

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA: INGENIERÍA ELECTRÓNICA

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO

DE:

INGENIERO ELECTRÓNICO

PROYECTO TÉCNICO

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE SOPORTE A LA DETECCIÓN DEL
GLAUCOMA A TRAVÉS DE PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES
BIOMÉDICAS DEL FONDO DE OJO Y USO DE SOFTWARE LIBRE.**

Autores:

Mirian Susana Encalada Ojeda

Edwin Gerardo Gamboa Vinueza

Tutor:

Ing. Eduardo Pinos V. MSc.

CUENCA, NOVIEMBRE DE 2016

Cesión de Derechos de los Autores

Nosotros Mirian Susana Encalada Ojeda y Edwin Gerardo Gamboa Vinueza, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación denominado: “Desarrollo de un sistema de soporte a la detección del glaucoma a través de procesamiento digital de imágenes biomédicas del fondo de ojo y uso de software libre.”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Electrónico con mención en Sistemas Industriales, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, Noviembre de 2016



Mirian Susana Encalada Ojeda

CI: 030260479-8



Edwin Gerardo Gamboa Vinueza

CI: 010482844-7

CERTIFICACIÓN

Yo declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación:
**“DESARROLLO DE UN SISTEMA DE SOPORTE A LA DETECCIÓN DEL
GLAUCOMA A TRAVÉS DE PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES
BIOMÉDICAS DEL FONDO DE OJO Y USO DE SOFTWARE LIBRE.”**,
realizado por, **Mirian Susana Encalada Ojeda y Edwin Gerardo Gamboa
Vinuela**, obteniendo un **Proyecto Técnico** que cumple con todos los requisitos
estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerado como
Trabajo de Titulación.

Cuenca, Noviembre del 2016



Ing. Eduardo Pinos V. Mg.T

TUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **Mirian Susana Encalada Ojeda**, con C.I. **0302604798** y **Edwin Gerardo Gamboa Vinueza**, con C.I. **0104828447** del “**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE SOPORTE A LA DETECCIÓN DEL GLAUCOMA A TRAVÉS DE PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES BIOMÉDICAS DEL FONDO DE OJO Y USO DE SOFTWARE LIBRE.**” Certificamos que el total de este **Proyecto Técnico** es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría

Cuenca, Noviembre de 2016

Mirian Susana Encalada Ojeda

CI: 030260479-8

Edwin Gerardo Gamboa Vinueza

CI: 010482844-7

AGRADECIMIENTO

Queremos expresar el más sincero agradecimiento a nuestro tutor del proyecto técnico Ing. Eduardo Pinos Velez y nuestro director de Grupo de Investigación Ing. Vladimir Robles, por ayudarnos a realizar el presente trabajo de investigación, quienes con su sabiduría y de una manera desinteresada, nos han guiado para concluir satisfactoriamente este proyecto.

Además queremos hacer un extensivo agradecimiento al Dr. Luis Chacón, Oftalmólogo especialista en Glaucoma de la Clínica “Santa Lucía”, por su importante aporte a este proyecto ya que con su conocimiento y experiencia ha sido parte fundamental del mismo. De igual manera nuestro mas sincero agradecimiento a la Doctora Ana Maria Núñez que con su amabilidad y paciencia nos acogió de la mejor manera para que este proyecto se concluya con éxito y a todos quienes conforman esta Clínica por abrirnos sus puertas, permitiéndonos realizar las pruebas necesarias para el desarrollo y validación de este trabajo de investigación.

También expresamos nuestra gratitud al Dr. Blasco Arichavala, Oftalmólogo del Centro Oftalmológico Arichavala, por impartirnos sus conocimientos para el desarrollo del presente trabajo.

Agradecemos a todos nuestros amigos, compañeros y docentes de la Universidad Politécnica Salesiana, por formar parte de esta importante etapa de nuestra vida.

Mirian Susana - Edwin Gerardo

DEDICATORIA

A Dios por guiarme y bendecirme cada día para lograr cumplir una meta mas en mi vida, a mis padres Jorge y Laura por el esfuerzo y sacrificio realizado para verme convertida en una profesional; a mis hermanos Anita, Jorge Luis y Karla por el apoyo incondicional en todo momento; a mis abuelitos Cesar y Julia por sus palabras que me alentaron a no rendirme jamás; a mi sobrino Cristopher por ser mi alegría, mi inspiración y mi motivación para salir adelante; a mi novio Jorge Luis por su ejemplo de superación, por acompañarme en los buenos y malos momentos de esta etapa, por sus palabras de aliento que me ayudaron a levantarme con mas fuerzas de las caidas; a mis amigos Santiago, Carlos y Johana por sus consejos y apoyo brindado durante estos años. Los amo

Mirian Susana

Dedico este trabajo primeramente a Dios por haberme llevado por el camino del bien y del éxito. A mi madre Laura que con sus sabias palabras y con todos sus esfuerzos siempre estuvo presente apoyándome y nunca dejó que me de por vencido, te amo mami.

A Pedro que con su cariño desinteresado pude terminar esta etapa importante de mi vida, siendo una de las personas que siempre me aconseja, ayuda y confía en mi.

A mis hermanas Carina y Wendy por acompañarme en todo momento, y ser un pilar importante en mi vida. A mi sobrina Yajaira por alegrarme los días con sus locuras y diversiones. Las quiero mucho.

A mi padre Gerardo que de una u otra manera estuvo presente para realizarme como un profesional.

Edwin Gerardo

ÍNDICE GENERAL

© DERECHOS DE AUTOR	II
CERTIFICACIÓN.....	III
AGRADECIMIENTO	IV
DEDICATORIA.....	VI
ÍNDICE GENERAL	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	X
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
ABREVIATURAS.....	XII
ANTECEDENTES	12
INTRODUCCIÓN	13
CAPÍTULO 1. ESTUDIO DEL DESARROLLO DEL GLAUCOMA Y DE LAS HERRAMIENTAS EXISTENTES PARA LA DETECCIÓN DEL MISMO ...	14
1.1 ANATOMÍA DEL OJO HUMANO	14
1.2 RETINA	15
1.2.1 MÁCULA	15
1.2.2 NERVIÓ ÓPTICO.....	15
1.2.3 CÁMARA ANTERIOR.....	16
1.2.4 CÁMARA POSTERIOR	16
1.2.5 CÁMARA VÍTREA	16
1.3 GLAUCOMA	16
1.4 TIPOS DE GLAUCOMA	16
1.4.1 GLAUCOMA PRIMARIO DE ÁNGULO ABIERTO (GPAA).....	17
1.4.2 GLAUCOMA DE ÁNGULO CERRADO	17
1.4.3 GLAUCOMA SECUNDARIO.....	18
1.5 HERRAMIENTAS PARA LA DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE GLAUCOMA	18
1.5.1 CAMPIMETRÍA	18
1.5.2 TONOMETRÍA	19
1.5.3 TOMOGRAFÍA DE COHERENCIA ÓPTICA	20

1.5.4 PENTACAM	21
CAPITULO 2. DESARROLLO DEL ALGORITMO PARA EL PROCESAMIENTO DIGITAL DE LAS IMÁGENES DE FONDO DE OJO.. 23	
2.1 SOFTWARE PARA EL DIAGNÓSTICO.....	23
2.1.1 Qt Creator.....	23
2.1.1.1 QtDesigner.	23
2.1.1.2 QtAssistant.....	24
2.1.2 OpenCV(Open Source Computer Vision)	25
2.2. BASE DE DATOS DE IMÁGENES BIOMEDICAS	25
2.3 DIAGRAMA DE FLUJO PARA PROCESAMIENTO DE IMÁGENES	26
2.4 TÉCNICAS USADAS PARA EL PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES.....	26
2.4.1 MÉTODOS DE FILTRADO	27
2.4.1.1 Filtro de Suavizado Gaussiano.....	27
2.4.1.2 Binarización	27
2.4.1.3 Filtro Bilateral.....	27
2.4.1.4 Filtro Adaptativo	28
2.4.2 OPERACIONES MORFOLÓGICAS	29
2.4.2.1 Dilatación.....	29
2.4.2.2 Erosión	29
2.5 IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO PARA EL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES	29
2.5.1 DISCO.....	31
2.5.2 COPA.....	32
CAPITULO 3. DESARROLLO DEL ALGORITMO PARA LA DETECCIÓN DEL GLAUCOMA Y SU RESPECTIVO DIAGNÓSTICO. 33	
3.1 MÉTODOS PARA LA DETECCIÓN DEL GLAUCOMA	33
3.1.1 Relación Copa-Disco	33
3.1.2 Regla ISNT	34
3.2 DIAGRAMA DE FLUJO PARA DETECCIÓN DE GLAUCOMA MEDIANTE RELACIÓN COPA-DISCO	34

3.3 IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO PARA LA DETECCIÓN DE GLAUCOMA MEDIANTE RELACIÓN COPA-DISCO	35
3.4 DIAGRAMA DE FLUJO PARA DETECCIÓN DE GLAUCOMA MEDIANTE REGLA ISNT	37
3.5 IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO PARA LA DETECCIÓN DE GLAUCOMA MEDIANTE LA REGLA ISNT	37
3.6 INTERFAZ GRÁFICA PARA EL RESPECTIVO DIAGNÓSTICO	39
CAPITULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	41
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	46
BIBLIOGRAFÍA	48

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Anatomía del ojo humano [9].</i>	14
<i>Figura 2. Imagen de fondo de ojo</i>	15
<i>Figura 3. Glaucoma de ángulo abierto [7]</i>	17
<i>Figura 4. Glaucoma de ángulo cerrado [7]</i>	18
<i>Figura 5. Exámen de Campo Visual [37].</i>	19
<i>Figura 6. Tonómetro de Goldmann digital [28]</i>	20
<i>Figura 7. Equipo de OCT</i>	21
<i>Figura 8. Pentacam [34].</i>	22
<i>Figura 9. Imagen tomada con el Pentacam para la corrección de la PIO [33].</i>	22
<i>Figura10. Pantalla principal de QtDesigner para el diseño de GUI.</i>	24
<i>Figura11. Pantalla principal de QtAssistant.</i>	24
<i>Figura12. Diagrama de Flujo del Procesamiento</i>	26
<i>Figura 13. Filtro Adaptativo [49]</i>	28
<i>Figura14. Región de Interés</i>	30
<i>Figura15. (a) Imagen filtrada con desenfoque gaussiano, (b) Imagen dilatada</i>	30
<i>Figura 16. (a) Máscara del nervio óptico, (b) Imagen binarizada y erosionada, (c) Imagen con filtrado bilateral.</i>	31
<i>Figura 17. (a) Contorno interno del nervio óptico, (b) Imagen con filtrado adaptativo, (c) Operación OR.</i>	31
<i>Figura18. (a) Imagen filtrada y binarizada, (b) Imagen erosionada, (c) Contornos</i>	32
<i>Figura19. Regiones para obtención de la copa</i>	32
<i>Figura 20. Imagen Biomédica de Fondo de ojo</i>	33
<i>Figura 21. (a) Fondo de ojo, se observa el nervio óptico del ojo derecho (b) Fondo de ojo, se observa el nervio óptico del ojo izquierdo.</i>	34
<i>Figura22. Diagrama de Flujo - Regla CDR</i>	35
<i>Figura 23. Imagen procesada</i>	36
<i>Figura24. Diagrama de Flujo - Regla ISNT</i>	37
<i>Figura25. (a) Copa y Disco Binarizados y Umbralizados, (b) Imagen Triangular.</i>	38
<i>Figura 26. Anillo Neurorretiniano, Región Superior</i>	38
<i>Figura 27. Regiones ISNT</i>	39
<i>Figura 28. Interfaz Gráfica</i>	40

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 4.1 Identificación automática del disco y la copa con el algoritmo propuesto.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 4.2 Comparación de resultados obtenidos de la relación copa-disco del oftalmólogo con el software propuesto.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 4.3 Comparación de resultados obtenidos de la regla ISNT del oftalmólogo con el software propuesto.</i>	<i>45</i>

ABREVIATURAS

CONADIS	Consejo Nacional para la Igualdad de Discapacidades
SNC	Sistemas Nervioso Central
PIO	Presión Intraocular
GPAA	Glaucoma primario de ángulo abierto.
CV	Campo Visual
RCD	Relación Copa-Disco
TAG	Tonometría de aplanación de Goldmann
OCT	Tomografía de coherencia óptica
OMS	Organización Mundial de la Salud
ISNT	Inferior-Superior-Nasal-Temporal

ANTECEDENTES

En Ecuador según el Consejo Nacional para la Igualdad de Discapacidades (CONADIS) existe un 0,8% de personas con discapacidad visual, donde una gran parte ha sido a causa del glaucoma que es una enfermedad silenciosa, donde el paciente va perdiendo la visión. Al observar este gran porcentaje de personas no videntes debido al glaucoma, surge la necesidad de ayudar desde el estudio de la Biomedicina, puesto que tanto para los pacientes como para los especialistas la concatenación de la ingeniería con la medicina es un avance para optimizar los diagnósticos ejecutados. [4]

Los datos o antecedentes con respecto a la detección del glaucoma se han expuesto en distintos trabajos como: el desarrollo del algoritmo de la relación copa-disco (RCD) [1], el diseño de un algoritmo para la segmentación del disco óptico y la copa óptica [2], además se ha realizado un sistema automático para la detección del borde de la zona de relación de discos y la extracción de varias características ya sea de manera vertical u horizontal de la RCD [3]; en los cuales se prioriza de manera general el procesamiento de imágenes para poder manipular el brillo del entorno, la umbralización, el contraste, y otros métodos para los distintos inconvenientes para una detección temprana del glaucoma.

