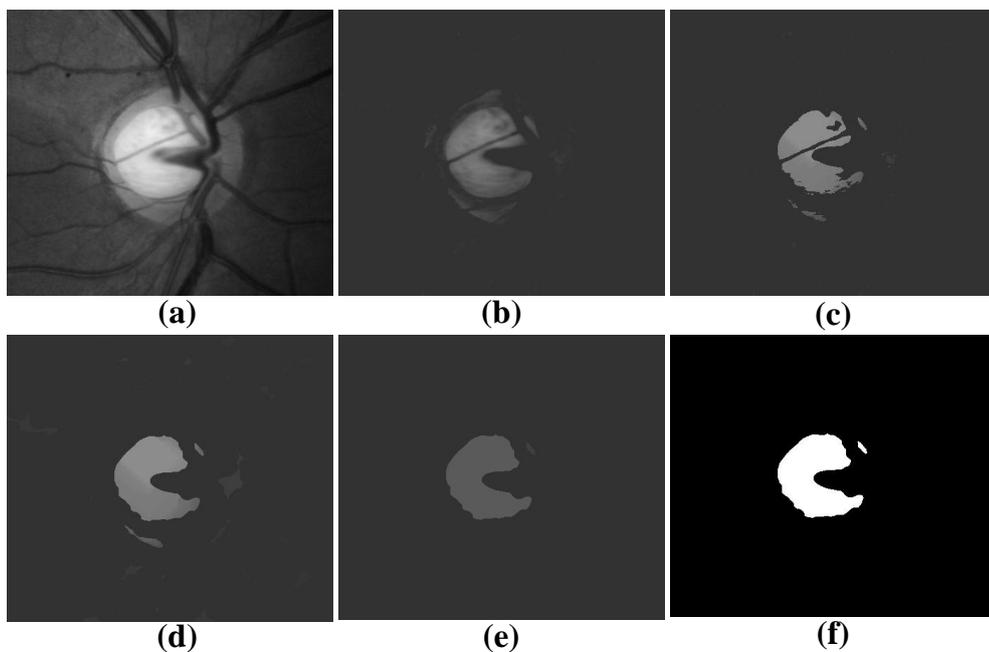
Por fim, é aplicado o operador de máximos regionais, obtendo-se a imagem binária f_6 a partir da imagem tons de cinza f_5 , como definido na [Equação 4.6](#). Nesse operador,

se um conjunto de pixels conectados de f_5 possui o mesmo nível de cinza, forma-se uma região homogênea. Se essa região possuir um valor de intensidade maior que seus pixels vizinhos, então o valor lógico “1” é atribuído para todos os pixels desse conjunto. Caso contrário, “0” é atribuído para todos os pixels do conjunto. A imagem f_6 , resultante do operador $RMAX$, contém a região da escavação detectada e pode ser visualizada na [Figura 6](#) (f).

$$f_6 = RMAX(f_5) = f_5 + 1 - R_{f_5+1}(f_5) \quad (4.6)$$

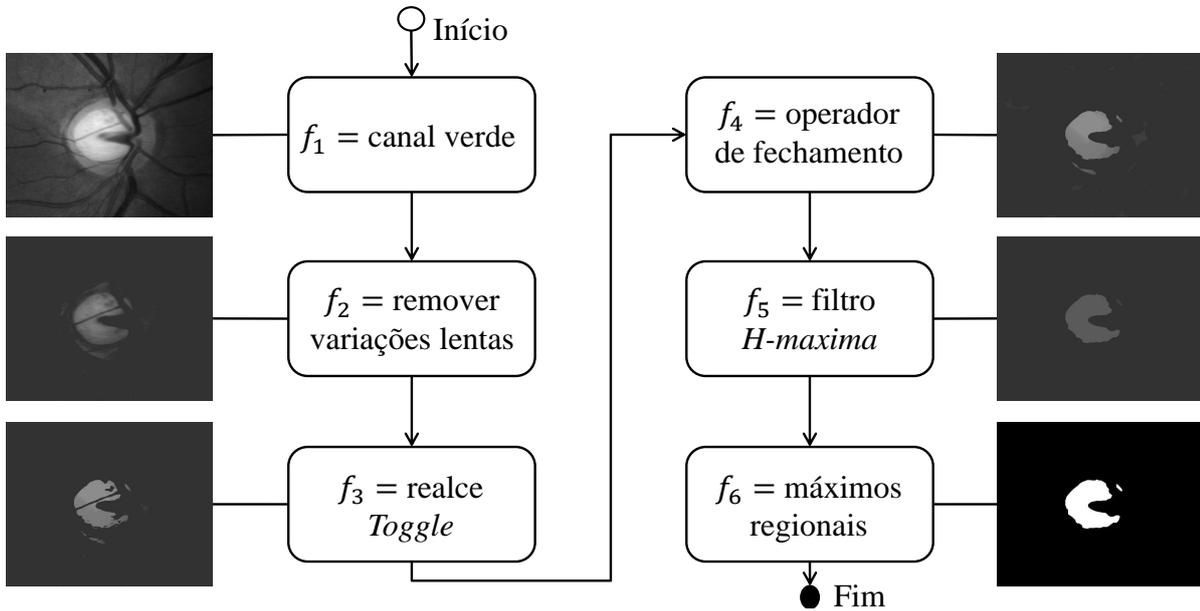
A [Figura 7](#) apresenta um fluxograma que mostra, de forma resumida, o método de detecção da escavação. A entrada do fluxograma é a imagem inicial, f_1 . No final, tem-se a escavação detectada.

Figura 6 – Imagens resultantes das etapas da detecção da escavação.



(a) f_1 - Canal verde da imagem inicial. (b) f_2 - Remoção das variações lentas do fundo. (c) f_3 - Realce *Toggle*. (d) f_4 - Operador de fechamento. (e) f_5 - Filtro *H-maxima*. (f) f_6 - Operador de máximos regionais.

