

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO

VITOR FERNANDO PAMPLONA

**Estudo sobre a íris humana para síntese de
imagens fotorealísticas**

Trabalho Individual I
TI-1284

Prof. Dr. Manuel Menezes Oliveira
Orientador

Porto Alegre, 17 de julho de 2007

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| LISTA DE FIGURAS | 4 |
| RESUMO | 6 |
| ABSTRACT | 7 |
| 1 INTRODUÇÃO | 8 |
| 2 O OLHO | 12 |
| 2.1 Variedades de Olhos | 12 |
| 2.2 Campo de visão | 13 |
| 2.3 Anatomia do Olho Humano | 13 |
| 2.3.1 Córnea | 15 |
| 2.3.2 Esclera (Sclera) | 16 |
| 2.3.3 Coróide (Choroid, úvea) | 16 |
| 2.3.4 Câmara Anterior (Anterior Chamber) | 16 |
| 2.3.5 Câmara Posterior (Posterior Chamber) | 17 |
| 2.3.6 Cavidade Vítrea | 17 |
| 2.3.7 Cristalino (Crystalline lens) | 17 |
| 2.3.8 A pupila (Pupil) | 18 |
| 2.3.9 Corpo e Músculo Ciliar (Ciliary Muscle and Body) | 19 |
| 2.3.10 Retina | 20 |
| 2.3.11 Íris (Irises) | 21 |
| 3 A COR DO OLHO | 27 |
| 3.1 Os genes | 28 |
| 3.2 Classificação das Cores | 29 |
| 3.2.1 Marrons Escuros | 29 |
| 3.2.2 Castanhos claros (Hazel) | 29 |
| 3.2.3 Amarelo e Marrom amarelado | 30 |
| 3.2.4 Verdes | 30 |
| 3.2.5 Azul | 30 |
| 3.2.6 Cinza | 30 |
| 3.2.7 Violeta | 30 |
| 3.3 Algumas Doenças | 31 |
| 3.3.1 Aniridia | 31 |
| 3.3.2 Albinismo Ocular | 31 |
| 3.3.3 Heterocromia | 31 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 3.3.4 | Melanoma | 32 |
| 4 | MOVIMENTOS PUPILARES | 33 |
| 4.1 | Pupilometria | 36 |
| 5 | TRANSMISSÃO DE LUZ | 40 |
| 6 | MODELOS PARA MÚSCULOS | 42 |
| 7 | MODELOS PARA SIMULAÇÃO DE DINÂMICA PUPILAR | 43 |
| 7.1 | Modelo de Moon e Spencer 1944 | 43 |
| 7.2 | Modelo de Groot e Gebhard 1952 | 44 |
| 7.3 | Pokorny e Smith 1997 | 44 |
| 7.4 | Modelo de Longtin and Milton | 45 |
| 8 | RECONHECIMENTO DE ÍRIS | 47 |
| 9 | BANCOS DE DADOS DE FOTOS DE ÍRIS | 49 |
| 10 | SÍNTESE DE ÍRIS BIOLOGICAMENTE CORRETAS | 50 |
| 11 | CONCLUSÃO | 52 |
| | REFERÊNCIAS | 53 |
| | ASSINATURAS | 61 |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|--------------|--|----|
| Figura 1.1: | Personagem Gollum do filme Senhor dos Anéis exibe íris azul clara e com brilho forte mesmo em ambientes escuros. Imagem extraída de [66] | 9 |
| Figura 1.2: | Humano virtual que participa da apresentação do programa Fantástico na TV Globo. Proveniente de [100] | 9 |
| Figura 1.3: | Classificação dos padrões da íris segundo a Iridologia. Extraído de [82] | 10 |
| Figura 2.1: | Diferença entre campo de visão da presa e do predador. Figura retirada de [37] | 13 |
| Figura 2.2: | Diagrama mostrando as camadas do olho humano. Figura retirada de [109] | 14 |
| Figura 2.3: | Estruturas da borda externa da íris. Extraído de [29] | 15 |
| Figura 2.4: | Fluxo do Aqueous Humour [14]. | 17 |
| Figura 2.5: | Diagrama detalhado das camadas do olho. Fonte [112] | 19 |
| Figura 2.6: | Corpo Ciliar, limbo e outras estruturas do olho. Extraído de [7] | 20 |
| Figura 2.7: | Diagrama detalhado do músculo ciliar. Fonte [97] | 20 |
| Figura 2.8: | Foto detalhada mostrando as camadas internas da íris. Extraído de [7] | 22 |
| Figura 2.9: | Foto detalhada mostrando o músculo dilatador (preto externo), o sphincter (rosa) e a IPE (preto escuro). Extraído de [30] | 22 |
| Figura 2.10: | Estrutura dos Vasos Sanguíneos da Íris. Fonte [58] | 23 |
| Figura 2.11: | Um setor da íris mostrando: 1-Beira de pigmentos, 2-zona pupilar, 3-colarete, 4-zona ciliar, 5-criptas e 6 bolha de pigmentos. Fonte [68] | 24 |
| Figura 2.12: | Imagem de uma íris real. Cortesia de Cinara Cunha. | 25 |
| Figura 2.13: | Corte na íris com a seguinte legenda: (a) ABL, (b) beira de pigmentos, (c) esfíncter, (d) vasos sanguíneos, (e) fibrobastos, (f) dilataador, (g) célula pigmentada, (h) colarete, (i) stroma e (j) IPE. Fonte [65] . . | 26 |
| Figura 3.1: | O mesmo olho fotografado com iluminação diferente | 28 |
| Figura 3.2: | Íris multicolorida, marrom no centro e verde nas bordas. Fonte [110] | 29 |
| Figura 3.3: | Exemplo de Heterocromia. Fonte: [111] | 31 |
| Figura 3.4: | Melanoma na íris. Fonte: [18] | 32 |
| Figura 4.1: | Caminho parasimpático para o PLR. Source: [77] | 36 |
| Figura 5.1: | Transmissão da luz direta e total nas estruturas do olho. Fonte: [13] . | 41 |

Figura 7.1: Comparação entre os modelos de Groot e Gebhard [27], Moon e Spencer [67] e Pokorny e Smith [76]. As equações foram equiparadas convertendo as entradas de millilambert para candelas por metro quadrado. Esta conversão é direta, sendo que 1 millilambert é igual a 3.18 candelas por metro quadrado. 44

RESUMO

Este trabalho apresenta um levantamento sobre a anatomia, fisiologia e patologia do olho humano focando na região anterior, onde encontra-se a íris e o cristalino. Discute questões envolvendo o que define a cor das íris e seus padrões, como funcionam os processos de acomodação da lente e reflexo a luz da íris. Também apresenta modelos musculares e simulações para dinâmica pupilar. Além disto, apresenta informações gerais sobre reconhecimento de íris e transmissão da luz nas componentes internas do olho, sobre os bancos de dados de imagens de íris públicos e estuda algoritmos e técnicas para síntese de íris biologicamente corretas. Este estudo visa propiciar uma base teórica para o desenvolvimento de trabalhos na área de computação gráfica envolvendo a íris humana e dilatação pupilar.

Palavras-chave: Anatomia do Olho, Sistema Visual Humano, Dinâmica pupilar, Bancos de imagens de Íris, Síntese de Íris.

ABSTRACT

The purpose of this work is to survey the human eye anatomy, physiology and pathology with emphasis in the anterior chamber part where are the iris and crystalline lens. It discusses what defines the iridal color and patterns, how the accommodation and pupil light reflex work, and presents some muscle and pupil dynamic models. In addition, it presents some general information about iris recognition and light transmission inside of the eye, enumerates four public iris image databases and discusses the existing techniques for biophysically-based iris image synthesis. This work aims to create theoretical base for future works on human iris and pupil dynamics.

Keywords: Eye Anatomy, Visual Human System, Pupil Dynamics, Iris Image Database, Iris Synthesis.

1 INTRODUÇÃO

O conhecimento sobre o sistema visual humano ainda é pequeno em relação aos outros sistemas do corpo humano como, por exemplo, o sistema circulatório e o sistema ósseo. Quanto mais as pesquisas avançam, mais complexo o olho humano se mostra. Parte desta complexidade é proveniente de uma estrutura muscular chamada íris. Colorida de uma maneira diferente de qualquer outra parte do corpo, a íris é a responsável por determinar a quantidade de luz que incide sobre a retina, melhorando a percepção em ambientes com diferentes níveis de iluminação.

O estudo da íris humana tem aplicações em diversas áreas. Alguns pesquisadores da medicina acreditam que a Íris pode informá-los sobre a saúde de órgãos e sistemas do corpo. Outra grande razão é o reconhecimento e/ou autenticação de pessoas por leituras dos padrões da íris, comentada no capítulo 8. No entanto nada supera a aflição dos cientistas em não conseguirem completar, com exatidão, as informações sobre a anatomia e fisiologia de algumas partes da íris [56].

Além disso, há um esforço considerável das áreas de marketing, vendas e psicologia em decifrar as emoções humanas através do tamanho das pupilas. Se estamos excitados, ou interessados em algo que estamos vendo, nossas pupilas se dilatam. O subconsciente das pessoas entende a mensagem e passa a confiar mais na informação que aquela pessoa está passando. Ao contrário, quando estamos zangados, e/ou negativos, as nossas pupilas tendem a se contrair, mesmo em ambientes com pouca iluminação [43]. O subconsciente das outras pessoas também entende essa mensagem e produz uma resposta natural de "manter distância". Esta é uma das justificativas para a quase totalidade das fotos de publicidade serem alteradas para aumentar a pupila das modelos. Fato também constatado em relacionamentos interpessoais. Assim como essas, é possível citar várias outras pesquisas relacionadas, uma delas indica que, durante a apresentação de um tema qualquer, 83% da informação é transmitida aos espectadores pelos olhos, enquanto apenas 11% é pelos ouvidos [74].

Em computação gráfica, os trabalhos envolvendo íris têm tido como objetivo central sintetizar expressões humanas realistas. Filmes, animações, jogos, programas de TV e simuladores de comportamento humano têm sido aplicações alvo das pesquisas nesta área. Por exemplo, na Figura 1.1, o personagem Gollum do filme Senhor dos Anéis [66], exibe uma íris azul clara iluminada em um ambiente muito escuro. Neste caso, trata-se apenas de um efeito artístico para aumentar o impacto visual da imagem ou é, de fato, uma resposta realista naquelas condições de iluminação? Será que o conhecimento atual sobre as estruturas do olho humano nos permite sintetizar imagens realísticas de íris, dadas

as condições de iluminação do ambiente e parâmetros biológicos, sem a intervenção de artistas?

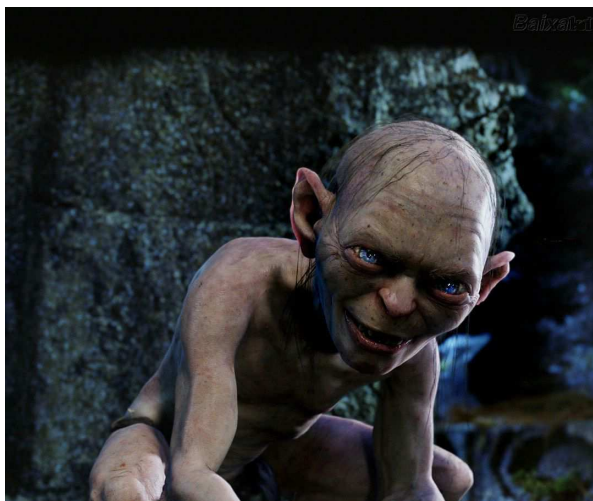


Figura 1.1: Personagem Gollum do filme Senhor dos Anéis exibe íris azul clara e com brilho forte mesmo em ambientes escuros. Imagem extraída de [66]

Pesquisadores da área de computação gráfica têm simulado o comportamento, a fisionomia e as reações do corpo humano em relação a condições ambientais, físicas e biológicas, principalmente com modelo de materiais, *subsurface scattering*, dinâmica muscular e óssea. Estas pesquisas são importantes para desenvolver e comprovar o conhecimento da ciência e, num caso mais prático, auxiliar artistas, automatizando os trabalhos em animações como no caso da apresentadora virtual Eva Byte do programa de TV Fantástico, da rede Globo. [100]. A linguagem corporal e, neste caso, a facial, transmite muita informação emocional, o que gera uma grande preocupação com a face e expressões realistas. Um descuido ou incoerência entre uma resposta real e uma virtual costuma ser facilmente percebida pelos observadores.

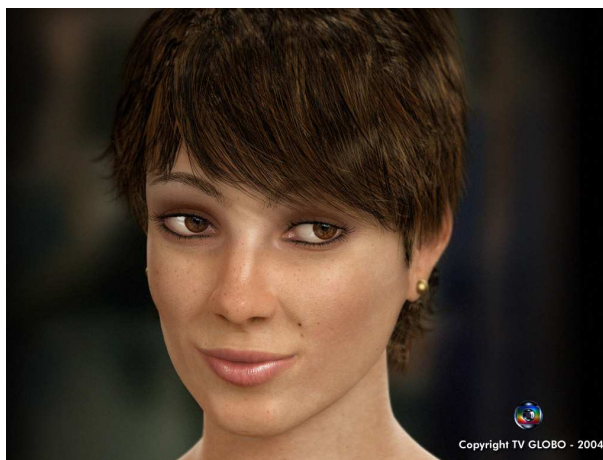


Figura 1.2: Humano virtual que participa da apresentação do programa Fantástico na TV Globo. Proveniente de [100]

Atualmente, existem 3 classes de técnicas para geração de íris:

1. **Técnicas artísticas:** baseadas na concepção de realismo do artista. Nesta categoria, o conhecimento e o subjetivismo do artista são de extrema importância. O artista procura transmitir uma sensação por meio do olhar do personagem (Figura 1.1) e frequentemente precisa alterar a íris sintética afim desta ser utilizada em diferentes cenas e ações do personagem. Essa técnica possui apenas um representante no meio científico [56], mas é muito utilizada em filmes de animação como Cars, Shrek, Bug's Life entre outros;
2. **Técnicas baseadas em imagens:** fotos de íris são coletadas e processadas tornando possível utilizar a tonalidade ou os padrões em um modelo virtual. Como esta categoria é baseada em imagens, é preciso tratar uma série de dificuldades, desde a discretização da íris real no processo de captura da image, problemas de foco e reflexão da córnea, até erros em redimensionamento dos padrões contidos na íris devido a alterações pupilares. Alguns trabalhos científicos estão contidos nesta categoria [21, 51, 63, 116, 117];
3. **Técnicas baseadas em biofísica:** modelos matemáticos são criados para descrever a forma e a cor da íris, bem como a reação de seus músculos em relação ao uso de drogas e à luminosidade do ambiente. Baseado nestas informações, novas imagens podem ser criadas por processos automáticos e adicionadas aos modelos virtuais. As diferenças entre duas íris geradas e a resolução dos detalhes são maiores nesta categoria. Apenas um trabalho [54] foi encontrado na área de computação gráfica.

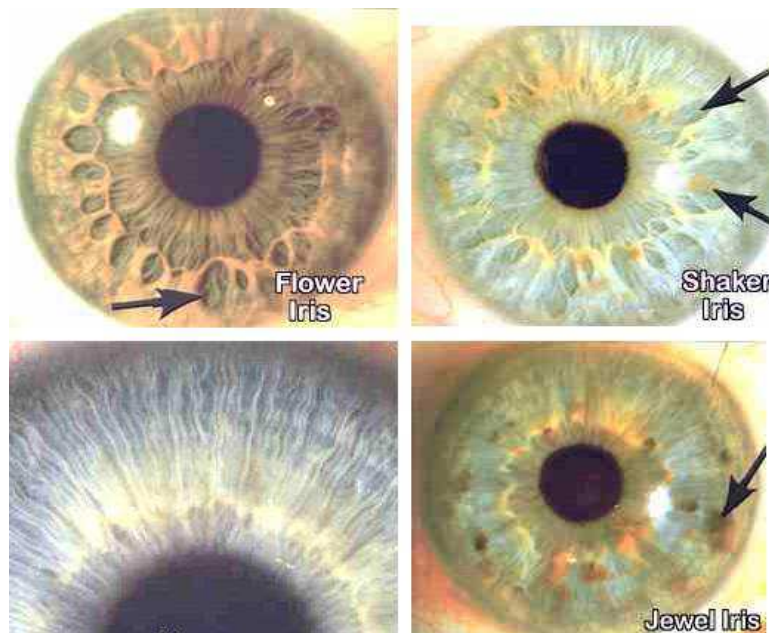


Figura 1.3: Classificação dos padrões da íris segundo a Iridologia. Extraído de [82]

Este trabalho visa compreender a anatomia, a fisiologia e patologia do olho humano, focando em sua parte anterior (Íris, Pupila e Córnea). Também discute algumas características do sistema visual, doenças e efeitos de iluminação, comenta sobre iridologia, reconhecimento e classificação de íris. No capítulo 10 explica o que é síntese de imagens biológica e fisicamente corretas, mostrando as principais técnicas já desenvolvidas e os modelos matemáticos para interação de luz, dilatação de pupila e alteração do padrão.