El glaucoma es una de las principales causas de daño ocular y pérdida de la visión en la que aumenta la presión intraocular (PIO) del ojo, deteriorando progresivamente el nervio óptico [3], además es una enfermedad no curable que puede causar ceguera irreversible al no ser detectada en una etapa temprana. [1]

En la mayoría de casos el glaucoma no es detectado a tiempo, por ello se propone dar un soporte a los especialistas en oftalmología al momento del análisis de la imagen biomédica del ojo, la cual consiste en avanzar con el proyecto realizado de la caracterización de la imagen del ojo para la detección y prevención del glaucoma [8]. Anexándole la realización de una herramienta de diagnóstico que optimizará el resultado en la detección del glaucoma con uso de software libre, lo que permitirá al especialista la facilidad de dar un diagnóstico sin necesidad de procesar varios parámetros o características propias de la enfermedad.

INTRODUCCIÓN

El glaucoma es una enfermedad ocular que daña el nervio óptico (haz de fibras nerviosas que transportan la información desde el ojo al cerebro), provocando la pérdida de la visión periférica y por último la ceguera. El daño que se da en el nervio óptico, generalmente es por la presión intraocular (PIO) elevada, pero también se puede dar cuando la presión intraocular es normal, por lo que existen varios parámetros que se deben tomar en cuenta para dar un diagnóstico efectivo [5].

El glaucoma puede presentarse en cualquier persona sin importar la edad o raza. Sin embargo existen algunos factores que pueden aumentar la probabilidad de desarrollar esta enfermedad como es la etnicidad, donde las personas afroamericanas son más propensas a desarrollarla, así como también la genética debido a que el glaucoma es hereditario. También la edad influye en el desarrollo de dicha enfermedad ocular ya que se vuelve más común con la edad especialmente en las personas mayores a 40 años [5].

Hasta agosto de 2014, según la organización mundial de la salud (OMS) se ha registrado 5,700.000 personas con ceguera o pérdida de visión debida al glaucoma [6]. Siendo considerado la segunda causa de ceguera en el mundo. En el cual las fibras nerviosas de la papila óptica se degeneran lenta y progresivamente hasta destruirse todas produciendo la ceguera [6].

La detección del Glaucoma se lo puede realizar mediante la Tomografía de Coherencia Óptica (OCT) ó la Tomografía retinal (HTR), la desventaja que presentan éstos exámenes son el costo elevado y por ende se encuentran en pocas clínicas oftalmológicas [7]. Por lo que se propone realizar una herramienta accesible que facilite el diagnóstico del glaucoma utilizando procesamiento digital de imágenes del ojo humano. Para lo cual se va requerir del uso de una cámara especial para tomar las imágenes de fondo de ojo necesarias; además se realizará en software libre lo que ayudará la accesibilidad y rapidez del diagnóstico por parte del especialista.

CAPÍTULO 1. ESTUDIO DEL DESARROLLO DEL GLAUCOMA Y DE LAS HERRAMIENTAS EXISTENTES PARA LA DETECCIÓN DEL MISMO

El ojo humano es un sistema óptico convergente que forma una imagen invertida del mundo externo sobre la capa sensible de la retina, situada al fondo del globo ocular [10]. En este capítulo se realiza una descripción de las partes del ojo humano, luego se realiza el estudio sobre el glaucoma, los tipos de glaucoma y como se desarrolla. Además se realiza una investigación sobre las características para el diagnóstico, donde se describe los tipos de exámenes o herramientas existentes para el diagnóstico y los métodos de detección.

1.1 ANATOMÍA DEL OJO HUMANO

El ojo humano consta del globo ocular y órganos anexos, donde el globo ocular tiene una forma casi esférica de unos 24mm de diámetro aproximadamente, el mismo que está constituido por varias capas y cámaras y de tres membranas como es la esclerótica, la coroides y la retina. El globo ocular se encarga de detectar la luz y transmitir las imágenes al cerebro mediante el nervio óptico, por lo que es la base del sentido de la vista [9] [13].

La coroides interviene en la nutrición del ojo y en la formación del humor acuoso y vítreo que se encuentran dentro del globo ocular. En su parte anterior se halla el iris, que es un disco de color variable con un orificio central llamado pupila (véase figura 1). La cámara anterior puede ser más grande en los pacientes con miopía, y por el contrario pueden ser más estrechas en pacientes con glaucoma [9] [11].

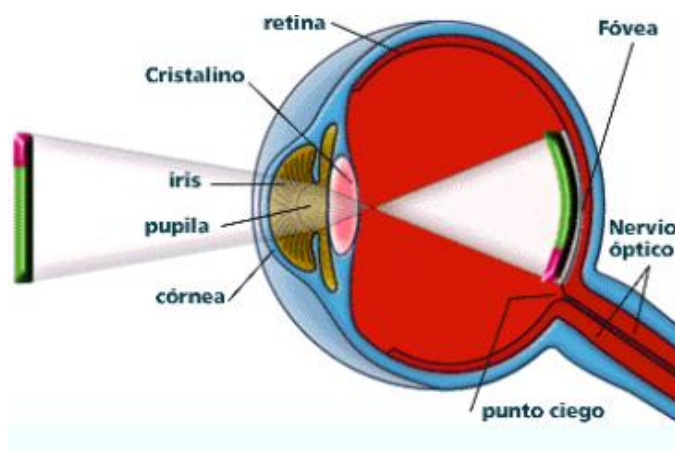


Figura 1. Anatomía del ojo humano [9].

1.2 RETINA

La retina es la capa más interna del ojo, siendo esta una extensión del sistema nervioso central (SNC) que está conectada con el cerebro por medio del nervio óptico. Internamente tiene contacto con el cuerpo vítreo y externamente con la coroides y es la parte donde se forman las imágenes que observamos [10] [13].

1.2.1 MÁCULA

En la parte central de la retina se encuentra la mácula, que tiene una forma ovalada con un pigmento carotenoides¹ amarillo no fotolábil y un diámetro aproximado de 5,5mm (véase figura 2) [10] [12].

1.2.2 NERVIO ÓPTICO

El nervio óptico está constituido por fibras nerviosas de las células fotosensibles de la retina y es el encargado de la transmisión de los impulsos nerviosos hasta la corteza cerebral, como se observa en la figura 2, en la parte de la retina se encuentra el nervio óptico, el cual tiene una forma ovalada de color amarillento rosado esto representa un punto ciego en el campo visual para la persona [10] [12] [13].

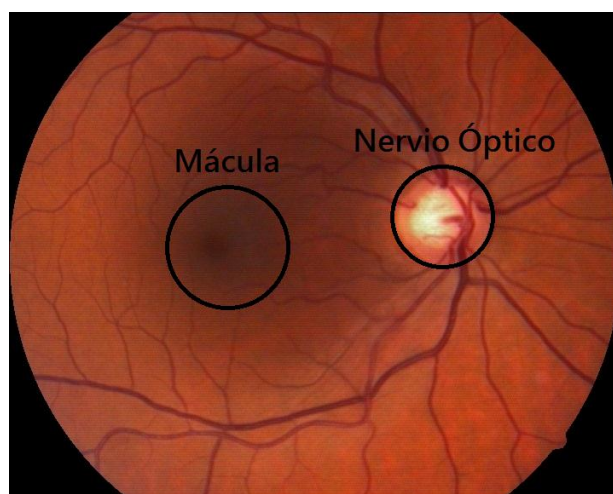


Figura 2. Imagen de fondo de ojo.

Fuente: Los autores

¹ Carotenoides: Es el responsable de la gran mayoría de los colores amarillos, anaranjados o rojos presentes en los alimentos vegetales, y también de los colores anaranjados de varios alimentos animales. <https://www.ecured.cu/Carotenoides>

1.2.3 CÁMARA ANTERIOR

Esta zona está cubierta de humor acuoso, se encuentra entre el iris y la córnea. Cuando este líquido no circula adecuadamente se produce el glaucoma que se da por el aumento de la presión intraocular (PIO) y esto puede destruir las fibras nerviosas dañando ciertas estructuras del ojo [13].

1.2.4 CÁMARA POSTERIOR

Esta zona también está cubierta de humor acuoso y se encuentra entre el iris y el cristalino. Tanto la cámara anterior como posterior se comunican a través de la pupila [13].

1.2.5 CÁMARA VÍTREA

Se encuentra entre el cristalino y la retina y está cubierta de humor vítreo, que es un líquido transparente viscoso [13].

1.3 GLAUCOMA

El glaucoma es una de las principales enfermedades que causa la pérdida de la visión, ya que afecta gradualmente al nervio óptico por medio de la presión intraocular (PIO) debido a la acumulación del humor acuoso, deteriorando las fibras nerviosas que se encuentran en la retina y el campo de visión de la persona. [7] [2] [16] [17] [18].

En la etapa temprana las personas no se percatan el verse afectadas por esta enfermedad, pues no existen síntomas previos como el dolor o pérdida visual imprevista, ya que sólo se tendrá conocimiento cuando el glaucoma se encuentre bastante desarrollado; por lo cual se debe controlar la presión intraocular que se encuentra entre 10mm y 20mm de Hg, además se debe analizar el campo de visión en toda el área, y la relación de copa-disco (RCD), todas estas características son importantes para dar un diagnóstico veraz. [3] [19] [18].

1.4 TIPOS DE GLAUCOMA

Dentro del estudio de glaucoma existen varios tipos de esta enfermedad, de los cuales se mencionará los más importantes y habituales.

1.4.1 GLAUCOMA PRIMARIO DE ÁNGULO ABIERTO (GPAA)

Es el tipo de glaucoma más usual, que se desarrolla debido al escaso drenaje del humor acuoso, a través del ángulo entre el iris y la córnea (véase Fig3.), hacia la parte exterior del ojo, causando el aumento de la PIO entre 30 – 45mm Hg, la pérdida de visión percibiendo solo manchas negras desde la periferia hacia el centro y cambios de la papila al observar una excavación más grande de lo normal en el nervio óptico produciendo la ruptura de las fibras nerviosas [18] [20] [21] [7].

Este tipo de glaucoma en su inicio no presenta síntomas, por lo que no se siente dolor y no se distingue ninguna anomalía a simple vista, para ello se debe realizar un diagnóstico de manera anticipada ya que es una enfermedad irreversible, generalmente a personas con miopía alta, que tengan el grosor de la córnea menor a 550micras y enfermedades que afectan al sistema nervioso [22] [23].

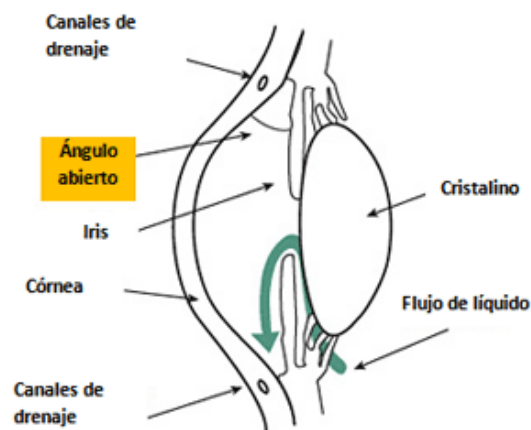


Figura 3. *Glaucoma de ángulo abierto* [7]

1.4.2 GLAUCOMA DE ÁNGULO CERRADO

Este tipo de glaucoma es menos común que el glaucoma primario de ángulo abierto (GPAA), afectando a mujeres en la mayoría de casos, el glaucoma de ángulo cerrado se produce porque el fragmento inferior del iris se encuentra unido a la parte posterior de la córnea acortando el ángulo en varios grados y formando una zona poca profunda [24] [20] [18].

En caso de que el ángulo de drenaje sea bloqueado completamente, se producirá síntomas como dolores, vómitos, náuseas, problemas extremos en el ojo, entre

otros. Para ello la persona que tenga dichos síntomas se debe atender de urgencia ya que podría quedar ciega en un par de días [7] [18].

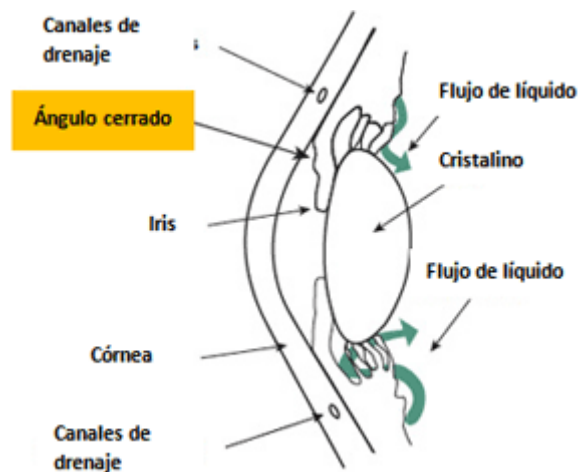


Figura 4. *Glaucoma de ángulo cerrado* [7]

1.4.3 GLAUCOMA SECUNDARIO

Es poco frecuente, ya que se obtiene este tipo de glaucoma a partir de alguna causa conocida previamente en el paciente como: pseudoexfoliación, uveítis, trauma en el globo ocular, corticoides, cambio de tamaño en el cristalino, diabetes retiniana. Para la prevención del desarrollo del glaucoma secundario generalmente se realiza una cirugía ocular o con medicamentos recetados por el oftalmólogo [20] [7].