Figura 7 – Resumo do método proposto para detecção da escavação.



4.3 Método proposto para a detecção do disco óptico

Inicialmente é obtido o canal R (vermelho) da imagem original, representada por f_R . A imagem original e o canal R podem ser visualizados na [Figura 8\(a\)](#) e [Figura 8\(b\)](#), respectivamente. Esse canal de cores é utilizado pois apresenta maior contraste da região do disco óptico em relação ao fundo.

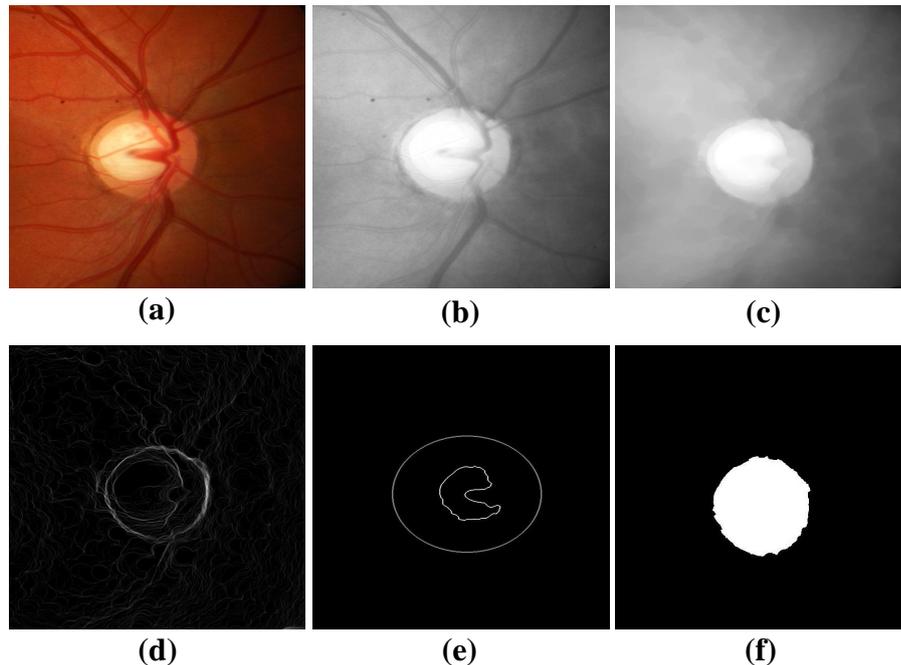
Como pode ser observado na [Figura 8\(b\)](#), diversos vasos sanguíneos partem do centro do disco óptico. A fim de reduzir a influência desses vasos sanguíneos, é aplicado um operador de fechamento morfológico na imagem f_R canal R da imagem original, como definido na [Equação 4.7](#). Assim, obtem-se a imagem f_7 , que pode ser visualizada na [Figura 8\(c\)](#).

$$f_7 = \phi^B = \varepsilon^B(\delta^B(f_R)) \quad (4.7)$$

onde f_R consiste no canal R da imagem original.

Assim, é possível aplicar a Transformada Watershed. O funcionamento dessa transformada baseia-se no princípio físico da inundação de vales. Considera-se uma imagem bidimensional em níveis de cinza, representada por uma superfície topográfica. Definem-se os mínimos regionais da imagem como as regiões conexas na superfície topológica que apresentam intensidade constante (zonas planas) e menor do que a intensidade

Figura 8 – Imagens resultantes das etapas da detecção do disco óptico.



(a) - Imagem Original. (b) f_R - Canal R (vermelho) da imagem original. (c) f_7 - Operador de fechamento. (d) f_8 - Gradiente Morfológico da imagem f_7 . (e) $f_{\text{marcaadores}}$ - Marcadores (interno e externo). (f) f_9 - Transformada Watershed (disco óptico detectado)

dos pontos vizinhos destas regiões (DOUGHERTY; LOTUFO, 2003). Assim, os mínimos regionais desta imagem em níveis de cinza são perfurados e a superfície é imersa na água. A água irá penetrar regularmente pelos furos e encher as bacias hidrográficas, ou seja, as regiões de contraste.

A transformada Watershed clássica é aplicada a todos os mínimos regionais de uma imagem. Esta abordagem normalmente resulta em um efeito de supersegmentação, pois muitos mínimos correspondem a ruídos, estruturas menores ou descontinuidades na imagem, que não devem dar origem a uma bacia. Uma das abordagens para evitar o problema da supersegmentação é a utilização da Transformada Watershed por Marcadores. Os marcadores são elementos utilizados para fornecer uma informação adicional a respeito das estruturas que serão segmentadas. A única diferença em relação ao processo de inundação descrito acima é que somente as regiões dos marcadores são perfuradas e inundadas. Dessa forma, a detecção do disco óptico é baseada na Transformada Watershed por marcadores.

Assim, o próximo passo consiste em se obter os marcadores e o gradiente morfológico, utilizados pela watershed.

O gradiente morfológico é gerado a partir da imagem f_7 , como definido na Equ-

ção 4.8. Com isso, obtém-se a imagem f_8 , que pode ser visualizada na Figura 8(d). O gradiente morfológico consiste em uma imagem em que cada valor de pixel indica a intensidade do contraste entre sua vizinhança.