Estaremos interessados em entender alguns mecanismos relacionados ao funcionamento da íris humana, como tempo de latência, amplitude, velocidade do processo de contração e dilatação, quando submetida a variações de iluminação e mudanças emocionais. Os componentes internos da íris, como aglutinados de pigmentos, criptas, padrões radiais e concêntricos, vasos sanguíneos, nervos e o colarete, podem variar muito entre duas pessoas (Figura 1.3), em função da iluminação do ambiente e do uso de medicamentos. Em uma pesquisa preliminar, não encontramos nenhum trabalho que discuta o processo de deformação dos padrões da íris humana em função da dilatação pupilar. Estamos interessados em estudar e modelar este processo com vistas a sua utilização para síntese de íris realistas em aplicações de computação gráfica.

2 O OLHO

O olho é apenas uma parte do sistema visual presente em alguns seres vivos. Sua função é permitir que uma certa intensidade de luz, de um determinado ângulo de visão, encontre um painel sensível a luz, chamado de retina. Ali os raios de luz são convertidos em sinais elétricos e são transmitidos ao cérebro através do nervo óptico. Os olhos mais simples apenas informam se o ambiente está claro ou escuro, enquanto os mais complexos podem distinguir formas, cores, texturas e tamanhos nas mais variadas resoluções.

Na natureza existe uma grande variedade de formas de globos oculares. Essa variação deve-se, principalmente, a adaptação dos animais, onde o ser mais adaptado sobrevive enquanto os outros tendem a desaparecer.

2.1 Variedades de Olhos

Em muitos vertebrados e em alguns moluscos, os olhos são esféricos e preenchidos por uma substância em forma de gel chamada humor vítreo, possuem duas lentes para trabalhar o foco da imagem (cristalino e córnea), e uma íris que regula a **intensidade** da luz que entra no olho.

Em artrópodes, são encontrados os olhos ditos compostos. Este nome se dá pelo fato de existirem muitas facetas organizadas hexagonalmente, cada uma com um ângulo diferente com suas lentes e seus fotossensores, resultando em uma imagem pixelada em alta resolução. Este tipo de olho, que pode ter até 28 mil facetas e 360 graus no campo de visão, é muito sensível ao movimento.

Conforme descrito em [19], se considerarmos apenas um ângulo de visão de 120 graus, a resolução do nosso olho seria semelhante a uma câmera digital de 576 megapixels em uma taxa de 530 pixels por polegada. A sensibilidade do olho, o equivalente a ISO das máquinas fotográficas, varia entre 1 e 800. Obviamente você não vê todos aqueles pixels, mas seus olhos focam em uma certa quantidade deles o tempo todo.

Alguns dos olhos mais simples podem ser encontrados em caracóis, são chamados de Stemma e identificam apenas o quão claro está o ambiente. Possuem células fotossensíveis, mas não possuem lentes ou qualquer outro mecanismo que possa projetar a imagem vista nas células da retina. As aranhas-saltadoras, uma das mais numerosas famílias de aranhas existentes no planeta, possuem dois grandes olhos e uma série de pequenos que, junto com uma estrutura de retina mais complexa, podem ver, além do espectro visível,

a faixa ultra-violeta, o que as caracteriza como tetracromatas. Teorias indicam que os humanos também são tetracromatas [38], mas as intensidades de luz ultra violetas são bloqueadas pela córnea e pelo cristalino [26, 13].

Porém, independente da posição ou estrutura do olho, quem mais trabalha em todo o processo visual dos seres vivos é o cérebro. É responsabilidade dele converter pulsos eletroquímicos em informação, corrigir a imagem e coordenar o ajuste do foco. Devido ao desgaste natural das estruturas do olho, o cérebro aumenta o volume de correção feito sobre os pulsos com o passar dos anos. Além do desgaste natural, doenças como a catarata também danificam a visão, fato muito conhecido pelos quadros de Monet [47] antes de depois de sua cirurgia.

2.2 Campo de visão

Muitos animais, incluindo mamíferos, pássaros, répteis e peixes possuem dois olhos e, freqüentemente, seus campos de visão se sobrepõem permitindo uma maior precisão de profundidade. O campo de visão de cada olho humano é de 150 graus, mas a disposição dos dois olhos na face humana cria um ângulo de 180 graus para ambos, o que resulta em um ângulo de 120 graus que é visto por ambos os olhos [19]. A luz captada dentro deste campo de visão é enviada ao cérebro como informação sobreposta.

Em alguns organismos, os olhos estão dispostos de maneira a evitar a sobreposição, como em camaleões por exemplo. Assim os animais aumentam o seu campo de visão - que pode chegar a 360 graus - mas comprometem a precisão de profundidade na imagem. Uma das razões para este tipo de diferença é a sobrevivência, conforme pode ser visto na Figura 2.1, onde predadores possuem uma noção maior de profundidade para localizar a presa, enquanto a presa possui um campo de visão maior detectando predadores no maior número de direções possíveis.

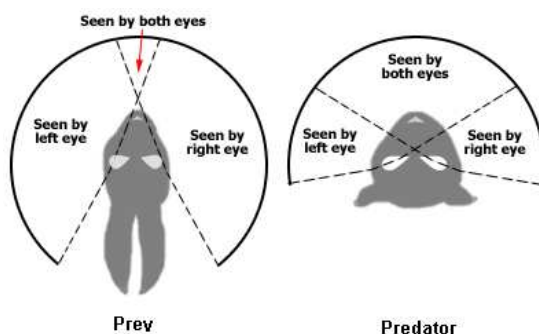


Figura 2.1: Diferença entre campo de visão da presa e do predador. Figura retirada de [37]

2.3 Anatomia do Olho Humano

O olho humano consiste em um conglomerado de estruturas, cada qual com sua função específica. O objetivo como um todo é transformar raios de luz em pulsos eletroquímicos. Estes raios primeiramente atravessam uma camada transparente, a córnea, e após um lí-

quido, também transparente, chamado humor aquoso, Figura 2.2. Neste ponto, a luz pode continuar por dois caminhos: ou ela passa pela pupila, atravessa o cristalino e posteriormente chegará a retina, ou ela se choca com a íris. No primeiro caso, o cristalino atuará como uma lente de focalização, convergindo os raios de luz para a fóvea, o ponto com maior incidência de células fotossensíveis da retina e responsável pelo foco da imagem. No segundo, a luz interagirá com camadas de colágeno e fibroblastos e será absorvida ou refletida para fora da íris [52].

O olho tem diâmetro antero-posterior de aproximadamente 24,521 milímetros [44, 52], diâmetros horizontal e vertical ao nível do equador de aproximadamente 23,48 milímetros, circunferência ao equador de 75 milímetros, pesa 7,5 gramas e tem volume de 6,5cc [99].

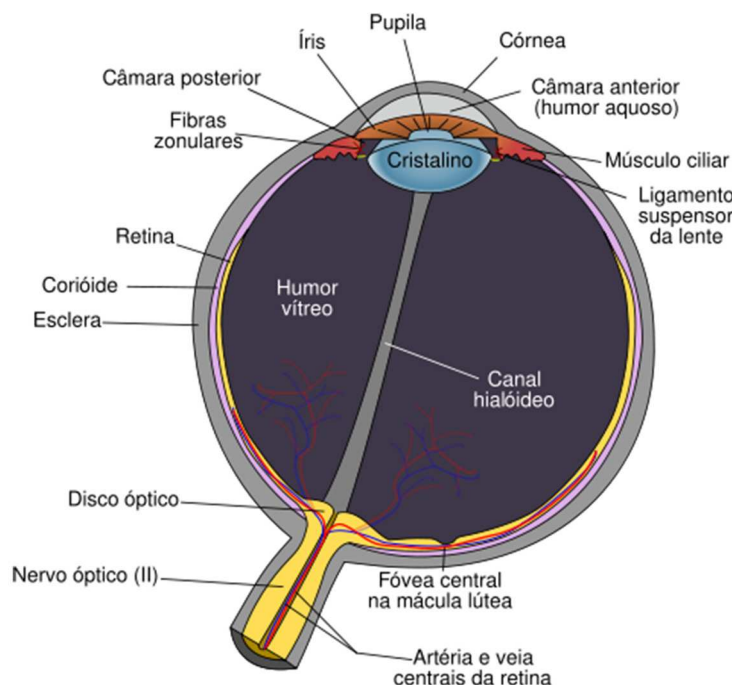


Figura 2.2: Diagrama mostrando as camadas do olho humano. Figura retirada de [109]

A estrutura do globo ocular, mostrada na figura 2.2, pode ser dividida em três camadas principais (ou túnicas) [99]:

- A Túnica Fibrosa Externa (Fibrous Tunic): é a camada mais externa do globo ocular composta pela córnea e esclera. Tem função de proteção.
- A Túnica Média ou Vascular (Vascular Tunic - uveal tract): inclui a íris, o músculo ciliar e a coróide. Como sugere o nome, é composta por vasos sanguíneos que tem função de nutrição de todas as camadas do globo ocular.
- A Túnica Nervosa Interna ou Retina (Nervous Tunic - Retina), também conhecida como túnica nervosa oculi, inclui a retina e as células fotossensíveis. É responsável por transformar a percepção em sinais eletroquímicos.

2.3.2 Esclera (Sclera)

A esclera é a grande e dura esfera que cobre cinco sextos [99] do olho humano na parte posterior (fundo). Quando vista de frente é comum ser referenciada como a parte branca do olho [14]. Ela consiste em uma camada densa e compacta (de 0.3 à 1mm [99]) de fibras de colágeno entrelaçada com elastina, tornando-a opaca. Possui o propósito de proteger os componentes internos.

Na anatomia, é muito difícil determinar a separação entre Esclera e Córnea, chamada de limbo [56], Figura 2.6. Ambos são compostos por fibras, mas a córnea possui uma cobertura externa e interna de queratina e o entrelaço entre fibras de colágeno e elastina é ortogonal. Tudo isso junto torna-a transparente [14].

2.3.3 Coróide (Choroid, úvea)

A coróide é uma fina camada posicionada entre a esclera e a retina que contém os vasos sanguíneos responsáveis pela nutrição de todas as células que compõem o olho. A coróide, nos humanos e em alguns animais diurnos, é a responsável pelo efeito de olho vermelho em fotografias. É devido aos vasos sanguíneos presentes nesta camada que a luz refletida aparece vermelha [99].

Em animais noturnos, há uma outra camada refletora atrás da camada epitelial da retina, chamada de tapetum lucidum. Como ela se encontra atrás da retina e reflete e refrata luz com vários índices de refração diferentes, os cones e bastonetes acabam sendo estimulados duas vezes e, em consequência, melhora a visão noturna dos animais. Os humanos não tem esta camada e é por isso que a nossa visão noturna não é tão boa. Dependendo da estrutura do olho e da pigmentação nela encontrada, ela pode refletir luz em várias cores dependendo da necessidade do animal: animais diurnos, noturnos, mistos, caçadores e presas [73].

Em primatas uma melanina com pigmento escuro na coróide ajuda a limitar as reflexões que poderiam resultar na percepção de imagens confusas. Em contraste, a coróide em outros animais contém materiais refletivos que ajudam a coletar a luz em situações turvas e/ou escuras. Uma visão ruim pode ser resultado da falta destes materiais que ocorre em seres albinos.

Em caso de retinoblastoma, um câncer do olho, a luz do flash refletida no fundo do olho não terá a cor vermelha, mas sim branca.

2.3.4 Câmara Anterior (Anterior Chamber)

A câmara anterior é uma camada que se situa entre a córnea e o cristalino. No seu interior existe um líquido alcalino chamado humor aquoso, semelhante a uma gelatina transparente [52]. O humor aquoso é produzido lenta e constantemente pelos processos ciliares do corpo ciliar, passa entre o cristalino e a íris e é drenado pela trama trabecular (trabecular meshwork), como pode ser visto na Figura 2.4 [14].

O humor aquoso é, normalmente, tão transparente quanto a água e possui um índice de refração de 1.336 em 500 nm[39]. Ele abre passagem para comprimentos de onda entre 220 nm e 2400nm, porém comprimentos de onda acima de 980nm começam a ser

parcialmente absorvidos. A quantidade de absorção aumenta até chegar no comprimento de onda 2400nm, onde os raios são totalmente absorvidos. O humor aquoso não sofre alteração conforme a idade do indivíduo avança [13].

Suas funções são manter o formato convexo da córnea até chegar a lente, permitir que o Cristalino altere a forma das lentes e prover nutrientes a última camada da córnea. Quando o líquido não é transparente pode indicar problemas de saúde como inflamação na íris.

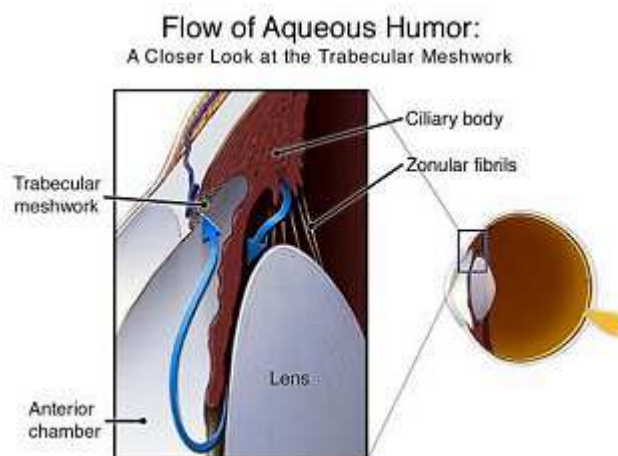


Figura 2.4: Fluxo do Aqueous Humour [14].

2.3.5 Câmara Posterior (Posterior Chamber)

A câmara posterior é uma camada que se situa entre a íris e o cristalino (Figura 2.2). No seu interior também existe o humor aquoso com o mesmo índice de refração da câmara anterior.

2.3.6 Cavidade Vítreia

A cavidade vítrea é a maior região do olho e está localizada atrás da pupila e se estende até à frente da retina. Nela, ao invés do humor aquoso, existe o humor vítreo, uma substância gelatinosa que preenche todo o espaço interno do globo ocular. O índice de refração do humor vítreo é 1.336 em 500 nm [39].

A função do humor vítreo é manter a forma do olho esférica, sustentar as lentes permitindo a mudança de curvatura e não causar refração da luz até esta chegar a retina.

2.3.7 Cristalino (Crystalline lens)

O cristalino é uma das lentes dos olhos. É muitas vezes confundido com a pupila que é apenas a abertura que torna parte do cristalino visível. Enquanto a íris regula a intensidade de luz, com movimentos de contração ou relaxamento, o cristalino, juntamente com a córnea, é quem corrige o foco da imagem, processo chamado de *acomodação*. Seu poder de refração é de 16 até 26 dioptrias [52, 39].

O cristalino é flexível e é controlado pelos músculos ciliares. Estes músculos mudam a curvatura da lente e acertam o foco para objetos tanto longe quanto próximos ao olho. Para focar em objetos próximos o cristalino torna-se mais convergente, aumentando o seu poder de refração e, em objetos distantes, torna-se menos convergente, diminuindo seu poder dióptrico [52].

O cristalino, que nunca pára de se regenerar [84], é constituído por proteínas transparentes, chamadas de cristalinos (crystallins), organizadas longitudinalmente - formato semelhante a uma casca de cebola - em 20 mil camadas concêntricas muito finas. Tem de 7 a 9 mm de comprimento no seu maior eixo e 2 a 4.5 mm de espessura, com formato parecido com uma lentilha [84]. O índice de refração é de 1.406 nas camadas centrais baixando até 1.386 nas camadas menos densas [39]. Esse decaimento no índice de refração aumenta o poder óptico da lente.

Como uma componente transparente, o cristalino permite a passagem de comprimentos de onda desde o ultravioleta até o infravermelho em 1900nm. Porém esse espaço sofre variações no decorrer da vida dos humanos. Por exemplo, enquanto um bebê pode perceber desde 300nm, um adulto com 63 anos percebe apenas as ondas com comprimento maior que 400nm. Da mesma forma, a taxa de transmissão direta, composta por raios que não sofrem nenhum efeito durante a passagem pela lente, também cai com a idade, chegando a 41% do total para pessoas com 75 anos [13, 85]. Com o envelhecimento, o cristalino pode perder sua transparência, causando borramento da visão, a chamada catarata. O tratamento consiste na sua remoção cirúrgica e na colocação de uma lente artificial em seu lugar [14].

O cristalino se liga com os músculos ciliares através de uma camada de fibras em anel chamada de fibras zonulares (Zonule of Zinn), como pode ser visto na figura 2.5.

2.3.8 A pupila (Pupil)

A pupila é um espaço vazio em forma circular, normalmente preto, definido pela margem interior da íris. Mede de 1.5 mm com muita luz até 8 mm de diâmetro com pouca luz [81]. Sua função é controlar a passagem de luz que chega até a retina [5, 28]. Quando o olho é exposto a níveis de iluminação muito elevados, a pupila se contrai (na verdade a íris dilata), efeito chamado de *Pupillary Reflex*. Quando existe pouca luz a pupila age de maneira contrária: se dilata [81]. Desta forma, ela deixa passar mais luz até a retina e permite a visão em lugares escuros. A pupila também é responsável pela proteção do olho, pois luz em excesso pode danificar a retina.

Como a pupila é um orifício, sua cor preta existe porque apenas uma pequena fração de toda a luz que entra no globo ocular consegue sair. Sua forma varia de espécie para espécie e está diretamente ligada às características ópticas da lente, forma e sensibilidade da retina e dos requerimentos de cada espécie. As pupilas de um gato, por exemplo, são elipses, ou fendas verticais, com grande dilatação em ambientes escuros. Nos répteis, a pupila pode apresentar formas muito variadas, desde uma abertura circular nas tartarugas, muitos lagartos e serpentes diurnas, uma fenda vertical nos crocodilos e serpentes noturnas e até uma fenda horizontal presente em algumas serpentes arborícolas [35].