1.5 HERRAMIENTAS PARA LA DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE GLAUCOMA

Los especialistas en enfermedades oculares utilizan varias herramientas para dar un resultado a sus pacientes, por lo cual se estudiará los instrumentos usados en la oftalmología para la detección del glaucoma.

1.5.1 CAMPIMETRÍA

La campimetría o perimetría visual es un examen para determinar diferentes enfermedades oftalmológicas como el glaucoma o diversas patologías retinianas, ya que estudia las alteraciones que se dan en el Campo Visual (CV) del paciente. El campo visual que se obtiene es una representación invertida de la retina [15].

La perimetría es una herramienta fundamental para el diagnóstico del glaucoma. Los resultados obtenidos por este examen determinarán la pérdida visual de paciente, con lo cual se puede establecer un diagnóstico del mismo [14] [15].

El campo visual es definido como un área del espacio, en la que los objetos pueden ser percibidos por un ojo que se está inmóvil, mirando un punto hacia el infinito. El campo visual es por tanto todo el espacio que un ojo es capaz de abarcar en un instante. Las dimensiones monoculares del campo visual en una persona normal se extienden hasta los 60° a nivel superior y hasta los 70°-75° a nivel inferior. En sentido horizontal el campo visual se extiende nasalmente hasta los 60°-65° y en sentido temporal hasta los 100°-105° [14], figura 5.



Figura 5. Examen del campo visual [37].

1.5.2 TONOMETRÍA

Es un método usado para medir la presión intraocular (PIO) en el ojo humano, con la ayuda de un oftalmólogo mediante un tonómetro, es de gran importancia realizarse el examen de tonometría porque si la PIO tiende a aumentar se puede pronosticar que el paciente tiene glaucoma. [7] [19] [25]

Existen distintos tipos de tonometrías basándose en la deformación que se causa en la córnea, por ende hay tonómetros para cada una de estas causas como: el tonómetro de indentación, tonómetro de aplanación de Goldmann, y el tonómetro de contorno dinámico. [26] [28]

El tonómetro de Goldmann (ver figura6.), se fundamenta en el principio en el cual un área de 3,06 mm en un ojo humano es aplanada con 520 micras de espesor de la córnea y el aumento de la PIO no tiene significancia. Entonces no se debe generar alguna corrección en la dureza ocular y la PIO será medida en mm Hg. [27] [7]

La tonometría de aplanación de Goldmann (TAG), es una de las técnicas más precisas y utilizadas por los especialistas, siendo una de las más sencillas por su fácil procedimiento. Es distinto a los otros tonómetros ya que posee una mejoría en que no influye la dureza del contorno ocular para la adquisición de los valores de la PIO. [20] [7]

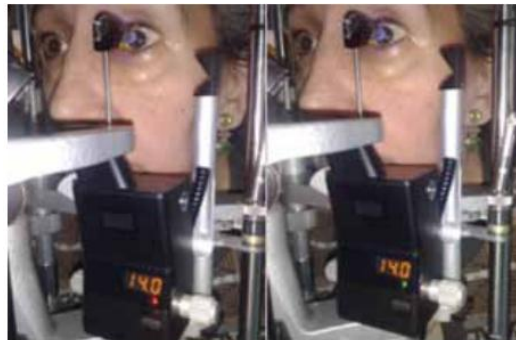


Figura 6. *Tonómetro de Goldmann digital* [28]

1.5.3 TOMOGRAFÍA DE COHERENCIA ÓPTICA

La Tomografía de coherencia óptica (OCT) (véase figura7.) es un método no invasivo, donde se puede observar el grosor de las capas de fibras del nervio óptico y otros tejidos biológicos, la cual utiliza una luz infrarroja con longitud de onda de 820nm; al obtener la imagen anatómica colorimétrica de alta resolución, se puede analizar la medida cuantitativa del espesor del anillo retiniano y de la retina en general, lo que hace posible avanzar en el estudio del glaucoma [30] [26] [31] [29].

La OCT se basa en el principio del uso del interferómetro², el cual utiliza las ondas de luz para realizar una medición; para la obtención de la imagen se efectúa mediante dos haces que se dirigen hacia la retina y hacia un espejo, para luego ser comparadas con un interferómetro [29] [7].



Figura 7. *Equipo de OCT*

Fuente: *Los autores*

1.5.4 PENTACAM

La técnica de Pentacam se implantó en el área oftalmológica, figura 8, que permite la observación de imágenes en todo el eje óptico del ojo, consta de una cámara rotatoria Scheimpflug que opera a 360°. Esta se extiende desde la zona anterior de la córnea hasta la parte posterior del cristalino, puede tomar de 25 a 50 imágenes tridimensionales, las cuales tienen una alta precisión y resolución, y son capturadas en tan solo 2 segundos [32] [33] [34].

² Interferómetro: Es un instrumento que emplea la interferencia de las ondas de luz para medir con gran precisión las longitudes de onda de la luz misma. <https://www.ecured.cu/Interfer%C3%B3metro>.



Figura 8. *Pentacam* [34].

Para realizar este examen el paciente debe estar ubicado de forma alineada en el instrumento, el especialista colocará la cámara en el ojo del paciente, posteriormente se pedirá al paciente que mantenga los ojos bien abiertos y que trate de no parpadear al momento de tomar la imagen. Luego del escaneo, los datos son procesados y se indicaran en un recuadro general los resultados que son interpretados por el especialista para dar un diagnóstico [32].

Para pacientes con glaucoma que requieren el estudio topográfico estructural del segmento anterior del ojo, el pentacam es ideal ya que permite medir la amplitud angular, la profundidad y volumen de la cámara anterior así como también corregir la presión intraocular [33] [34], figura 9.

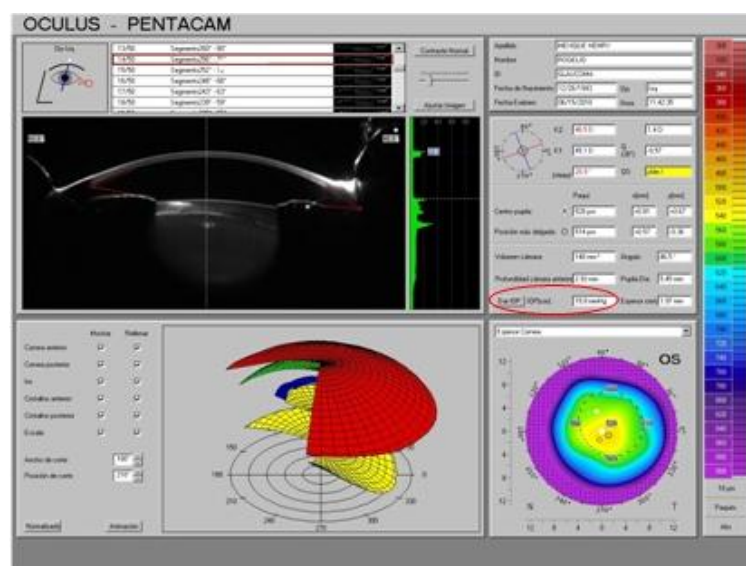


Figura 9. *Imagen adquirida con el Pentacam para la corrección de la PIO* [33].

CAPITULO 2. DESARROLLO DEL ALGORITMO PARA EL PROCESAMIENTO DIGITAL DE LAS IMÁGENES DE FONDO DE OJO.

En el presente capítulo se especificará el software libre utilizado, algunas características para la obtención de una aceptable base de datos, y los métodos usados para la obtención de la copa y el disco del nervio óptico mediante el procesamiento digital de imágenes. Para lo cual se dará a conocer algunas definiciones de las técnicas utilizadas para facilitar el entendimiento del algoritmo realizado en nuestro sistema.

Posteriormente se muestra el desarrollo del algoritmo programado en software libre, para la detección del borde de la copa y el disco del nervio óptico; finalmente se explicará y describirá cada una de las etapas de este proceso.

2.1 SOFTWARE PARA EL DIAGNÓSTICO

Para el análisis y por ende para un diagnóstico del glaucoma, se utilizó el software libre Qt Creator. Este software es una tecnología que nos proporciona una serie de herramientas y elementos gráficos para la creación de interfaces y aplicaciones multiplataforma [38].

Para el desarrollo del algoritmo se utilizó las librerías de OpenCV, que trabaja conjuntamente con la tecnología Qt ofreciendo una interfaz gráfica de usuario un poco más sofisticada y eficiente con un enfoque para aplicaciones casi en tiempo real, la cual contiene aproximadamente 500 algoritmos para imagen y análisis de video [39][40].

2.1.1 Qt Creator

En la actualidad este software permite realizar implementaciones en diferentes áreas, que va desde aplicaciones en escritorio hasta sistemas electrónicos y empujados. La tecnología Qt contiene herramientas de desarrollo y soporte como es Qt Designer y QtAssistant [38].

2.1.1.1 QtDesigner

Esta herramienta permite crear interfaces graficas de usuario. Proporciona un conjunto de componentes estándar y un mecanismo de conexión signal- slot que permite conectar eventos de la interfaz con la lógica del programa que han de soportar [38], figura 10.

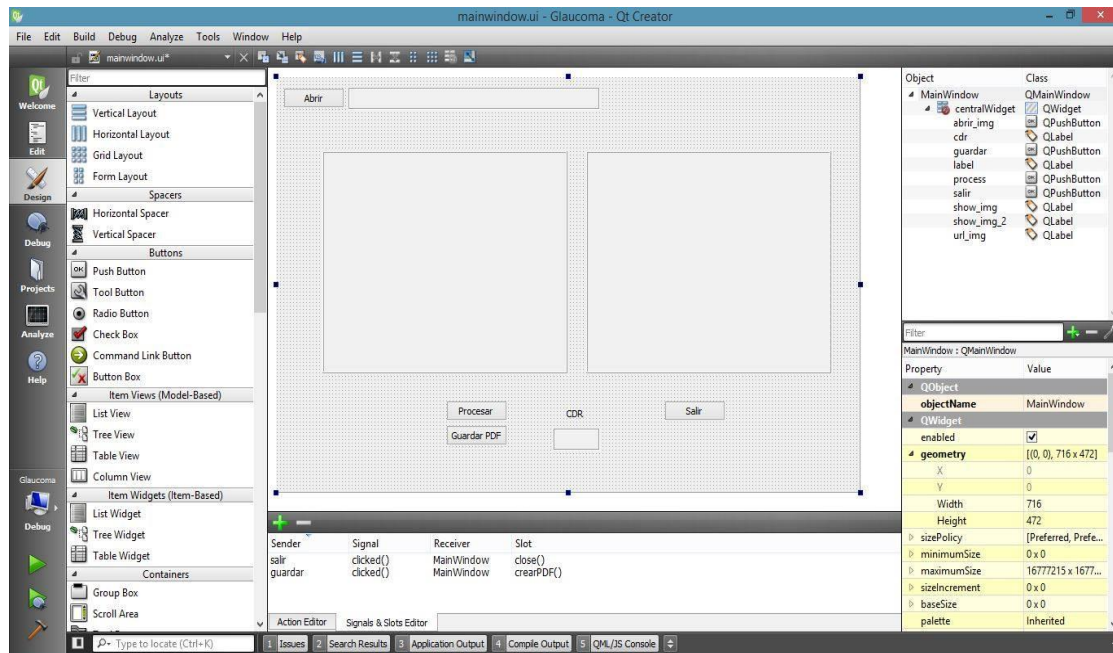


Figura 10. Pantalla principal de QtDesigner para el diseño de GUI.

Fuente: Los Autores

2.1.1.2 QtAssistant

Es un componente de Qt que permite navegar por la documentación, en forma de páginas HTML. También implementa opciones de búsqueda y de extensión [38], figura 11.

