
INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE TEZIUTLÁN

Tesis



“Sistema de predicción de retinopatía diabética con base en las morfologías y análisis de estructuras de fondos de ojos”

PRESENTA:

LIZ TERESA RAMOS REYES

CON NÚMERO DE CONTROL
20TE0014P

PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:
MAESTRA EN SISTEMAS COMPUTACIONALES

CLAVE DEL PROGRAMA ACADÉMICO
MPSCO 2011-15

DIRECTOR (A) DE TESIS:
DRA. MARÍA DEL PILAR SALAS ZÁRATE

CO- DIRECTOR DE TESIS:
DR. Mario Andrés Paredes Valverde

“La Juventud de hoy, Tecnología del Mañana”
TEZIUTLÁN, PUEBLA, JULIO 2022

AGRADECIMIENTOS

¡Me gustaría agradecer a las siguientes personas, sin las cuales no hubiera podido completar esta investigación y sin las cuales no hubiera terminado mi maestría!

A mi codirector del Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán, y, especialmente a mi asesora principal, la Dra. María del Pilar Salas Zárate, cuya visión y conocimiento me guiaron a través de esta investigación, gracias por su dedicación y por compartirme su tiempo.

Y mi mayor agradecimiento a mi casa de estudios el Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán, por todo el apoyo que me han brindado siempre.

DEDICATORIA PERSONAL

Primeramente, dedico este proyecto a Dios, mi creador, mi fuente de inspiración, sabiduría, conocimiento y entendimiento. Él ha sido la fuente de mi fuerza a lo largo de esta aventura.

También dedico mi trabajo de tesis a mi familia y amigos. Un sentimiento especial de gratitud a mis amados abuelitos, Benjamín Y Blasa, y especialmente a mi madre, Angélica, cuyas palabras de aliento y empuje aún resuenan en mis oídos y corazón.

También a mi adorada tía Zenaida, que a pesar de ya no estar con nosotros físicamente, siempre la recuerdo y admiro.

A mis hermanos Eduardo y Alexandra, que siempre están para apoyarme y nunca me han dejado sola, son muy especiales.

También dedico este trabajo a mis amigos que me han apoyado durante todo el proceso.

Siempre apreciaré todo lo que han hecho, especialmente, quiero agradecer al Dr. Juan Carlos Moreno Rodríguez por ayudarme a desarrollar mis habilidades, por el apoyo moral y palabras de aliento que siempre ofrece.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	9
INTRODUCCIÓN.....	10
CAPITULO I GENERALIDADES DEL PROYECTO	11
1.1 Marco teórico.....	11
1.1.1 Retinopatía diabética.....	11
Diccionario de terminología.....	13
1.1.2 Base de datos IDRiD	15
1.1.3 Método de matriz de coincidencia de nivel de grises (GLCM)	16
1.1.4 Maquina de Soporte Vectorial (SVM).....	19
1.1.5 MATLAB®.....	20
1.1.6 PYTHON.....	21
1.1.7 OCTAVE.....	21
1.1.8 Metodologías de desarrollo se Software.....	22
1.2 Planteamiento del Problema	25
1.3 Justificación	30
1.4 Hipótesis.....	30
1.5 Objetivo general.....	30
1.6 Objetivos específicos.....	31
1.7 Alcances y limitaciones.....	31
CAPITULO II ESTADO DEL ARTE	33
2.1 Trabajos relacionados	33
2.2 Análisis comparativo de los trabajos relacionados	38
Conclusión estudios.....	42
2.3 Alternativas de solución	43
2.4 Solución propuesta	43
CAPITULO III METOLOGÍA Y DESARROLLO.....	45
3.1 Metodología de desarrollo	45

3.1.1 Imágenes de fondo de ojo.....	47
3.1.2 Procesamiento.....	48
3.1.3 Segmentación.....	51
3.1.4 Extracción de características	52
3.1.5 Clasificación	53
3.2 Desarrollo del software	64
CAPITULO IV RESULTADOS	67
4.1 Análisis de datos.....	67
4.2 Selección de pruebas estadísticas.....	67
4.3 Validación del modelo desarrollado	69
4.4 Comprobación de la hipótesis	74
CAPITULO V CONCLUSIONES.....	75
REFERENCIAS.....	76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Etapas de la retinopatía (Fuente: Asociación Mexicana de Retina).	13
Figura 2. Ejemplo de imagen con mala iluminación.	16
Figura 3. Ejemplo de creación de GLCM.	17
Figura 4. Logo de MATLAB® (fuente: (Mathworks, 2022)).....	20
Figura 5. Logo Pillow.	21
Figura 6. Logo Octave.	22
Figura 7. Ejemplo de desarrollo en cascada (fuente: creación propia).	23
Figura 8. Fases del desarrollo en espiral.....	24
Figura 9. Modelo de desarrollo RAD.	25
Figura 10. Personas con diabetes mellitus II en México 2018 de acuerdo a ENSANUT (fuente: creación propia).	26
Figura 11. Personas con diabetes mellitus en México 2020.....	26
Figura 12. Comparación de crecimiento de personas con diabetes 2018 y 2020...	27
Figura 13. Complicaciones por diabetes.....	28
Figura 14. Pacientes con retinopatía en 2018 (fuente: Asociación Mexicana de Retina).	29
Figura 15. comparación de alternativas.	43
Figura 16. Diagrama general.	45
Figura 17. Fondo de imagen con retinopatía (izquierda) y una sana (derecha). ...	47
Figura 18. Resultado de la sentencia rbg2gray.....	48
Figura 19. Obtención de canal rojo.	48
Figura 20. Obtención de canal verde.....	49
Figura 21. Obtención de canal azul.	49
Figura 22. Comparación de imagen original en B/N (Izquierda) y una contrastada (derecha).	50
Figura 23. Imagen contrastada (izquierda) e imagen filtrada por mediana (derecha).	51
Figura 24. Imagen con filtro morfológico y disco excluido	52

Figura 25. Imagen morfológica ajustada	52
Figura 26. Ejemplo de variable con el resultado de las características.	53
Figura 27. Ejemplo de salida de SVM.	53
Figura 28. Interfaz principal en blanco.	65
Figura 29. Imágenes procesadas.	66
Figura 30. Segmentación de imágenes.	66
Figura 31. Localización de lesión.....	67
Figura 32. Aplicación de filtro de media.....	67
Figura 34. Análisis de 100 imágenes.	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Terminología.....	15
Tabla 2 Estadísticas GLCM	17
Tabla 3. Trabajos relacionados.....	41
Tabla 4. Conjunto de entrenamiento de la base de datos IDRiD	64
Tabla 5. Bases de datos empleadas.	69
Tabla 6. Resultado de la prueba del modelo desarrollado.....	73
Tabla 7. Análisis de 100 imágenes.	73

CARTAS DE ACEPTACIÓN

RESUMEN

La retinopatía diabética es una de las enfermedades oculares más comunes y es una complicación de la diabetes que afecta a los ojos, puede no causar síntomas o solo problemas de visión leves. Eventualmente, puede causar ceguera. Así que la detección temprana de los síntomas podría ayudar a evitar la ceguera.

En los últimos años se ha introducido el tratamiento con láser que puede disminuir significativamente la probabilidad de ceguera en pacientes diabéticos, si dicha enfermedad se trata en la etapa adecuada, sin embargo, sigue siendo un problema de salud pública asegurarse de que cada paciente sea tratado en el momento óptimo en el desarrollo de la enfermedad.

En esta tesis, se lleva a cabo la realización de un software que sirve como apoyo al prediagnóstico de la retinopatía diabética, con la finalidad de que se pueda informar a tiempo al paciente y se puedan tomar las medidas necesarias.

INTRODUCCIÓN

El presente documento se estructura de la siguiente manera; en el capítulo 1, se abordan todos los términos relacionados a la retinopatía diabética con la finalidad de tener un contexto acertado e informado sobre el tema principal de esta tesis.

En el capítulo 2, se enlistan los trabajos relacionados que ya existen, sin embargo, se seleccionaron los de mayor impacto en el área, haciendo un análisis comparativo de cada uno de los estudios. Posteriormente, se realiza una conclusión de la información recaba por los otros estudios, y se realiza la propuesta de solución basado en las áreas de oportunidad detectadas.

En el capítulo 3, se presenta el método empleado para llevar a cabo el software, así como cada una de sus fases, detallando cada una. También presenta un método de mejoras de imágenes para preprocesar los fondos de ojos de manera más eficiente.

En el capítulo 4, se realiza el estudio y análisis de resultados, al poner a prueba el sistema. En este capítulo, también se muestran los resultados que se obtuvieron y se da respuesta a la Hipótesis formulada al inicio de este proyecto.

CAPITULO I GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1 Marco teórico

1.1.1 Retinopatía diabética

En la actualidad el tratamiento de las diversas enfermedades, tiene un mejor resultado cuando la enfermedad se detecta en una etapa temprana. La retinopatía diabética es una enfermedad que se caracteriza por aumentar la cantidad de glucosa en la sangre debido a la falta de insulina, afectando la calidad de vida de quien la padece, pero principalmente la retina, el corazón, nervios y los riñones. Alrededor del mundo se estima que afecta a un total de 425 millones de adultos.

La retinopatía diabética también abreviada RD, se define como una complicación de la diabetes que provoca que los vasos sanguíneos de la retina se inflamen y pierdan líquidos y sangre (Batey & Taylor, 2012). La retinopatía diabética causa en 2.6% de la ceguera, y la posibilidad de presencia es superior en los pacientes diabéticos que llevan tiempos prolongados padeciendo dicha enfermedad. La RD se detecta mediante la aparición de lesiones en las imágenes de las retinas de los ojos, estas lesiones son comúnmente como microaneurismas (MA) oculares o hemorragias (HM), exudados blandos y exudados duros (EX) (Chi Wing, y otros, 2020).

El grado de afección de la retinopatía se puede clasificar en 7 etapas que se vuelven mayor conforme el daño detectado, en la etapa uno, el daño a la retina no es evidente. La etapa dos surge comúnmente entre los 5-10 años de padecimiento, dependiendo de los niveles de azúcar en la sangre y el estilo de vida del paciente, en esta etapa comienzan a aparecer los primeros signos de retinopatía diabética no proliferativa, es decir, aneurismas, sin embargo, no causa problemas de visión aún. Con el tiempo y llevar un control de glucosa adecuado, llega la etapa 3, en donde las lesiones aumentan en número y gravedad. Incluso en este punto, donde hay mucho daño, la visión del paciente aún podría no verse afectada en lo mínimo.

En la etapa 4, en algunos pacientes, el daño a los vasos sanguíneos puede provocar una acumulación de líquido y proteínas en la parte central de la retina, lo que provoca un edema macular y una pérdida significativa de la visión.

En la etapa 5 si el daño a la retina continúa, aparecen nuevos vasos sanguíneos en para transportar más oxígeno y nutrientes a la retina. Los síntomas de la enfermedad pueden ser peligrosos para la visión. Cuando estos vasos anormales están presentes, la retinopatía es prolifera.

Durante la etapa 6 estos vasos mencionados anteriormente, se rompen provocando una hemorragia vítrea, que es cuando el vítreo se contamina con sangre y provoca una pérdida repentina de la visión.

En la etapa 7, estas afecciones causan desprendimiento de retina o, si se desarrollan en la parte frontal del ojo, pueden causar glaucoma neovascular.

Físicamente estas anomalías son detectadas de forma manual, es decir el medico se encarga de revisar las imágenes y si observa alguna anomalía entonces se reporta para su atención, sin embargo, en algunos casos en donde la retinopatía se encuentra en etapa uno o en ocasiones en etapa 2, las lesiones son muy difíciles de detectar a simple vista.

En la Figura 1 se puede observar más a detalle cada una de fases y etapas por las cuales pasa la retinopatía.