O tamanho da pupila é independente de gênero, índice de refração ou cor da íris, mas tende a decair conforme a idade avança. Esse decaimento pode ser agravado pelo recebi-

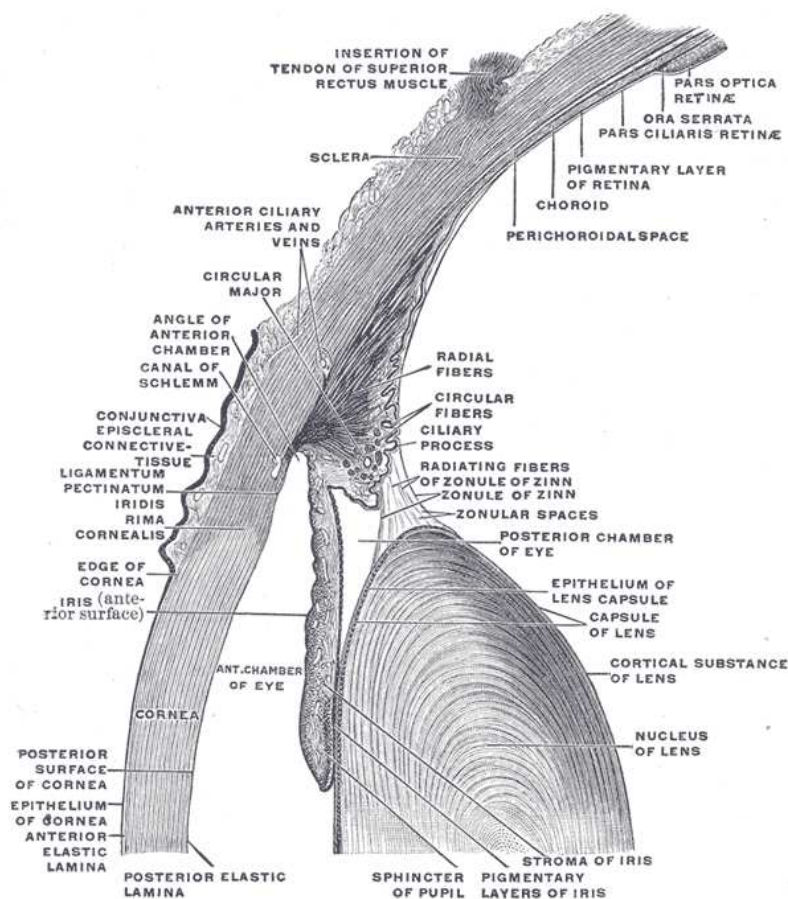


Figura 2.5: Diagrama detalhado das camadas do olho. Fonte [112]

mento de mudanças de luminância bruscas e contínuas durante a vida [10, 85]. O campo de estudo da pupila chama-se pupilografia ou pupilometria e investiga os movimentos da pupila, contração, redilatação, amplitude e velocidade.

2.3.9 Corpo e Músculo Ciliar (Ciliary Muscle and Body)

O corpo ciliar é uma parte da íris que engloba o músculo ciliar e os processos ciliares. O músculo prende a íris com a esclera e, pelas fibras zonulares, sustenta e altera a forma do cristalino (Figuras 2.5 e 2.6). Está localizado acima e abaixo do cristalino. Sua função, além da acomodação, é produzir o humor aquoso e a manutenção das fibras zonulares [14]. Os processos ciliares produzem o humor aquoso.

Na acomodação, quando o músculo ciliar contrai, o cristalino fica mais grosso e convexo e a pupila cresce focando em objetos próximos. O contrário, quando o músculo relaxa o cristalino fica mais fino e plano e a pupila diminui focando em objetos longínquos. Como pode ser observado na figura 2.7, existem três regiões distintas no músculo ciliar: longitudinais, reticulares e circulares [97].

A flexibilidade do músculo em humanos é perdida com o tempo resultando na impossibilidade de focar em objetos próximos e, então, na necessidade de óculos. Com o passar dos anos, o músculo ciliar perde volume nos conjuntos longitudinais e reticulares, a distância entre o início do músculo na esclera e o término na pupila diminui. O músculo

ciliar é o alvo de grande parte dos medicamentos para corrigir a visão [97].

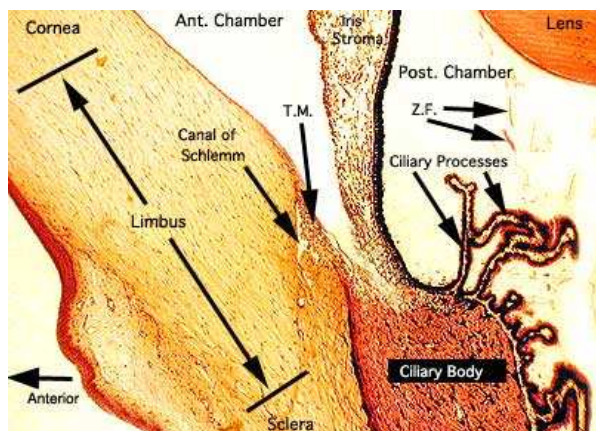


Figura 2.6: Corpo Ciliar, limbo e outras estruturas do olho. Extraído de [7]

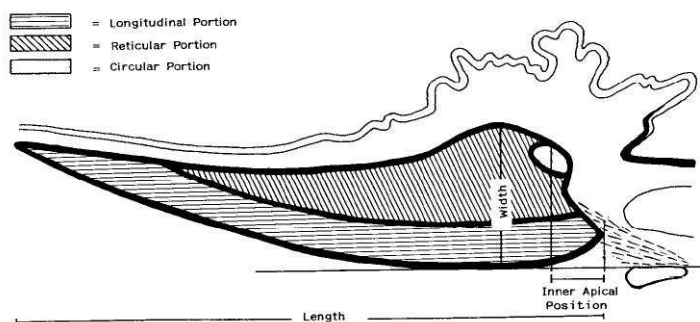


Figura 2.7: Diagrama detalhado do músculo ciliar. Fonte [97]

2.3.10 Retina

A retina fica localizada na parte posterior do olho. Sua responsabilidade é captar a luz, transformá-la em impulsos eletroquímicos e enviá-los ao nervo óptico. A imagem que a retina recebe já está em foco. Em cada retina há cerca de 130 milhões de foto-receptores, que podem ser de dois tipos: cones e bastonetes. Ambas estão ligadas a células bipolares e células ganglionares do nervo óptico e, por elas, enviam moléculas neurotransmissoras para o cérebro [99].

Os bastonetes possuem uma proteína pigmentada chamada rhodopsin e são altamente sensíveis a luz, permitindo a visão em ambientes escuros e turvos. Vários bastonetes estão ligados a apenas uma célula bipolar e, da mesma maneira, várias células bipolares estão ligadas a apenas uma célula ganglionar. Ou seja, se um raio de luz atingir apenas um bastonete, é provável que o cérebro não receberá essa informação, pois, devido a relação entre eles e as outras células, é necessário que haja uma convergência na informação. Como os bastonetes respondem de maneira igual para todos os comprimentos de onda não é possível diferenciar cores. Por esse motivo, todos os objetos, quando vistos a noite, tem tons acinzentados [99].

Já os cones têm proteínas diferentes para cada comprimento de onda e necessitam de muita luz para enviarem alguma resposta ao cérebro, portanto são próprios para a visão

diurna. Eles respondem a comprimentos de onda diferentes e isso torna possível diferenciarmos as cores. Além disso, a relação entre cones, células bipolares e ganglionares é de um para um, o que dá aos cones uma visão em alta resolução e a percepção de detalhes que os bastonetes não possuem.

A iluminância que chega na retina é medida em Troland (símbolo Td), que representa a foto luminância (cd/m^2) multiplicado pela área pupilar (mm^2).

$$Td = L \times p \quad (2.1)$$

ou

$$Td = L \times \frac{\pi}{4} diameter^2 \quad (2.2)$$

2.3.11 Íris (Irises)

A Íris é um disco colorido medindo cerca de 12mm de diâmetro [99] encontrado na frente do olho, entre o humor aquoso e o cristalino [68]. É o único órgão interno claramente visível. Sua função é idêntica ao diafragma de uma máquina fotográfica: bloquear parte da luz que atinge a retina [14].

A íris cresce a partir do músculo ciliar com origens ectodérmicas - que também gera os sistemas nervoso, pele e cabelo, etc - e mesodérmicas - que também produz o esqueleto, músculos, etc. Ela começa a se formar no terceiro mês de gestação e se completa no oitavo mês [68], no entanto, a mudança de pigmentação continua até o primeiro ano após o nascimento. Após este período, a íris se modifica, porém tão suavemente que muitas vezes é imperceptível [22]. A íris conecta-se a esclera e a córnea através da trama trabecular (trabecular meshwork) formando um ângulo de aproximadamente 30° [14], como pode ser visto nas Figuras 2.3, 2.5 e 2.6.

A íris é constituída por dois músculos distintos, ambos conectados ao sistema nervoso autônomo (Figura 2.8). O músculo esfíncter, que está situado ao longo da borda interna da íris, possui nervos parasimpáticos e contrai para próximo da pupila, ou seja, ao contrair, o esfíncter diminui o tamanho da pupila. O músculo dilatador corre radialmente, como os raios de uma bicicleta, possui nervos simpáticos e quando contrai abre a pupila. Os nervos, os vasos sanguíneos e estes dois músculos presentes na íris formam rugas radiais e concêntricas. As rugas radiais geralmente iniciam perto da pupila e terminam perto do colarete, região onde os músculos se encontram. As rugas concêntricas são geralmente circulares e concêntricas com a pupila. Elas tipicamente aparecem na zona ciliar, perto da periferia da íris [68, 99].

A íris é dividida em 3 camadas principais: A borda anterior (Anterior Border Layer - ABL), o stroma (Stromal Layer) e o epitélio pigmentado (Iris Pigmented Epithelium - IPE) [53], como pode ser visto na Figura 2.9. A borda anterior é composta por um arranjo denso de células pigmentadas (melanócitos), fibras de colágeno e fibroblastos [91, 56]. Diretamente após a ABL, encontra-se a stroma, uma camada fibrovascular composta por fibras de colágeno distribuídas livremente. É mais espessa e menos densa que a ABL. A stroma conecta o músculo esfíncter (sphincter pupillae) a um conjunto de músculos

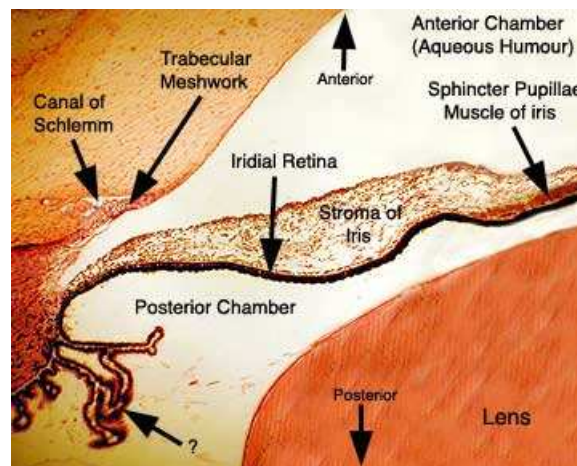


Figura 2.8: Foto detalhada mostrando as camadas internas da íris. Extraído de [7]

dilatadores (dilator pupillae) [99]. Por fim, encontra-se a IPE, uma camada rugosa cuja a densidade dos pigmentos é tamanha que torna-se opaca absorvendo grande parte da luz que a atinge [68, 96]. ABL e Stroma constituem a parte que dá cor à íris, por sua variação nos indivíduos [68]. Já a IPE contém sempre o número máximo de pigmentação possível e não varia entre indivíduos [113].

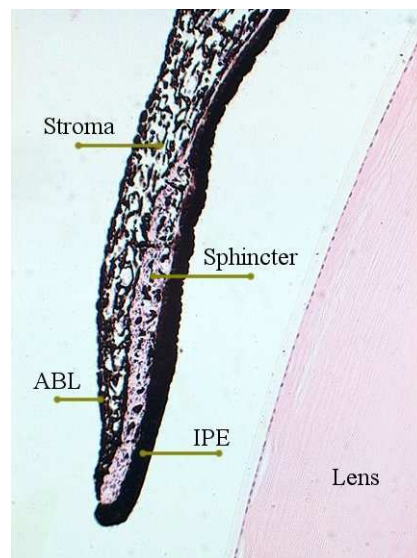


Figura 2.9: Foto detalhada mostrando o músculo dilatador (preto externo), o sphincter (rosa) e a IPE (preto escuro). Extraído de [30]

A ordem das camadas que compõem a íris é a seguinte [99]:

- Borda anterior (ABL)
- Stroma
 - Músculo esfínter
 - Músculo dilatador
- Epitélio (IPE)

- Epitélio pigmentada anterior
- Epitélio pigmentada posterior

A íris, quando vista de frente, é dividida em duas zonas separadas pela colarete [68]. Podem ser vistas na figura 2.10 e na figura 2.11:

- Zona pupilar (pupillary zone), é a parte mais interna, próxima a pupila.
- Zona ciliar (ciliary zone), é a parte mais externa do círculo da íris, conectada com o músculo ciliar. Pode ser dividida em três partes: a área interna, relativamente plana com rugas radiais; a área do meio, com rugas em todas as direções e com cadeias de grupos de pigmentos; e a área externa com algumas criptas.

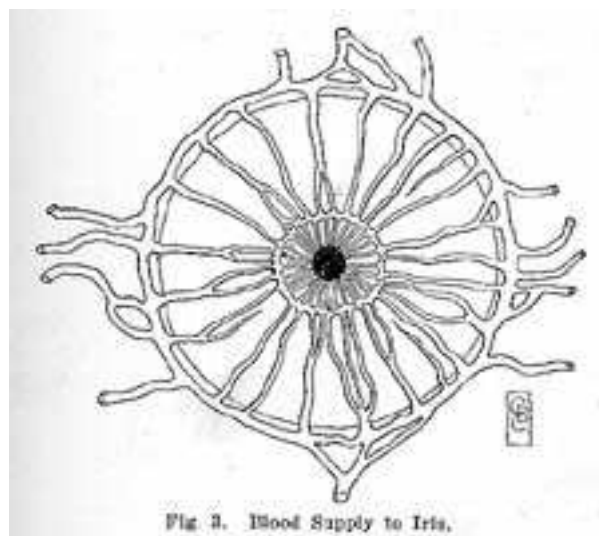


Figura 2.10: Estrutura dos Vasos Sanguíneos da Íris. Fonte [58]

O *colarete*, a mais fina parte da íris, é identificada pela região que o músculo esfíncter e o músculo dilator se sobrepõem [68]. Na Figura 2.10 é identificada como a região circular interna onde os vasos sanguíneos se conectam, na Figura 2.12 como um zigzag circular e na Figura 2.11 é mostrado com o número três. Na prática ela costuma ser identificada como um zigzag circular no meio da íris, como pode ser visto na figura 2.12.

Ao analisar uma imagem de íris, podemos identificar, além do colarete, outros três efeitos visuais: criptas, grupo de pigmentos, e a beira de pigmentos. As criptas (crypts), como mostrado na figura 2.11, são áreas onde a íris é relativamente fina. Elas são identificadas por áreas com uma cor mais escura perto do colarete ou na região periférica [68]. Eles possuem a cor negra porque a IPE absorve quase a totalidade da luz que a atinge. As manchas (pigment spots, naevi) acontecem randomicamente por toda a zona ciliar com uma alta concentração de células pigmentadas. A Beira de pigmentos, o número 1 na Figura 2.11, é apenas uma saliência de pigmentos proveniente da camada IPE que pode ser vista na margem na pupila.

A íris pode sofrer algumas anomalias raras por trauma ou ação de alguma droga. Áreas atrofiadas podem aparecer, assim como tumores podem crescer. A pupila não necessariamente é circular e os centros da íris e da pupila podem ser diferentes em 20%.

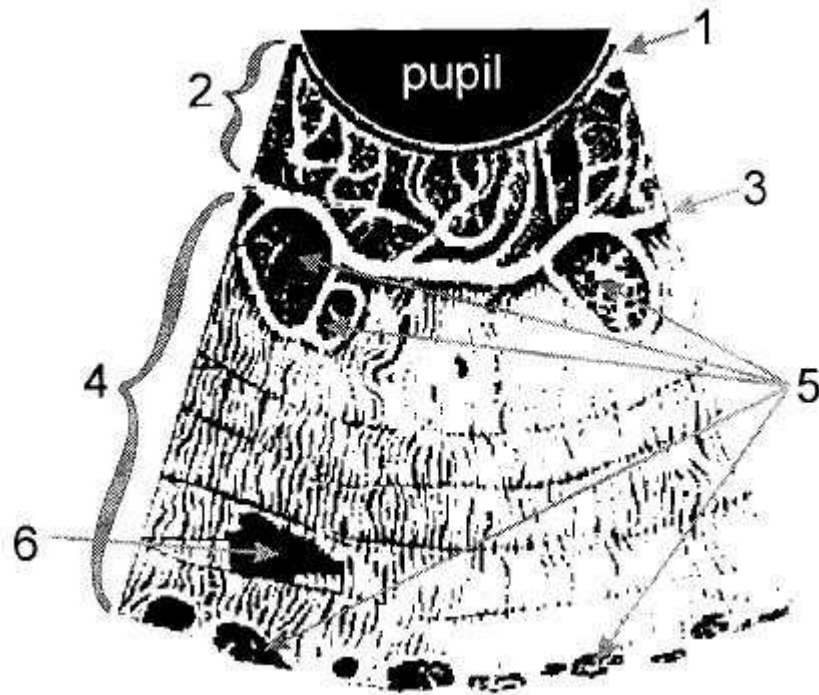


Figura 2.11: Um setor da íris mostrando: 1-Beira de pigmentos, 2-zona pupilar, 3-colarete, 4-zona ciliar, 5-criptas e 6 bolha de pigmentos. Fonte [68]

Normalmente esta variação ocorre levando o centro da pupila para mais próximo do nariz. [99].