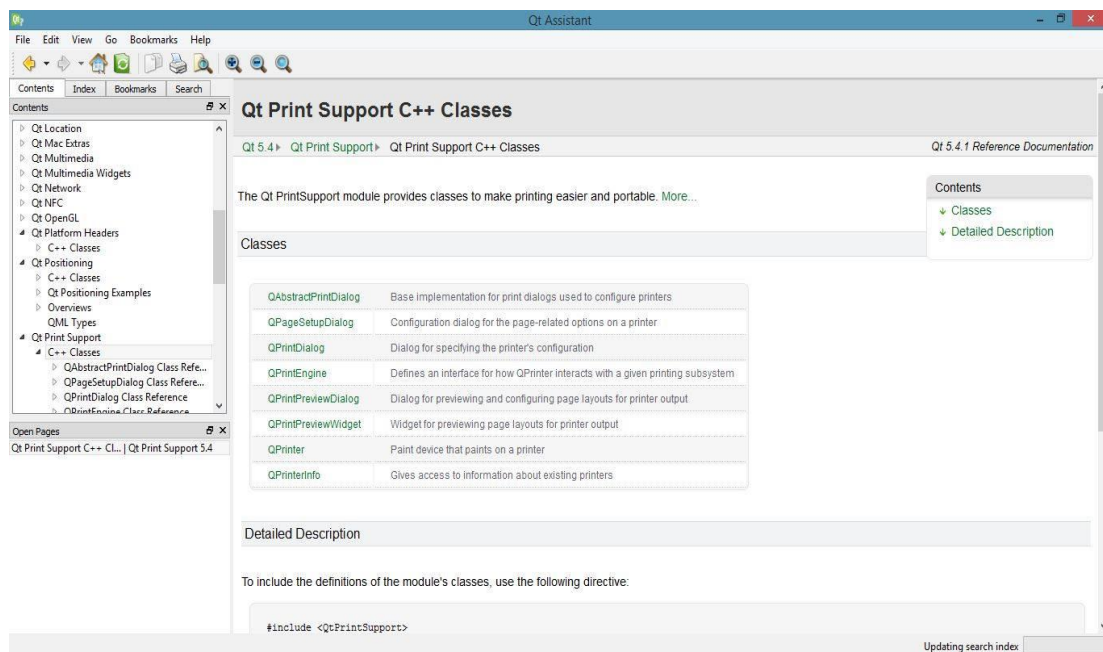


Figura 11. Pantalla principal de QtAssistant.

Fuente: Los Autores

2.1.2 OpenCV (Open Source Computer Vision)

Es una biblioteca de código abierto que contiene cientos de algoritmos de visión por ordenador. OpenCV es multiplataforma, lo que significa que se puede desarrollar aplicaciones en diferentes sistemas operativos como Windows, Linux, Mac OS X, etc [39] [40] [41].

OpenCv contiene varias bibliotecas compartidas o estáticas [41]. Los módulos utilizados para el desarrollo del algoritmo para el análisis y diagnóstico del glaucoma son los siguientes:

```
#include <opencv2/core/core.hpp>
#include <opencv2/highgui/highgui.hpp>
#include <opencv2/imgproc/imgproc.hpp>

#include "opencv2/features2d/features2d.hpp"
#include "opencv2/legacy/legacy.hpp"

#include <vector>
```

core: Es un módulo que define las estructuras de datos básicas, incluyendo las funciones multidimensional [41].

highgui: Es una interfaz de fácil uso para la captura de imagen y video[41].

imgproc: Es un módulo de procesamiento de imágenes, el cual contiene el filtrado de imágenes no lineal y lineal, también realiza transformaciones geométricas de imagen, la conversión de espacio de color, histogramas, etc [41].

features2d: Utilizada para detectar las características sobresalientes, descriptores y comparadores de descriptores [41].

2.2 BASE DE DATOS DE IMÁGENES BIOMÉDICAS

Después que se realizó el estudio sobre el glaucoma, de los métodos de diagnóstico y los instrumentos oftalmológicos más relevantes para determinar dicha enfermedad ocular, se precedió a la obtención de las imágenes biomédicas del ojo humano, las cuales se obtuvieron de la Clínica “Santa Lucía” de la ciudad de Quito de pacientes que fueron diagnosticados con glaucoma. Esta base de datos cuenta con 300 imágenes, de las cuales han sido descartadas la mayoría debido a la calidad de las mismas, siendo en algunos casos más opacos y en otras contenían partes más claras, debido a esto se perdían los patrones que se desean encontrar. Por lo que fueron 50 imágenes tomadas como válidas para el diagnóstico.

2.3 DIAGRAMA DE FLUJO PARA PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

Para el procesamiento de imágenes, se realizó el algoritmo de la figura 12, donde se elimina el ruido y aclara algunos bordes de la imagen biomédica, quedando lista para la obtención de los bordes y para luego proceder a la detección de la copa y del disco.

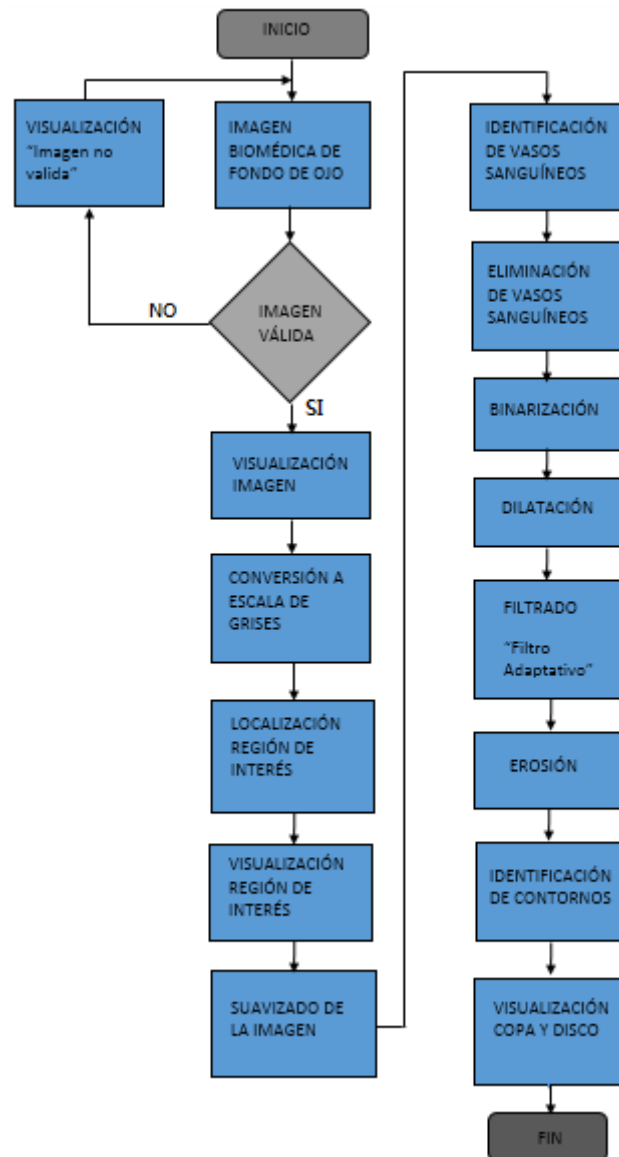


Figura 12. Diagrama de Flujo del Procesamiento

Fuente: Los Autores

2.4 TÉCNICAS USADAS PARA EL PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

En esta sección se presenta las distintas técnicas de procesamiento digital utilizadas con las imágenes de nuestra base de datos, para reconocer el nervio óptico y de

forma simultánea detectar las regiones del disco y la copa. Entre estas técnicas se describirá: el filtrado en la región de interés (ROI) y las operaciones morfológicas aplicadas.

2.4.1 MÉTODOS DE FILTRADO

2.4.1.1 Filtro de Suavizado Gaussiano

Se basa en el filtro de gauss (ver ecuación 2.1), el cual implementa máscaras que representa a la campana Gaussiana, por lo que realiza una convolución entre la matriz de la imagen y la matriz de Gauss; produciendo que la intensidad de los pixeles se aproxime entre sí [42] [43].

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-(x^2+y^2)/2\sigma^2} \quad (2.1)$$

Por ello el filtro de suavizado gaussiano principalmente realiza el difuminado de las imágenes para la eliminación del ruido, y al mismo tiempo hace que la imagen sea menos nítida o clara, ya que es común que se utilice para el opaque de los bordes y para la similitud de pixeles en la imagen [44].

2.4.1.2 Binarización

Es una técnica la cual convierte la imagen original en una imagen binaria (blanco y negro), y se dividen en dos tipos: binarización global y local [45].

El método de binarización global intenta localizar un umbral para aplicar en toda la imagen, por ello existe los distintos niveles de gris con los cuales se distingue la imagen de fondo [45] [46].

El método de binarización local divide a la imagen en varias partes, donde obtiene el umbral para cada una de ellas y relacionarse a los pixeles vecinos siendo procesadas aplicando su umbral local [45] [46].

2.4.1.3 Filtro Bilateral

Es un filtro que suaviza las regiones y reduce los colores fantasmas de una imagen conservando los bordes, mediante una combinación no lineal

basándose en niveles de grises de los pixeles vecinos de la imagen, tratando de igualar sus intensidades [47] [48].

La ecuación 2.2 del filtro bilateral se muestra a continuación: [48]

$$y[k] = \frac{\sum_{n=-N}^N W[k, n] * x[k - n]}{\sum_{n=-N}^N W[k, n]} \quad (2.2)$$

Donde:

k es la posición del pixel a procesar.

n es el pixel con que se compara el pixel k.

y[k] es el resultado para cada pixel de salida.

x[k] es el pixel de entrada.

$W[k, n]$ es un factor multiplicativo que se muestra en la ecuación 2.3 (σ_s = pesos espaciales) y ecuación 2.4 (σ_i = intensidad de gris) [48].

$$W_s[k, n] = \exp\left(-\frac{n^2}{2\sigma_s^2}\right) \quad (2.3)$$

$$W_i[k, n] = \exp\left(-\frac{(x[k] - x[k - n])^2}{2\sigma_i^2}\right) \quad (2.4)$$

2.4.1.4 Filtro Adaptativo

Este filtro se fundamenta en un algoritmo propuesto para mejorar la calidad de la imagen al poder actualizar sus coeficientes. Estos filtros son utilizados para los sistemas de control conjuntamente con redes neuronales [49].

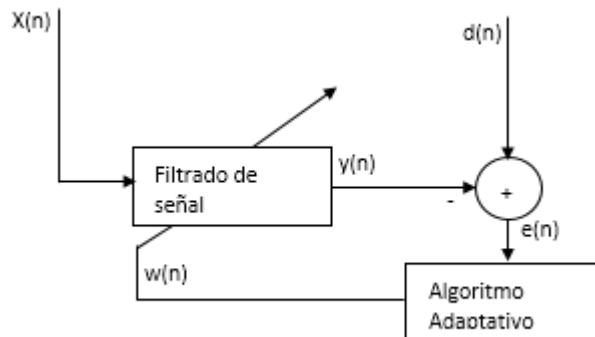


Figura 13. Filtro Adaptativo [49]

En la Figura13. Se muestra la estructura de un filtro adaptativo donde: $x(n)$ es la señal de entrada del sistema, $d(n)$ es la señal deseada, $y(n)$ es la señal de salida del filtro y $e(n)$ es la señal de error [49].

2.4.2 OPERACIONES MORFOLÓGICAS

2.4.2.1 Dilatación

Es un tipo de operación básica de morfología matemática que consiste en agregar una nueva capa externa de los objetos detectados, por ende agranda dicho objeto en la imagen. Además depende del elemento estructurado es decir de una ventana de cualquier tamaño que circula sobre la imagen y sustituye el pixel medio por el máximo de los niveles de gris cubiertos por el elemento estructurado [50] [51] [52].

2.4.2.2 Erosión

Es la operación morfológica que contrae y elimina las partes exteriores de un objeto mostrado en la imagen. De igual manera esta operación depende del elemento estructurado que circula sobre la imagen y sustituye el pixel medio por el mínimo de los niveles de gris cubiertos por el elemento estructurado [50] [51] [52].

2.5 IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO PARA EL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

Para empezar con el procesamiento de la imagen, es necesario encontrar la ubicación del nervio óptico (ver figura14.), para ello se realiza lo siguiente: se convierte a escala de grises, se encuentra los valores máximos y mínimos y se recorta la imagen en la región de interés.

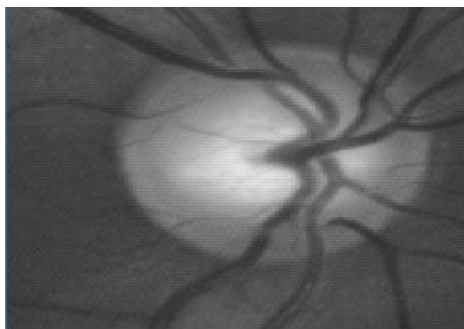
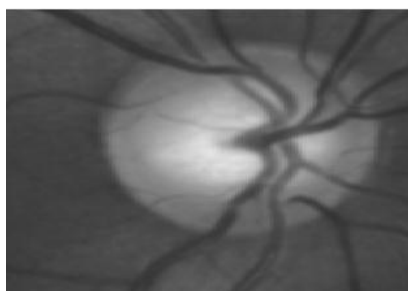


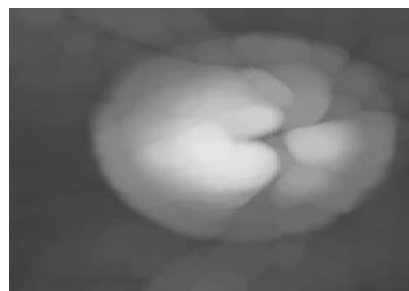
Figura 14. *Región de Interés*

Fuente: *Los Autores*

Para reducir el ruido y el detalle de la figura 14, se utilizó el filtro de suavizado gaussiano por lo que se ha variado el valor de sigma y el suavizado, dando así el resultado de la imagen filtrada que se observa en la figura 15(a); además se realiza la dilatación para observar con mayor realce la región donde se encuentra el disco y la copa del nervio óptico como se muestra en la figura 15(b).