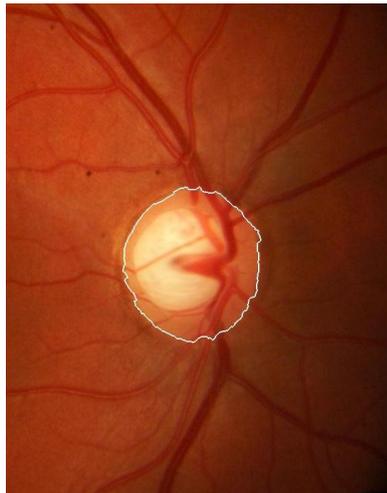
$$f_8 = \delta^B(f_7) - \varepsilon^B(f_7) \quad (4.8)$$

A Transformada Watershed faz uso de dois marcadores, interno e externo. Como marcador interno, é utilizada a região da escavação, detectada anteriormente. Como marcador externo, é utilizado um círculo, calculado a partir do centro da região da escavação e com diâmetro maior que os limites do disco óptico. Os dois marcadores (interno e externo) compõem uma imagem binária, $f_{\text{marcadores}}$, como pode ser visualizada na Figura 8(e).

Por fim, é aplicada a Transformada Watershed por marcadores, obtendo-se a imagem f_9 , que é a imagem final da detecção do disco óptico, como definido na Equação 4.9. A imagem f_9 pode ser visualizada na Figura 8(f). A Figura 9 mostra a borda detectada do disco óptico sobreposta na imagem original.

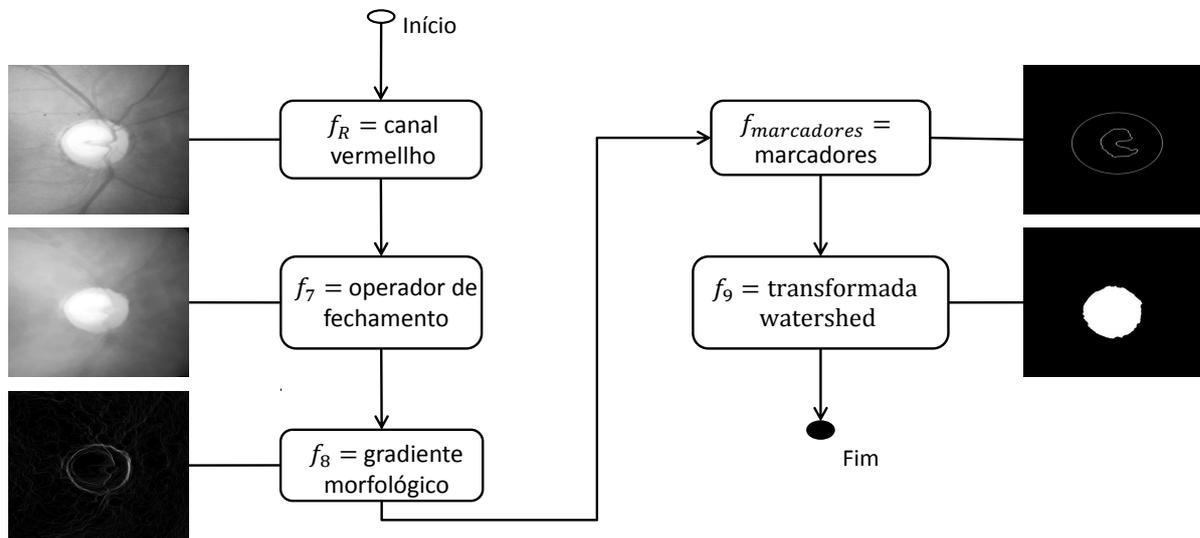
$$f_9 = WT_{f_8}^{f_{\text{marcadores}}} \quad (4.9)$$

Figura 9 – Disco óptico segmentado



Na Figura 10 é possível visualizar, em forma de fluxograma, os passos do método de detecção do disco óptico.

Figura 10 – Resumo do método proposto para detecção do disco óptico.



4.4 Quantificação do Grau de Severidade do Glaucoma

O grau de severidade do glaucoma é calculado pela razão entre o disco óptico e a escavação, como descrito na [seção 1.2](#). A escavação e o disco óptico são detectados conforme os métodos descritos anteriormente. Portanto, com as regiões dessas duas estruturas detectadas, o grau de severidade do glaucoma pode ser calculado automaticamente.

Inicialmente, é gerada uma imagem com o contorno do disco óptico e o contorno da escavação, como pode ser visualizado na [Figura 11\(a\)](#).

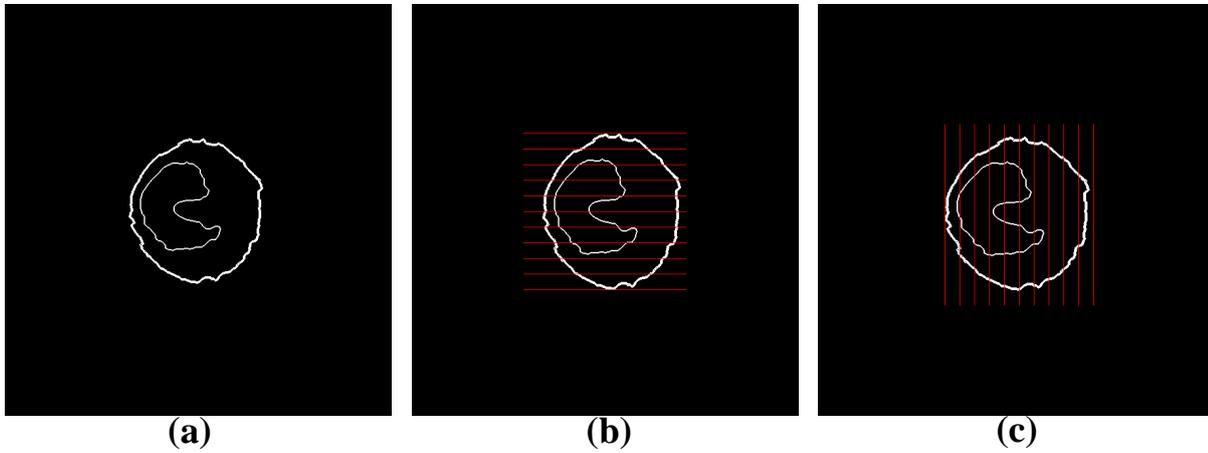
A região dessas duas estruturas é então dividida em 10 partes iguais, tanto verticalmente quanto horizontalmente. Para isso, 11 retas horizontais e verticais são traçadas a partir das extremidades do disco óptico, como mostra a [Figura 11 \(a\)](#) e [Figura 11 \(b\)](#).