A figura 2.13 mostra detalhadamente todas as camadas do olho. Nela podemos identificar as fibras radiais e o esfíncter.

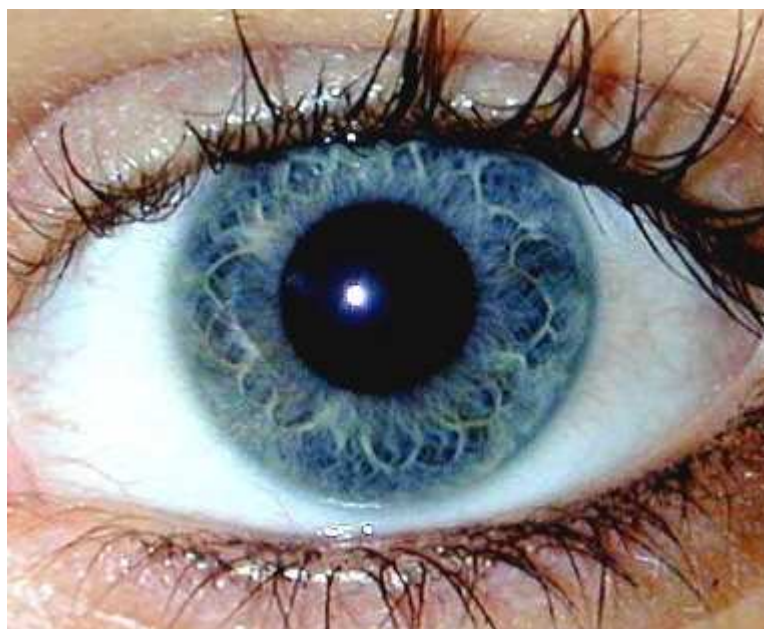


Figura 2.12: Imagem de uma íris real. Cortesia de Cinara Cunha.

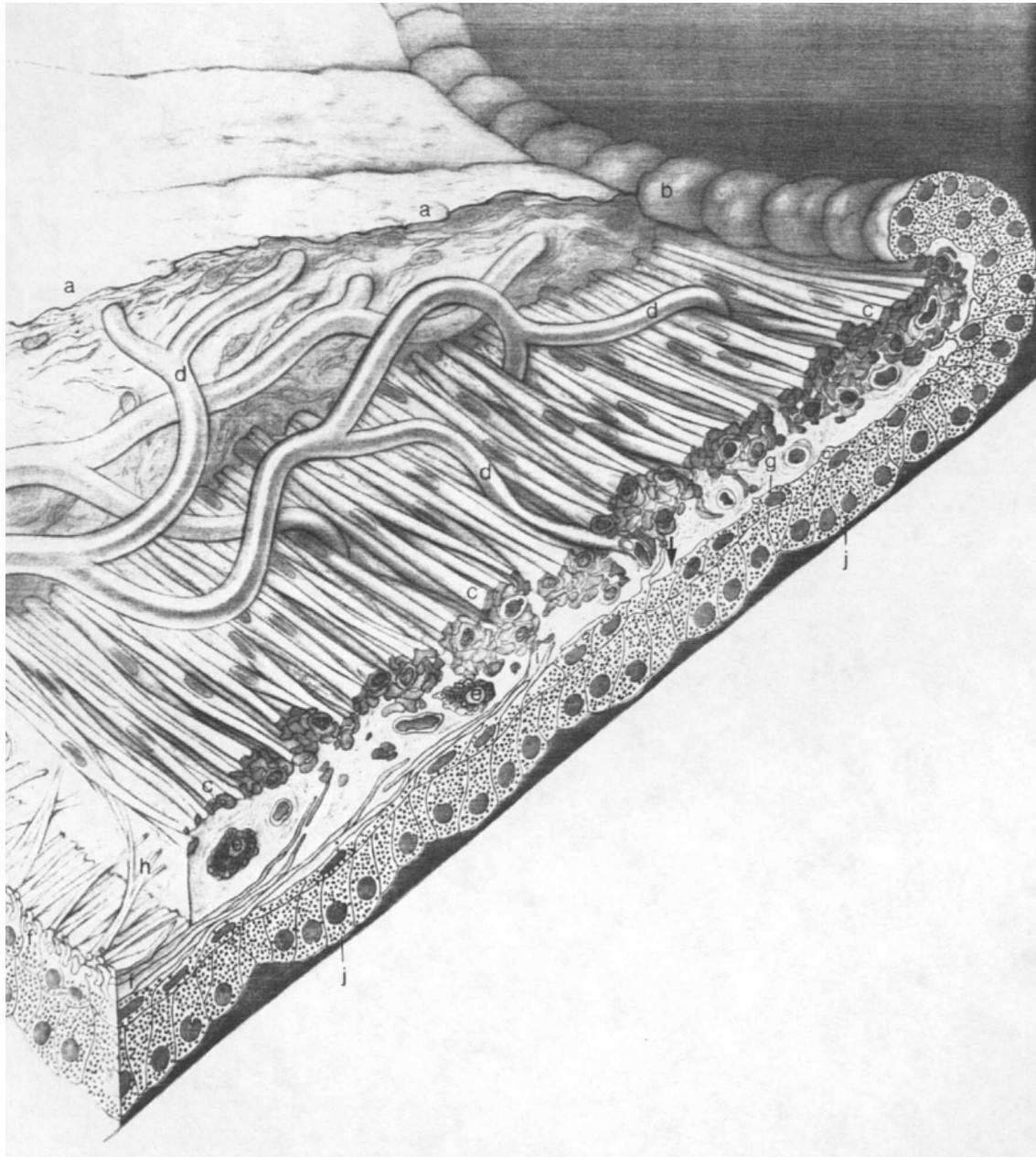


Figura 2.13: Corte na íris com a seguinte legenda: (a) ABL, (b) beira de pigmentos, (c) esfíncter, (d) vasos sanguíneos, (e) fibroastos, (f) dilatador, (g) célula pigmentada, (h) colarete, (i) stroma e (j) IPE. Fonte [65]

3 A COR DO OLHO

A cor do olho ou, já que a esclera é branca e a córnea é transparente, a cor da íris, é uma composição de vários fenômenos: relevo irregular, pigmentação, fibras de colágeno e vasos sanguíneos. No entanto, a tonalidade em si é, basicamente, determinada por uma característica poligênica que define a densidade de pigmentação na stroma e na ABL [96]. Estes pigmentos refletem, refratam ou absorvem os raios de luz que os atingem. Este comportamento será discutido no Capítulo 5. Como há uma disposição maior para os raios de ondas longas serem absorvidos, a íris acaba tendo a cor próximo das ondas curtas, onde estão o azul e o verde. [96, 53, 113].

Em humanos, a pigmentação é proveniente de duas classes de uma proteína chamada melanina [99]. Uma das classes chama-se eumelanina, de cor acastanhada ou preta e a outra é a feomelanina de cor avermelhada ou amarelada. Em olhos castanhos há, pelo menos, 17% de feomelanina na stroma, enquanto que em olhos azulados esse percentual baixa para 10%. Na IPE a feomelanina baixa para cerca de 2.4% em olhos azuis e 7.3% em olhos castanhos [108]. A quantidade de melanina total na íris varia entre $53\mu g$ em olhos azuis médios e $95.8\mu g$ em castanhos escuros. No entanto o volume a mais de melanina para olhos castanhos não significa que quanto mais melanina, mais castanho. Justamente pela proporção entre eumelanina e feomelanina, em olhos castanhos quanto mais melanina, mais escuro, e em olhos azuis, quanto mais melanina, mais claros [10]. No entanto, a cor de um olho claro também depende da quantidade de hemoglobinas e carotenóides na íris além da disposição da melanina entre o stroma e a ABL [4].

A melanina é produzida pelos melanócitos durante o processo de melanogênese e é armazenada em organelos - estruturas com função especializada suspensa no citoplasma de uma célula - chamados melanossomos. O melanossomo atua na defesa dos raios de luz e não são móveis [113]. Há duas formas de produção de melanina, durante a melanogênese [96], ambas ocorrem tanto na íris quanto na pele e no cabelo, mas enquanto que na pele e no cabelo a melanina é produzida continuamente e eliminada da célula, na íris a melanina permanece acumulada no citoplasma. No entanto, após a infância, a produção de melanina é menos observada [108].

O número de melanócitos, sua densidade ou posição, não é determinante na cor da íris, mas sim a quantidade de pigmentação (melanina), seu agrupamento e densidade nas camadas ABL e do Stroma [1, 113, 4]. Na ABL, o número de melanócitos é constante [113]. A densidade dos pigmentos (melanina) faz o olho ser mais castanho quando há uma alta quantidade de melanina, ou mais azulado, quando há baixa quantidade de melanina [96, 113]. Em olhos de qualquer cor, a camada epitelial (IPE) contém a mesma quantidade

de eumelaninas. A densidade das células do stroma também afeta a quantidade de luz que é absorvida pela camada epitelial (IPE), ou seja, mais raios são refletidos no Stroma.

Três fatores são citados como determinantes da cor aparente da íris: (i) grânulos de pigmentos na IPE; (ii) a concentração de pigmentos nos melanócitos do Stroma; (iii) as propriedades de reflexão, dispersão e absorção das componentes extra celulares no stroma da íris [113]. Há três tipos de células que possuem melanossomos: (i) melanócitos; (ii) epitélio pigmentado e (iii) uma pequena quantidade de *clump cells*. Melanócitos e o epitélio pigmentado produzem melanina, as *clump cells* fazem a fagocitose das proteínas livres na íris, ou seja, consomem melanina. Os melanócitos do Stroma são orientados com seu eixo mais comprido paralelo a superfície da íris e tendem a se unir na ABL [113].

A área médica estuda, há muito tempo, a influência cor da íris com doenças e problemas oftalmológicos. Sabe-se que a cor da íris determina um fator de risco para certas doenças, uma delas é o câncer. Os grânulos de melanina se dispõem na célula de modo a impedir lesões no DNA pelos raios ultravioleta. A eumelanina é muito mais eficiente que a feomelanina nessa proteção, e por isso os cânceres de pele são mais comuns em pessoas de pele clara, cujo conteúdo relativo de eumelanina é menor [108].

A iluminação do ambiente também modifica a tonalidade da íris, conforme pode ser visto na figura 3.1 onde os olhos são os mesmos mas em situações de iluminação diferentes.



Figura 3.1: O mesmo olho fotografado com iluminação diferente

3.1 Os genes

A tonalidade da íris é proveniente de características genéticas, o qual denominamos de genótipo. Já o padrão da íris é algo que se forma com o passar dos anos, com a interferência do ambiente. Este outro, denominamos fenótipo [24].

Os Davenports [25] presumiram, em 1907, que a cor do olho seria monogênica, que as cores castanho escuras são dominantes em relação às azuis e também, que sempre que ambos os pais tiverem íris azuis, o filho também terá. No entanto, estavam enganados. A cor do olho é poligênica e, por mais incomum que seja, a vida provou que dois pais com olhos castanhos podem gerar um filho de olhos azuis [96].

A cor do olho é determinada por mais de um gene, porém fortemente influenciada pelo gene OCA2 no cromossomo 15 [96]. Sabe-se que as codificações do gene OCA2: R305W e R419Q estão associadas às cores castanhas e castanho-esverdeadas respectivamente [80]

e que mutações neste gene podem levar o indivíduo a ter Albinismo. Porém há muito ainda a pesquisar na genética. Além do OCA2, os possíveis genes a influenciar na cor da íris são: TYR, TYRP1, DCT, MATP e MYO5A [55].

A genética define a cor do olho, mas não determina o padrão visual da íris. Pode-se dizer, então, que a íris tem baixa penetrância genética, ou seja, mesmo que duas pessoas possuam o mesmo gene, a íris não será igual [68]. Assim, a diferença entre dois olhos de sujeitos diferentes, mesmo sendo irmãos gêmeos, é tamanha que torna-se possível identificar uma pessoa apenas pela imagem da sua íris [23].

3.2 Classificação das Cores

A cor da íris é um espaço contínuo que vai desde o castanho mais escuro até o azul mais claro [96]. Seddon et al [87] criaram um sistema de classificação da cor da íris humana baseada na análise visual de 339 fotografias. Embora existam somente 3 cores de íris - Azul, verde e castanho - Seddon estendeu as cores criando cinco classificações: azul, cinza, verde, castanho claro, e castanho escuro. As outras cores são variações na quantidade de melalina presente na íris.

A seguir falaremos um pouco sobre cada uma das possíveis cores para os olhos dos animais, o que inclui as cinco humanas mais duas: Violeta e Amarelo.

3.2.1 Marrons Escuros

A cor marrom ocorre quando há grandes quantidades de eumelanina na ABL e no stroma da Íris, que absorve mais luz, principalmente com ondas longas [105, 64, 56, 113]. A cor castanha é a predominante na população mundial e, em muitos povos originários da África, Ásia e América Latina, ela é a única que existe.

3.2.2 Castanhos claros (Hazel)

Olhos castanhos claros são uma combinação de um *Rayleigh scattering* no Stroma e uma quantidade moderada de melanina na ABL [105, 108, 56, 113]. Estudos indicam que a cor castanha é exatamente a cor mediana entre marrom e azul o que pode produzir íris multicoloridas, como por exemplo, olhos castanhos perto da pupila e verdes na borda como pode ser visto na figura 3.2.



Figura 3.2: Íris multicolorida, marrom no centro e verde nas bordas. Fonte [110]

3.2.3 Amarelo e Marrom amarelado

Olhos amarelados possuem uma grande concentração de um pigmento phototóxico, semelhante a melanina, chamada de lipocromo (*Lipochrome*) na íris. Este pigmento é encontrado em olhos verdes e violetas e as manchas amarelas indicam alta concentração de lipocromo. O lipofuscin, ou lipocromo, quando é exposto a ondas curtas (390-550 nm) pode destruir a célula que o hospeda [26].

Olhos amarelados por causa do lipocromo são muito comuns em animais e são chamados popularmente por *olhos de gato* [26]. Os olhos amarelos de alguns pombos e corujas contêm um pigmento fluorescente conhecido como pteridine na Stroma [56, 26].

3.2.4 Verdes

Olhos verdes são produto de uma quantidade moderada de melanina e melanossomos e é a cor mais rara em humanos. Baranoski e Lam comprovaram que para olhos claros, além da melanina, deve-se considerar também a quantidade de hemoglobinas e carotenóides e que a disposição das melaninas nas duas camadas externas (ABL e stroma) tem importância [4].

3.2.5 Azul

A cor azul ocorre principalmente como resultado de um *backscattering* nas fibras de colágeno do stroma em uma aproximação ao Rayleigh [113]. O *backscattering* ocorre em maior quantidade nas íris azuis, porque elas tem baixas quantidades de melanina e pouquíssimos melanossomos na ABL. Essa baixa concentração de melanina baixa a quantidade de raios absorvidos [105, 45, 56]. Os olhos azuis tem quase 15% menos melanina que os castanhos.

Olhos azuis são relativamente comuns na Europa, e raros no resto do mundo [96]. Aproximadamente 8% da população mundial tem olhos azuis [64, 108]. Muitos bebês nascem com a cor de olho azul, que vai escurecendo com o passar dos anos devido ao crescente aumento na pigmentação.

3.2.6 Cinza

A cor cinza da íris é apenas uma variação da cor azul, é a segunda mais rara, e ocorre devido ao menor índice de melanina. As vezes a cor cinza pode caracterizar uma inflamação na íris chamada de Uveitis.

3.2.7 Violeta

A aparência de olhos cor violeta é apenas uma mistura de reflexão azul e vermelha encontrada em alguns albinos.

3.3 Algumas Doenças

3.3.1 Aniridia

Embora o nome indique a falta de uma íris, a aniridia é uma condição genética onde o gene responsável pelo desenvolvimento do olho não funciona corretamente e a íris acaba não se desenvolvendo [46] [89]. Há dois tipos de Aniridia, a hereditária transmitindo em 50% dos descendentes e a esporádica que é proveniente de um câncer chamado Nephroblastoma. A doença pode afetar apenas um olho, mas é mais comum afetar ambos. Normalmente é acompanhada de outros problemas como catarata e glaucoma.

Nestes casos a íris desaparece e o que se vê é uma grande pupila. A função de proteção contra a luz da íris não existe. Os portadores tornam-se muito sensíveis a luz e se previnem com óculos ou lentes de contato próprias para a doença.

3.3.2 Albinismo Ocular

Aqueles que tem albinismo não possuem melanina e podem até apresentar uma íris rosada, fruto da intensidade da luz sobre a coróide, que é uma camada vascular [96]. A falta de melanina é caracterizada pela ausência da enzima tirosinase nos melanócitos. Sem a enzima os melanócitos não conseguem produzir a melanina. [92]

É uma condição hereditária que aparece com a combinação de genes que são recessivos nos pais. Os olhos não têm pigmento na coróide nem na retina, e a íris é diáfana, em geral azul-acinzentada. Invariavelmente ocorrem nistagmo - oscilação contínua no olho -, fotofobia e diminuição da acuidade visual. As pupilas são às vezes vermelhas nas crianças, mas nos adultos são sempre negras [92].