(a)



b)

Figura 15. (a) *Imagen filtrada con desenfoque gaussiano*, (b) *Imagen dilatada*

Fuente: *Los Autores*

Se obtiene la máscara de la figura 15, para encontrar los vasos sanguíneos como se muestra en la figura 16(a), posteriormente se binariza y se erosiona la imagen aclarando dichos vasos, ver figura 16(b), para luego realizar un filtrado bilateral y eliminar en su totalidad los vasos sanguíneos en la parte externa del disco óptico como se observa en la figura 16(c) y de esta manera poder identificar con menor complejidad la parte esencial que corresponde a la enfermedad ocular.

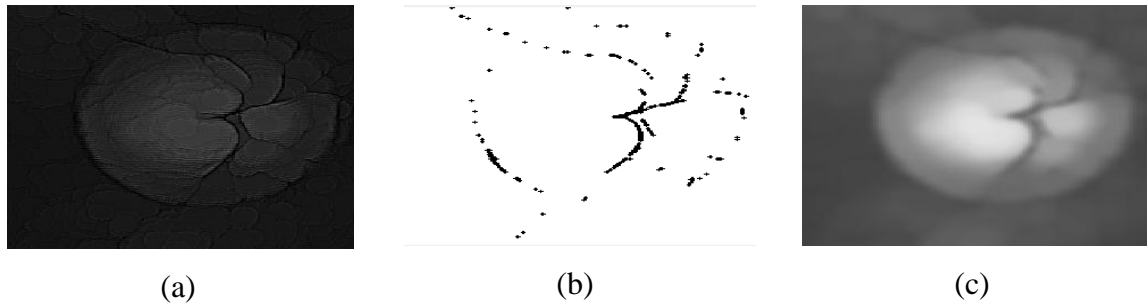


Figura 16. (a) *Máscara del nervio óptico*, (b) *Imagen binarizada y erosionada*
(c) *Imagen con filtrado bilateral*

Fuente: *Los Autores*

2.5.1 DISCO

Para la supresión de los vasos sanguíneos internos se binariza y se dilata la figura 16(c), obteniendo el contorno formado en la parte interna del nervio óptico como se muestra en la figura 17(a), además se efectúa un filtro adaptativo, figura 17(b), para luego realizar una operación OR entre estas dos figuras y de esta manera obtener solamente el contorno del disco, como se observa en la figura 17(c).

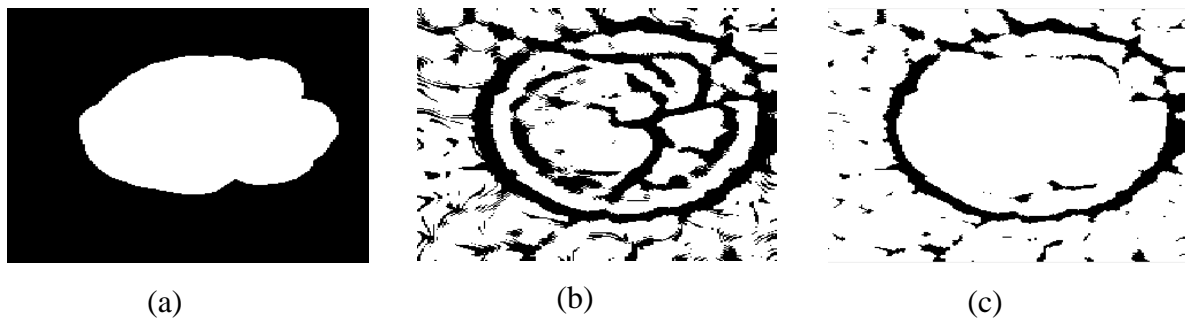


Figura 17. (a) *Contorno interno del nervio óptico*, (b) *Imagen con filtrado adaptativo*,
(c) *Operación OR*

Fuente: *Los Autores*

Para eliminar los detalles externos al disco óptico se realiza nuevamente la binarización y el filtro de desenfoque gaussiano variando el valor de sigma y suavizado, ver figura18 (a), y para poder observar sin espacios en blanco se ha erosionado como se muestra en la figura18 (b); lo cual será de ayuda para obtener el contorno del disco óptico, que para ello se encuentra el segundo contorno más largo como se observa en la figura 18(c).

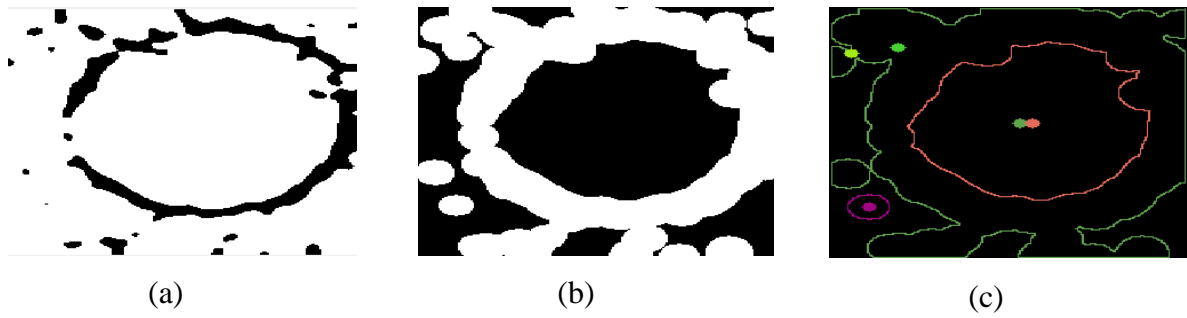


Figura 18. (a) *Imagen filtrada y binarizada*, (b) *Imagen erosionada*, (c) *Contornos*

Fuente: *Los Autores*

2.5.2 COPA

La detección de la copa en la imagen del nervio óptico es un proceso menos complejo, ya que se encuentra el valor máximo de la figura 16(c) y posteriormente se binariza, para poder obtener las regiones con mayor luminosidad como se muestra en la figura 19.



Figura 19. *Regiones para obtención de la copa*

Fuente: *Los Autores*

CAPITULO 3. DESARROLLO DEL ALGORITMO PARA LA DETECCIÓN DEL GLAUCOMA Y SU RESPECTIVO DIAGNÓSTICO.

En el presente capítulo se dará a conocer el proceso realizado para la detección del glaucoma mediante la relación copa-disco (RCD) y la regla ISNT, para ello se especificará los propósitos de cada método de detección.

3.1 MÉTODOS PARA LA DETECCIÓN DEL GLAUCOMA

3.1.1 Relación Copa-Disco (RCD)

La relación Copa-Disco es el análisis más utilizado para la detección del glaucoma, que consiste en realizar el cálculo, tomando el área de la copa óptica y dividido para el área del disco óptico [2].

El disco óptico es un área brillante donde se cruzan los vasos sanguíneos, y la copa óptica es la parte más clara que se encuentra dentro del disco óptico (véase figura 20) [2]. Para la obtención del área de la copa y el disco óptico se realizó mediante el procesamiento de la imagen biomédica de fondo de ojo, donde se obtuvo los contornos de la copa y el disco, y luego se calculó el área de cada uno de ellos para obtener la relación C/D .

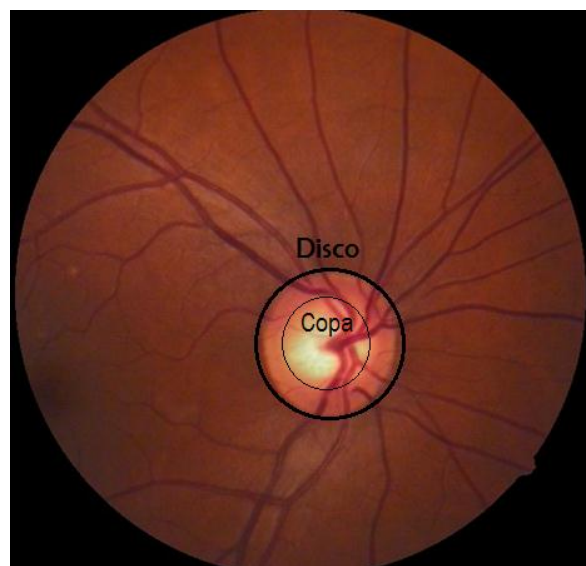


Figura 20. *Imagen Biomédica de Fondo de Ojo*

Fuente: *Los Autores*

3.1.2 Regla ISNT

La regla ISNT es otro tipo análisis para determinar el glaucoma, debido a que algunas personas tienen el nervio óptico grande, lo que podría afectar los resultados de la relación copa-disco. Por lo que es necesario aplicar la regla ISNT que se enfoca en el grosor del anillo neuroretiniano, la región entre el disco óptico y la copa óptica.

Para la regla ISNT se divide el nervio óptico en cuatro regiones, donde la I representa la región Inferior, S es la región Superior, N es la región Nasal y T es la región Temporal (véase figura 21). Luego de realizar la división se mide cada región del nervio óptico y se aplica la siguiente condición $I+S > N+T$, si no se cumple la regla el paciente tiene como diagnóstico el glaucoma.

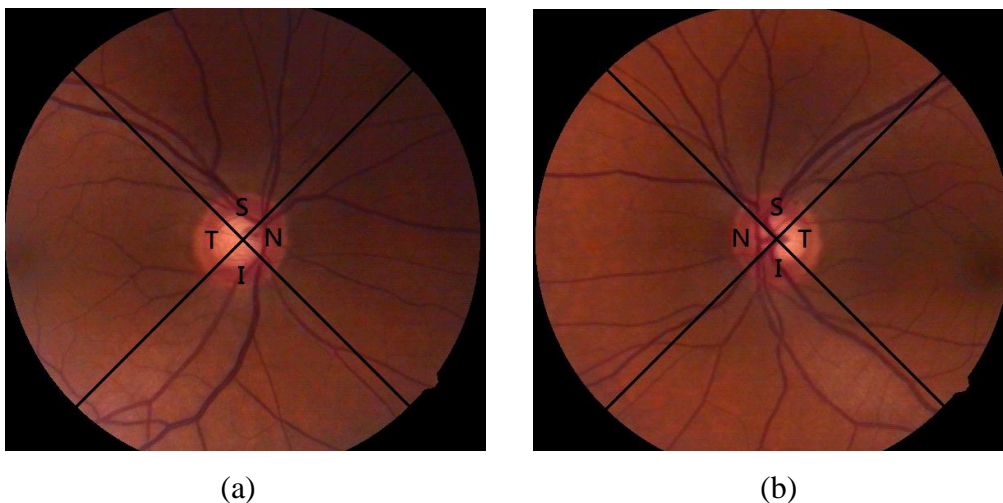


Figura 21. (a) Fondo de ojo, se observa el nervio óptico del ojo derecho (b) Fondo de ojo, se observa el nervio óptico del ojo izquierdo.

Fuente: Los Autores.

3.2 DIAGRAMA DE FLUJO PARA DETECCIÓN DE GLAUCOMA MEDIANTE RELACIÓN COPA-DISCO

La RCD es uno de los métodos propuestos para la detección del glaucoma, con la finalidad de analizar el nervio óptico, midiendo que tan grande es la excavación (copa óptica) referente al disco óptico. Para ello se realiza el siguiente algoritmo (véase figura 22), que luego del procesamiento digital de las

imágenes del ojo humano se realiza la identificación de contornos (Copa-Disco), para posteriormente obtener el área de los mismos y finalmente se realiza el cálculo para la RCD, mostrando los resultados con su respectivo diagnóstico.