Por fim, é calculado quantas dessas dez partes estão sobre a região da escavação. Assim, tem-se o grau de severidade do glaucoma vertical e horizontal.

4.5 Conclusão

Este capítulo apresentou os materiais utilizados para o desenvolvimento e validação deste trabalho, bem como os métodos implementados, baseados em morfologia matemática. Foram apresentados os passos para a detecção da escavação, juntamente com um fluxograma, mostrando o resultado do processamento da imagem em cada passo. Também são descritas as etapas para detecção do disco óptico, na qual faz uso da Trans-

Figura 11 – Divisão da região do disco óptico e da escavação em dez partes iguais (horizontal e vertical).



(a) - Bordas do disco óptico e da escavação. (b) Divisão vertical. (c) Divisão horizontal

formada Watershed para realizar a segmentação. Em adição, é descrito como é realizada a quantificação do grau vertical e horizontal do glaucoma.

5 Resultados Experimentais

Neste capítulo são apresentadas as métricas utilizadas para validar os métodos propostos. Também são apresentados os resultados obtidos através dos testes desses métodos e, por fim, os resultados na quantificação do glaucoma.

A [seção 5.1](#) descreve as quatro métricas utilizadas na avaliação dos métodos apresentados anteriormente. A [seção 5.3](#) apresenta os resultados obtidos pelos métodos de detecção da escavação, detecção do disco óptico e quantificação do grau de severidade do glaucoma. Também é apresentada uma análise desses testes.

5.1 Métricas utilizadas na avaliação dos métodos implementados

Os resultados obtidos pelos métodos são quantificados utilizando medidas de sensibilidade, especificidade, erro de sobreposição e coeficiente de *Dice*. Para isso, valores de Falsos Positivos (FP), Falsos Negativos (FN), Verdadeiros Positivos (VP) e Verdadeiros Negativos (VN) foram calculados. Além disso, para a avaliação da quantificação do grau do glaucoma foi calculado o erro de quantificação, da mesma forma que foi calculado pelos autores nos trabalhos relacionados.

Quando um pixel for classificado como pertencente à região na qual se deseja detectar, ele pode realmente pertencer à essa região (verdadeiro positivo) ou pode ter sido classificado incorretamente (falso positivo). Da mesma forma, quando um pixel for classificado como não pertencente à região que se deseja detectar, o mesmo pode realmente não pertencer à essa região (verdadeiro negativo) ou foi classificado incorretamente (falso negativo).

A sensibilidade, definida na [Equação 5.1](#), mede a capacidade do método em identificar corretamente regiões que realmente fazem parte da região buscada. Já a especificidade mede a capacidade do método em não detectar regiões que não pertencem a escavação. Essa medida é calculada de acordo com a [Equação 5.2](#).

$$\text{Sensibilidade} = \frac{VP}{VP + FN} \quad (5.1)$$

$$\text{Especificidade} = \frac{VN}{VN + FP} \quad (5.2)$$

O Coeficiente de *Dice* consiste em uma medida de similaridade, onde os valores vão de 0 à 1, sendo 1 a similaridade perfeita. A [Equação 5.3](#) define essa métrica.

$$\text{Coeficiente de Dice} = \frac{2 \times VP}{VP + FN + FP} \quad (5.3)$$

A sobreposição da área entre o *ground truth* da escavação e a escavação obtida através do método desenvolvido é estimada de acordo com a [Equação 5.4](#).

$$\text{Erro de sobreposição} = \frac{VP}{VP + FN + FP} \quad (5.4)$$

A precisão da quantificação do glaucoma foi medida através da média de erro de quantificação. Essa métrica é descrita na [Equação 5.5](#).

$$\text{Média de erro} = \frac{\sum_{i=1}^N |err_i|}{N} \quad (5.5)$$

onde N é o número de imagens testadas e err é a subtração do grau calculado manualmente pelo grau calculado automaticamente.

5.2 Resultados obtidos nos métodos de detecção da escavação e do disco óptico

A [Tabela 3](#) mostra os resultados obtidos nas medidas de sensibilidade e especificidade para os métodos de detecção da escavação e do disco óptico. Também é mostrado o cálculo das médias dessas métricas. De acordo com os resultados apresentados, observa-se que os métodos atingiram médias satisfatórias na maioria das imagens avaliadas nessa tabela.

Considerando os resultados da detecção da escavação, a *imagem #3* da [Tabela 3](#) atingiu um dos melhores resultados. Essa imagem pode ser visualizada na [Figura 12 \(a\)](#). O alto contraste entre a região da escavação e o restante do disco óptico, juntamente com a pouca influência dos vasos sanguíneos nessa região permitiram que a escavação fosse detectada corretamente, como mostra a [Figura 12 \(b\)](#). Entretanto, em alguns casos, como a *imagem #9* da [Tabela 3](#), os resultados não foram satisfatórios. Essa imagem pode ser visualizada na [Figura 12 \(c\)](#). Nessa imagem, a intensidade dos pixels entre a região da escavação e dos pixels pertencentes ao disco óptico é muito similar. Assim, o operador *H-maxima* ([Equação 4.5](#)) acabou removendo, através do seu parâmetro de limiarização, muitos pixels pertencentes à região da escavação. Conseqüentemente, o operador de máximos regionais ([Equação 4.6](#)) detectou a escavação parcialmente, como mostra a [Figura 12 \(d\)](#).

Em relação ao método de detecção do disco óptico, observou-se que a presença de vasos sanguíneos consiste no principal fator para o método ter falhado em certas imagens.