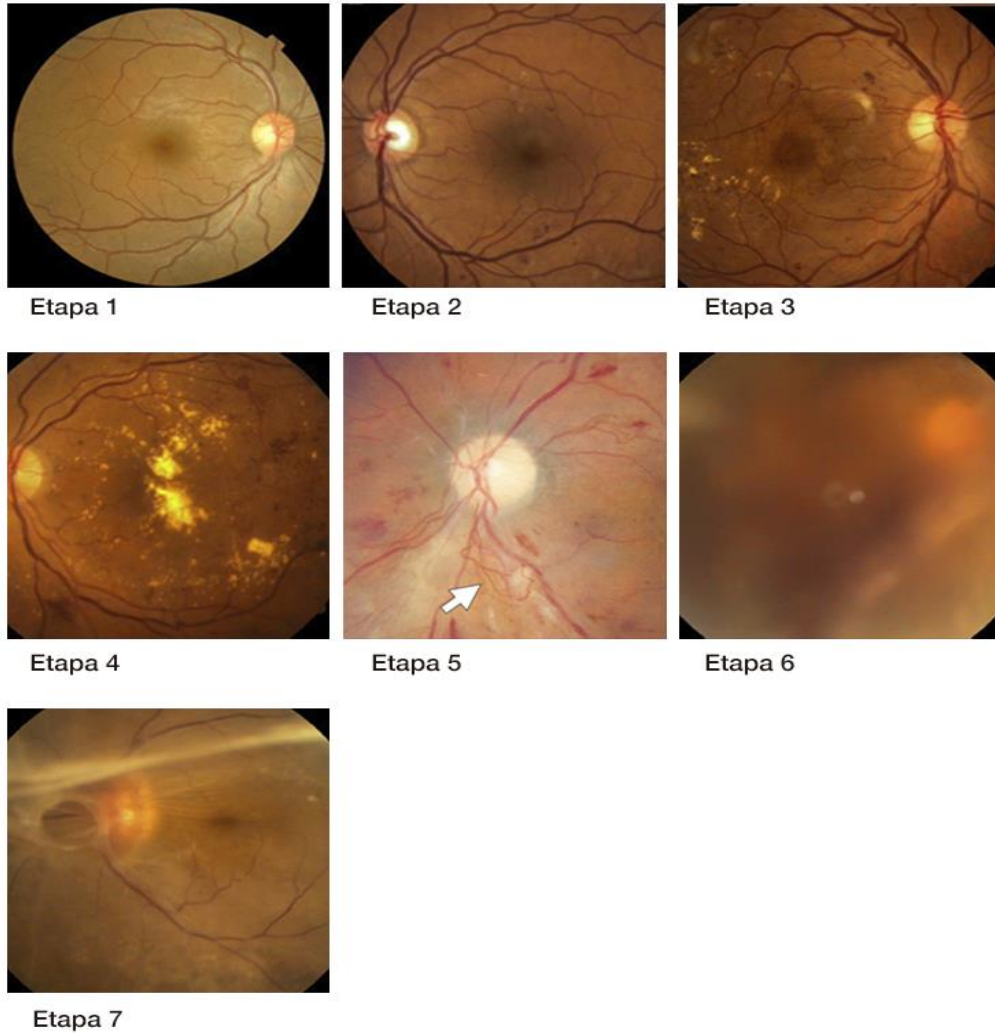


Figura 1. Etapas de la retinopatía (Fuente: Asociación Mexicana de Retina).

Diccionario de terminología

• Retinopatía diabética	Complicación de la diabetes que afecta los ojos.
• Vasos Sanguíneos	Sistema de "tuberías" por las que circula nuestra sangre.
• Microaneurismas	Pequeñas dilataciones saculares que afectan a capilares de diversas áreas vasculares como el corazón, el riñón y el ojo.

<ul style="list-style-type: none"> • Hemorragia subconjuntival 	Ruptura de vaso sanguíneo roto justo debajo de la superficie transparente del ojo.
<ul style="list-style-type: none"> • Angiografía 	Examen de los vasos sanguíneos que utiliza imágenes por rayos X, TC o RMN y una inyección de un material de contraste radiopaco para obtener imágenes de las arterias.
<ul style="list-style-type: none"> • Oftalmología 	Especialidad médica que estudia las enfermedades de ojo y su tratamiento, incluyendo el globo ocular, su musculatura, el sistema lagrimal y los párpados.
<ul style="list-style-type: none"> • Degeneración macular 	Enfermedad ocular que provoca pérdida de la visión
<ul style="list-style-type: none"> • Edema macular diabético (EMD) 	Consiste en la inflamación y acumulación de líquido en la mácula, que es la parte central de la retina responsable de la visión central y de los detalles.
<ul style="list-style-type: none"> • Glucosa 	Es el azúcar principal que se encuentra en su sangre.
<ul style="list-style-type: none"> • Insulina 	Hormona producida por el páncreas, que se encarga de regular la cantidad de glucosa de la sangre.
<ul style="list-style-type: none"> • Retina 	Membrana interior del ojo en la cual se reciben las impresiones luminosas que son transmitidas al cerebro.
<ul style="list-style-type: none"> • Disco óptico 	Zona circular situada en el centro de la retina, por donde salen del ojo los axones de las células ganglionares de la retina que forman el nervio óptico.

<ul style="list-style-type: none"> • Nervio óptico 	Agrupar a más de un millón de fibras nerviosas que trasladan mensajes visuales. Este conecta la parte posterior de cada ojo (su retina) al cerebro.
<ul style="list-style-type: none"> • Fondo de ojo 	Parte posterior del interior del ojo, que comprende la retina y el nervio óptico.

Tabla 1. Terminología.

1.1.2 Base de datos IDRiD

Para el presente trabajo, se emplearon imágenes de diferentes bases de datos debido a la cantidad de imágenes que contenía cada una, es importante comentar que las bases utilizadas contienen imágenes que fueron evaluadas por expertos.

Todas las imágenes que se encuentran en la base de datos, están localizadas en el espacio rojo, verde y azul, mejor conocido como RGB. Sin embargo, un punto muy importante, es que el canal azul no proporciona mucha información, es también por este motivo que en la mayoría de los estudios se descarta.

En el presente trabajo, se emplean imágenes de prueba de las bases de datos IDRiD, la cual cuenta con 413 imágenes de fondos de ojos para el entrenamiento y 103 para el testeo.

Lo común en las imágenes de fondos de ojo, es que no sean iguales, es decir, uniformes, algunas se ven impactadas por las condiciones en las que estas fueron capturadas. Y muchos factores influyen como, por ejemplo; el reflejo de la luz, la iluminación, el ángulo de la foto, etc., en la Figura 2 se puede observar una imagen de ejemplo con mala calidad de iluminación.

Con el procesamiento de las imágenes se busca cubrir principalmente dos tareas, la primera es la mejora de las imágenes para facilitar la interpretación y la segunda es manipularlas de modo que el intérprete semiautónomo pueda tener la mayor tasa de éxito posible.

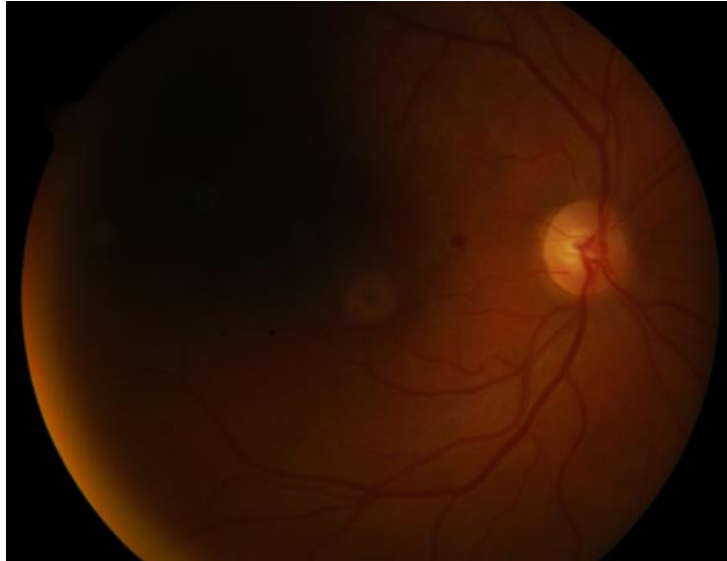


Figura 2. Ejemplo de imagen con mala iluminación.

1.1.3 Método de matriz de coincidencia de nivel de grises (GLCM)

En el análisis de las imágenes, las características de la textura se calculan a partir de la distribución estadística de las combinaciones de intensidades observadas en posiciones específicas relativas entre sí en la imagen.

Según el número de puntos de intensidad(píxeles) en cada combinación, las estadísticas se clasifican en estadísticas de primer orden, segundo orden y orden superior.

El método de matriz de coincidencia de nivel de grises (GLCM) es una forma de extraer características de textura estadísticas de segundo orden. Una GLCM es una matriz donde el número de filas y columnas es igual al número de niveles de gris, en la imagen.

En la **iError! No se encuentra el origen de la referencia.**, se muestra cómo se calcula los primeros tres valores en un GLCM. En el GLCM de salida, el elemento en la posición (1,1) contiene el valor 1 esto es debido a que solo hay una instancia en

la imagen de entrada donde dos píxeles adyacentes horizontalmente tienen los valores 1 y 1, respectivamente.

En la posición (1,2) contiene el valor 2 debido a que hay dos casos en los que dos píxeles adyacentes horizontalmente tienen los valores 1 y 2.

En la posición (1,3) se tiene el valor 0 porque no hay instancias de dos píxeles adyacentes horizontalmente con los valores 1 y 3.

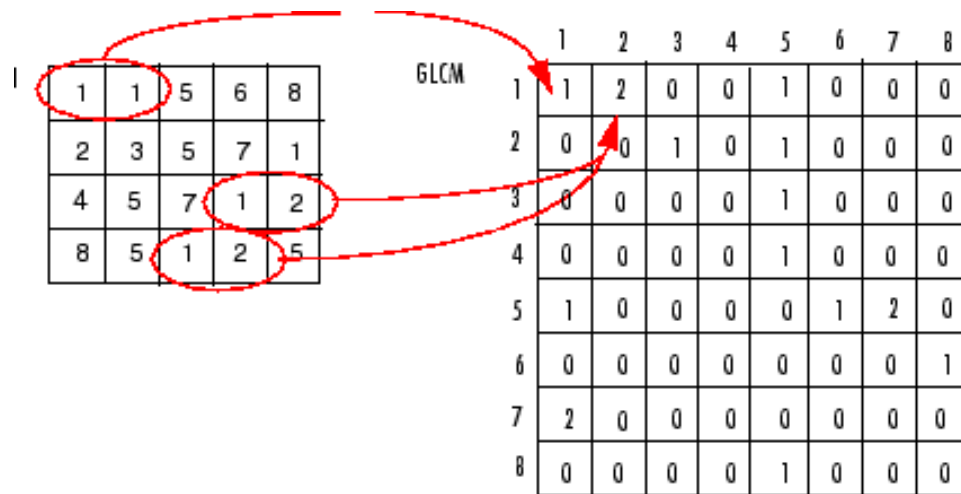


Figura 3. Ejemplo de creación de GLCM.

Una vez creadas las GLCM usando, se puede derivar varias estadísticas que proporcionan información sobre la textura de una imagen.

Estadística Descripción

Contraste	Se refiere a la medida de contraste entre un pixel y su vecino en toda la imagen
Correlación	Se refiere a la medida de cuán correlacionado está un pixel con su vecino en toda la imagen
Energía	Se refiere a la suma de los elementos al cuadrado en la GLCM
Homogeneidad	Se refiere al valor que mide la proximidad de distribución de elementos
Entropía	Es alta cuando los elementos de la matriz de coocurrencia tienen relativamente valores iguales.

Tabla 2 Estadísticas GLCM

1.1.3.1 Contraste

Es la medida de contraste entre un píxel y su vecino en toda la imagen. Tiene un valor alto cuando la región dentro de la escala de la ventana tiene un alto contraste.