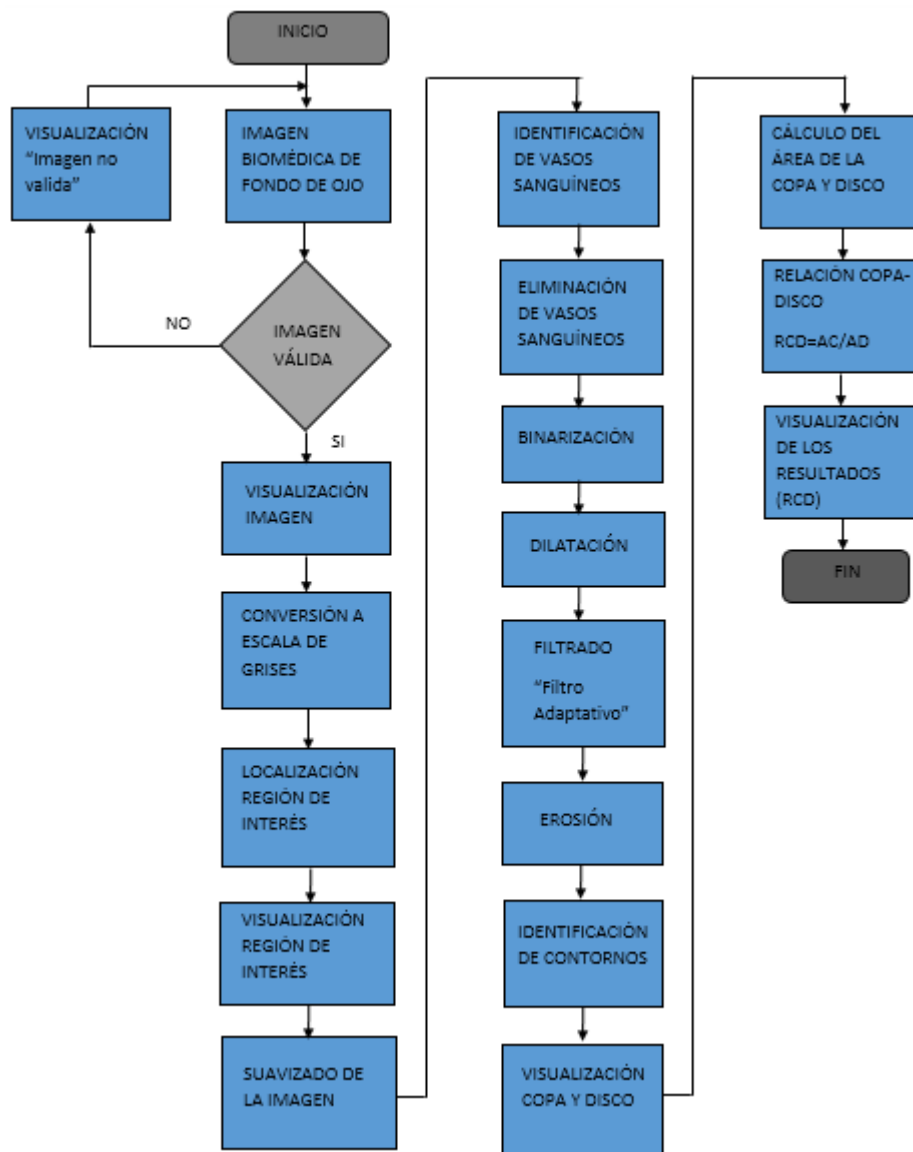


Figura 22. Diagrama de Flujo - Regla CDR

Fuente: Los Autores

3.3 IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO PARA LA DETECCIÓN DE GLAUCOMA MEDIANTE RELACIÓN COPA-DISCO

Al adquirir las regiones con mayor luminosidad de la imagen, se procede a encontrar el contorno más largo para así obtener solamente el área que compete a la copa del nervio óptico; de tal manera que se visualiza en la figura 23, los contornos tanto de la copa como del disco óptico.

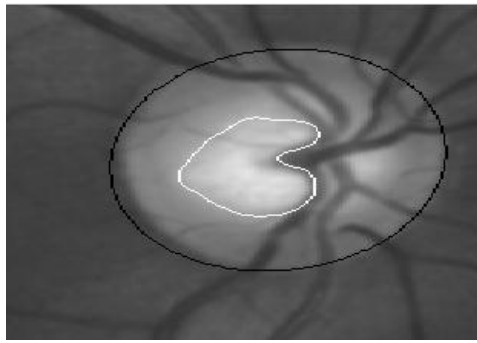


Figura 23. *Imagen procesada*

Fuente: *Los Autores*

Al haber obtenido los contornos que se muestra en la figura 23, se procedió a calcular la relación copa-disco (RCD) como se observa en la ecuación 3.1.

$$R = \frac{Ac}{Ad} \quad (3.1)$$

Donde: Ac = Área de la copa

Ad = Área del Disco

3.4 DIAGRAMA DE FLUJO PARA DETECCIÓN DE GLAUCOMA MEDIANTE LA REGLA ISNT

Para la implementación de la regla ISNT se propone el siguiente algoritmo (véase la figura 24), que luego de la identificación de los contornos, éstos se umbralizan y se aplica la operación XOR para quedarnos con la parte del anillo neuroretiniano, posteriormente segmentamos esta parte en 4 regiones (Inferior, Superior, Nasal y Temporal), luego se realiza la identificación del ojo si es derecho o izquierdo para poder aplicar la regla con mayor efectividad sobre todo para las regiones Nasal y Temporal ya que estas regiones cambian de posición dependiendo del lado del ojo (véase figura 21) . Después se calcula cada región segmentada para aplicar la regla $(I+S>N+T)$ y observar su diagnóstico.

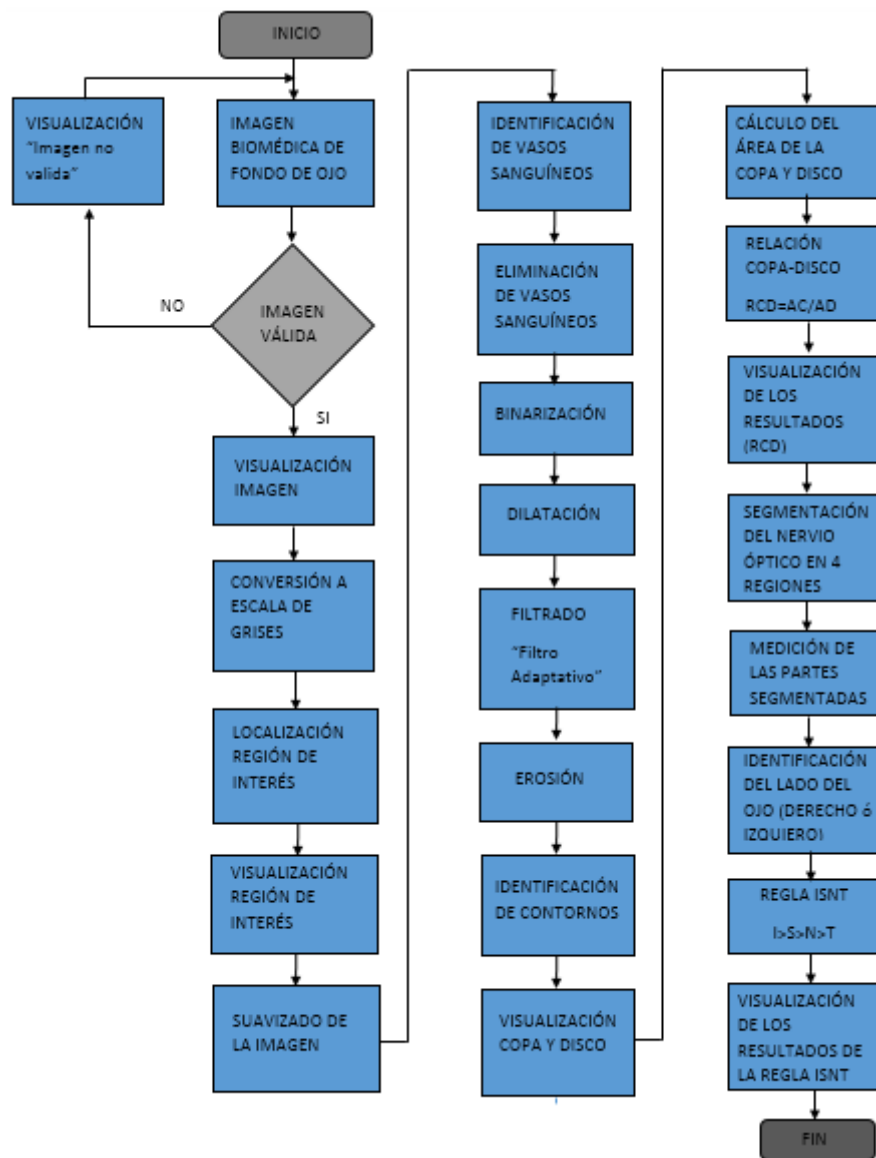


Figura 24. Diagrama de Flujo - Regla ISNT

Fuente: Los Autores

3.5 IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO PARA LA DETECCIÓN DE GLAUCOMA MEDIANTE LA REGLA ISNT

Para analizar la detección del glaucoma mediante la regla ISNT, se tiene una imagen con las dimensiones 220x220, donde es necesario obtener el disco y la copa de manera binarizada y umbralizada como se muestra en la figura 25(a). Además es fundamental obtener una imagen triangular, ver figura 25 (b), con las mismas dimensiones y con líneas de 45°.



Figura 25. (a) *Copa y Disco Binarizados y Umbralizados*, (b) *Imagen Triangular*

Fuente: *Los Autores*

Al obtener estas dos imágenes se ha realizado una operación AND para obtener la región que debe analizarse, el cual se encuentra entre el borde del disco y el borde de la copa como se observa en la figura 26, científicamente conocido como el anillo neurorretiniano.



Figura 26. *Anillo Neurorretiniano, Región Superior*

Fuente: *Los Autores*

Para la obtención de todas las regiones Inferior, Superior, Nasal y Temporal (ISNT), se tuvo que rotar 90° al triángulo anteriormente expuesto (véase figura 25b) para la dirección deseada, y luego realizar el mismo procedimiento ya dicho, del resultado de esta parte del algoritmo se adquirió las cuatro regiones que se visualizan en la figura 27.

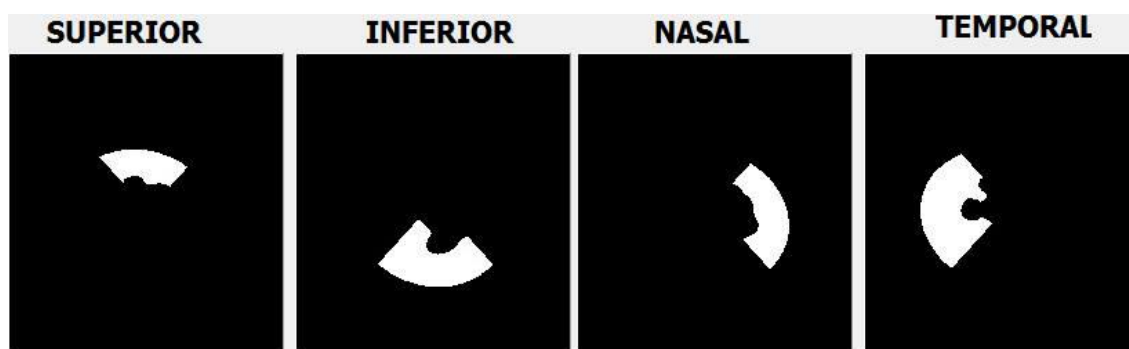


Figura 27. *Regiones ISNT*

Fuente: *Los Autores*

Se obtuvieron las cuatro regiones por separado para conseguir el número de píxeles blancos en cada imagen, y de esta manera observar cuál es de mayor valor para analizar si cumple con la condición anteriormente expuesta ($I+S>N+T$).

3.6 INTERFAZ GRÁFICA PARA EL RESPECTIVO DIAGNÓSTICO

Se ha realizado la interfaz gráfica en el software libre QtCreator como se observa en la figura 28. En donde se podrá visualizar los diagnósticos de cada método elaborado.

A continuación se describe cada una de las funciones presentadas en el programa:

- ✓ Botón Abrir: Al pulsar se abrirá una ventana, en donde se podrá escoger la imagen que se desea procesar y se mostrará en el lado izquierdo de la figura 28.
- ✓ Botón Procesar: Al dar clic se visualizará la imagen procesada, el valor del CDR, las distintas regiones del nervio óptico, y el diagnóstico que se le dará al paciente.
- ✓ Botón Guardar: Al oprimir se guardará un archivo en PDF con todos los parámetros necesarios para el especialista y el paciente.
- ✓ Botón Salir: Se retira del programa por completo.