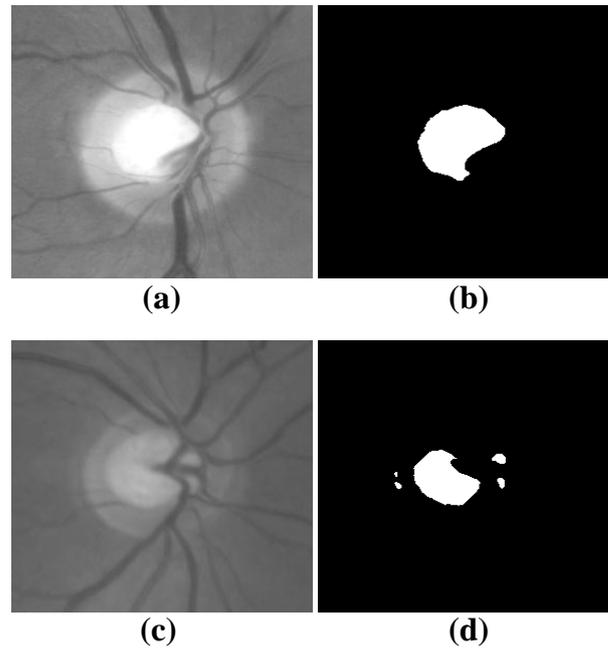
Tabela 3 – Resultados obtidos na detecção da escavação e do disco óptico.

Imagem	Detecção da escavação		Detecção do disco óptico	
	Sensibilidade	Especificidade	Sensibilidade	Especificidade
#1	92.56%	99.95%	97.81%	99.86%
#2	99.97%	99.95%	98.96%	99.92%
#3	98.51%	99.94%	97.13%	99.99%
#4	84.06%	99.97%	95.18%	99.96%
#5	97.09%	99.92%	56.39%	99.98%
#6	77.80%	99.86%	97.28%	99.93%
#7	86.45%	99.95%	61.71%	100.00%
#8	81.40%	99.96%	89.46%	99.99
#9	66.75%	99.95%	95.16%	99.96%
#10	86.42%	99.99%	95.99%	99.98%
#11	81.31%	100.00%	83.12%	99.97%
#12	95.08%	99.95%	93.74%	99.99%
#13	96.01%	99.83%	87.26%	99.97%
#14	85.65%	99.97%	60.53%	99.98%
#15	95.72%	99.92%	97.44%	99.31%
#16	72.37%	99.97%	94.30%	99.92%
#17	91.01%	99.98%	99.79%	99.16%
#18	83.92%	99.99%	99.05%	99.95%
#19	58.43%	99.97%	97.08%	99.94%
#20	97.38%	99.83%	99.96%	99.58%
#21	70.54%	99.92%	99.51%	99.88%
#22	92.99%	99.97%	96.80%	99.90%
#23	87.07%	99.97%	98.27%	99.81%
#24	87.04%	99.86%	96.70%	99.94%
#25	71.14%	99.98%	82.92%	99.98%
#26	77.19%	99.94%	97.73%	99.91%
#27	67.61%	100.00%	98.75%	99.86%
#28	76.84%	100.00%	98.87%	99.83%
#29	80.07%	99.99%	95.47%	99.98%
#30	83.42%	100.00%	89.56%	99.98%
#31	49.55%	99.95%	97.38%	99.96 %
Médias	84.06%	99.95%	92.92%	99.87%

Esses vasos sanguíneos passam sobre a região do disco óptico e em algumas imagens não foram completamente eliminados pelo operador de fechamento. Um desses casos pode ser visualizado na [Figura 13](#), onde é mostrado como os vasos sanguíneos interferem na detecção do disco óptico. Isso ocorre pois a Transformada Watershed busca, a partir de um centro, regiões de contraste, ou seja, que representam as bordas da região que se deseja detectar. Como pode ser visualizado na [Figura 13](#), os vasos sanguíneos que passam verticalmente sobre a região do disco óptico fazem com que a Transformada Watershed considere o alto contraste daquela região como as bordas do disco.

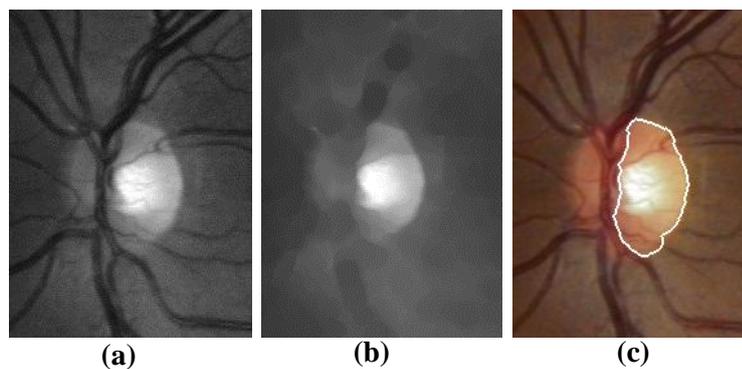
A especificidade é alta em todas as imagens testadas, tanto na a detecção da escavação quanto na detecção do disco óptico. Isso ocorre pois o método tem a capacidade de detectar poucos pixels que não fazem parte da escavação, ou seja, quanto menos pixels caracterizados como FP forem detectados, maior será a especificidade.

Figura 12 – Exemplos de detecções da escavação.



(a) – (b) Escavação que foi corretamente detectada. (c) – (d) Erros na detecção da escavação, devido ao baixo contraste da imagem.