El contraste es 0 para una imagen muy constante. La propiedad de contraste también se conoce como varianza e inercia. Su fórmula se representa por:

$$\sum_{i,j} |i - j|^2 p(i, j)$$

1.1.3.1 Correlación

Devuelve una medida de cuán correlacionado está un píxel con su vecino en toda la imagen. Su rango es de -1 a 1. La correlación es 1 o -1 para una imagen perfectamente correlacionada positiva o negativamente. La correlación es indefinida para una imagen constante. Su fórmula se muestra a continuación:

$$\sum_{i,j} \frac{(i - \mu_i)(j - \mu_j)p(i, j)}{\sigma_i \sigma_j}$$

1.1.3.3 Energía

Devuelve la suma de los elementos al cuadrado en el GLCM, su rango se sitúa entre 0 y 1. La energía es 1 para una imagen constante. La propiedad energía también se conoce como uniformidad, uniformidad de energía y segundo momento angular. Su fórmula se muestra a continuación:

$$\sum_{i,j} p(i, j)^2$$

1.1.3.4 Homogeneidad

Devuelve un valor que mide la proximidad de la distribución de elementos en el GLCM a la diagonal del GLCM, su rango se sitúa entre 0 y 1. Su fórmula se muestra a continuación:

$$\sum_{i,j} \frac{p(i, j)}{1 + |i - j|}$$

1.1.3.6 Entropía

Es alta cuando los elementos de la matriz de coocurrencia tienen relativamente valores iguales. Es baja cuando los elementos son cercanos a 0 o 1 (por ejemplo cuando la imagen es uniforme dentro de la ventana). Su fórmula se muestra a continuación:

$$\sum_{i,j}^{N-1} -P_{i,j} \ln(P_{i,j})$$

1.1.4 Máquina de Soporte Vectorial (SVM)

Una Máquina de Soporte Vectorial (SVM) es un modelo de aprendizaje automático supervisado que utiliza algoritmos de clasificación para problemas de clasificación de dos grupos, es uno de los algoritmos de aprendizaje supervisado más populares, que se utiliza tanto para problemas de clasificación como de regresión. Sin embargo, principalmente, se utiliza para problemas de clasificación.

El objetivo del algoritmo SVM es crear la mejor línea o límite de decisión que pueda segregar el espacio n-dimensional en clases para que podamos colocar fácilmente el nuevo punto de datos en la categoría correcta en el futuro. Este límite de mejor decisión se llama hiperplano.

En comparación con los algoritmos más nuevos, como las redes neuronales, tienen dos ventajas principales: mayor velocidad y mejor rendimiento con un número limitado de muestras (en miles). Esto hace que el algoritmo sea muy adecuado para problemas de clasificación.

Para este proceso se tomaron en cuenta diversos softwares, sin embargo, los especializados en materia de procesamiento de imágenes son pocos, es por ello que a continuación se describen los más importantes.

1.1.5 MATLAB®

MATLAB® (Figura 4 **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) es una herramienta de visualización y análisis de datos, en especial cuando se trabajan con operaciones matriciales, además de tener muchas cajas de herramientas también conocidas como "toolbox" sin embargo, debido al interés de este estudio, sólo se hablará de la caja de herramientas para el procesamiento de imágenes. De acuerdo al sitio oficial de MATLAB®, describen la caja como se muestra a continuación:

"Proporciona un conjunto completo de algoritmos estándar de referencia y aplicaciones de flujo de trabajo para el procesamiento de imágenes, el análisis, la visualización y el desarrollo de algoritmos." (MATLAB, 2021).

Como se mencionó con anterioridad, los tipos estándar de MATLAB® son las matrices, así que las imágenes también son matrices cuyos elementos son los RGB de cada pixel.



Figura 4. Logo de MATLAB® (fuente: (Mathworks, 2022)).

1.1.6 PYTHON

Python es un lenguaje de programación sencillo pero muy exitoso debido a que cuenta con una sintaxis sencilla y extensible a C++ o a JAVA, sin embargo, el procesamiento de imágenes es un aspecto muy importante, sin embargo, se necesita el apoyo de los módulos de Numpy y Scipy. Además de la librería PIL (Python Imaging Library), la cual se puede utilizar para mostrar imágenes, crear miniaturas, cambio de tamaño, rotación, conversión entre formatos de archivo, contraste mejorado, filtrar y aplicar otro procesamiento de imágenes digitales, etc. PIL admite formatos de imagen como PNG, JPEG, GIF, TIFF, BMP. Otra variante "más amigable" es "Pillow" (Figura 5), la cual agrega capacidades de procesamiento de imágenes a su intérprete de Python. (Python Official, s.f.)



Figura 5. Logo Pillow.

1.1.7 OCTAVE

Octave (Figura 6) es una muy buena alternativa de código abierto a MATLAB®. Casi todas las funciones de MATLAB® se ejecutan en Octave.

Se describe a Octave como un lenguaje de programación científica con una potente sintaxis orientada a las matemáticas con herramientas de visualización y trazado 2D / 3D integradas. Además de ser un software gratuito, se ejecuta en GNU / Linux, macOS, BSD y Microsoft Windows, compatible con muchos scripts de Matlab. (GNU, s.f.)



Figura 6. Logo Octave.

Dentro de las metodologías tradiciones se pueden encontrar varias, sin embargo, debido a la naturaleza del proyecto, se está considerando optar por alguna de las que se mencionan a continuación:

1.1.8 Metodologías de desarrollo se Software

1.1.8.1 Cascada

El enfoque de cascada enfatiza una progresión estructurada entre fases definidas. Cada fase (Figura 7) consta de un conjunto definido de actividades y entregables que deben lograrse antes de que pueda comenzar la siguiente fase. Las fases siempre se nombran de manera diferente, pero la idea básica es que la primera fase intenta capturar lo que el sistema hará y los requisitos de software, la segunda fase determina cómo se diseñará. La tercera etapa es donde se comienza a escribir el código, la cuarta fase es la prueba del sistema y la fase final se centra en tareas de implementación como capacitación y documentación pesada, así como testeos.

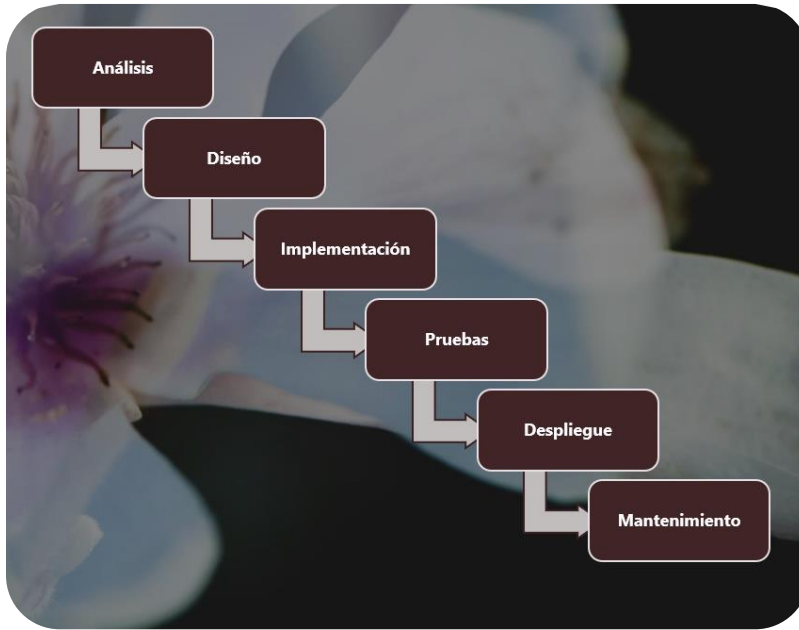


Figura 7. Ejemplo de desarrollo en cascada (fuente: creación propia).

1.1.8.2 Desarrollo en espiral

Esta metodología combina elementos de diseño y creación de prototipos en etapas. Hay cuatro fases principales del modelo en espiral (Figura 8):

1. Establecimiento de objetivos: se identifican los objetivos específicos para la fase del proyecto
2. Evaluación y reducción de riesgos: los riesgos clave se identifican, analizan y se obtiene información para reducir estos riesgos
3. Desarrollo y validación: se elige un modelo apropiado para la siguiente fase de desarrollo.
4. Planificación: el proyecto se revisa y se elaboran planes para la siguiente ronda de espiral.

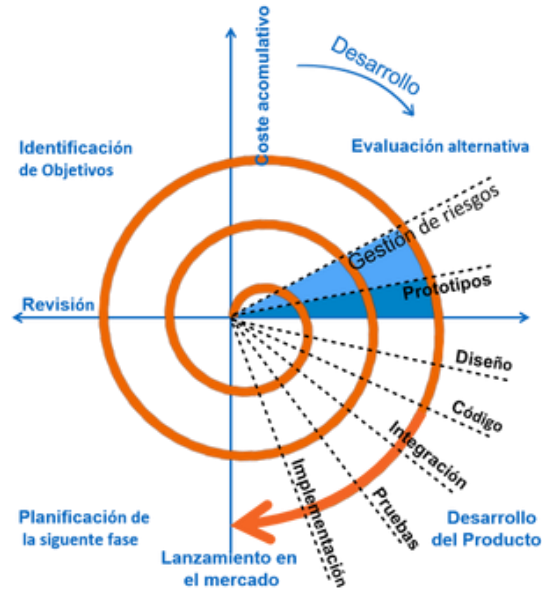


Figura 8. Fases del desarrollo en espiral.

1.1.8.3 Modelo de desarrollo RAD

El modelo RAD o el modelo de desarrollo rápido de aplicaciones es un proceso de desarrollo de software basado en la creación de prototipos sin ninguna planificación específica. En el modelo RAD, se presta menos atención a la planificación y se le da más prioridad a las tareas de desarrollo. Su objetivo es desarrollar software en un corto período de tiempo. En la Figura 9, pueden observarse sus fases, las cuales se enlistan a continuación:

1. Modelado de negocios
2. Modelado de datos
3. Modelado de procesos
4. Generación de aplicaciones
5. Pruebas y rotación

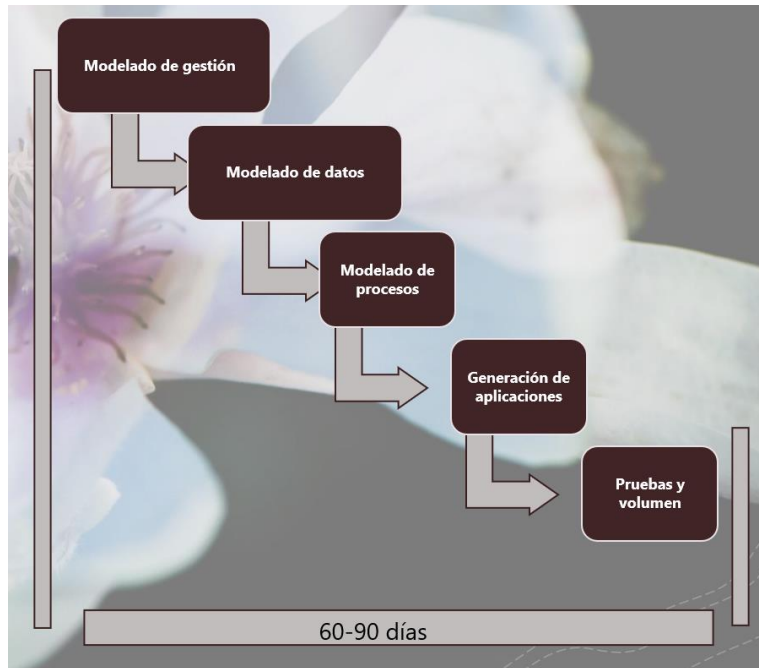


Figura 9. Modelo de desarrollo RAD.

1.2 Planteamiento del Problema

A nivel mundial la Federación Internacional de Diabetes (FID) estima que en 2019 había 463 millones de personas con diabetes y que, de acuerdo a sus proyecciones, esta cifra puede aumentar a 578 millones para 2030 y a 700 millones en 2045. (Federación Internacional de Diabetes, 2019). En México, en 2020, la diabetes mellitus pasó de ser la segunda causa de muerte a la tercera, superada por el COVID 19 y las enfermedades del corazón ya que en el año 2018 se registraron 101,257 muertes ocasionadas por esta enfermedad de acuerdo con el INEGI¹. De acuerdo a los estudios realizados por ENSANUT y como se puede observar en la Figura 10, la mayor afección se encuentra en los rangos de edad de 30 o más años.