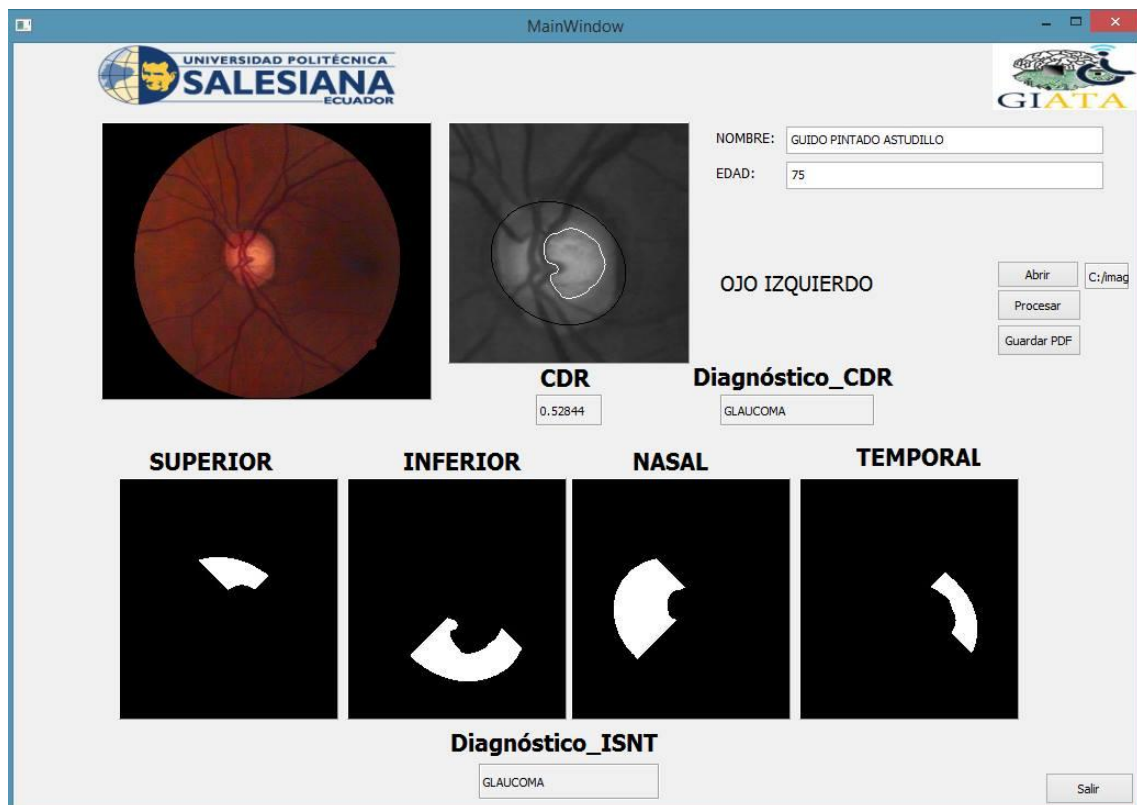


Figura 28. *Interfaz Gráfica para el diagnóstico*

Fuente: *Los Autores*


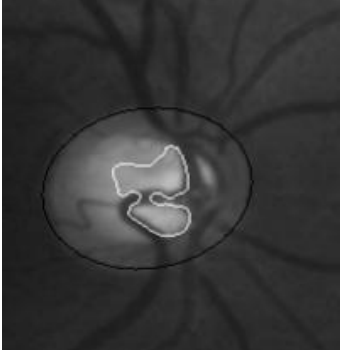
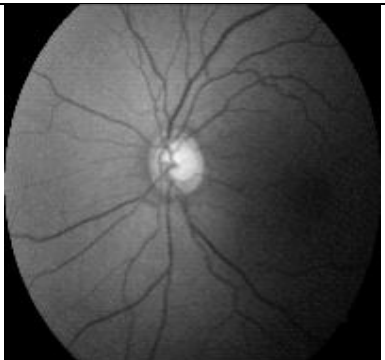

CAPITULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

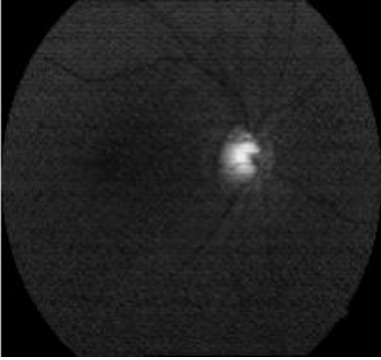
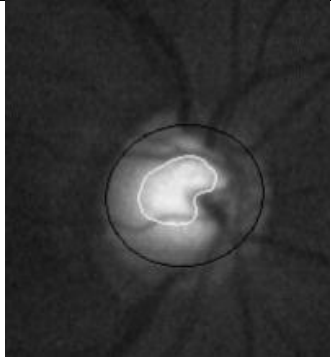

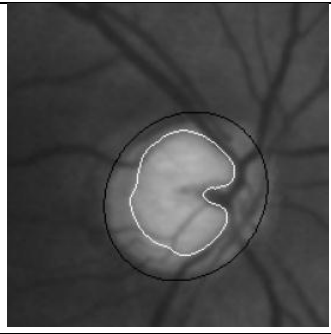
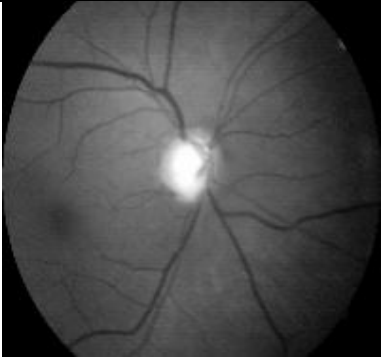


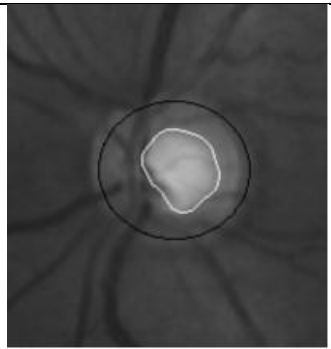
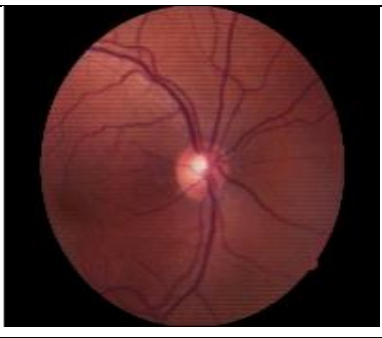
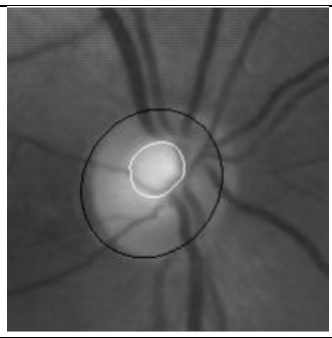
En este capítulo se realiza el análisis de resultados, que está dividido en tres partes. La primera parte consta de una tabla donde se muestra la identificación del disco y la copa, la segunda parte indica los resultados obtenidos de la relación copa-disco y por último se indica los resultados de la regla ISNT.


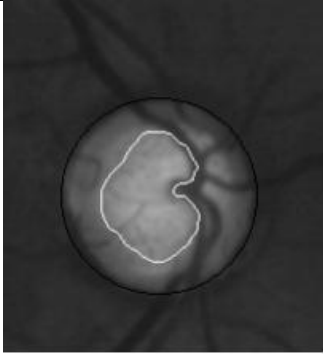

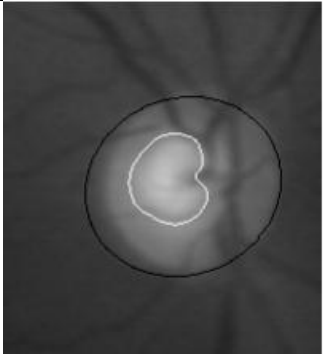

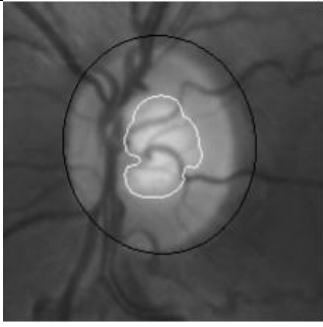
4.1 IDENTIFICACIÓN DEL DISCO Y LA COPA.

El primer paso que se realiza con este software es la identificación del Disco y la Copa, para proceder a realizar la relación copa-disco. En la tabla 4.1 se observa la imagen Biomédica de fondo de ojo y adyacente a esta se muestra la imagen procesada, donde el Disco es el contorno de color negro y la copa es el contorno de color blanco.

Tabla 4.1 *Identificación automática del disco y la copa con el algoritmo propuesto.*

Identificación del Disco y la Copa		
	Imagen de Fondo de Ojo	Imagen Procesada
Paciente 1		
Paciente 2		

Paciente 3		
Paciente 4		
Paciente 5		
Paciente 6		
Paciente 7		

Paciente 8		
Paciente 9		
Paciente 10		

4.2 RESULTADOS OBTENIDOS DE LA RELACIÓN COPA-DISCO.

En esta parte se realiza una tabla con los resultados obtenidos de la relación copa-disco. Para cual se compara los resultados del examen realizado por el oftalmólogo y los resultados del software propuesto, los mismos que serán usados para entregar el diagnóstico de la siguiente manera: Si $RCD < 0.3$ es un paciente que no padece de esta enfermedad, si se obtiene una respuesta de $0.3 < RCD < 0.5$ es una persona con sospecha de glaucoma, pero al ser $0.5 < RCD < 1$ el paciente tendrá dicha enfermedad ocular.

También se muestra el margen de error que tiene el sistema, para cual utilizamos la ecuación 4.1 y 4.2, donde Ea representa el error absoluto, \bar{x} el resultado clínico, xi el resultado del algoritmo realizado y Er el error relativo.

$$Ea = \bar{x} - xi \quad (4.1)$$

$$Er = \frac{Ea}{\bar{x}} \times 100 \quad (4.2)$$

Este error fue calculado con los resultados de cada paciente, teniendo un error relativo promedio de 4.5 % para las 10 muestras presentadas en la tabla 4.2.

Tabla 4.2 Comparación de resultados obtenidos de la relación copa-disco del oftalmólogo con el software propuesto.

Pacientes	RCD (Clínica Santa Lucía)	RCD (Algoritmo propuesto)	Diagnóstico (Clínica Santa Lucía)	Diagnóstico (Algoritmo propuesto)	Error
1	0.501	0.490178	Glaucoma	Sospecha	2.16%
2	0.673	0.64073	Glaucoma	Glaucoma	4.79%
3	0.584	0.550454	Glaucoma	Glaucoma	5.74%
4	0.6712	0.718801	Glaucoma	Glaucoma	7.09%
5	0.790	0.780874	Glaucoma	Glaucoma	1.15%
6	0.577	0.584225	Glaucoma	Glaucoma	1.25%
7	0.374	0.405062	Sospecha	Sospecha	8.30%
8	0.6463	0.612014	Glaucoma	Glaucoma	5.3%
9	0.436	0.458708	Sospecha	Sospecha	5.2%
10	0.487	0.465954	Sospecha	Sospecha	4.32%

4.3 RESULTADOS OBTENIDOS DE LA REGLA ISNT.

En la tabla 4.3 se indica los resultados obtenidos de la regla ISNT del oftalmólogo y el software propuesto, donde se muestra si cumple o no la regla ($I+S>N+T$) para posteriormente dar el diagnóstico.

Tabla 4.3 Comparación de resultados obtenidos de la regla ISNT del oftalmólogo con el software propuesto.

Pacientes	Región I	Región S	Región N	Región T	Regla ISNT	
					Oftalmólogo (Clínica Santa Lucía)	Algoritmo propuesto
1	1.859	1.401	1.654	3.321	No cumple	No cumple
2	2.0738	0.86140	1.9733	1.3776	No cumple	No cumple
3	1.5620	0.77586	1.8683	0.8939	No cumple	No cumple
4	2.1550	0.63162	2.1330	0.9960	No cumple	No cumple
5	2.1951	0.89863	1.9521	1.517	No cumple	No cumple
6	1.0492	1.2269	1.3025	1.2579	No cumple	No cumple
7	2.2975	1.1058	1.0029	2.1743	Cumple	Cumple
8	2.3973	1.4061	2.229	2.1611	No cumple	No cumple
9	2.4324	1.5804	3.4592	1.5291	No cumple	No cumple
10	2.6644	4.2645	3.2645	2.8614	Cumple	Cumple

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El Glaucoma es una de las principales causas de discapacidad visual en el mundo, ya que es una enfermedad que no presenta síntomas en una etapa temprana, por ello existen varias técnicas de mediciones oftalmológicas como: Campimetría, Tonometría, Pentacam, Tomografía de coherencia óptica, entre otras.
- En la actualidad es un inconveniente el análisis de los métodos de medición nombrados anteriormente, debido al alto costo que conlleva tanto para el oftalmólogo como para el paciente, por lo que se ha realizado un software que puede ser utilizado en todas las clínicas oftalmológicas siendo únicamente necesarias las imágenes fondo de ojo.
- El procesamiento digital de imágenes es primordial para la identificación del nervio óptico; para lo cual la utilización de las librerías de OpenCV en la aplicación de filtros y operaciones morfológicas fueron de gran ayuda para facilitar la localización de los contornos tanto del disco como de la copa.
- El sistema propuesto realiza dos métodos para la detección del glaucoma mediante la relación copa-disco (RCD) y por medio de la regla ISNT; donde las áreas del disco y de la copa son necesarias para el cálculo del RCD, siendo este método una alternativa para determinar si el paciente es sospechoso o no de tener glaucoma.
- El cálculo de la RCD puede ser afectado con imágenes fondo de ojo de personas con un nervio óptico grande, por ello es fundamental realizar la regla ISNT midiendo el anillo neuroretiniano y observando que cumpla la condición de $I+S>N+T$, ya que con las cuatro regiones analizadas se tendrá una mayor exactitud y el especialista podrá dar un claro diagnóstico.
- El software QtCreator es utilizado en este proyecto debido a que puede ser ejecutado en varias plataformas tales como: Linux, Windows, Mac OS X y

Android; además cualquier persona puede acceder a él, ya que es un software libre y no tiene costo.