O albinismo ocular pode ser dividido em dois tipos que somente são distinguidos por exames clínicos: tirosinase-positivo e tirosinase-negativo. O tirosinase-positivo ocorre com uma frequência aproximada de 1/40000 entre caucasóides e de 1/15000 entre negros americanos; o albinismo tirosinase-negativo ocorre com frequência de 1/40000 (brancos) e de 1/30000 (negros) [92].

3.3.3 Heterocromia

Ocorre quando a cor de uma íris é diferente de outra no mesmo indivíduo, como pode ser vista na Figura 3.3. Ocorre por doença, ferimento ou característica genética, causando o excesso, ou a falta de pigmentação, em todo, ou em apenas parte, da íris [111].



Figura 3.3: Exemplo de Heterocromia. Fonte: [111]

3.3.4 Melanoma

Melanoma é um tumor maligno, um tipo de câncer de pele, que pode ocorrer na íris. Produz uma mancha na íris como pode ser vista na figura 3.4. As células do melanoma concentram-se inicialmente em ninhos nas camadas da íris. Elas são maiores que os melanócitos normais, e podem ou não produzir melanina [18].

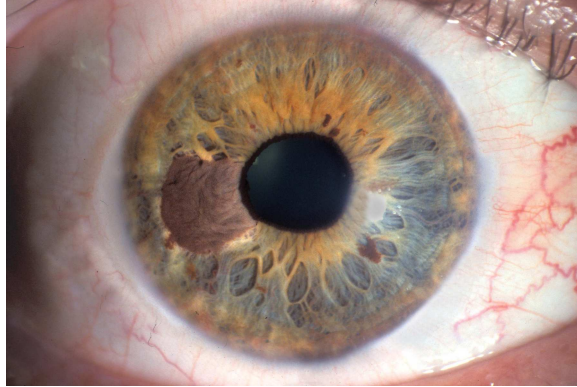


Figura 3.4: Melanoma na íris. Fonte: [18]

4 MOVIMENTOS PUPILARES

A pupila humana possui basicamente três movimentos: (i) a *acomodação*, que ocorre devido ao processo de foco, (ii) o reflexo pupilar a luz (Pupil Light Reflex - PLR), que é o reflexo da íris para adaptar o sistema visual a iluminação ambiente e (iii) o *hippus*, uma oscilação que ocorre constantemente como parte de um processo de convergência disparado pela acomodação e pelo PLR. Sabe-se que vários fatores podem alterar o tamanho da pupila ou iniciar estes processos, os dois mais óbvios são a luz [81, 34], que já foi muito estudada pela medicina, e o foco [48, 86], que ainda não possui estudos completos. Além destes, pode-se destacar como fonte ou perturbação na movimentação pupilar: uso de drogas, doenças [11, 49], fatores emocionais [74], respiração [115, 17] e batidas do coração [114, 17], interesse e curiosidade [43], idade [95, 12, 85], cor da íris [10], nível de consciência [62], o local onde um raio de luz atinge o cristalino, na borda ou no centro (*Stiles Crawford effect*) [?], comprimento de onda da luz incidente [2, 107] e os padrões espaciais [101, 57, 81].

A acomodação é o processo de relaxamento ou contração do músculo ciliar para ajuste de foco (*depth of field*) que pode alterar a forma da íris pela mudança de pressão na câmara posterior. Acomodação ocorre quando se está olhando um objeto longe e troca-se por um objeto perto. Desacomodação é o processo inverso [48]. Como ocorre processo de acomodação como um todo ainda é um mistério para a ciência, mas existem quatro teorias que tentam explicar o processo:

- a de Hermann von Helmholtz, a mais famosa e aceita teoria para os processos de acomodação diz que quando olha-se para um objeto distante, os músculos ciliares relaxam puxando as lentes e tornando-as mais finas. Quando olha-se para um objeto próximo, os músculos ciliares contraem tornando a lente mais convexa [99];
- a de William Bates diz que a acomodação é proveniente da ação de dois dos cinco músculos extra oculares: superior oblique, inferior oblique [6];
- a de Ronald Schachar diz o oposto a idéia de Helmholtz, quando o músculo ciliar puxa a lente, somente a parte central torna-se mais convexa, enquanto que a parte periférica torna-se mais plana. [16];
- a de D. Jackson Coleman propõe que as lentes, o zonule of Zinn e a câmara anterior comprimem um diafragma entre a camada anterior e o vítreo do olho. Em outras palavras, o musculo não altera diretamente a forma da lente, mas sim a pressão intra-ocular [20].

A *pupil light reflex* (PLR) é um processo essencialmente orientado à intensidade de luz incidente na retina [103], mas é influenciado pelo uso de medicamentos, o estado emocional do indivíduo, o contraste da imagem percebida [101] e produz resultados diferentes de acordo com o comprimento de onda [107]. O reflexo síncrono entre as duas pupilas do sistema visual humano. A falta deste sincronismo se traduz em algum mal funcionamento do sistema [11]. As variações pupilares protegem a retina contra uma carga muito intensa de luz [5].

O PLR é um exemplo de um princípio muito utilizado na medicina, o princípio do feedback negativo, ilustrado por Delauney em 1971 [75, 83, 15]. Este conceito modela ações do corpo em dois passos distintos: percepção e ajuste. Na íris, a percepção ocorre quanto a luz chega na retina e a informação é enviada ao cérebro, e o ajuste quando o cérebro envia sinais para fechar ou abrir a pupila. Diz-se negativo, pois o sistema responde de maneira oposta a perturbação. Em eletrônica, é comumente utilizado para estabilizar sistemas digitais [75].

Uma equação de feedback é descrita pela seguinte equação diferencial:

$$f(l) = \frac{d^2x}{dt^2} + \left(\frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} \right) \frac{dx}{dt} + \frac{1-G}{\tau_1\tau_2}x \quad (4.1)$$

onde x é o resultado quantificado da percepção (iluminância), os τ são tempos constantes de latência (delay) e G é o ganho da recursão [75].

Um outro reflexo visto na pupila chama-se flutuação espontânea ou a hippus. Um fenômeno de mudança contínua no tamanho da pupila mesmo em uma iluminação estável ou na escuridão total. São consideradas como erros randômicos e os valores de uma captura real podem ser aproximadas por uma função polinomial [41]. Estas variações possuem uma sincronia com a respiração e com o ritmo regular circulatório e neural. O ritmo da respiração (High Frequency - HF) é a marcação para o nervo parasimpático, enquanto que os batimentos cardíacos possuem uma relação maior com o nervo simpático (Low Frequency - LF) [115, 114, 17].

Tanto a acomodação quando o PLR são estudados pela pupilometria desde 1920 [81], campo que tem como principal instrumento o pupilômetro - dispositivo que identifica o tamanho da pupila via luz infravermelha. Uma variação anormal na acomodação é resultado de algum problema no sistema nervoso, que pode ser ocasionado por alcoolismo, diabetes, AIDS, síndrome de down, depressão, mal de Alzheimer, hipertensão intracranial, medo etc. [98].

Os dois músculos da íris (esfíncter e dilatador) são ativados e controlados por uma série de caminhos neurais ainda pouco explorados pela ciência. Fato que faz da pupila uma fonte rica de informação para diagnósticos. Várias pesquisas feitas por fisiologistas e neurologistas tentam determinar como ocorre o controle nervoso pela resposta pupilar, ou seja, quais sinais, nervos e componentes químicos influenciam na variação da pupila. Uma linha de pesquisa semelhante, mas com físicos e biólogos, tenta descrever em termos matemáticos o PLR. Em adição, vários estudos neuro-oftalmológicos e farmacológicos tentam identificar a utilidade da pupila no diagnóstico de lesões oculares. No entanto, mesmo com todas estas pesquisas, a extração e o estudo de pequenos sinais durante a alteração pupilar e a comprovação de sua função, ainda é uma tarefa complexa e difícil de

ser realizada [5, 107, 41, 72].

O PLR e o hippus são um processo automático, uma reação reflexa, ou seja, diferente da acomodação, não é comandado pelo cérebro, mas sim pelo sistema nervoso autônomo (SNA). O SNA pode ser dividido em dois subsistemas: o sistema nervoso simpático (SNS), utilizado quando o organismo requer respostas rápidas e o parasimpático (SNP) em nos casos opostos. Na pupila, o SNS é responsável pela dilatação (processo de mydriasis), ativando o músculo dilatador, e o SNP pela contração ativando o esfíncter (processo de miosis). O tamanho final da pupila é consequência do balanceamento destas duas forças [98, 5].

Na visão clínica, há dois componentes que explicam o PLR: (i) O componente de regime (steady-state), quando uma rápida e firme contração da pupila ocorre devido ao aumento de iluminação; (ii) O componente transiente (transient), quando a pupila reflete não apenas a luminância, mas também a diferença de contraste do ambiente [101]. Um estímulo pode disparar ambos os componentes, mas a contribuição de cada componente será relativa ao tamanho do estímulo, contraste de luminância, características temporais e a localização no campo visual (cor, estrutura espacial, movimento). Em estímulos grandes e com alto contraste de luminância o componente transiente pode saturar e governar a oscilação [5, 101].

Durante a contração da pupila, o músculo esfíncter, que é circular e innervado com fibras parasimpáticas, recebe um sinal para dilatar-se. Já o mecanismo de dilatação da pupila ocorre em duas situações: (i) a contração dos músculos dilatadores innervados por fibras simpáticas; (ii) a inibição da atividade dos núcleos de Edinger-Westphal (EW), comumente referenciados como reflexo passivo devido, por exemplo, a uma excitação [61, 77, 90]). A prova disto é que mesmo se o nervo simpático for cortado cirurgicamente, ainda é possível ver o ciclo pupilar [61]. A conexão com EW também explica uma série de comportamentos, como a contração da pupila durante o sono ou com anestésicos, o decréscimo gradual do tamanho da pupila com a idade e as pequenas oscilações observadas durante o período de sonolência [5].

O caminho parasimpático (contração da pupila) entre a recepção da luz, até o músculo da íris é longo (Figura 4.1). Primeiramente, células ganglionárias situadas na retina, capturam a luminosidade e enviam diretamente ao nervo óptico. A informação enviada por estas duas células se encontram no quiasma (chiasm), uma região cerebral onde as fibras ópticas se cruzam. Um pequeno número destas fibras chega até a região pretectal e após até os núcleos de Edinger-Westphal, também no cérebro. A informação é processada, uma resposta é gerada e enviada pelo terceiro nervo óptico. A informação chega então ao gânglio ciliar (ganglion ciliary). Um aglomerado de neurônios parasimpáticos localizada logo atrás do globo ocular [77].

Já no caminho simpático, o menos conhecido pela ciência, supõe-se que os axiomas são enviados pelo hipotálamo (*hypothalamus*), uma região do cérebro responsável por metabolismos e atividades autônomas, até o núcleo ciliospinal de Budge na espinha cervical. Após a informação chega ao gânglio ciliar que ativa os músculos dilatadores da íris. Como pode ser visto, em nenhum momento os sinais simpáticos e parasimpáticos se cruzam, visto que o balanço dos dois é uma relação de adaptação [50].

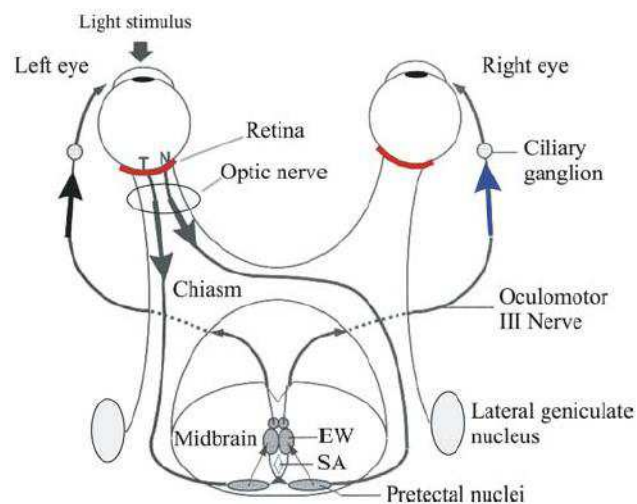


Figura 4.1: Caminho parasimpático para o PLR. Source: [77]

4.1 Pupilometria

A pupilometria é a ciência que estuda e mede variações pupilares, suas causas e efeitos. Estas medições começaram com Reeves em 1920 [81] e são feitas com experimentos, simulando o ciclo pupilar. Um ciclo, é definido como o movimento que contrai e expande a pupila retornando ao estado inicial [61]. Há outros tipos de simulações, por exemplo, o *pupil escape* é o nome dado quando uma pupila dilatada sofre a ação de um estímulo de luz e contrai e, após alguns segundos ou minutos, retorna ao seu estado inicial. Quando a intensidade de luz é muito grande e a pupila não retorna ao seu estado inicial, dá-se o nome de *pupil capture* [50].

A pupilometria mede diversos componentes: amplitude máxima, latência, velocidade de dilatação e contração e tamanho máximo e mínimo. Chama-se amplitude, a diferença entre o tamanho inicial e o mínimo da pupila durante o PLR. Como já sabemos, o cristalino deixa de ser totalmente transparente com a idade, reduzindo a quantidade de luz que chega à retina. Como a amplitude é proporcional ao logarítmo de todo o fluxo de luz que chega na retina, ela acaba se tornando, também, dependente da idade do indivíduo [85, 12]. Esta perda é estimada em cerca de 0.4mm por década a partir dos 20 anos [12].

Chama-se latência, o tempo que a pupila leva para reagir a um estímulo de luz. Em observações clínicas, a latência pode identificar objetivamente os atrasos no processamento visual, que são proporcionais ao dano causado ao sistema visual. A latência comparada a amplitude é menos volátil e é menos afetada pelas propriedades mecânicas da íris, no entanto ainda é afetada. Estudos mostram que a latência pode auxiliar no diagnóstico de doenças aferentes, como: inflamações no sistema nervoso (demyelinating), ambliopia (amblyopia), degeneração de fibras ópticas (optic atrophy), etc. Para definir matematicamente quando que o tempo de latência termina, utiliza-se a segunda derivada da função de tamanho da pupila em relação ao tempo. Durante a maior inclinação no gráfico de velocidade (1ª derivada) haverá um canal na função de aceleração (2ª derivada). O pico deste canal é o ponto onde a latência termina [9]. Há evidências que a latência e a amplitude são governadas pela ativação parasimpática junto com a velocidade de contração. A velocidade de dilatação é governada por ativação simpática [12].

A latência é um fato que exemplifica o conceito de *nonminimum phase lag*, existente em sistemas de feedback padrões IEEE [83]: um evento associado a uma demora modelada como $\exp(-ST)$ [59]. A latência foi modelada inicialmente por Stark [93] onde, usando uma luz senoidal, ele determinou a função de transferência para descrever a pupila. Stark [93] e outros pesquisadores supunham que a latência está ligada unicamente a intensidade do estímulo. No entanto, contrariando os estudos anteriores, Link e Stark [59] criaram um modelo para a latência, onde consideram a intensidade do estímulo e a taxa de repetição (frequência):

$$L = 253 - 14\log(I) + 70R - 29R\log(I) \quad (4.2)$$

onde I é a intensidade em Fl (footLamberts), R a taxa de repetição em Hz e L é a latência em ms . O número 253 é originário do atraso na ativação do cálcio no músculo da íris. O segundo termo, $-14\log(I)$ mostra que, conforme aumenta a intensidade, a latência diminui. O terceiro termo, $70R$ mostra que conforme a frequência aumenta, a latência também aumenta. O último termo, $-29R\log(I)$, está relacionado a um cross product entre o segundo e o terceiro [59].

Assim como a amplitude e a latência, o tamanho da pupila, em estado de descanso, é maior para pessoas mais velhas. A velocidade máxima de dilatação e de contração é menor nestas pessoas (o que indica perda da força de atuação dos nervos simpáticos e parasimpáticos). A ciência ainda não determinou o que faz estas alterações ocorrerem, mas como o cristalino se torna menos transparente com a idade, obviamente, deixa passar menos luz para a retina, e assim, menos contração. Uma das hipóteses seria o aumento da influência parasimpática ou a perda da influência simpática [12]. Vale salientar também, que o tamanho máximo da pupila não depende do tamanho da íris, mas sim da sua inervação [50].

Segundo [34], a amplitude e a velocidade máxima de contração e de dilatação é proporcional à quantidade de luz incidente na retina, enquanto a latência é inversamente proporcional. As seguintes equações foram obtidas a partir de um experimento de PLR envolvendo 19 pessoas e possuem limites mínimo e máximo dados pelos limites do corpo humano [34].

$$a = -0.12 + 0.66x - 0.04x^2 \quad (4.3)$$

$$\tau = 445.7 - 22.9x + 76.2x^2 \quad (4.4)$$

$$vc = 0.15 + 2.0x - 0.17x^2 \quad (4.5)$$

$$vd = 0.16 + 0.72x - 0.07x^2 \quad (4.6)$$

Onde a é a amplitude em mm, τ a latência em ms, vc a velocidade de contração em mm/segundo, vd a velocidade de dilatação em mm/segundo, e x a intensidade do estímulo em unidades logarítmicas[34].