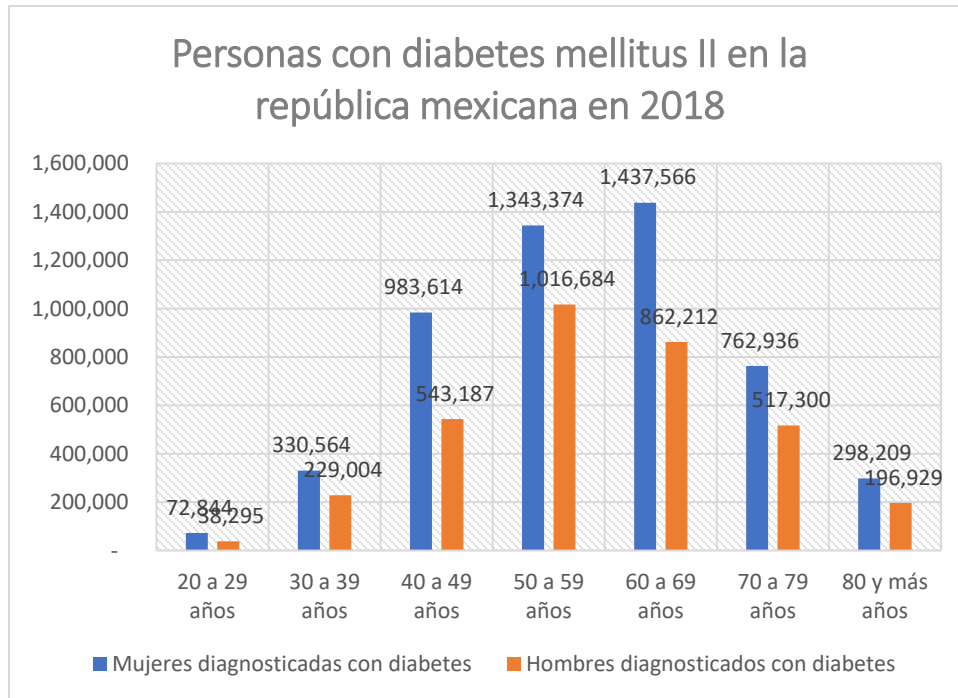


Figura 10. Personas con diabetes mellitus II en México 2018 de acuerdo a ENSANUT (fuente: creación propia).

En 2020 dicho estudio fue realizado nueva mente, y como se puede observar en la Figura 11, estas cifras crecieron de manera exponencial. Si se compara como en la Figura 12, se puede observar que, en tan solo 2 años, el diagnostico de personas con diabetes creció de manera impresionante.

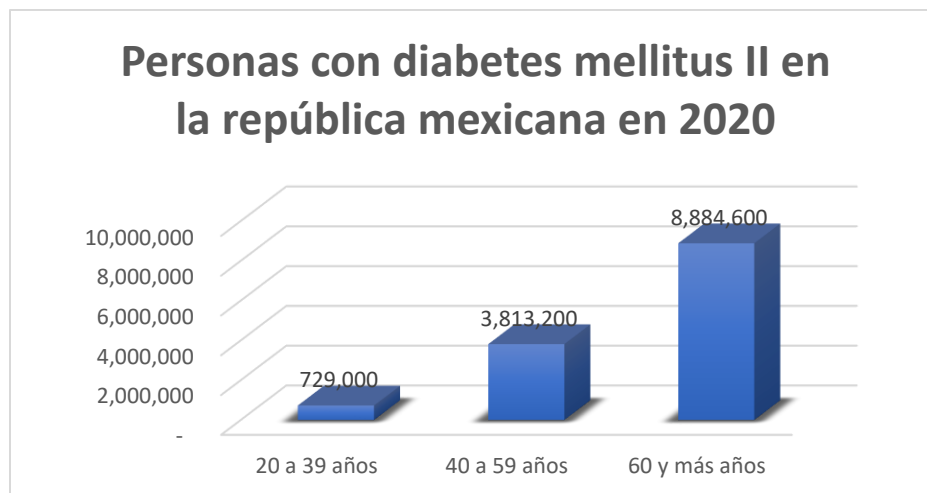


Figura 11. Personas con diabetes mellitus en México 2020.

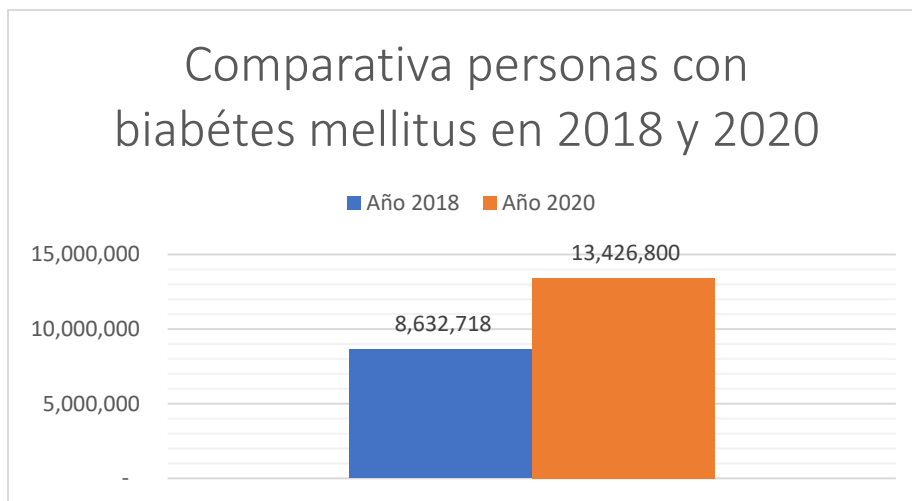


Figura 12. Comparación de crecimiento de personas con diabetes 2018 y 2020.

De acuerdo al INEGI (INEGI, 2020), en Teziutlán Puebla durante el censo de 2020, se detectó que había 42,720 habitantes en un rango de edad de 15 a 64 años y 5,472 de 65 años o más, dando así un total aproximando 48,192, de los cuales de acuerdo a la encuesta nacional de salud (ENSANUT, 2020), se tiene una prevalencia del 9.0% de diabetes en los poblanos; 10.2% mujeres y 7.2 en hombres. Es decir, 4,338 habitantes aproximadamente en Teziutlán, tienen diabetes.

Al inicio, esta enfermedad no presenta molestias, por lo que se puede padecer diabetes y no saberlo, por esta razón es conveniente que se realicen pruebas para su detección oportuna. La retinopatía se encuentra entre las principales complicaciones de la diabetes junto con la neuropatía y nefropatía como se puede observar en la Figura 13

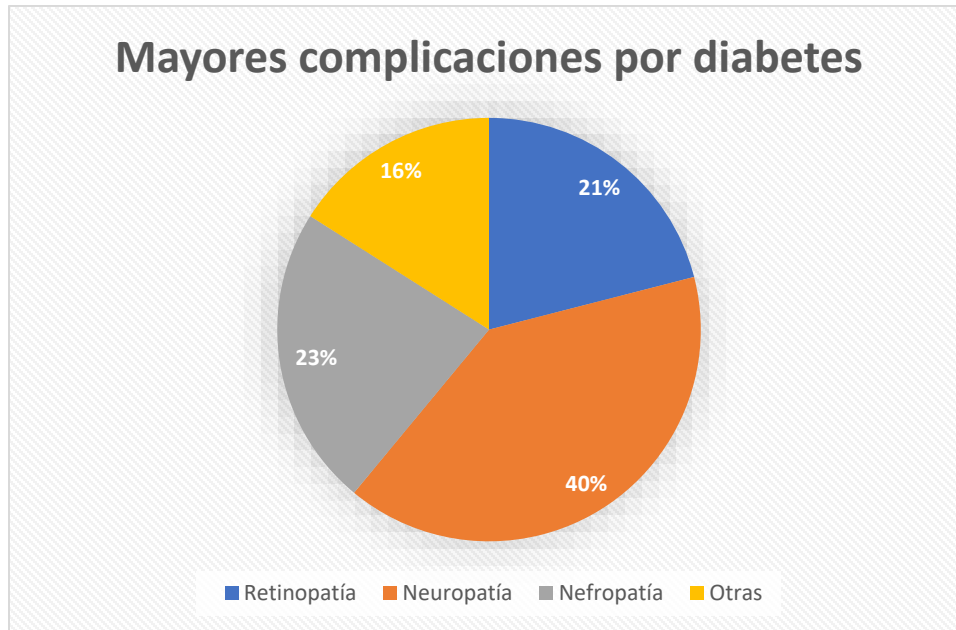


Figura 13. Complicaciones por diabetes.

El estudio de la retinopatía, es muy importante cuando se habla de la diabetes, gracias a este estudio, pueden prevenirse muchas consecuencias y una detección oportuna, podría salvar a las personas de la ceguera ya que esta condición daña los vasos sanguíneos de la retina provocando fugas que finalmente conducen a la pérdida de la visión.

Los pacientes de diferentes tipos de diabetes desarrollan alguna forma de retinopatía después de 20 años de esta enfermedad crónica. (Pérez Muñoz, Casado, Pérez, & Cordové, 2012) La retinopatía diabética se desarrolla en casi todos los pacientes con diabetes de tipo 1 y alrededor del 60% de los pacientes con diabetes de tipo 2. De acuerdo con la Federación Mexicana de Diabetes A.C.² en el año 2017, la retinopatía diabética es la causa número uno de ceguera en México y se estima que el 50% de los pacientes con diabetes en México, puede desarrollarla después de padecer diabetes. A su vez la Retinopatía Diabética puede derivar en Edema Macular Diabético (EMD) la causa más frecuente de pérdida visual. De acuerdo con la

Asociación Mexicana de Retina, en 2018, como se puede observar en la Figura 14, 2,000,000 de diabéticos sufren de algún grado de retinopatía detectada al punto en el cual el daño ya es mayor.



Figura 14. Pacientes con retinopatía en 2018 (fuente: Asociación Mexicana de Retina).

Por otro lado, la ceguera es la segunda causa de discapacidad en México. (INEGI, 2020) La retinopatía es una de las principales complicaciones de la diabetes que se suscribe a la estadística que coloca a la ceguera como la segunda causa de discapacidad en México. Esta, se presenta en una tercera parte de la población con diabetes mellitus.

Cuando se detectan las señales de advertencia de la retinopatía, el nivel de gravedad de la enfermedad debe validarse para poder tomar decisiones con respecto al tratamiento adecuado. La principal dificultad que enfrentan los pacientes afectados por RD es que no son conscientes de la enfermedad hasta que los cambios en la retina han progresado a un nivel en el que el tratamiento, a su vez, tenderá a ser menos efectivo.

En idioma de precios, el costo anual de la diabetes para la sociedad mexicana, según la Encuesta Nacional de Salud y Nutrición (ENSANUT), se estima en alrededor de

\$3,872 millones de dólares para atención a la diabetes anualmente, representando el 34% del gasto en salud, generando el costo por persona de \$707 dólares al año³.

1.3 Justificación

En la actualidad la mejor manera de diagnosticar la RD es mediante el análisis de fondos de ojos, sin embargo, el número de especialistas se ve superado de manera muy notable por el abundante crecimiento de personas que padecen diabetes.

En este sentido, en el presente proyecto se propone el desarrollo de un sistema software que a través del procesamiento de imágenes (fondos de ojos) sea capaz de predecir si un paciente padece retinopatía diabética.

Con lo anterior, se pretende proporcionar a los especialistas de la salud una herramienta tecnológica que sirva de apoyo en el diagnóstico clínico de personas con retinopatía diabética y, por ende, una mayor precisión del diagnóstico, dando así a los pacientes, resultados más fiables y que puedan tener un tratamiento de manera más eficaz y rápida.