- La interfaz gráfica realizada en este software, será de gran beneficio para los especialistas debido a que se muestra respuestas y diagnósticos con los dos métodos propuestos de manera automática. Anexado a esto los resultados pueden ser guardados en archivos “.pdf”, que ayudará a comparar con resultados futuros y hacer un seguimiento de la enfermedad.
- Las pruebas de funcionamiento de este software fueron comparadas con resultados obtenidos del OCT usando una base de datos (imágenes fondo de ojo), siendo los resultados y las imágenes adquiridas de la clínica “Santa Lucía” de la ciudad de Quito.
- Se ha comparado la relación copa-disco de la Clínica Santa Lucía con el algoritmo propuesto dando como resultado un error relativo promedio de 4.5%, lo cual es satisfactorio puesto que los resultados son mayormente confiables.
- Se recomienda que para el software propuesto, las imágenes del ojo humano tenga una buena resolución, debido a que esto alteraría los resultados tanto para el cálculo del CDR como para la regla ISNT.
- Para futuras propuestas de proyectos relacionados con este tema se recomienda realizar un estudio sobre la cantidad de fibras nerviosas en el ojo humano para determinar si tiene alguna anomalía o se encuentre sano.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. A. Salam, M. U. Akram, K. Wazir, S. M. Anwar and M. Majid, "Autonomous Glaucoma detection from fundus image using cup to disc ratio and hybrid features," *2015 IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology (ISSPIT)*, Abu Dhabi, 2015, pp. 370-374.
- [2] M. K. Dutta, A. K. Mourya, A. Singh, M. Parthasarathi, R. Burget and K. Riha, "Glaucoma detection by segmenting the super pixels from fundus colour retinal images," *Medical Imaging, m-Health and Emerging Communication Systems (MedCom)*, 2014 International Conference on, Greater Noida, 2014, pp. 86-90.
- [3] M. Lotankar, K. Noronha and J. Koti, "Detection of optic disc and cup from color retinal images for automated diagnosis of glaucoma," *2015 IEEE UP Section Conference on Electrical Computer and Electronics (UPCON)*, Allahabad, 2015, pp. 1-6.
- [4] E.G. Pinos, "Método de detección por tonometría para el diagnóstico temprano del glaucoma a través de herramientas de simulación", Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación en Ingenierías – CIDII, Ecuador, 2013.
- [5] BrightFocus Foundation; National; Glaucoma: Datos Esenciales; 2015 [Consulta 15 de Julio de 2016]; Disponible en: http://www.brightfocus.org/sites/default/files/essentialfactsonglaucoma_spanish.pdf
- [6] Organización Mundial de la Salud; Ceguera y discapacidad visual; Agosto de 2014 [Consulta 15 de Julio de 2016]; Disponible en <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs282/es/>
- [7] ÁLVAREZ CÁRDENAS, Nora del Rocío; TORRES RÍOS, Carlos Sebastián. "Simulación y modelamiento del ojo humano como herramienta para la prevención del glaucoma a través la medición de la presión intraocular", 2015.
- [8] Herrera Alvarez, D. V., & Flores Rivera M. A., "Caracterización de la imagen del ojo para la detección y prevención del glaucoma mediante el uso de imágenes biomédicas y software especializado", 2016.
- [9] Hernández, E. L. I. Z. A. B. E. T. H. (2005). Evaluación sensorial. Universidad Nacional Abierta ya Distancia-UNAD. Bogotá, Colombia. 2005.
- [10] Puell Marín, M. C. (2006). Óptica Fisiológica: el sistema óptico del ojo y la visión binocular.
- [11] Dr. Enrique Graue Wiechers; El ojo: estructura y función; capítulo 1; Enero 2015. [Consulta 2 de Julio de 2016] Disponible en: highered.mheducation.com/sites/dl/free/./Graue_ofthalmologia_3e_cap_muestra.pdf

- [12] Dr. Abelardo Cuadrado Montes (2000). Neuroftalmología-Capítulo 17. Universidad Mayor de San Marcos- UNMSM. Lima, Perú. 2000.
- [13] MINISTERIO DE EDUCACIÓN. Discapacidad visual. Instituto de tecnologías educativas. Disponible en: http://www.ite.educacion.es/formacion/materiales/129/cd/pdf/m1_dv.pdf
- [14] Andrés Castaño P, Verónica Fernández, Sergio Galano y Robinson Gómez. “Confiabilidad de la campimetría manual por confrontación para detectar defectos de campos visuales en patologías neurológicas”. Universidad de Chile. REV CHIL NEURO-PSIQUIAT 2014; 52 (2): 73-80
- [15] Leni Anta López, M^a Ángeles Sebastian. Protocolo para la realización de campimetría. Máster en enfermería oftalmológica. Universidad de Valladolid. IOBA. 2012-2013.
- [16] NAZ, Sobia; RAO, Sheela N. “Glaucoma Detection in Color Fundus Images Using Cup to Disc Ratio”. The International Journal Of Engineering And Science (IJES) Vol, 2014, vol. 3, p. 51-58.
- [17] QURESHI, Imran. “Glaucoma Detection in Retinal Images Using Image Processing Techniques: A Survey”. International Journal of Advanced Networking and Applications, 2015, vol. 7, no 2, p. 2705.
- [18] PÉREZ, Santos; IRVING, Bryan. “19 que propenden a la ceguera”. Instituto Politécnico Nacional. Centro de Investigación en Computación, 2008.
- [19] PETER, PRÁCE Bc ROMAN. "IMAGE DATABASE SYSTEM FOR GLAUCOMA DIAGNOSIS SUPPORT", 2007
- [20] PATIL, Dnyaneshwari D.; MANZA, Ramesh; BEDKE, Gangadevi C. “Diagnose Glaucoma by proposed Image processing Methods”. International Journal of Computer Applications, 2014, vol. 106, no 8.
- [21] ESQUIVEL, Oscar Camacho; QUIRÓS, Alexander Gómez. “Glaucoma de ángulo abierto”. Revista médica de Costa Rica y Centroamérica, 2015, vol. 72, no 615, p. 447-453.
- [22] BRECHTEL BINDEL, Margot, et al. “Glaucoma primario de ángulo abierto”. Rev Hosp Dr. Gea González, 2003, vol. 4, no 3, p. 61-8.
- [23] DÍEZ, Rafael Castañeda; ROMÁN, Jesús Jiménez; BARBOSA, María José Iriarte. “Concepto de sospecha de glaucoma de ángulo abierto: definición, diagnóstico y tratamiento”. Revista Mexicana de Oftalmología, 2014, vol. 88, no 4, p. 153-160.
- [24] CASTAÑEDA-DÍEZ, Rafael; MAYORQUÍN-RUIZ, Mariana; JIMÉNEZ-ROMÁN, Jesús. “Glaucoma de ángulo cerrado. Perspectiva actual”. Rev Mex Oftalmol, 2007, vol. 81, no 5, p. 272-282.

- [25] GONZÁLEZ-MÉIJOME, José Manuel; MARTINS JORGE, J. M. “Tonometría no invasiva. Precisión, ventajas y limitaciones (I)”. *Gaceta Óptica*, 2008, no 432, p. 12-18.
- [26] SALES SANZ, Marco, et al. “Influencia de la córnea en la medida de la presión intraocular con distintos sistemas tonométricos”. 2010.
- [27] BHATT, Mittal. “Detecting glaucoma in biomedical data using image processing”. 2005.
- [28] SÁENZ, Sofía García; MATILLA, María; FEIJÓO, Julián García. José M. ^a Martínez de la Casa, Federico Sáenz Francés, Laura Morales, Paula Bañeros. “Tonometría, Capítulo 9.1”.
- [29] GRINÓ GARCÍA-PARDO, Caridad, et al. Tomografía de Coherencia Óptica (OCT). Funcionamiento y utilidad en patología macular (I). *Gaceta Óptica*, 2008, no 429, p. 12-15.
- [30] IBÁÑEZ GARCÍA, Ainsa. OCT vs Perimetría Computerizada en Glaucoma. 2015.
- [31] DEBUC, Delia Cabrera. A review of algorithms for segmentation of retinal image data using optical coherence tomography. INTECH Open Access Publisher, 2011.
- [32] DE, P. D. E. D., & LASER, C. V. C. E. (2010). Simplificando la Evaluación de Ectasias por medio de Tomografía Corneal Pentacam. *Revista Highlights of Ophthalmology*, 38(3).
- [33] Domínguez Randulfe, M., Fernández Argones, L., Miqueli Rodríguez, M., Piloto Díaz, I., Fumero González, F. Y., & Ferrer Guerra, M. T. (2012). Beneficios del sistema Scheimpflug en glaucoma. *Revista Cubana de Oftalmología*, 25, 449-457.
- [34] LAIZ, M., NEGRETE, M., & POVEDA, D. (2007). La cámara Scheimpflug rotacional Pentacam. *Actualizaciones Tecnológicas en Oftalmología*.
- [35] Organización Mundial de la Salud; Ceguera y discapacidad visual; Agosto de 2014 [Consulta 15 de Julio de 2016]; Disponible en <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs282/es/>
- [36] BrightFocus Foundation; National; Glaucoma: Datos Esenciales; 2015 [Consulta 15 de Julio de 2016]; Disponible en: http://www.brightfocus.org/sites/default/files/essentialfactsonglaucoma_spanish.pdf
- [37] Eye Design Optometry; The Latest in Advanced Technology; 2015 [Consulta 20 de Julio de 2016] Disponible en: <http://www.eyedesignoptometry.com/digital-eye-exam/>
- [38] David González Gutiérrez; Tutorial de Qt4 Designer y QDevelop; Septiembre de 2008 [Consulta 5 de agosto de 2016] Disponible en: <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/7656/memoriafinalPFC.pdf?sequence=1>

- [39] The OpenCV Tutorials; Septiembre de 2016 [Consulta 30 de septiembre de 2016]
 Disponible en: http://docs.opencv.org/2.4/opencv_tutorials.pdf
- [40] Robert Laganière; OpenCV 2 Computer Vision Application Programming Cookbook; Mayo de 2011 [Consulta 25 de julio de 2016] Disponible en:
[tp.ylsh.ilc.edu.tw/upload/opencv/OpenCV.2.Computer.Vision.Application.Programming.Cookbook.pdf](http://ylsh.ilc.edu.tw/upload/opencv/OpenCV.2.Computer.Vision.Application.Programming.Cookbook.pdf)
- [41] The OpenCV Reference Manual; Junio de 2014 [Consulta 22 de julio de 2016]
 Disponible en: <http://docs.opencv.org/3.0-beta/opencv2refman.pdf>
- [42] Departamento de Electrónica y Automática - Facultad de Ingeniería - U.N.S.J Capítulo 3: Técnicas de realce de Imágenes en Medicina (Bioingeniería). Disponible en
<http://dea.unsj.edu.ar/imagenes/recursos/capitulo3.pdf>
- [43] RAMOS, Melva Rivas. “Sistema de pre-procesamiento de imágenes electrocardiográficas en telemedicina”. Departamento de Ingeniería en Sistemas Computacionales - Escuela de Ingeniería – U.D.L.A.P. Capítulo 3: Procesamiento de imágenes. 2003. Disponible en
http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lis/ramos_r_m/capitulo3.pdf
- [44] ESCALANATE, Boris R. “Procesamiento digital de Imágenes”, 2006. Disponible en
<http://verona.fi-p.unam.mx/boris/teachingnotes/Capitulo4.pdf>
- [45] MACHADO, Nery Javier. "SEGMENTACIÓN DE MELANOMA BASADO EN METODOS DE BINARIZACION". 2014.
- [46] NIETO, Daniel Bonilla. “Sistema de reconocimiento de kanjis japoneses basado en procesamiento digital de imágenes aplicado a dispositivos móviles”. Departamento de Computación, Electrónica y Mecatrónica. Escuela de Ingeniería. U.D.L.A.P. Capítulo 2: Técnicas de Procesamiento Digital de Imágenes y Reconocimiento de Patrones. 2010. Disponible en
http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lis/nieto_b_d/capitulo2.pdf
- [47] TOMASI, Carlo; MANDUCHI, Roberto. “Bilateral filtering for gray and color images”. En Computer Vision, 1998. Sixth International Conference on. IEEE, 1998. p. 839-846.
- [48] “Tratamiento de Imagen y sonido”. Ingeniería Informática de Servicios y Aplicaciones. Universidad de Valladolid. 2013. Disponible en.
https://alojamientos.uva.es/guia_docente/uploads/2013/413/40833/1/Documento3.pdf
- [49] GIRALDO, Juan Carlos Ramírez; FLETCHER, Joel J.; MCCOLLOUGH, Cynthia H. “REDUCCIÓN DEL RUIDO EN IMÁGENES DE TOMOGRAFÍA COMPUTARIZADA USANDO UN FILTRO BILATERAL ANISOTRÓPICO”- “Noise reduction in computed tomography images using an anisotropic bilateral filter”. Revista Ingeniería Biomédica, 2011, vol. 4, no 7, p. 62-68.

- [50] GUADALUPE, Silva; ELIZABETH, Verónica; SAMANIEGO CAMPOVERDE, Luis Miguel. “Diseño e implementación de un filtro adaptativo para la cancelación de ruido con redes Neuronales utilizando DSP”. 2016.
- [51] GÓMEZ, Esmeralda Lozano; ESCARCENA, Javier Cardenal; GARCÍA, Jorge Delgado. “Inventario Semiautomático Del Olivar A Partir De Ortofotografías Digitales”. En XIV Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica Santander, España–5-7 junio de. 2002.
- [52] OSIO, Jorge, et al. “Desarrollo de Algoritmos de Procesamiento de Imágenes Basados en “Operadores de Ventana” sobre una FPGA”.
- [53] TORRES, Wuilian J.; BELLO, Roger J. “Procesamiento de imágenes a color utilizando morfología matemática”.