Launay [28] foi o primeiro a publicar funções de densidade probabilísticas do diâmetro pupilar em diferentes níveis de iluminação. Logo após em 1963, Alpern et al [3] realizaram um estudo onde um flash de luz é disparado contra um indivíduo e a resposta

pupilar é observada. Segundo eles, a variação de intensidade da luz ou a sua duração seguem a lei de reciprocidade (intensidade x tempo de exposição = constante). Também afirmaram que não é necessário ativar os cones na retina para que haja reação da pupila, que o tempo de latência nos experimentos decaiu conforme aumentava-se a intensidade e a duração, e que a curva relacionando a energia do estímulo com a mudança no tamanho da pupila é dividida em duas partes. O artigo supõe que esta divisão ocorre quando, além dos bastonetes (visão *scotopic*), os cones sentem o estímulo de luz (visão *photopic*) [3, 9]. Photopic é a visão do olho em ambientes claros, onde os cones são utilizados. Scotopic é a visão em ambientes escuros, onde os bastonetes são usados. Mesopic é quando ambos, cones e bastonetes, são utilizados para gerar a imagem. O olho humano usa scotopic puro com luminância abaixo de $0.034\text{cd}/\text{m}^2$, e usa photopic puro acima de $3.4\text{cd}/\text{m}^2$. No entanto, a participação em detalhes dos bastonetes durante o PLR ainda é difícil de ser explicada [107]. O efeito de Stiles e Crawford [?], por exemplo, não ocorre quando somente os bastonetes são ativados pelos raios de luz.

Adrian [107] mostrou que comprimentos de onda diferentes podem contrair mais a pupila em ambientes onde a visão photopic é utilizada. Em sua pesquisa, ele validou os experimentos de Alpern e Campbell [2], encontrando tamanhos de pupila diferentes para comprimentos de onda diferentes. Nestes casos, a pupila se contrai mais para luz com baixas frequências. Isso ocorre devido a uma absorção dos raios de luz, com comprimento de onda maior que 520nm, pelo pigmento macular existente na fóvea. Já em ambientes onde as visões scotopic e mesopic são utilizadas, o tamanho da pupila é independente de comprimento de onda [107]. Alpern e Campbell [2] também encontraram uma função que descreve a sensibilidade spectral por comprimento de onda. A curva é uma gaussiana e tem sensibilidade máxima por volta de 560 nm. No entanto, conforme descrito Gasparovsky [40], hoje as funções V que determinam a sensibilidade dos comprimentos de onda em todos os ambientes são descritos pela norma CIE/ISO 10527.

Usui e Stark [103] estudaram o erro randômico (hippus) que ocorre durante as variações pupilares. Essencialmente este erro é modelado como um erro Gaussiano multiplicativo e deve ser injetado durante a passagem pelo núcleo de Edinger-Westphal. A origem do erro ainda é desconhecida e será difícil determiná-la, visto que é influenciado por muitas partes do sistema nervoso central.

Segundo Straub et al. [95], o máximo diâmetro pupilar, o diâmetro pupilar em relação a área da íris, a área pupilar máxima, a latência, a máxima velocidade de contração, a velocidade de contração em 1 segundo e a de dilatação em 6 segundos são fortemente dependentes da idade [12]. Assim, todos os parâmetros que são dependentes da área pupilar, são dependentes de idade. Não foram encontradas dependências em relação ao sexo dos indivíduos.

Segundo pesquisas de Bergamin et al. [10], o processo de contração dura cerca de 400 milissegundos mais uma latência de 520 ms, atuando a uma velocidade de 13.75 e $16.01\text{mm}^2/\text{s}$ para íris azuis e castranhas respectivamente. O processo de redilatação ocorre a uma velocidade de 4.80 e $5.66\text{mm}^2/\text{s}$ para íris azuis e castranhas. Isso significa que a cor da íris pode influenciar na velocidade e amplitude de contração, embora que não esteja provado que este ganho de velocidade ocorra por causa da melanina. O tamanho da pupila e a latência permanecem iguais para ambos os olhos [10] porém, ainda não está claro para a medicina, de onde vem esta latência. Há duas hipóteses: uma origem no meio do cérebro, ou com origem na musculatura da íris [61]. Porém, para alguns casos, pode-se

assumir que a latência ocorre na retina [50].

Atualmente há vários modelos que simulam a dinâmica da pupila[98]. Estes modelos serão discutidos no capítulo 7.

5 TRANSMISSÃO DE LUZ

Quando uma radiação eletromagnética (luz) passa por um meio, 4 reações podem acontecer: (i) ela pode passar sem sofrer qualquer alteração (transmissão direta); (ii) pode refletir pelo meio; (iii) pode dispersar no meio (scattering); (iv) pode ser absorvida pelo meio causando uma fluorescência nas células do meio. Boettner e Wolter estimaram que 83.5% da luz que chega passa por nossa pupila chega à retina. Outras pesquisas indicam uma taxa de transmissão entre 79% e 82%[13]. Este percentual de transmissão ainda sofre uma queda de acordo com o quão longe passa um raio de luz do centro da pupila. O amplamente estudado *Stiles Crawford effect* mostra que a efetividade de um raio de luz que passa próximo a borda da pupila pode ser 1/5 daqueles que passam pelo centro da mesma [? 67].

Conforme revisado por Berg e Tan [8], a córnea não sofre os efeitos da idade, possuindo a mesma função de transmissão de luz nos jovens e nos adultos. Estudos de light scattering revelaram que cada raio de luz sofre uma dispersão aproximada à função do comprimento de onda na potência -4 (aproximação ao *Rayleigh scattering*). Seguindo esta lei, o seguinte modelo para transmissão de luz foi proposto [8].

$$\log(t) = -0.016 - c * \lambda^{-4} \quad (5.1)$$

onde t é a transmitância, λ é o comprimento de onda e c é uma constante que vale $21 * 10^8 nm^4$ para transmissão total - luz em forma de cone com 170 graus - e $85 * 10^8 nm^4$ para transmissão direta - luz em forma de cone com 1 grau.

Boettner e Wolter coletaram valores de transmissão de luz no humor aquoso, na lente, no humor vítreo e na retina, conforme pode ser visto na Figura 5.1 [13].

Estes dados serão importantes pois, se algum modelo completo for proposto, deve considerar a perturbação que a luz sofre quando passa pelas estruturas do olho. Estas funções, anexadas a extensão da lei de Weber-Fechner proposta por Stevens [94], podem trazer mais precisão para o modelo que descreve o tamanho da pupila em função da intensidade de luz.

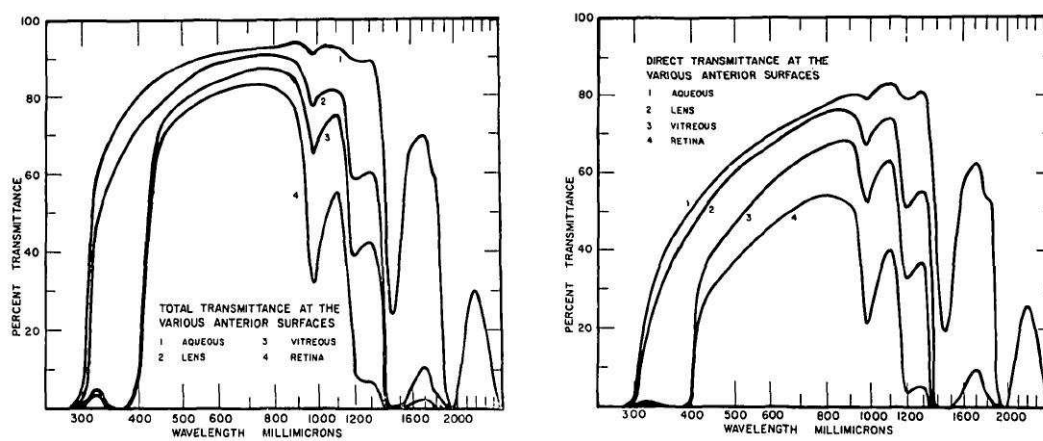


Figura 5.1: Transmissão da luz direta e total nas estruturas do olho. Fonte: [13]

6 MODELOS PARA MÚSCULOS

O músculo dilatador pode ser simulado com técnicas de já conhecidas para modelagem de músculos [71, 70, 69]. Segundo Heldoorn et al. [42], existem vários modelos para simular a interação dos músculos esfíncter com o ambiente em que se encontram. Os parâmetros para cada modelo divergem assim como a sua implementação e seu resultado [42]. Após uma vasta análise dos modelos existentes, Heldoorn criou um modelo neuromuscular baseado em um sistema massa mola com dissipação de energia que recebe estímulos de uma rede neural. Neste modelo, pode-se ativar o esfíncter de maneira não uniforme permitindo a simulação de doenças.

7 MODELOS PARA SIMULAÇÃO DE DINÂMICA PUPILAR

Os modelos encontrados para dinâmica pupilar infelizmente consideram apenas a intensidade da luz que chega a retina. Não foi encontrado um modelo que assuma como entrada níveis de drogas, interesse ou mesmo distância focal. Segundo [48] e [86] os estudos sobre a variação pupilar em função da distância focal ainda estão incompletos, portanto os modelos que poderiam ser baseados nestes experimentos poderiam não contemplar todas as possibilidades.

A variação da pupila em função da luz foi mapeada por Longtin e Milton, e Loewenfeld e Newsome [61, 60] como um sistema dinâmico não linear. O modelo tem base em considerações fisiológicas e anatômicas e resulta em uma equação *delay-differential*. Este tipo de equação leva em consideração o estado atual de uma variável e são implementados como funções recursivas em computação. É possível encontrar modelos mais simples representam as curvas de dilatação da pupila em função da intensidade luminosa aplicada a ela. Porém estes modelos representam apenas as curvas de aproximação para um conjunto de dados capturados em experimentos.

Nas próximas seções serão apresentados alguns modelos para dilatação pupilar baseados na intensidade da luz.

7.1 Modelo de Moon e Spencer 1944

O modelo de [67] é uma equação que representa o diâmetro da pupila em função da luminância de uma cena. Esta equação foi construída com dados experimentais de vários autores, portanto, diz respeito ao grupo de voluntários que participaram dos experimentos.

$$D = 4.9 - 3 * \tan[0.4 * (\log_{10}(L) + 0.5)] \quad (7.1)$$

Com o diâmetro D variando de 2 a 8 mm e luminância de fundo de cena L medida em millilamberts (mLb), variando de $10^5 blondels$ em dias com sol a $10^{-5} blondels$ em noites escuras.

7.2 Modelo de Groot e Gebhard 1952

Da mesma forma que o modelo de Moon e Spencer, o modelo de Groot e Gebhard é uma equação que reflete a curva encontrada para um determinado número de pessoas [27].

$$D = 10^{(0.8558 - 0.000401(\log_{10}(L) + 8.1)^3)} \quad (7.2)$$

Com diâmetro D expresso em mm e luminância L medida em milliamberts (mLb).

7.3 Pokorny e Smith 1997

O modelo de Pokorny e Smith [76] é bem similar ao de Moon e Spencer, apenas algumas constantes variam.

$$D = 5 - 3 * \tan(0.4 * (\log_{10}(L))) \quad (7.3)$$

Com diâmetro D expresso em mm e luminância L medida em candelas por metro quadrado (cd/m^2). A Figura 7.1 compara os três modelos apresentados até o momento.

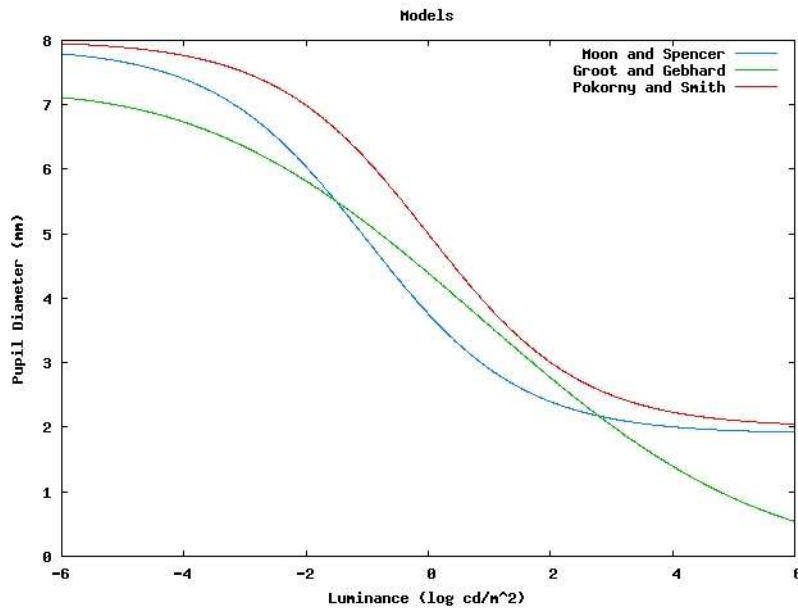


Figura 7.1: Comparação entre os modelos de Groot e Gebhard [27], Moon e Spencer [67] e Pokorny e Smith [76]. As equações foram equiparadas convertendo as entradas de millilambert para candelas por metro quadrado. Esta conversão é direta, sendo que 1 millilambert é igual a 3.18 candelas por metro quadrado.

7.4 Modelo de Longtin and Milton

O modelo de Longtin e Milton [61] é um modelo bem mais completo do que os anteriores. Trata-se de um modelo neurofisiológico que considera, além da intensidade da luz atual, a intensidade de um momento anterior, e como é um modelo temporal, também modela os movimentos de hippus por meio de uma equação *delay-differential*.

Este modelo utiliza uma definição de Stark em 1959 [93] que determina o nível de luz na retina (ϕ). Stark define que o fluxo (ϕ) é igual a luminância I , medida em lumens por milímetro quadrado (mm^{-2}), multiplicado pela área da pupila A , medida em milímetros (mm^2):

$$\phi = IA \quad (7.4)$$

Após uma latência de saída τ_r , o fluxo é transformado em um potencial de ação neural que passa através do nervo óptico. Sendo assim, podemos calcular o número de potenciais aferentes - que vão para o sistema nervoso central - por unidade de tempo $N(t)$:

$$N(t) = \eta \ln \left[\frac{\phi(t - \tau_r)}{\bar{\phi}} \right] \quad (7.5)$$

onde η é um fator constante e $\bar{\phi}$ é o limiar do fluxo, o nível máximo de luz que não afeta a pupila. A notação $\phi(t - \tau_r)$ indica que a quantidade depende do fluxo de um tempo no passado. O logarítmo natural já foi previamente discutido por Cornsweet em 1967 e é referenciado como a lei de Weber-Fechner [106, 36, 88, 94], que transforma estímulos enviados em estímulos percebidos pelo corpo humano. Com esse valor, podemos encontrar a quantidade de potenciais eferentes por unidade de tempo $E(t)$, ou seja, aqueles potenciais que são produzidos pelos núcleos de Edinger-Westphal, saem do sistema nervoso central após uma latência de τ_t e viajam via fibras parasimpáticas.

$$E(t) = \gamma' \ln \left[\frac{\phi(t - (\tau_t + \tau_r))}{\bar{\phi}} \right] \quad (7.6)$$

onde γ' é um fator constante e τ_t é a latência.

Os potenciais eferentes chegam, em seguida, na junção neuromuscular localizada no colarete. Alí, os potenciais liberam um neurotransmissor químico (acetilcolina) e iniciam o processo de contração. Este evento gera outra latência τ_m e, para nossas equações será chamado de atividade muscular (x). O próximo passo é definir uma equação entre os potenciais eferentes $E(t)$ e a atividade muscular (x) e em seguida entre x e a área pupilar (A).

A atividade muscular (x) é definida por um conjunto de fatores que podem incluir concentração e difusão de Ca^{2+} , *action-myosin cross linking*, o tamanho inicial e a tensão. Assim, se o único interesse é a área da pupila, não há necessidade de extrair x . Podemos encontrar x pela aproximação de Partridge e Benton (1981), que transforma a relação entre $E(t)$ e x de:

$$E(t) = M \left(x, \frac{dx}{dt}, \frac{d^2x}{dt^2}, \dots \right) \quad (7.7)$$

para:

$$E(t) \doteq k \left(\frac{dx}{dt} + \alpha x \right) \quad (7.8)$$

onde α é uma constante e k é um fator de proporcionalidade que depende das definições para x utilizadas no modelo. Combinando as equações 7.6 e 7.8, obtemos a atividade muscular (x):

$$\frac{dx}{dt} + \alpha x \doteq \gamma \ln \left[\frac{\phi(t - \tau)}{\bar{\phi}} \right] \quad (7.9)$$

onde $\tau = \tau_r + \tau_t + \tau_m$ é a latência total e $\gamma \equiv \gamma'/k$.

Para definir uma função que retorna a área da pupila, precisamos: (i) garantir que o resultado seja positivo e fechado em limites finitos; (ii) refletir o papel elasto-mecânico das propriedades da íris na dinâmica pupilar. Uma das alternativas que cumpre estes requisitos é a função de Hill ($f(x)$):

$$A = \frac{\Lambda \theta^n}{\theta^n + x^n} + \Lambda' \quad (7.10)$$

onde Λ' e $\Lambda + \Lambda'$ são, respectivamente, as áreas pupilares mínima e máxima, e θ é o valor de x quando a área da pupila é média. Aqui, estamos aproximando a curva que descreve a área em função da atividade muscular.