1.4 Hipótesis

El desarrollo de un sistema de predicción de retinopatía diabética mediante la examinación de fondos de ojo, servirá de apoyo para el prediagnóstico clínico en personas con retinopatía diabética e informar a tiempo a quienes podrían tener indicios de dicha enfermedad, tomándose así las medidas necesarias para su tratamiento oportuno.

1.5 Objetivo general

Desarrollar un sistema software de apoyo para el prediagnóstico de retinopatía diabética, con base en las morfologías y análisis de estructuras de fondos de ojo.

1.6 Objetivos específicos

- Realizar un análisis del estado del arte para identificar herramientas de software más utilizadas y las principales técnicas para la predicción de retinopatía diabética.
- Recolectar un conjunto de imágenes públicas de retina sana y retina con retinopatía diabética.
- Entrenar un algoritmo de clasificación empleando el conjunto de imágenes pre-procesadas.
- Diseñar y desarrollar un software que sirva de apoyo en el diagnóstico clínico de personas con retinopatía diabética.
- Realizar pruebas del modelo obtenido a través de métricas de evaluación.

1.7 Alcances y limitaciones

Con la realización de este proyecto, se espera obtener resultados óptimos, sin embargo, hay consciencia sobre las limitaciones que afecten los procesos de desarrollo, teniendo como alcances y limitaciones las situaciones mostradas a continuación.

Alcances:

- El presente trabajo, explorará el empleo de máquinas de vector de soporte en la clasificación de las características de la retinopatía diabética.
- La presente investigación abarca y estudia únicamente imágenes de fondos de ojo de rubro público.
- Se espera que el empleo de los filtros adicionales y el algoritmo empleado, logran más de un 90% de efectividad en la predicción de la retinopatía diabética.

Limitaciones:

- La falta de bancos y bases de datos públicas en español y estandarizadas de fondos de ojos.
- En algunas clínicas no se cuenta con la tecnología adecuada para el funcionamiento del proyecto.
- El código solo se generará en MatLab, a pesar de poderse exportar a otras plataformas solo la aplicación.

CAPITULO II ESTADO DEL ARTE

2.1 Trabajos relacionados

En resumen, a continuación, se muestran los estudios encontrados sobre el tema, cabe mencionar que la mayoría de los estudios aquí mencionados son de revistas de gran interés, y se enlista el año de publicación, un resumen de su principal objetivo y los resultados que se obtuvieron. Algunos artículos no hacen referencia a cuáles fueron sus resultados, ni el número de imágenes analizadas, por tanto, no se sabe qué tan efectivos o contraproducentes fueron. No hay datos que sirvieran como base, ya que cada estudio utilizó diferentes imágenes, así como diferente cantidad de datos analizados, por ende, no puede haber una estandarización de estos resultados.

En el estudio denominado "*Evaluation of automated fundus photograph analysis algorithms for detecting microaneurysms, haemorrhages and exudates, and of a computer-assisted diagnostic system for grading diabetic retinopathy*" (Dupas, y otros, 2010); se realizó la evaluación de algoritmos de análisis automático de imágenes de fondo de ojo para la detección de micro aneurismas, hemorragias y exudados (duros y blandos) mediante un sistema de diagnóstico asistido por computadora para la clasificación de la retinopatía diabética. Una de las principales metas de dicho estudio, se centró en probar y evaluar diversos algoritmos para el análisis de fondos de ojos y la detección de lesiones visibles de la retinopatía diabética. Sobre el método empleado en dicha investigación, primero se montó un microaneurismas y exudado a dos fondos de ojo sobre las que se marcaron manualmente estas lesiones, después de eso, se empleó un sistema de diagnóstico asistido por computadora que permitió clasificar la retinopatía diabética y el riesgo de edema macular.

Por otro lado, en el artículo denominado "*A new curvelet transform based method for extraction of red lesions in digital color retinal images*" (Dehnavi, Dehghani, Esmaeili, & Rabbani, 2010) se presenta un algoritmo basado básicamente en curvas

que separan las lesiones marcadas en rojo en los fondos de ojos del resto de la imagen de la retina, con el valor agregado de que es a color. Para evitar que la fóvea (mancha de la retina) se considere una lesión roja, se introdujo un algoritmo de ecualización de la iluminación y lo aplican en el plano del fondo de ojo. Luego, se aplica DCUT o también conocida como transformación de la curva digital para hacer una mejora de la imagen y una modificación de los coeficientes de la curva. Posteriormente a estas regiones tratadas y modificadas le aplican un umbral, dando como resultado la estructura total de los vasos sanguíneos después de extraerlos con la técnica basada en curvas y falsos positivos.

En el estudio denominado "*Automated microaneurysm detection using local contrast normalization and local vessel detection*" (Fleming, Philip, Goatman, Olson, & Sharp, 2006) cuenta como los microaneurismas son el signo más temprano de la retinopatía diabética y, por lo tanto, son muy importantes para clasificar si las imágenes muestran signos de alguna lesión. También se describen métodos automáticos para la detección de microaneurismas y muestra cómo la normalización del contraste de la imagen puede mejorar la capacidad de distinguir entre microaneurismas y otros puntos que se producen en la retina. Se comparan varios métodos para la normalización del contraste. Los mejores resultados se obtuvieron con un método que utiliza la transformación de la cuenca para derivar una región que no contiene vasos ni otras lesiones. Los puntos dentro de los vasos se manejan con éxito utilizando una técnica de detección de vasos sanguíneos local.

En "*Red Lesion Detection Using Dynamic Shape Features for Diabetic Retinopathy Screening*" (Seoud, Hurtut, Chelbi, Cheriet, & Langlois, 2016) hablan sobre el desarrollo de un sistema eficiente para la detección y segmentación asistida por computadora de la retinopatía diabética, ya que es de suma importancia la detección confiable de las lesiones retinianas en una etapa temprana para hacer un buen diagnóstico y posteriormente un tratamiento. Dentro de este estudio se describe un método que en su época fue nuevo y novedoso para la detección automática de microaneurismas y hemorragias o también conocidas como petequias, en imágenes

a color de fondo de ojo. Se describe un conjunto de características de forma dinámica, su diferenciación es que no requiere una segmentación precisa de las regiones para clasificar. Dichas características permiten hacer una discriminación entre las lesiones y los segmentos de vasos sanguíneos. El método aquí mencionado se valida por lesión y por imagen utilizando seis bases de datos, cuatro de las cuales están disponibles públicamente. Demuestra ser robusto con respecto a la variabilidad en la resolución de la imagen, la calidad y el sistema de adquisición.

En el trabajo "*Automated Feature Extraction in Color Retinal Images by a Model Based Approach*" se han desarrollado métodos para extraer las características principales de las imágenes de fondos de ojo a color. El análisis de componentes principales se emplea para localizar el disco óptico, además de que se propone un modelo de forma activa. Se establece un sistema de coordenadas de fondo de ojo para proporcionar una mejor descripción de las características en las imágenes retinianas y también proponen un enfoque para detectar exudados por la región combinada de crecimiento y detección de bordes. Las tasas de éxito de la localización del disco, la detección de los límites del disco y la localización de la fovea son del 99%, 94% y 100%, respectivamente (Li & Chutatape, 2004).

En el estudio denominado "*Development and validation of a deep learning algorithm for detection of diabetic retinopathy in retinal fundus photographs*" (Gulshan, y otros, 2016), se entrenó un tipo específico de red neuronal optimizada para la clasificación de imágenes mediante una red neuronal convolucional profunda, utilizando un conjunto de datos de desarrollo retrospectivo de 128,175 imágenes de fondos de ojos, que se clasificaron de 3 a 7 veces para la retinopatía diabética, edema macular diabético por un panel de 54 oftalmólogos con licencia de EE. UU. y residentes de oftalmología entre Mayo y Diciembre de 2015. El algoritmo resultante fue validado en enero y febrero de 2016 utilizando 2 conjuntos de datos separados. La sensibilidad y especificidad de dicho algoritmo para la detección de retinopatía

diabética referible (RDR), definida como retinopatía diabética moderada o en el peor de los casos, como edema macular diabético referible, o ambos, se generaron en base al estándar de referencia de la decisión mayoritaria de la asociación de oftalmólogos.

El artículo "*Automated Identification of Diabetic Retinopathy Using Deep Learning*" (Gargeya & Leng, 2017), habla sobre el desarrollo de una tecnología de diagnóstico robusta para automatizar la detección de retinopatía diabética. La derivación de ojos con RD a un oftalmólogo para una evaluación y tratamiento adicionales ayudaría a reducir la tasa de pérdida de visión, lo que permitiría diagnósticos precisos y oportunos. Para el diseño desarrollaron y evaluaron un algoritmo de aprendizaje profundo basado en datos como una nueva herramienta de diagnóstico para la detección automatizada de retinopatía diabética. Este algoritmo se encarga de procesar imágenes de fondo de ojo en color y clasificarlas como sanas (sin retinopatía) o con insanas (con retinopatía), identificando casos relevantes para derivación médica. Se utilizaron un total de 75,137 imágenes de fondo de ojo de pacientes diabéticos disponibles públicamente. También se probaron los modelos utilizando las bases de datos públicas MESSIDOR 2 y E-Ophtha para validación externa.

En el estudio "*Biomarkers in diabetic retinopathy*" (Jenkins, y otros, 2015), se hace mención sobre los biomarcadores comunes de la retinopatía diabética y sus riesgos relacionados en la práctica clínica actual con la visualización de imágenes retinianas y las medidas de glucosa, lípidos, presión arterial, peso corporal, tabaquismo y estado de embarazo. Un mayor conocimiento de los nuevos biomarcadores y mediadores de la retinopatía diabética, como los relacionados con la inflamación ha contribuido al desarrollo de tratamientos adicionales, en particular para la retinopatía en etapa tardía, incluidos los corticosteroides intraoculares y los inhibidores del factor de crecimiento endotelial vascular intravítreo. Desafortunadamente, a pesar de una variedad de tratamientos (que incluyen fotocoagulación con láser, esteroides intraoculares, etc. y, más recientemente, un fármaco hipolipemiante, muchos

pacientes con retinopatía diabética no responden bien a los tratamientos actuales. Por tanto, son necesarios tratamientos más eficaces para la retinopatía diabética. Las nuevas técnicas analíticas, en particular las relacionadas con los marcadores moleculares, están acelerando el progreso en la investigación de la retinopatía diabética. Los biomarcadores pueden facilitar una mejor comprensión de la retinopatía diabética y contribuir al desarrollo de nuevos tratamientos y nuevas estrategias clínicas para prevenir la pérdida de visión en personas con diabetes. Este artículo revisa aspectos clave relacionados con la investigación de biomarcadores y se centra en algunos biomarcadores específicos relevantes para la retinopatía diabética.

El estudio denominado "*Development and validation of a deep learning system for diabetic retinopathy and related eye diseases using retinal images from multiethnic populations with diabetes*" (Ting, y otros, 2017), habla sobre la creación de un sistema de aprendizaje profundo también denominado DLS, la cual es una tecnología de aprendizaje automático con potencial para detectar la retinopatía diabética y enfermedades oculares relacionadas. El objetivo principal de este estudio es la evaluación del desempeño de un DLS en la detección de retinopatía diabética leve, retinopatía diabética que amenaza la visión, posible glaucoma y degeneración macular relacionada con la edad en poblaciones multiétnicas comunitarias y clínicas con diabetes. Se evaluó el rendimiento diagnóstico del DLS para la retinopatía diabética y enfermedades oculares relacionadas utilizando 494,661 imágenes retinianas. Se entrenó un DLS para detectar retinopatía diabética usando 76.370 imágenes, posible glaucoma utilizando 125,189 imágenes. El entrenamiento de la DLS se completó en mayo de 2016, y la validación de la DLS se completó en mayo de 2017 para la detección de retinopatía diabética referible (retinopatía diabética no proliferativa-moderada) y retinopatía diabética que amenaza la visión (retinopatía diabética no proliferativa severa) usando un conjunto primario de datos de validación en el Programa Nacional de Detección de Retinopatía Diabética de Singapur.