Figura 13 – Interferência dos vasos sanguíneos na detecção do disco óptico



(a) Canal R da imagem a ser processada. (b) Operador de fechamento aplicado no canal R. (c) Detecção incorreta do disco óptico

O erro de sobreposição e o coeficiente de dice foram calculados para se realizar uma comparação com os trabalhos relacionados. Para a detecção da escavação, a média de erro de sobreposição e de coeficiente de dice foi de 25.87% e 0.84, respectivamente. Na detecção do disco óptico, a media erro de sobreposição atingiu 12.64% e o coeficiente de dice atingiu uma média de 0.92.

5.3 Resultados obtidos na quantificação do grau de severidade do glaucoma

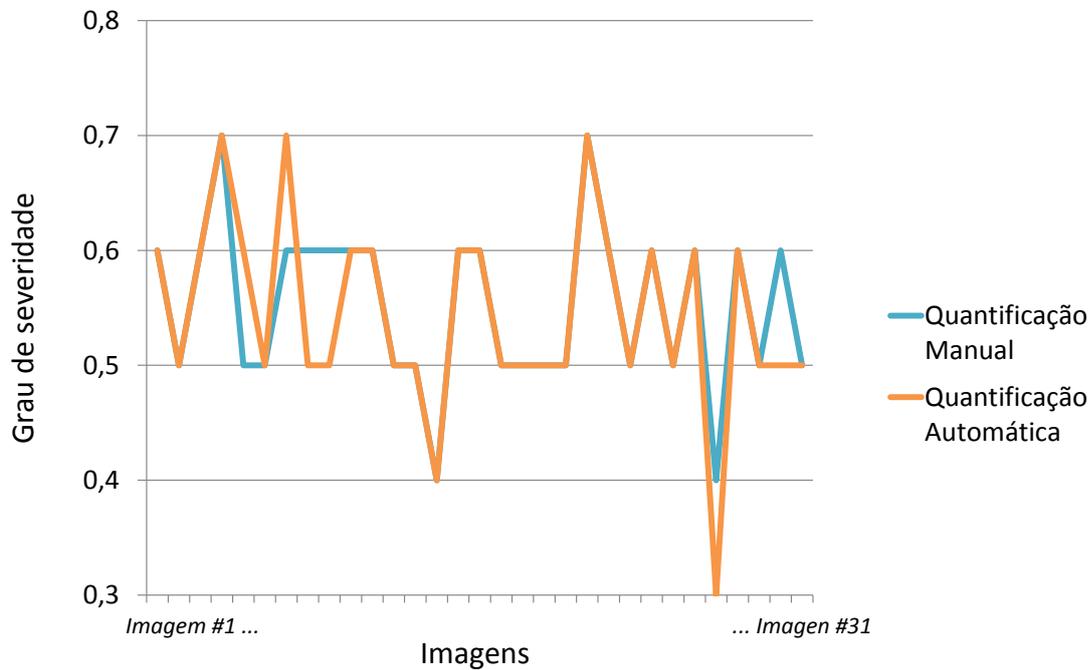
A [Tabela 3](#) mostra, para cada imagem testada, o grau de severidade (horizontal e vertical) calculado pelo método desenvolvido neste trabalho. Nesta tabela, também é mostrado o grau de severidade quantificado manualmente, ou seja, o grau real de cada imagem.

Tabela 4 – Resultados obtidos na quantificação automática do grau de severidade do glaucoma.

Imagem	Quantificação Manual		Quantificação automática	
	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal
#1	0,6	0,6	0,6	0,6
#2	0,5	0,5	0,5	0,5
#3	0,6	0,6	0,6	0,6
#4	0,7	0,7	0,7	0,7
#5	0,5	0,5	0,6	0,7
#6	0,5	0,5	0,5	0,4
#7	0,6	0,5	0,7	0,5
#8	0,6	0,5	0,6	0,5
#9	0,6	0,6	0,5	0,5
#10	0,6	0,6	0,6	0,6
#11	0,6	0,6	0,6	0,5
#12	0,5	0,5	0,5	0,5
#13	0,5	0,6	0,5	0,6
#14	0,4	0,4	0,4	0,5
#15	0,6	0,6	0,6	0,6
#16	0,6	0,6	0,5	0,4
#17	0,5	0,5	0,5	0,5
#18	0,5	0,5	0,5	0,5
#19	0,5	0,7	0,5	0,5
#20	0,5	0,4	0,5	0,4
#21	0,7	0,7	0,7	0,6
#22	0,6	0,6	0,6	0,6
#23	0,5	0,6	0,5	0,6
#24	0,6	0,5	0,6	0,5
#25	0,5	0,6	0,5	0,5
#26	0,6	0,5	0,6	0,4
#27	0,4	0,4	0,3	0,3
#28	0,6	0,5	0,6	0,4
#29	0,5	0,6	0,5	0,5
#30	0,6	0,5	0,5	0,5
#31	0,5	0,7	0,5	0,5

Observa-se na [Tabela 4](#) que a quantificação do grau de severidade vertical foi precisa na grande maioria das imagens. Foi calculada a média de erro de quantificação, o que atingiu um valor de 0,02. Na [Figura 14](#) é possível visualizar com mais clareza o comportamento dos resultados obtidos em relação à quantificação manual do grau de severidade vertical.