Usando a equação 7.10 podemos rescrever 7.9 em termos da área pupilar:

$$\frac{dg}{dA} \frac{dA}{dt} + \alpha g(A) = \gamma \ln \left[\frac{\phi(t - \tau)}{\bar{\phi}} \right] \quad (7.11)$$

onde $g(x)$ é a inversa da função de Hill ($f(x)$). Note que: (i) a função $A(t)$ é recursiva; (ii) é necessário especificar a função $I(t)$ no intervalo $t \in (-\tau, 0)$. Desta forma, cria-se um modelo da área pela intensidade de iluminação.

8 RECONHECIMENTO DE ÍRIS

O reconhecimento de íris é uma área de estudo da computação associado a biometria. Biometria são as classificações e medidas de características biológicas realizadas automaticamente visando a obtenção de valores quantitativos plausíveis que, com alta confiabilidade, podem diferenciar dois indivíduos [79]. Trata-se de conseguir distinguir dois indivíduos com a leitura de suas íris.

Neste tipo de tecnologia, uma das características mais observadas é o grau de variabilidade intra e inter classes, ou seja, o quanto o objeto varia durante a vida, e o quanto dois objetos se diferenciam. É claro que, quanto menor a variação do primeiro caso e maior do segundo, melhor será a técnica [24]. Por esta métrica, é comum considerar a íris como uma das melhores estruturas do corpo para ser medida e classificada pela biometria. Em uma escala de 0% a 100%, onde 0% é o pior e 100% o melhor caso, ela possui 96% de unicidade, 93% de universalidade, 97% de permanência, 62% de colectabilidade, 98% de performance e 50% de aceitação dos usuários, segundo dados coletados por Proença [79]. Mesmo a aceitação sendo baixa, outros sistemas de reconhecimento possuem uma aceitação menor e nas outras características ela se sobressai. É extremamente difícil falsificar íris por via cirúrgica, porém íris artificiais podem ser lidas no processo.

Os resultados como a acurácia e velocidade do sistema de identificação encorajam ainda mais os pesquisadores rumo a um sistema de informação em larga escala [79]. Daugman [22] mostrou que um padrão de íris tem 250 graus de liberdade, o que resulta na probabilidade de 1 para 7 bilhões de duas pessoas possuírem a mesma íris.

Entre as vantagens da utilização da íris em sistemas biométricos pode-se citar [68]:

- É um órgão altamente protegido.
- É visível a distância
- Alta randomicidade de padrões
- Mudanças no tamanho da pupila indicam que o organismo está vivo.
- Baixa penetrância genética
- Estável ao longo da vida

Como desvantagens pode-se enumerar [68]:

- Alvo pequeno e movimentação rápida.
- Possui uma superfície curva e reflexiva
- Obstrução pelas pálpebras e cílios.
- Deformações não são elásticas

O processo de reconhecimento da íris observa o seguinte fluxo: captura, segmentação, normalização, extração de características e comparação de assinaturas. A captura da imagem da íris é feita com uma câmera tradicional utilizando um feixe de luz próximo ao infravermelho para iluminar a íris. A segmentação separa apenas a íris, deixando de lado a pupila, a esclera e o resto das estruturas. Os algoritmos se baseiam em íris redondas em ambas as bordas (interna e externa). O processo de normalização posiciona e altera o tamanho da íris, de maneira que o algoritmo de extração de características não dependa destes valores [79]. Normalmente, para este passo é utilizado o algoritmo de Daugman [22].

Para a extração de características da íris existem três categorias de métodos utilizados: *phase-based*, *zero-crossing* e *texture analysis*. Os métodos geram cadeias binárias como saída, geralmente com 266 graus de liberdade, e estas cadeias são comparadas com as que existem nas bases de dados. O sujeito é reconhecido mesmo que 10% da cadeia binária esteja em desacordo com a cadeia cadastrada. Este percentual existe para ignorar erros como blur, ausência de foco, baixa qualidade, problemas na câmera, obstrução, etc [79, 24].

9 BANCOS DE DADOS DE FOTOS DE ÍRIS

Nos últimos anos, a performance dos algoritmos de reconhecimento de íris foi melhorada consideravelmente, tornando-os cada vez mais viáveis para o uso comercial [51]. Muitos testes estão sendo realizados sobre fotos de íris humanas na tentativa de provar que os algoritmos não possuem falhas. No entanto, a coleta de imagens de íris não é tão fácil de ser realizada. Além de necessitar uma iluminação adequada, de muitos indivíduos dispostos e de equipamentos específicos, a captura da íris possui imprecisões: falta de foco, alterações nos raios de luz pelo efeito de scattering da córnea, a possível interferência de luz proveniente de reflexos na coróide, entre outros.

Dado esta dificuldade, existem instituições que criaram bancos de dados de imagens de íris. Bancos de dados que mantêm um conjunto grande de fotos de íris reais para pesquisa e análise. Alguns deles disponibilizam publicamente as informações, apenas preservam seus copyrights. O CASIA [104] foi o primeiro banco público a surgir, com 756 imagens de íris de 108 olhos com 7 sessões de captura utilizando um dispositivo especial semelhante a um pupilômetro. O CASIA é mantido pelo National Laboratory of Pattern Recognition (NLPR) do Institute of Automation (IA) da Chinese Academy of Sciences (CAS) e permite acesso e uso gratuito. Atualmente é o maior banco público, com apenas 756 imagens [116]. Dos bancos proprietários, o maior deles tem 350.000 imagens [63].

Um outro banco de dados é o UPOL [31, 32, 33], com 384 imagens de íris de 64 pessoas diferentes (3 sessões para cada olho). As imagens estão em formato PNG, com 24 bits RGB e tamanho de 576x768 pixels. As fotos foram escaneadas com um dispositivo óptico TOPCON TRC50IA conectado com uma câmera SONY DXC-950P 3CCD.

O banco de dados da UBIRIS [78] é composto por 1.877 imagens de íris coletadas de 241 pessoas. As imagens foram capturadas com uma câmera tradicional Nikon E5700, salvas com formato JPEG com tamanhos 800x600 em 24 bits e 200x150 em 24 bits e tons de cinza. Ao contrário da CASIA e do UPOL, o UBIRIS mantém imagens sem qualquer alteração para remoção de erro ou melhoria de foco. Eles também se preocuparam em fotografar íris em diferentes condições de iluminação.

O quarto banco de dados é da universidade de Bath [102], contendo 16.000 imagens de íris tiradas a partir de 800 olhos de 400 pessoas. Estão disponíveis em escala de cinza, em formato BMP, com 1.2 MB cada. No entanto, apenas 1.000 imagens estão disponíveis gratuitamente para download. Estão comprimidas em formato JPEG, com resolução de 1280x960 e em escala de cinza.

10 SÍNTESE DE ÍRIS BIOLOGICAMENTE CORRETAS

A dificuldade de captura de imagens de íris e o baixo volume de imagens de íris nos bancos de dados públicos fez com que diversos pesquisadores criassem técnicas para produzir imagens realistas. O primeiro trabalho envolvendo síntese de imagens realísticas foi feito por Lefohn et al[56], seguindo a estrutura dos produtores de olhos artificiais (*oculists*). Uma íris é montada como uma sequência sobreposta de texturas semi-transparentes e a cada uma é anexada um objeto de cone. Cada textura representa algum artefato de uma camada da estrutura da íris (criptas, sulcos, vasos sanguíneos). O rendering é feito com um *ray tracer* considerando a transparência das texturas, mas desconsiderando as propriedades do material encontrado numa íris real. Na imagem final a composição das texturas cria uma sensação de profundidade, tornando as imagens mais realistas. Porém, apesar de realistas, o algoritmo requer que um artista desenhe texturas que representem fielmente as características do olho. O trabalho também gerou apenas imagens de olhos castanhos, verdes e azuis.

Cui et al. [21] criaram um novo método na área de processamento de imagens, baseado em *principal component analysis* (PCA) e super resolução. O método sintetiza um vetor de características globais com 75 dimensões, criado a partir de imagens de íris reais, para apenas 8 dimensões e utiliza super resolução para reconstruir a imagem da íris. Aquelas 8 dimensões devem ser alteradas para gerar novas imagens de íris.

Em 2005, Wecker et al [51] apresentaram uma outra solução, na qual uma imagem de íris é decomposta usando multiresolução e wavelets [23] e recombinada utilizando resoluções decompostas de outras íris. Neste modelo é necessário um pré-processamento onde o centro da pupila é alinhado ao centro da íris e a pupila é removida. Este pré-processamento pode resultar na perda de informações na beira de pigmentos, região onde a pupila encontra-se com a íris, conforme pode ser visualizado na Figuras 2.11 e 2.13. Uma outra limitação é que as resoluções de duas íris só podem ser misturadas se elas possuem características semelhantes, por exemplo o mesmo número de anéis (rings) com altas frequências. Isso exige uma classificação prévia das imagens a combinar.

Ainda em 2005, Makthal e Ross [63] desenvolveram um método de síntese de íris baseado em cadeias de Markov. Em resumo, o algoritmo é dividido em duas partes: a primeira seleciona regiões (criptas, sulcos, etc) em uma ou mais imagens de íris e determina pesos a cada uma delas; a seguinte executa um método iterativo que consulta as regiões, analisa a melhor delas e salva em uma nova imagem. O processo termina quando a imagem gerada se parecer com uma íris, sem ter ruídos visíveis, o que requer cerca de 10 iterações. O algoritmo gera boas imagens de íris, mas requer intervenção humana na

avaliação de cada iteração do método. É o usuário que define se a imagem da íris está boa ou não.

Em 2006, Zuo e Schmid [116, 117] criaram um modelo, baseado na anatomia da íris, que pode ser dividido em cinco etapas principais: (i) em um ambiente 3D, gerar fibras contínuas em coordenadas cilíndricas (Z, R, θ) , onde Z é o tamanho da íris, R a distância medida radialmente e θ é o ângulo rotacional; (ii) projetar as fibras em um espaço 2D; (iii) usar funções coseno para adicionar o efeito do colarete; (iv) adicionar um efeito de blur na imagem, um relevo e um filtro de erro Gaussiano. O modelo contém 40 parâmetros randômicos e não biológicos capazes de gerar muitas íris diferentes.

Embora que todos os métodos anteriores gerem imagens convincentes, eles apenas refletem a percepção de artistas ou criam variações em cima de imagens reais. Para se ter dados mais consistentes é necessário gerar as imagens via parâmetros provenientes da biologia e da física como, por exemplo, estrutura das fibras, volume e densidade pigmentação, índices de refração e, até mesmo, estrutura celular [116]. Em 2006, surgiu o primeiro artigo propondo um modelo preditivo para a composição da cor do olho. Lam e Baranoski [54] desenvolveram um método estocástico que, baseado num *ray tracer* por comprimento de onda, calcula, para cada raio de luz, a refração, reflexão e absorção dentro das camadas da íris. Os fatores de reflexão e absorção são calculados a partir de informações biológicas das células e componentes químicos. O resultado é capaz de determinar a tonalidade de uma íris com qualidade, porém o método não consegue determinar o surgimento de criptas ou sulcos de pigmentos, assim como ignora as bordas da íris.

Atualmente, não existe nenhum algoritmo que considere uma possível alteração do tamanho da pupila, e em consequência a modificação do padrão da íris, após a imagem formada. Além de parâmetros físicos e biológicos, uma situação interessante seria considerar a idade do indivíduo ao construir a íris, visto que elas mudam de cor com o tempo, mas não variam muito o seu padrão.

11 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um estudo sobre a íris humana considerando desde noções sobre anatomia e fisiologia, até o estado atual dos algoritmos de síntese de imagens de íris. Nota-se que questões importantes sobre a estrutura nervosa do corpo humano ainda são pouco conhecidos e que várias pesquisas apresentaram hipóteses que ainda não foram comprovadas. Uma das maiores questões ainda em aberto é como criar um modelo que reflita o tamanho da pupila em função de todas as variáveis envolvidas: luz [81, 34], foco [48, 86], drogas, doenças [11, 49], fatores emocionais [74], respiração [115, 17], batidas do coração [114, 17], interesse e curiosidade [43], idade [95, 12, 85], cor da íris [10], nível de consciência [62], comprimento de onda [2, 107] e padrões espaciais [101, 57, 81].

Também conclui-se que o volume de imagens de íris nos bancos de dados públicos ainda não é suficiente e que os algoritmos de reconhecimento de íris necessitam de mais dados para provarem a sua usabilidade. Além disso, os algoritmos para geração de imagens de íris não conseguem produzir imagens realistas sem intervenção humana, seja ela artística ou tendo fotos de íris como base. Seria interessante podermos criar novas imagens a partir de informações biofísicas presentes neste trabalho. Quem sabe até utilizando somente parâmetros biológicos e gerando imagens nunca antes catalogadas.

REFERÊNCIAS

- [1] D. M. Albert, R. Green, M. L. Zimbric, C. Lo, R. E. Gangnon, K. Hope, and J. Gleiser. Iris melanocyte numbers in asian, african american, and caucasian irides. *Trans Am Ophthalmol Soc*, 101:217–222, Nov 2003.
- [2] M. Alpern and F. W. Campbell. The spectral sensitivity of the consensual light reflex. *J Physiol.*, 164(3):478–507, 1962.
- [3] M. Alpern, D. W. McCready Jr., and L. Barr. The dependence of the photopupil response on flash duration and intensity. *The Journal of General Physiology*, 47:265–278, 1963.
- [4] G. V. G. Baranoski and M. W. Y. Lam. Qualitative assessment of undetectable melanin distribution in lightly pigmented irides. *Journal of Biomedical Optics*, (12(3)):030501–1 – 030501–3, May/Jun 2007.
- [5] J. L. Barbur. Learning from the pupil - studies of basic mechanisms and clinical applications. In *The Visual Neurosciences*, Eds. L. M. Chalupa and J. S. Werner, Cambridge, MA: MIT Press, 1:641–656, 2004.
- [6] W. H. Bates. *The cure of imperfect sight by treatment without glasses*. Central fixation Pub. Co.
- [7] A. L. Bell. Histology lab IX: the eye. <http://faculty.une.edu/com/abell/histo/histolab3b.htm>, 1999. [Online; accessed 12-February-2007].
- [8] T. J. T. P. V. D. Berg and K. E. W. P. Tan. Light transmittance of the human cornea from 320 to 700 nm for different ages. *Vision Research*, 34:1453–1456, June 1994.
- [9] O. Bergamin and R. H. Kardon. Latency of the pupil light reflex: sample rate, stimulus intensity and variation in normal subjects. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 44:1546–1554, 2003.
- [10] O. Bergamin, A. Schoetzau, K. Sugimoto, and M. Zulauf. The influence of iris color on the pupillary light reflex. *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, 236(8):567–570, July 1998.
- [11] O. Bergamin, M. B. Zimmerman, and R. H. Kardon. Pupil light reflex in normal and diseased eyes: Diagnosis of visual dysfunction using waveform partitioning. *Ophthalmology*, Volume 110, Issue 1, Pages 106-114, 110(1):106–114, 2003.

- [12] P. Bitsios, R. Prettyman, and E. Szabadi. Changes in autonomic function with age: a study of pupillary kinetics in healthy young and old people. *Age and Ageing*, 25(6):432–438, 1996.
- [13] E. A. Boettner and J. R. Wolter. Transmission of the ocular media. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 1:776–783, 1962.
- [14] L. D. Bores. Ocular anatomy. <http://e-sunbear.com/>, 2002. [Online; accessed 12-February-2007].
- [15] P. C. Bressloff and C. V. Wood. Spontaneous oscillations in a nonlinear delayed-feedback shunting model of the pupil light reflex. *Physical Review E (Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics)*, 58(3):3597–3605, Sep 1998.
- [16] H. J. Burd, S. J. Judge, and M. J. Flavell. Mechanics of accommodation of the human eye. *Vision Res*, (39(9)):1591–1596, May 1999.
- [17] G. Calcagnini, F. Censi, S. Lino, and S. Cerutti. Spontaneous fluctuations of human pupil reflect central autonomic rhythms. *Methods Inf Med.*, 39(2):142–145, Jun 2000.
- [18] R. L. O. O. Centre. Eye cancer. http://www.eyetumour.com/ocular_tumours.php, 2007. [Online; accessed 12-February-2007].
- [19] R. N. Clark. Clarkvision photography: Resolution of the human eye. <http://www.clarkvision.com/imagedetail/eye-resolution.html>, 2006. [Online; accessed 12-February-2007].
- [20] D. Coleman. Unified model for the accommodative mechanism. *Am J Ophthalmol*, (69):1063–1142, 1970.
- [21] J. Cui, Y. Wang, J. Huang, T. Tan, and Z. Sun. An iris image synthesis method based on pca and super-resolution. In *ICPR 04: Proceedings of the Pattern Recognition, 17th International Conference on (ICPR04) Volume 4*, pages 471–474, Washington, DC, USA, 2004. IEEE Computer Society.
- [22] J. Daugman. High confidence visual recognition of persons by a test of statistical independence. In *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, volume 25(11), pages 1148–1161, November 1993.
- [23] J. Daugman. How iris recognition works. In *Proceedings of 2002 International Conference on Image Processing*, volume 1, 2002.
- [24] J. Daugman. *Biometrics: personal identification in networked society*, volume 1. Springer, New York, NY, USA, 2006.
- [25] G. C. Davenport and C. B. Davenport. Heredity of eye-color in man. *Science*, 26:590–592, 1907.
- [26] S. Davies, M. H. Elliott, E. Floor, T. G. Truscott, M. Zareba, T. Sarna, F. A. Shamsi, and M. E. Boulton. Photocytotoxicity of lipofuscin in human retinal pigment epithelial cells. *Free Radical Biology and Medicine*, 31(2):256–265, July 2001.