El estudio “*Diabetic Retinopathy Detection*” (International Journal of Engineering and Advanced Technology, 2020), tiene como objetivo encontrar la enfermedad en la etapa más temprana posible, mediante la extracción de dos características de la imagen de fondo de ojo, microaneurismas, que es el síntoma inicial que muestra la característica y la hemorragia, muestra síntomas de las otras etapas. Con base en estas dos características, se clasifica la etapa de la enfermedad como normal, principios, leve y severo mediante el uso de una red neuronal convolucional, una técnica de aprendizaje profundo que reduce la carga de la extracción manual de características y proporciona una mayor precisión. También ubican la posición de estas características en las imágenes retinianas afectadas por la enfermedad para ayudar a los doctores a ofrecer un mejor tratamiento médico.

2.2 Análisis comparativo de los trabajos relacionados

Año publicación	Objetivo	Resultado
2004 (Li & Chutatape, 2004)	Se propone un sistema de coordenadas de fondo de ojo para proporcionar una mejor descripción de las características en las imágenes retiniana y de esta forma detectar exudados por la región combinada de crecimiento y detección de bordes.	La localización del disco, la detección de los límites del disco y la localización de la fovea son del 99%, 94% y 100%, respectivamente. La sensibilidad y especificidad de la detección de exudado son del 100% y del 71%, en consecuencia.
2006 (Fleming,	Describir métodos automáticos para la detección de	Las imágenes que contienen microaneurismas se detectan con

<p>Philip, Goatman, Olson, & Sharp, 2006)</p>	<p>microaneurismas y mostrar cómo la normalización del contraste de la imagen puede mejorar la capacidad de distinguir entre microaneurismas y otros puntos que se producen en la retina.</p>	<p>una sensibilidad del 85,4% y una especificidad del 83,1%.</p>
<p>2010 (Dehnavi, Dehghani, Esmaeili, & Rabbani, 2010)</p>	<p>Presentar un algoritmo aplicando la transformación de curva digital (DCUT) para separar lesiones rojas del resto de la imagen retiniana en color.</p>	<p>Los experimentos con 89 imágenes retinianas de pacientes diabéticos indican un 94% de sensibilidad y un 87% de especificidad en la detección de lesiones rojas.</p>
<p>2010 (Dupas, y otros, 2010)</p>	<p>Evaluar algoritmos automatizados de análisis de fotografías de fondo de ojo para la detección de lesiones primarias y un sistema de diagnóstico asistido por computadora para clasificar la retinopatía diabética (RD) y el riesgo de edema macular (EM).</p>	<p>El algoritmo para la detección automática de microaneurismas tiene una sensibilidad del 88,5%, con un promedio de 2,13 falsos positivos por imagen. La evaluación basada en píxeles del algoritmo para la detección automática de exudados tuvo una sensibilidad del 92,8% y un valor predictivo positivo del 92,4%. Para la detección de RD, la sensibilidad y especificidad del algoritmo fueron 83,9% y 72,7%, respectivamente, y, para la detección del riesgo de EM, la</p>

		sensibilidad y especificidad fueron 72,8% y 70,8%, respectivamente.
2015 (Jenkins, y otros, 2015)	Revisar aspectos clave relacionados con la investigación de biomarcadores diabéticos y se centra en algunos biomarcadores específicos relevantes para la retinopatía diabética.	No especificado.
2016 (Seoud, Hurtut, Chelbi, Cheriet, & Langlois, 2016)	Describir y validar un método novedoso para la detección automática de microaneurismas y hemorragias en imágenes de fondo de ojo en color. La principal contribución es un nuevo conjunto de características de forma, denominadas características de forma dinámica, que no requieren una segmentación precisa de las regiones para clasificar.	En la base de datos del Retinopathy Online Challenge, el método alcanza una puntuación FROC de 0,420, lo que lo sitúa en cuarto lugar.
2016 (Gulshan, y otros, 2016)	Aplicar el aprendizaje profundo para la creación de un algoritmo de detección automatizada de retinopatía diabética y edema	Usando un segundo punto operativo con alta sensibilidad en el conjunto de desarrollo, para EyePACS-1 la sensibilidad fue del 97,5% y la especificidad fue del

	macular diabético en fotografías de fondo de ojo de retina.	93,4% y para Mesidor-2 la sensibilidad fue del 96,1% y la especificidad fue del 93,9%.
2017 (Ting, y otros, 2017)	Evaluar el desempeño de un DLS en la detección de retinopatía diabética referible, retinopatía diabética que amenaza la visión, posible glaucoma y degeneración macular relacionada con la edad (DMAE) en poblaciones multiétnicas comunitarias y clínicas con diabetes.	Para la retinopatía diabética referible fue 95%, la sensibilidad fue del 90,5% y la especificidad fue del 91,6%.
2017 (Gargeya & Leng, 2017)	Desarrollar una tecnología de diagnóstico robusta para automatizar la detección de RD.	Logró un 94% y 98% de sensibilidad y especificidad, respectivamente.
2020 (International Journal of Engineering and Advanced Technology, 2020)	Encontrar la enfermedad en la etapa más temprana posible mediante la extracción de dos características de la imagen de la retina, a saber, microaneurismas, que es el síntoma inicial que muestra la característica y la hemorragia, que muestra síntomas de las otras etapas.	No especificado.

Tabla 3. Trabajos relacionados.

Conclusión estudios

En cada uno de los estudios presentados, se presentaron diferentes fuentes de imágenes, pero independientemente de eso, una de las principales diferencias que se observan son las características de las fotos, algunos aplican filtros RGB para hacer una mejora de la imagen, sin embargo, hay otros que se preocupan más por la iluminación y deciden aclarar la imagen para su procesamiento, otro estudio, separa la imagen en regiones de interés.

En la mayoría de los algoritmos presentados anteriormente se realiza el procesamiento utilizando solo el canal verde de la imagen RGB. Primero, se procesa la imagen para tratar de disminuir el ruido en la imagen. Luego, se realiza la aplicación de un método o algoritmo de segmentación para así poder extraer los casos sanguíneos. Posteriormente un algoritmo de clasificación es aplicado para categorizar las características de la imagen.

Dicho esto, otra dificultad que podría impactar en el desarrollo del presente, es la relación estrecha y que muchas veces es visible a simple vista es la similitud entre el color de la piel y el del disco óptico ocular, o que el nivel de iluminación al momento de hacer la captura del fondo de ojo intervenga en la impresión de la imagen.

Por ende, para realizar el presente estudio, es necesario que se tomen en cuenta dichas consideraciones, y hacer que el sistema se pueda adaptar a los diferentes escenarios que pudieran presentarse.

Otro punto importante observado es que la mayoría de estos estudios hacen hincapié en el procesamiento de imágenes utilizando RGB, dando más peso a los canales R y G, porque se determinó que en ellos se encuentran localizados la mayor parte de la información contenida en la imagen.

2.3 Alternativas de solución

A continuación, en la Figura 15 se puede observar una comparativa de las principales características de cada software que se analizó en el punto anterior, con la finalidad de seleccionar la mejor opción.

	OCTAVE	MATLAB	PYTHON
Libre	Sí	No	Sí
Volúmenes de datos grandes	No	Sí	Sí
Tiene librerías de procesamiento de imágenes	Sí	Sí	Sí
Herramientas de procesamiento específicas	Sí	Sí	No

Figura 15. comparación de alternativas.

2.4 Solución propuesta

Debido a que ya se ha trabajado anteriormente con el software de MATLAB, eso jugó un papel de gran peso en la decisión de la optativa, al considerar los tiempos de desarrollo.

Otras ventajas de gran consideración con respecto a las otras dos mencionadas, son las siguientes:

- Tiene una base de datos muy grande y que al día sigue creciendo en donde se puede encontrar algoritmos integrados para aplicaciones de procesamiento de imagen y de visión por computadora.
- Permite la prueba de algoritmos sin tener que hacer todo un proceso de compilación.
- La aplicación de escritorio, permite trabajar de forma interactiva con los datos, y de esta forma se puede llevar un seguimiento de los archivos y las

variables, haciendo así que las tareas de programación o depuración sean más sencillas.

- Tiene la capacidad de procesar una cantidad amplia y variada de formatos de imágenes, además de poder llamar a otras bibliotecas externas.
- En comparación con los otros dos softwares propuestos, MATLAB cuenta con documentación claramente escrita con muchos ejemplos.
- Cuando ya se está familiarizado con el funcionamiento de MATLAB, la curva de aprendizaje es muy rápida.
- Se cuenta con una comunidad grande, donde se comparte código, ideas y conocimiento.

CAPITULO III METOLOGÍA Y DESARROLLO

3.1 Metodología de desarrollo

A continuación, se describen a grandes rasgos como se dividirá y procesará la información, en la Figura 16 se puede observar un panorama general de cada bloque, en primer plano se debe contar con las imágenes de fondos de ojo, y estas a su vez, deben estar comprendidas en el espacio RGB.

Posteriormente, a dichas imágenes ingresadas se les aplica un procesamiento de cinco filtros para poder encontrar como primera parte los microaneurismas que pudieran presentarse, luego, se pasan a clasificación, que es la parte en donde se descartan los fondos de ojo sano.



Figura 16. Diagrama general.

Dentro de estas fases generales, las actividades que se llevan a cabo son las siguientes:

Para la metodología de desarrollo de la tesis, se tomaron en cuenta las siguientes actividades:

1. Recolección y planificación de requisitos.
2. Instalación y preparación de programas a utilizar, planeación del algoritmo(s) a implementar.
3. Revisión, obtención de imágenes públicas para base de la investigación (CrowSourcing).
4. Determinación y clasificación de características relevantes en las imágenes.
5. Modelado/Diseño rápido de aplicación.
6. Primera entrevista con expertos en el ámbito
7. Orden de imágenes por características manualmente.
8. Determinación de algoritmo y metodología.
9. Redacción del capítulo 1 y 2 de la tesis
10. Desarrollo de aplicación e interfaz, implementación de detección y visualización las lesiones ocasionadas por hemorragias.
11. Primera prueba y detección de áreas de oportunidad internamente.
12. Segunda entrevista con expertos y retroalimentación.
13. Aplicación de áreas de oportunidad y cambios en base a retroalimentación de expertos.
14. Determinación y clasificación de la gravedad de las lesiones halladas en base a lo platicado con experto.
15. Redacción del capítulo 3 de la tesis
16. Determinación y clasificación de características relevantes en las imágenes.
17. Desarrollo del segundo prototipo incorporando mejoras y primera versión de la interpretación de resultados.
18. Tercera entrevista con expertos y retroalimentaciones.
19. Aplicación de cambios/modificaciones en base a retroalimentación

20. Desarrollo de segunda versión de interpretación de resultados con mejoras.
21. Finalización de una versión alfa de la aplicación.
22. Redacción del capítulo 4 de la tesis
23. Retroalimentación de versión alfa, aplicación de posibles mejoras.
24. Entrega final de la aplicación

3.1.1 Imágenes de fondo de ojo

Una imagen de fondo de ojo, se trata de la superficie interna y posterior del ojo, en donde se encuentran la retina, mácula, disco óptico, fóvea y, además, los vasos sanguíneos. En la fotografía de fondo de ojo, una cámara especial, apunta a través de la pupila hacia la parte posterior del ojo y toma fotografías. Estas imágenes ayudan a los oftalmólogos a encontrar, observar y tratar enfermedades. En la Figura 17 se puede apreciar un ejemplo de lo que es un fondo de ojo con retinopatía y en la parte derecha, se puede observar un fondo de ojo de un ojo sano.