Figura 14 – Comparação entre o grau vertical calculado manualmente e o grau vertical quantificado automaticamente



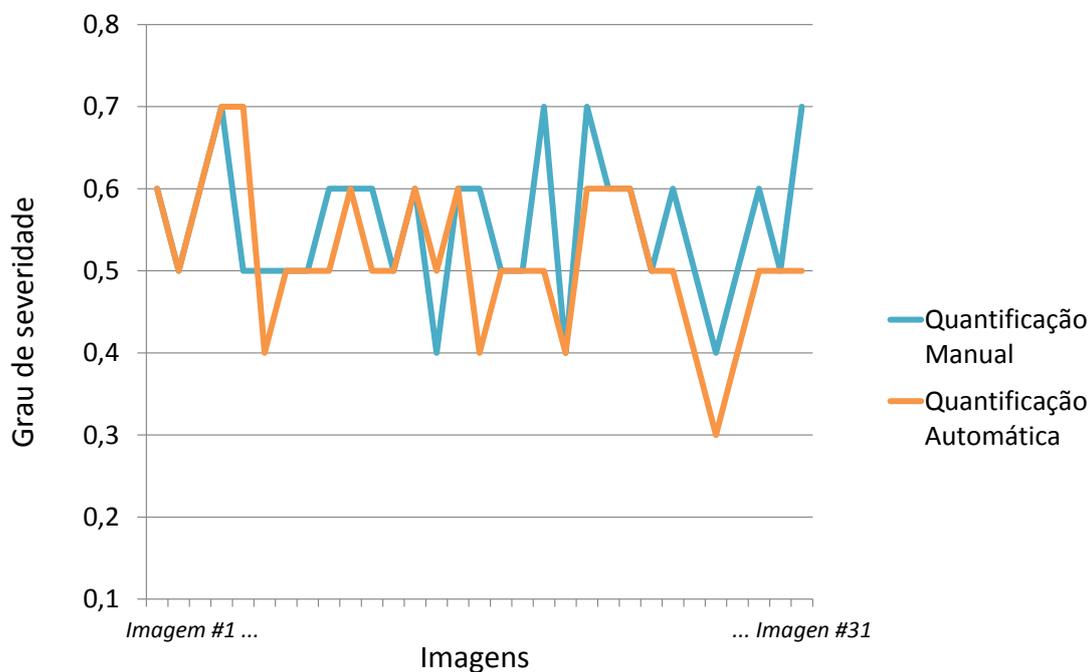
Na quantificação horizontal se obteve uma média de erro de quantificação de 0.05. Esse resultado é satisfatório, porém abaixo da quantificação vertical. Isso ocorre pois os vasos sanguíneos passam horizontalmente sobre a região da escavação e do disco óptico. Assim, os problemas na detecção dessas estruturas foram geralmente nas bordas horizontais, que são cortadas pelos vasos.

A precisão da quantificação automática do grau de severidade do glaucoma está diretamente ligada à precisão da detecção da escavação e do disco óptico. Assim, se essas estruturas não forem detectadas corretamente, a quantificação também não terá um bom resultado.

5.4 Conclusão

Este capítulo apresentou os resultados obtidos nos métodos de detecção da escavação, detecção do disco óptico e quantificação do glaucoma. Os resultados foram satisfatórios e comparáveis aos demais reportados pela literatura, mesmo não sendo possível realizar uma comparação exata, devido ao tipo de imagem que alguns autores utilizam (imagens não públicas). Os métodos elaborados são baseados em operadores morfológicos e podem ser úteis na análise de um grande número de imagens. Suas limitações referem-se

Figura 15 – Comparação entre o grau horizontal calculado manualmente e o grau horizontal quantificado automaticamente



principalmente ao baixo contraste das regiões da escavação e do disco óptico em relação ao restante da imagem e a extração de vasos sanguíneos, fazendo com que em certas imagens os métodos falhassem. De qualquer forma, as medidas atingidas mostram que o método poderia auxiliar no trabalho de especialistas em oftalmologia.

6 Considerações Finais

O glaucoma é uma doença ocular que afeta milhões de pessoas no mundo. Imagens de fundo de olho são amplamente utilizadas no diagnóstico de várias doenças oculares, incluindo o glaucoma, onde o diagnóstico é realizado manualmente. Neste contexto, este trabalho teve por objetivo desenvolver um método para quantificação automática do grau de severidade do glaucoma em imagens de fundo do olho.

O grau de severidade do glaucoma é definido de acordo com a razão entre o disco óptico e a escavação. Portanto, é necessário realizar a detecção dessas duas estruturas com maior precisão possível. Os métodos de detecção são baseados em técnicas de morfologia matemática, sendo testados em bancos de imagens públicos e em um conjunto de imagens obtidas de um hospital local.

Foram implementados métodos para a detecção da escavação e do disco óptico, o que possibilitou a quantificação do grau de severidade. Como resultados, o método de detecção da escavação atingiu 84,06% de sensibilidade e 99,95% de especificidade. O método de detecção do disco óptico atingiu 92,92% de sensibilidade e 99,87% de especificidade. Em certas imagens os métodos falharam devido ao baixo contraste da escavação e do disco óptico em relação ao restante da imagem. Outro fator que também dificultou a detecção dessas estruturas em certas imagens foi a presença dos vasos sanguíneos. A quantificação automática do grau de severidade do glaucoma obteve uma média erro de 0.02 para a quantificação vertical e 0.05 para a quantificação horizontal.

Os objetivos propostos neste trabalho foram atingidos e os resultados foram satisfatórios. A quantificação do grau de severidade do glaucoma tem por finalidade o auxílio ao diagnóstico médico. Assim, é importante deixar claro que os métodos de diagnóstico automáticos possuem falhas e, portanto, não podem ser usados de forma isolada. Esses métodos devem ser vistos como mecanismos de auxílio e otimização ao diagnóstico médico, já que através deles, um grande volume de imagens podem ser analisados em pouco tempo.

Os resultados preliminares desse trabalho foram apresentados no XIV Congresso Brasileiro de Informática em Saúde (CBIS) e no VI Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão (SIEPE). Em adição, os resultados finais serão submetidos para a Revista do IEEE América Latina.

Trabalhos futuros se concentrarão em melhorar os métodos de detecção da escavação e do disco óptico, realizando uma remoção mais precisa dos vasos sanguíneos. Assim, aumentando as medidas de sensibilidade e especificidade alcançadas neste trabalho, é possível atingir uma quantificação ainda melhor do grau de severidade vertical e horizontal

do glaucoma em imagens de fundo do olho. Além disso, pretende-se obter mais imagens de fundo de olho para realizar os testes.