- [27] S. G. de Groot and J. W. Gebhard. Pupil size as determined by adapting luminance. *J. Opt. Soc. Am.*, 42:492–495, 1952.
- [28] L. de Launey. A note on the photopupil reflex. *J. Opt. Soc. Am.*, 39(5):364–367, May 1949.
- [29] C. Deckert. Eye design book. <http://www.eyedesignbook.com/index.html>, 2007. [Online; accessed 12-February-2007].
- [30] Dept of Anatomy and Cell Biology of the Indiana University. Eye lab. http://anatomy.iupui.edu/courses/histo_D502/D502f04/Labs.f04/eye19.eye.f04.html, 2006. [Online; accessed 12-February-2007].
- [31] M. Dobes and L. Machala. Iris database. <http://www.inf.upol.cz/iris/>, 2004.
- [32] M. Dobes, L. Machala, P. Tichavsky, and J. Pospisil. Human eye iris recognition using the mutual information. *Optik*, 115(9):399–405, 2004.
- [33] M. Dobes, J. Martinek, D. Skoupil, Z. Dobesova, and J. Pospisil. Human eye localization using the modified hough transform. *Optik*, 117(10):468–473, 2006.
- [34] C. J. Ellis. The pupillary light reflex in normal subjects. *British Journal of Ophthalmology*, 65(11):754–759, Nov 1981.
- [35] E. Evanovich. Evolução da visão em cores. <http://www.biociencia.org/index.php?option=content&task=view&id=106>, 2004. [Online; accessed 12-February-2007].
- [36] G. Fechner. Elemente der psychophysik i u. ii. *Breitkopf u. Hartel, Leipzig*, 1907.
- [37] R. Foster and M. Smith. Eye anatomy and function. <http://www.peteducation.com/article.cfm?cls=1&cat=1344&articleid=1596>, 2007. [Online; accessed 12-February-2007].
- [38] J. T. Fulton. Human is a blocked tetrachromat. <http://www.4colorvision.com/files/tetrachromat.htm>, 2007. [Online; accessed 12-February-2007].
- [39] J. T. Fulton. Standardized human eye. <http://www.4colorvision.com/standeye.htm>, 2007. [Online; accessed 12-February-2007].
- [40] D. Gasparowsky. Calculation of the $v(l)$ curves with precising procedures. In *XI - th national conference on lighting*, Varna, Bulgaria, 2001. Bulgarian National Committee on Illumination.
- [41] A. Hachol, W. Szczepanowska-Nowak, H. Kasprzak, I. Zawojka, A. Dudzinski, R. Kinasz, and D. Wygledowska-Promienska. Measurement of pupil reactivity using fast pupillometry. *Physiol. Meas.*, 28:61–72, 2007.
- [42] M. Heldoorn, J. V. Leeuwen, and J. Vanderschoot. Modelling the biomechanics and control of sphincters. *J Exp Biol*, 204(23):4013–4022, Dec 2001.
- [43] E. H. Hess and J. M. Polt. Pupil Size in Relation to Mental Activity during Simple Problem-Solving. *Science*, 143:1190–1192, Mar. 1964.

- [44] H. C. Howland, S. Merola, and J. R. Basarab. The allometry and scaling of the size of vertebrate eyes. *Vision Research*, 44 (17):2043–, 2004.
- [45] P. Imesch, I. Wallow, and D. Albert. The color of the human eye: a review of morphologic correlates and of some conditions that affect iridial pigmentation. *Survey of ophthalmology*, 41 Suppl 2:177, Feb 1997.
- [46] A. N. International. What is aniridia? <http://www.aniridia.org/conditions/index.html>, 2007. [Online; accessed 12-February-2007].
- [47] H. Janiszewski and H. Lasota. Gardens of the sunlight: Claude Monet. http://www.e-mpressionism.net/monet/monet_en.html, 2004.
- [48] S. Kasthurirangan and A. Glasser. Characteristics of pupil responses during far-to-near and near-to-far accommodation. *Ophthalm. Physiol. Opt.*, 25:328–339, 2005.
- [49] M. Kojima, T. Shiori, T. Hosoki, H. Kitamura, T. Bando, and T. Someya. Pupillary light reflex in panic disorder. a trial using audiovisual stimulation. *Eur Arch Psychiatry Clin Neurosci*, 254(4):242–244, 2004.
- [50] W. Krenz, M. Robin, S. Barez, and L. Stark. Neurophysiological model of the normal and abnormal human pupil. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, BME-32(10):817–825, 1985.
- [51] F. S. L. Wecker and M. Gavrilova. Iris synthesis: A reverse subdivision application. *3rd International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 1:121–125, November 2005.
- [52] Laboratorio Rigor. A anatomia do olho humano. <http://www.laboratoriorigor.com.br/anatomia.html>, 2007. [Online; accessed 12-February-2007].
- [53] M. W. Y. Lam. Ilit: A predictive light transport model for the human iris. Master’s thesis, School of Computer Science, University of Waterloo, Waterloo, Canada, 2006.
- [54] M. W. Y. Lam and G. V. Baranoski. A predictive light transport model for the human iris. In *Proceedings of the ACM EUROGRAPHICS 2006*, volume 25 (3), pages 359–368, Vienna, Austria, 2006. Eurographics Association.
- [55] M. Larsson, N. L. Pedersen, and H. Stattin. Importance of genetic effects for characteristics of the human iris. *Twin Res.*, 6(3):192–200, June 2003.
- [56] A. Lefohn, B. Budge, P. Shirley, R. Caruso, and E. Reinhard. An ocularist’s approach to human iris synthesis. *IEEE Comput. Graph. Appl.*, 23(6):70–75, 2003.
- [57] Z. Li, P. Liang, and F. Sun. Properties of pupillary responses to dynamic random-dot stereograms. *Exp Brain Res*, 168:436–440, 2006.
- [58] H. Lindlahr. Iridagnosis: short table of contents. <http://www.soilandhealth.org/02/0201hyglibcat/020128iridagnosis/020128toc.html>, 1919. [Online; accessed 12-February-2007].

- [59] N. Link and L. Stark. Latency of the pupillary response. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 35(3):214–218, 1988.
- [60] I. Loewenfeld and D. Newsome. Iris mechanics. i. influence of pupil size on dynamics of pupillary movements. *Am J Ophthalmol.*, 71(1 Part 2):347–362, Jan 1971.
- [61] A. Longtin and J. G. Milton. Modelling autonomous oscillations in the human pupil light reflex using non-linear delay-differential equations. *Bulletin of Mathematical Biology*, 51 (5):605– 624, 1989.
- [62] O. Lowenstein and I. E. Loewenfeld. *The Eye.*, volume 3, chapter The Pupil., pages 255–337. Academic, New York, 2 edition, 1969.
- [63] S. Makthal and A. Ross. Synthesis of iris images using markov random fields. In *Proc. of 13th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, (Antalya, Turkey), September 2005.
- [64] I. Menon, D. Wakeham, S. Persad, M. Avaria, G. Trope, and P. Basu. Quantitative determination of the melanin contents in ocular tissues from human blue and brown eyes. *Journal of Ocular Pharmacology*, 8(8):35, 1992.
- [65] J. Miles. Miles research: Iris pigmentation research info. <http://www.milesresearch.com/iris/index.htm>, 2007. [Online; accessed 12-February-2007].
- [66] I. MMVII New Line Productions. The lord of the rings. <http://www.lordoftherings.net/legend/gallery/>, 2004. [Online; accessed 12-March-2007].
- [67] P. Moon and D. Spencer. On the stiles-crawford effect. *J. Opt. Soc. Am.*, 34:319–329, 1944.
- [68] A. Muron and J. Pospisil. The human iris structure and its usages. *Acta Univ. Palacki, Phisica*, 39:87–95, March 2000.
- [69] L. P. Nedel. Anatomic modeling of human bodies using physically-based muscle simulation. Master’s thesis, LIG - Computer Graphics Lab, EPFL - École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Switzerland, June 1998.
- [70] L. P. Nedel and D. Thalmann. Modeling and deformation of the human body using an anatomically-based approach. In *In Proceedings of Computer Animation’98*, pages 34–40, Philadelphia, Pennsylvania, USA, June 1998.
- [71] L. P. Nedel and D. Thalmann. Real time muscle deformations using mass-spring systems. In *In Proceedings of Computer graphics International (CGI’98)*, pages 156–165, Hannover, Germany, June 1998.
- [72] L. Niehaus, B. Guldin, and B. U. Meyer. Influence of transcranial magnetic stimulation on pupil size. *Journal of the Neurological Sciences*, 182(2):123–128, Jan 2001.

- [73] F. J. Ollivier, D. A. Samuelson, D. E. Brooks, P. A. Lewis, M. E. Kallberg, and A. M. Komromy. Comparative morphology of the tapetum lucidum (among selected species). *Veterinary Ophthalmology*, 7(1):11?22, March 2004.
- [74] A. Pease and B. Pease. *Desvendando os segredos da linguagem corporal*, volume 1. Sextante, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.
- [75] B. Pingnet, L. Beerden, H. J. Janssen, and E. L. M. Flerackers. Feedback in action: the mechanism of the iris. *Phys. Educ.*, 23:31–35, 1988.
- [76] J. Pokorny and V. C. Smith. The verriest lecture. how much light reaches the retina? In C.R. Cavonius (ed), *Colour Vision Deficiencies XIII. Documenta Ophthalmologica Proceedings Series 59*, pages 491–511, 1997.
- [77] C. M. Privitera and L. W. Stark. A binocular pupil model for simulation of relative afferent pupil defects and the swinging flashlight test. *Biological Cybernetics*, 94:215–224, 2006.
- [78] H. Proença and L. Alexandre. Ubiris: A noisy iris image database. In *Proceed. of ICIAP 2005 - Intern. Confer. on Image Analysis and Processing*, volume 1, pages 970–977, 2005. [Online; accessed 12-February-2007].
- [79] H. P. M. C. Proença. *Towards Non-Cooperative Biometric Iris Recognition*. PhD thesis, University of Beira Interior, Oct 2006.
- [80] T. R. Rebbeck, P. A. Kanetsky, A. H. Walker, R. Holmes, A. C. Halpern, L. M. Schuchter, D. E. Elder, and D. Guerry. P gene as an inherited biomarker of human eye color. *Cancer Epidemiol. Biomarkers Prev.*, 11(8):782–784, 2002.
- [81] P. Reeves. The response of the average pupil to various intensities of light. *Journal of the Optical Society of America*, 4(2):35–43, Mar 1920.
- [82] F. Reilly. Eyesite: Iris structure page. <http://www.middlepath.com.au/eyesite/struct.php>, 2007.
- [83] D. Robinson. Introduction to feedback control systems lecture notes. http://www.sensory-systems.ethz.ch/PDFs/Control_Systems.pdf, 2005. [Online; accessed 12-February-2007].
- [84] R. A. Schachar. Growth patterns of fresh human crystalline lenses measured by in vitro photographic biometry. *Journal of Anatomy*, 206:575, June 2005.
- [85] R. Schmid, P. Ceurremans, H. Luedtke, B. Wilhelm, and H. M. Wilhelm. Effect of age on the pupillomotor field. *Clinical Neural Ophthalmology*, 24(3):228–234, Sep 2004.
- [86] C. M. Schor and S. R. Bharadwaj. A pulse-step model of accommodation dynamics in the aging eye. *Vision Res.*, 45(10):1237–1254, May 2005.
- [87] J. M. Seddon, C. R. Sahagian, R. J. Glynn, and R. D. Spertduto. Evaluation of an iris color classification system. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 31:1592–1598, 1990.

- [88] K. Shigemoto. Weberfechner's law and cobbdouglas function. *Tezukayama Economic Papers*, 6:69–73, 1907.
- [89] D. Singh and A. Verma. Aniridia. <http://www.emedicine.com/oph/topic43.htm>, 2007. [Online; accessed 12-February-2007].
- [90] J. D. Smith, G. A. Masek, L. Y. Ichinose, T. Watamabe, and L. Stark. Single neuron activity in the pupillary system. *Brain Research*, 24:219–234, 1970.
- [91] R. S. Snell and M. A. Lemp. *Clinical Anatomy of the Eye*. Blackwell Publishing Limited, Massachusetts, USA, 2 edition, December 1997.
- [92] B. A. Souza. Doenças humanas gênicas. <http://www.ufv.br/dbg/BIO240/dg08.HTM>, 2007. [Online; accessed 12-February-2007].
- [93] L. W. Stark and P. M. Sherman. A servoanalytic study of consensual pupil reflex to light. *J. Neurophysiol.*, 20:17–26, 1959.
- [94] S. Stevens. On the psychophysical law. *Psychological Review*, 64:153–181, 1957.
- [95] R. H. Straub, U. Thies, and L. Kerp. The pupillary light reflex. 1. age-dependent and age-independent parameters in normal subjects. *Ophthalmologica*, 204(3):134–142, 1992.
- [96] R. A. Sturm and T. N. Frudakis. Eye colour: portals into pigmentation genes and ancestry. *Trends in Genetics*, 20(8):327–332, August 2004.
- [97] S. Tamm, E. Tamm, and J. W. Rohen. Age-related changes of the human ciliary muscle: A quantitative morphometric study. *Mechanisms of Ageing and Development*, 62:209–221, Feb 1992.
- [98] C. Tilmant, M. Charavel, M. Ponrouch, G. Gindre, L. Sarry, and J.-Y. Boire. Monitoring and modeling of pupillary dynamics. *Engineering in Medicine and Biology Society, 2003. Proceedings of the 25th Annual International Conference of the IEEE*, 1:678– 681, 2003.
- [99] P. D. Trevor-Roper and P. V. Curran. *The Eye and Its Disorders*, volume 3, chapter The Eyeball, pages 3–75. Blackwell Scientific Publications; St. Louis, Mo.: Distributors, USA, Blackwell Mosby, Oxford, Boston, 1984.
- [100] TV Globo. Wallpaper eva byte. <http://www.redpixel.com.br/images/news/wallpapereva.jpg>, 2004. [Online; accessed 12-March-2007].
- [101] K. Ukai. Spatial pattern as a stimulus to the pupillary system. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2(7):1094–1100, Jul 1985.
- [102] University of Bath. University of Bath iris image database. <http://www.bath.ac.uk/elec-eng/research/sipg/irisweb/index.htm>, 2005.
- [103] S. Usui and L. Stark. A model for nonlinear stochastic behavior of the pupil. *Biological Cybernetics*, 45(1):13–21, Aug 1982.

- [104] D. Y. Wang. Casia iris image database. <http://www.sinobiometrics.com/>, 2003. [Online; accessed 12-February-2007].
- [105] H. Wang, S. Lin, X. Liu, and S. B. Kang. Separating reflections in human iris images for illumination estimation. In I. C. Society, editor, *ICCV*, volume 2, pages 1691–1698, Los Alamitos, CA, USA, 2005. IEEE Computer Society.
- [106] E. Weber. De pulsu, resorptione, audita et tactu. annotationes anatomicae et physiologicae. *Trs. by H.E. Ross, Academic Press, New York, 1978, 1834.*
- [107] A. Werner. Spectral sensitivity of the pupillary system. *Clin. Exp. Optom.*, 86(4):235–238, 2003.
- [108] A. R. Wielgus and T. Sarna. Melanin in human irides of different color and age donors. *Pigment cell research*, 18:454, December 2005.
- [109] Wikipedia. Eye — Wikipedia, the free encyclopedia. <http://en.wikipedia.org/wiki/Eye>, 2007. [Online; accessed 12-February-2007].
- [110] Wikipedia. Eye color — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/wiki/Eye_Color, 2007. [Online; accessed 12-February-2007].
- [111] Wikipedia. Heterochromia — Wikipedia, the free encyclopedia. <http://en.wikipedia.org/wiki/Heterochromia>, 2007. [Online; accessed 12-February-2007].
- [112] Wikipedia. Zonule of zinn — Wikipedia, the free encyclopedia. http://en.wikipedia.org/wiki/Zonules_of_Zinn, 2007. [Online; accessed 12-February-2007].
- [113] C. L. Wilkerson, N. A. Syed, M. R. Fisher, N. L. Robinson, I. H. L. Wallow, and D. M. Albert. Melanocytes and iris color: light microscopic findings. *Archives of Ophthalmology*, 114(4):437–442, Apr 1996.
- [114] H. Yoshida, H. Miuta, T. Gouhara, and Y. Suzuki. Statistical properties of simultaneously recorded fluctuations in pupil diameter and heart rate. *Proc IEEE EMBS Conf 1995*, 1:165–166, Sep 1995.
- [115] H. Yoshida, K. Yana, F. Okuyama, and T. Tokoro. Time-varying properties of respiratory fluctuations in pupil diameter of human eyes. *Methods Inf Med*, 33(1):46–48, Mar 1994.
- [116] J. Zuo and N. A. Schmid. A model based, anatomy based method for synthesizing iris images. In *Proc. of ICB'06, Hong Kong, China*, pages 428–435, Jan 2005.
- [117] J. Zuo, N. A. Schmid, and X. Chen. On performance comparison of real and synthetic iris images. *ICIP*, pages 305–308, Oct 2006.

ASSINATURAS

Vitor Fernando Pamplona
(Mestrando)

Prof. Dr. Manuel Menezes de Oliveira Neto
(Orientador)