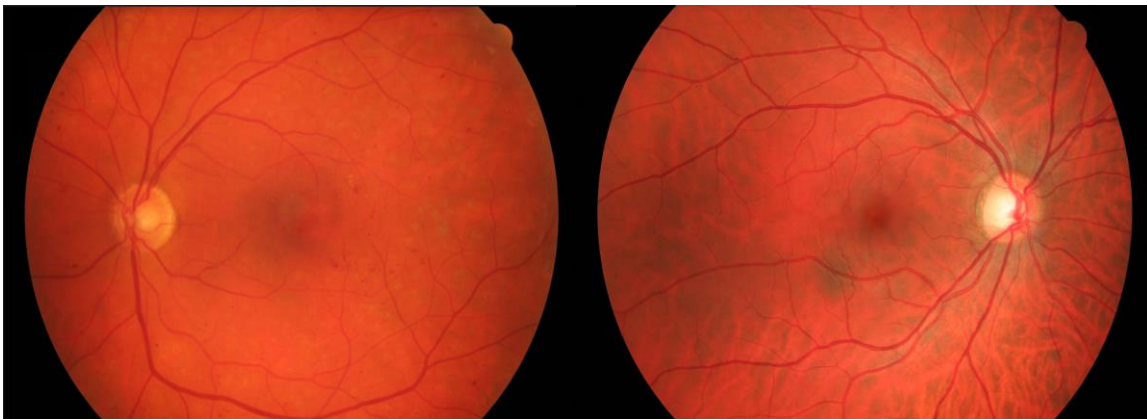


Figura 17. Fondo de imagen con retinopatía (izquierda) y una sana (derecha).

Para que el procesamiento se genere de manera más eficaz, el primero paso al obtener los fondos de ojo, es normalizar las imágenes, es decir, que cuenten con características iguales en cuanto a tamaño y relación, es por ello que el primero paso, es cambiar el tamaño de la imagen para que tenga el número especificado de filas y columnas, utilizando la sentencia ***imresize*** en Matlab.

3.1.2 Procesamiento

Mediante el procesamiento, se pretende que las imágenes sean mejoradas para que después la extracción de sus características sea más funcional. Durante el procesamiento, en el presente trabajo se emplearon los pasos que se enlistan a continuación:

El primero paso es convertir la imagen RGB a escala de grises, eliminando la información de matiz y saturación al mismo tiempo que se conserva la luminosidad., esto empleando la sentencia ***rgb2gray*** en Matlab, en la Figura 18 se puede visualizar un ejemplo de la aplicación de dicha sentencia. En la Figura 19, Figura 20 y Figura 21 el canal rojo, verde y azul correspondientemente.



Figura 18. Resultado de la sentencia rgb2gray.

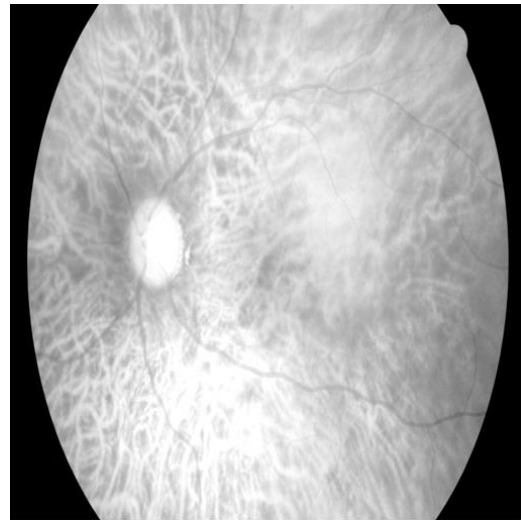


Figura 19. Obtención de canal rojo.

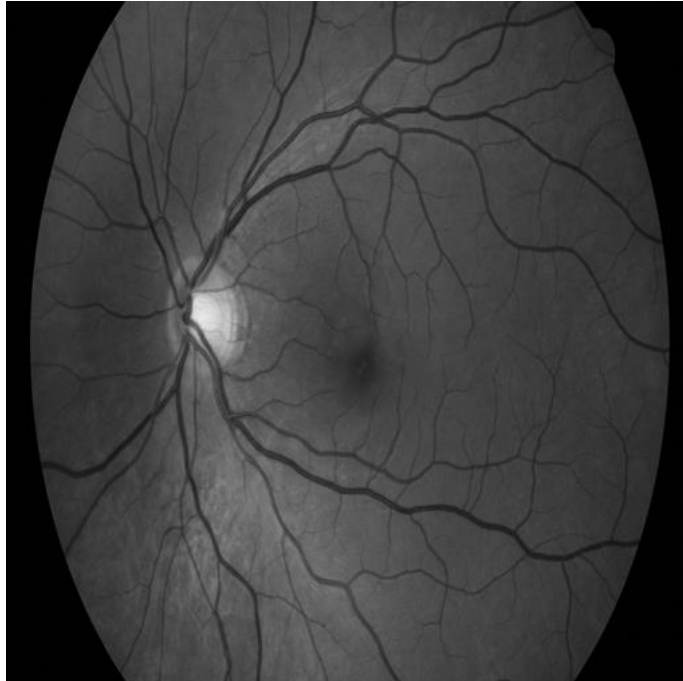


Figura 20. Obtención de canal verde.

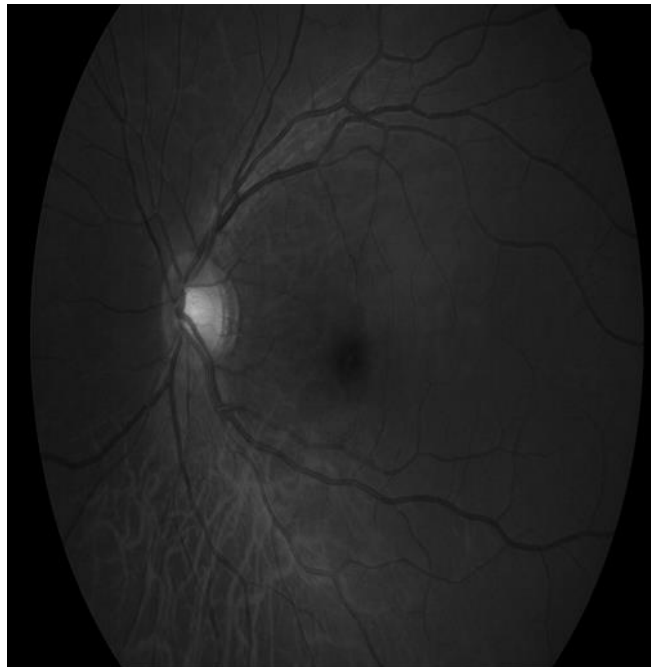


Figura 21. Obtención de canal azul.

A continuación, se aplica la ecualización de histograma adaptable limitada por contraste (CLAHE).

Básicamente, esta parte del proceso es la encargada del contraste (Figura 22), operando en regiones denominadas comúnmente como frames o mosaicos los cuales interactúan con sus vecinos combinándose por interpolación bilineal, una explicación simplificada sería que, si tenemos dos pixeles adyacentes, uno negro y otro blanco, la interpolación crearía un nuevo pixel gris entre ambos, mejorando así el contraste de la imagen en escala de grises.

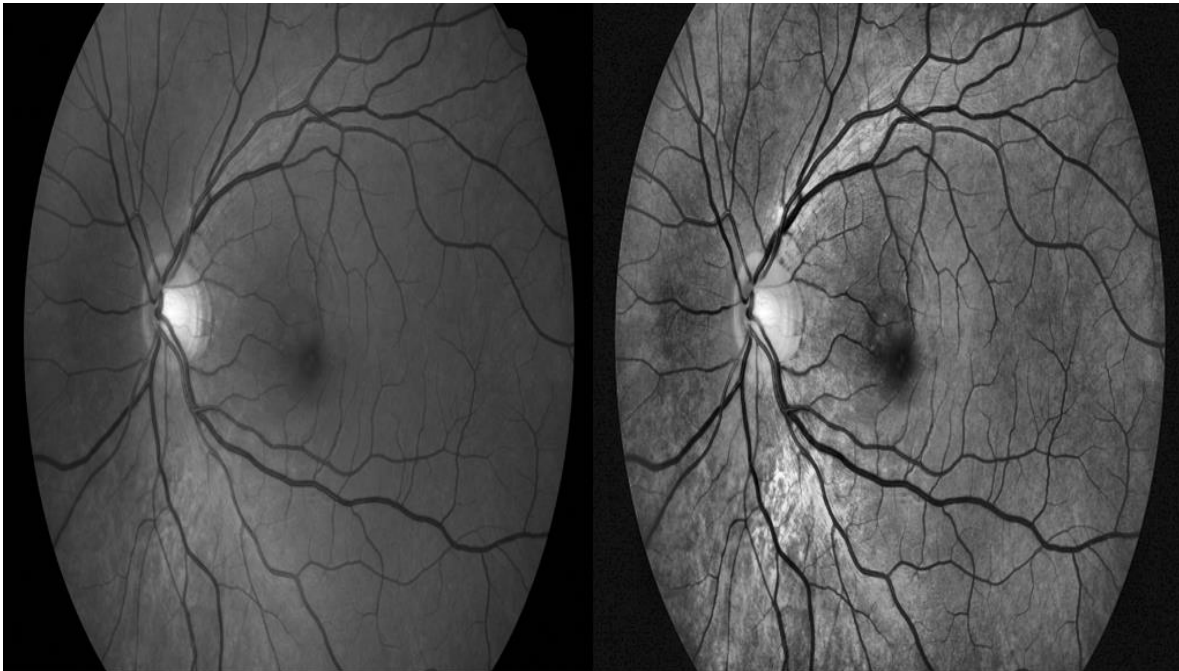


Figura 22. Comparación de imagen original en B/N (Izquierda) y una contrastada (derecha).

A continuación, se emplea el filtro de mediana de 2D con el cual se pretende eliminar el ruido que pudiera contener la imagen. Para ello, se emplea la sentencia ***medfilt2*** de Matlab. En la Figura 23 se puede observar el resultado de esta sentencia.

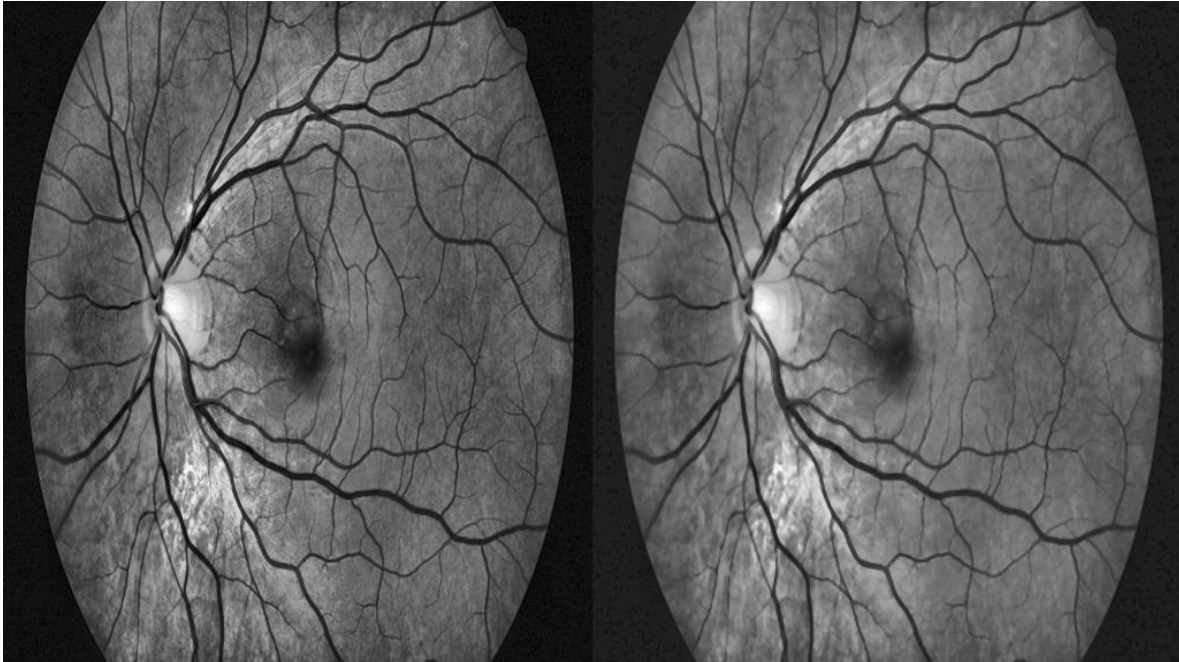


Figura 23. Imagen contrastada (izquierda) e imagen filtrada por mediana (derecha).