Referências

- ABRAG. *Associação Brasileira dos Portadores de Glaucoma: seus amigos e familiares*. 2009. Acessado em: 03 Maio 2014. Disponível em: <http://www.abrag.org.br/>. Citado na página 25.
- ABRÀMOFF, M. D.; GARVIN, M. K.; SONKA, M. Retinal imaging and image analysis. *Biomedical Engineering, IEEE Reviews in, IEEE*, v. 3, p. 169–208, 2010. Citado na página 25.
- CHENG, J. et al. Superpixel classification based optic disc and optic cup segmentation for glaucoma screening. *IEEE*, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 32, 34 e 35.
- DOUGHERTY, E. R.; LOTUFO, R. A. Hands-on morphological image processing. In: SPIE BELLINGHAM, WA. [S.l.], 2003. Citado 4 vezes nas páginas 39, 41, 42 e 45.
- FACON, J. *Morfología matemática. Teoria e exemplos. Curitiba Brasil, CITS*, 1996. Citado na página 37.
- FILHO, O. M.; NETO, H. V. *Processamento digital de imagens*. [S.l.]: Brasport, 1999. Citado na página 37.
- FRITH, P. *The eye in clinical practice*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2008. Citado na página 29.
- ISHIKAWA, A. Detecção de rodovias em imagens digitais de alta resolução a partir do uso da teoria de morfologia matemática. 2007. *Exame geral de qualificação–Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente*, 2007. Citado na página 37.
- JAHNE, B.; GEISSLER, P.; HAUSSECKER, H. *Handbook of Computer Vision and Applications with Cdrom*. [S.l.]: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1999. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.
- JOSHI, G. et al. Optic disk and cup segmentation from monocular color retinal images for glaucoma assessment. *Medical Imaging, IEEE Transactions on, IEEE*, v. 30, n. 6, p. 1192–1205, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 32, 34 e 35.
- KAUPPI, T. et al. The diaretdb1 diabetic retinopathy database and evaluation protocol. In: *BMVC*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 1–10. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 41.
- LIM, R.; GOLDBERG, I. Glaucoma in the twenty-first century. In: *The Glaucoma Book*. [S.l.]: Springer, 2010. p. 3–21. Citado na página 25.
- MATHWORKS. *MATLAB and Simulink for Technical Computing*. 1994. <http://www.mathworks.com>. Acessado em 10/05/2014. Citado na página 41.
- MEDEIROS, N. d. G. *Segmentação morfológica aplicada a cartografia*. Tese (Doutorado) — Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade Estadual Paulista, 131p, 2003. Citado na página 37.

- MICHELSON, G. et al. The papilla as screening parameter for early diagnosis of glaucoma. *Dtsch. Arztebl. Int*, v. 105, n. 34-35, p. 583–589, 2008. Citado na página 25.
- MMORPH. *SDC Morphology Toolbox for MATLAB*. 2008. <<http://www.mmorph.com>>. Acessado em 20/06/2014. Citado na página 41.
- PATTON, N. et al. Retinal image analysis: concepts, applications and potential. *Progress in retinal and eye research*, Elsevier, v. 25, n. 1, p. 99–127, 2006. Citado na página 28.
- QUIGLEY, H. A.; BROMAN, A. T. The number of people with glaucoma worldwide in 2010 and 2020. *British Journal of Ophthalmology*, BMJ Publishing Group Ltd., v. 90, n. 3, p. 262–267, 2006. Citado na página 25.
- ROCHTCHINA, E.; MITCHELL, P. Projected number of australians with glaucoma in 2000 and 2030. *Clinical & experimental ophthalmology*, Wiley Online Library, v. 28, n. 3, p. 146–148, 2000. Citado na página 25.
- SOEIRO, A. C. d. S. Um estudo epidemiológico sobre o glaucoma. subsídios alimentares e nutricionais. Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2010. Citado na página 25.
- SOILLE, P. *Morphological image analysis: principles and applications*. [S.l.]: Springer-Verlag New York, Inc., 2003. Citado 3 vezes nas páginas 37, 38 e 39.
- STAPOR, K. et al. Segmentation of fundus eye images using methods of mathematical morphology for glaucoma diagnosis. In: *Computational Science-ICCS 2004*. [S.l.]: Springer, 2004. p. 41–48. Citado 3 vezes nas páginas 32, 34 e 35.
- WALTER, T. et al. A contribution of image processing to the diagnosis of diabetic retinopathy-detection of exudates in color fundus images of the human retina. *Medical Imaging, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 21, n. 10, p. 1236–1243, 2002. Citado na página 42.
- WONG, D. et al. Level-set based automatic cup-to-disc ratio determination using retinal fundus images in argali. In: IEEE. *Engineering in Medicine and Biology Society, 2008. EMBS 2008. 30th Annual International Conference of the IEEE*. [S.l.], 2008. p. 2266–2269. Citado na página 28.
- WONG, D. et al. Automated detection of kinks from blood vessels for optic cup segmentation in retinal images. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. *SPIE Medical Imaging*. [S.l.], 2009. p. 72601J–72601J. Citado 3 vezes nas páginas 33, 34 e 35.
- YIN, F. et al. Automated segmentation of optic disc and optic cup in fundus images for glaucoma diagnosis. In: IEEE. *Computer-Based Medical Systems (CBMS), 2012 25th International Symposium on*. [S.l.], 2012. p. 1–6. Citado 3 vezes nas páginas 31, 34 e 35.
- ZHANG, Z. et al. Optic disc region of interest localization in fundus image for glaucoma detection in argali. In: IEEE. *Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2010 the 5th IEEE Conference on*. [S.l.], 2010. p. 1686–1689. Citado na página 28.

Índice

FN, [37](#)

FP, [37](#)

OMS, [19](#)

VN, [37](#)

VP, [37](#)