3.1.3 Segmentación

Posteriormente, se crea un elemento estructurante con la sentencia ***Strel.***

El elemento que es generado por dicha sentencia es morfológicamente plano, el cual es un entorno de valores binarios, para el presente proyecto en específico, se crea un elemento estructurante en forma de disco, con un radio de 5, esto para adaptarlo a los fondos de ojos.

Una vez obtenido el disco, se procede a aplicar el filtrado de fondo con la sentencia ***imbothat*** el cual, realiza el filtro morfológico de sombrero inferior en la imagen binaria, incluyendo el disco estructurante en el filtrado, restándole de la imagen original, dando como resultado la Figura 24.



Figura 24. Imagen con filtro morfológico y disco excluido

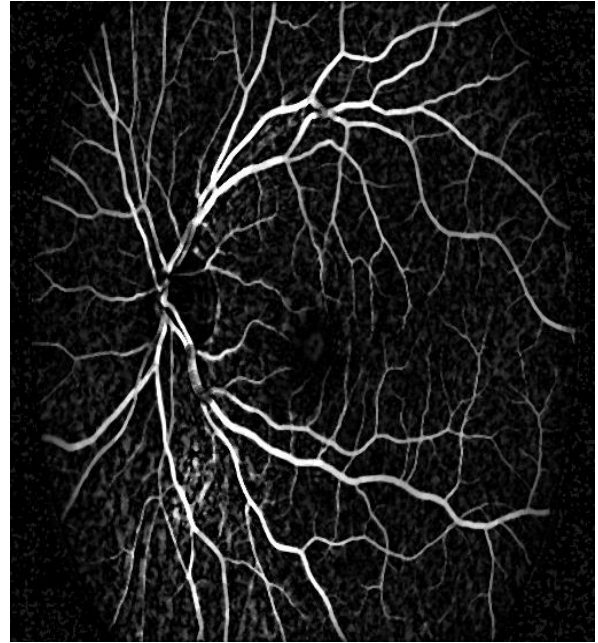


Figura 25. Imagen morfológica ajustada

Continuando con el procesamiento de la imagen, se ajustan los valores de intensidad aplicando la sentencia *imadjust* de la imagen morfológica obteniendo un resultado como el que se aprecia en Figura 25.

3.1.4 Extracción de características

El análisis de textura se realiza mediante el empleo de matriz de coocurrencia de nivel de gris, también conocido como GLCM, la cual es obtenida con la sentencia *graycomatrix*.

Para el cálculo de las características de los diferentes GLCM, se emplea la función llamada "GLCMFeatures" (Brynolfsson, 2016). Con la cual se obtienen los valores de contraste, correlación, energía, entropía y homogeneidad los cuales se pueden observar como un ejemplo en la Figura 26.

	1	2	3	4	5	6
1	0.5989	0.8497	0.5302	1.4383	0.9035	
2						
3						

Figura 26. Ejemplo de variable con el resultado de las características.

Estos datos son guardados en un archivo .txt para su clasificación en el próximo paso.

3.1.5 Clasificación

Para la clasificación se empleó la maquina de Soporte Vectorial (SVM), ya que este algoritmo se ajusta a las necesidades de clasificación y es muy utilizado en aplicaciones médicas de procesamiento de señales y reconocimiento de imágenes y voz. Entregando como resultado lo que se puede observar en la Figura 27.

	1	2	3
1	Normal		
2			

Figura 27. Ejemplo de salida de SVM.

Para el entrenamiento del algoritmo se utiliza la base de datos IDRiD, la cual se describe en la sección 1.1.2. Específicamente, se utilizó el conjunto de entrenamiento conformado por 413 imágenes, 280 de ellas con presencia de retinopatía (Ver Tabla 4). Como resultado de la clasificación se obtuvo un modelo que permite clasificar nueva información, en este caso imágenes con ritinopatia.

Nombre imagen	Grado de retinopatía	Riesgo de edema	Valor original
IDRiD_001	3	2	1
IDRiD_002	3	2	1
IDRiD_003	2	2	1
IDRiD_004	3	2	1
IDRiD_005	4	0	1
IDRiD_006	4	1	1
IDRiD_007	4	0	1
IDRiD_008	4	2	1
IDRiD_009	3	2	1
IDRiD_010	4	1	1
IDRiD_011	3	1	1
IDRiD_012	3	2	1
IDRiD_013	3	0	1
IDRiD_014	4	2	1
IDRiD_015	4	2	1
IDRiD_016	2	2	1
IDRiD_017	4	2	1
IDRiD_018	2	2	1
IDRiD_019	2	2	1
IDRiD_020	2	2	1
IDRiD_021	1	0	1
IDRiD_022	4	2	1
IDRiD_023	3	2	1
IDRiD_024	4	2	1
IDRiD_025	3	2	1
IDRiD_026	3	1	1

Nombre imagen	Grado de retinopatía	Riesgo de edema	Valor original
IDRiD_027	4	2	1
IDRiD_028	4	2	1
IDRiD_029	2	2	1
IDRiD_030	4	2	1
IDRiD_031	4	2	1
IDRiD_032	4	1	1
IDRiD_033	4	2	1
IDRiD_034	3	2	1
IDRiD_035	3	2	1
IDRiD_036	3	2	1
IDRiD_037	2	1	1
IDRiD_038	2	0	1
IDRiD_039	3	2	1
IDRiD_040	3	2	1
IDRiD_041	2	2	1
IDRiD_042	2	2	1
IDRiD_043	2	0	1
IDRiD_044	2	2	1
IDRiD_045	2	0	1
IDRiD_046	4	0	1
IDRiD_047	2	2	1
IDRiD_048	2	2	1
IDRiD_049	3	2	1
IDRiD_050	2	2	1
IDRiD_051	2	2	1
IDRiD_052	2	1	1
IDRiD_053	4	2	1

Nombre imagen	Grado de retinopatía	Riesgo de edema	Valor original
IDRiD_054	4	2	1
IDRiD_055	3	2	1
IDRiD_056	2	2	1
IDRiD_057	3	2	1
IDRiD_058	2	2	1
IDRiD_059	2	2	1
IDRiD_060	2	1	1
IDRiD_061	2	0	1
IDRiD_062	4	2	1
IDRiD_063	2	2	1
IDRiD_064	2	2	1
IDRiD_065	3	0	1
IDRiD_066	3	2	1
IDRiD_067	4	1	1
IDRiD_068	2	1	1
IDRiD_069	2	2	1
IDRiD_070	4	0	1
IDRiD_071	2	2	1
IDRiD_072	2	2	1
IDRiD_073	2	1	1
IDRiD_074	2	2	1
IDRiD_075	3	2	1
IDRiD_076	2	2	1
IDRiD_077	3	2	1
IDRiD_078	2	2	1
IDRiD_079	1	0	1
IDRiD_080	2	1	1

Nombre imagen	Grado de retinopatía	Riesgo de edema	Valor original
IDRiD_081	4	2	1
IDRiD_082	2	2	1
IDRiD_083	2	2	1
IDRiD_084	2	2	1
IDRiD_085	2	2	1
IDRiD_086	4	2	1
IDRiD_087	2	2	1
IDRiD_088	3	2	1
IDRiD_089	4	2	1
IDRiD_090	4	2	1
IDRiD_091	2	2	1
IDRiD_092	2	2	1
IDRiD_093	2	1	1
IDRiD_094	2	1	1
IDRiD_095	3	2	1
IDRiD_096	4	2	1
IDRiD_097	2	1	1
IDRiD_098	3	2	1
IDRiD_099	3	2	1
IDRiD_100	4	2	1
IDRiD_101	3	2	1
IDRiD_102	2	2	1
IDRiD_103	2	2	1
IDRiD_104	4	2	1
IDRiD_105	1	0	1
IDRiD_106	2	2	1
IDRiD_107	2	2	1

Nombre imagen	Grado de retinopatía	Riesgo de edema	Valor original
IDRiD_108	3	1	1
IDRiD_109	2	2	1
IDRiD_110	3	2	1
IDRiD_111	4	2	1
IDRiD_112	3	2	1
IDRiD_113	2	2	1
IDRiD_114	3	2	1
IDRiD_115	3	2	1
IDRiD_116	2	2	1
IDRiD_117	2	2	1
IDRiD_119	4	2	1
IDRiD_120	2	0	1
IDRiD_121	2	2	1
IDRiD_122	2	2	1
IDRiD_123	2	2	1
IDRiD_124	2	2	1
IDRiD_125	2	2	1
IDRiD_126	2	2	1
IDRiD_127	2	2	1
IDRiD_128	2	2	1
IDRiD_129	2	2	1
IDRiD_130	2	2	1
IDRiD_131	2	1	1
IDRiD_132	2	2	1
IDRiD_133	2	0	1
IDRiD_134	2	2	1
IDRiD_135	2	1	1

Nombre imagen	Grado de retinopatía	Riesgo de edema	Valor original
IDRiD_136	2	1	1
IDRiD_137	2	1	1
IDRiD_178	4	2	1
IDRiD_180	3	2	1
IDRiD_183	2	2	1
IDRiD_185	2	2	1
IDRiD_186	2	2	1
IDRiD_187	2	1	1
IDRiD_188	2	1	1
IDRiD_189	4	2	1
IDRiD_191	2	0	1
IDRiD_192	3	2	1
IDRiD_194	1	0	1
IDRiD_196	2	2	1
IDRiD_198	1	0	1
IDRiD_201	2	0	1
IDRiD_203	1	0	1
IDRiD_207	3	2	1
IDRiD_208	2	2	1
IDRiD_215	2	1	1
IDRiD_216	2	1	1
IDRiD_224	4	2	1
IDRiD_231	2	2	1
IDRiD_232	2	2	1
IDRiD_236	2	2	1
IDRiD_237	2	2	1
IDRiD_239	4	2	1

Nombre imagen	Grado de retinopatía	Riesgo de edema	Valor original
IDRiD_240	4	2	1
IDRiD_241	2	2	1
IDRiD_242	2	2	1
IDRiD_245	2	2	1
IDRiD_246	4	2	1
IDRiD_247	2	2	1
IDRiD_248	2	2	1
IDRiD_252	2	1	1
IDRiD_253	3	1	1
IDRiD_254	4	2	1
IDRiD_256	1	0	1
IDRiD_260	2	2	1
IDRiD_261	2	2	1
IDRiD_262	2	1	1
IDRiD_263	2	1	1
IDRiD_265	1	0	1
IDRiD_266	1	0	1
IDRiD_269	3	0	1
IDRiD_270	2	1	1
IDRiD_271	3	2	1
IDRiD_272	4	2	1
IDRiD_277	3	2	1
IDRiD_278	3	2	1
IDRiD_279	1	0	1
IDRiD_280	2	2	1
IDRiD_281	2	2	1
IDRiD_282	2	1	1

Nombre imagen	Grado de retinopatía	Riesgo de edema	Valor original
IDRiD_283	2	2	1
IDRiD_284	2	2	1
IDRiD_285	4	2	1
IDRiD_286	4	2	1
IDRiD_289	4	2	1
IDRiD_290	1	0	1
IDRiD_291	1	0	1
IDRiD_293	2	2	1
IDRiD_294	2	2	1
IDRiD_296	3	2	1
IDRiD_299	3	2	1
IDRiD_300	2	2	1
IDRiD_301	1	0	1
IDRiD_302	1	0	1
IDRiD_303	2	1	1
IDRiD_304	1	0	1
IDRiD_306	3	2	1
IDRiD_308	3	2	1
IDRiD_309	3	2	1
IDRiD_310	2	2	1
IDRiD_311	2	0	1
IDRiD_313	4	2	1
IDRiD_314	3	2	1
IDRiD_319	2	2	1
IDRiD_320	3	2	1
IDRiD_321	3	2	1
IDRiD_322	2	2	1

Nombre imagen	Grado de retinopatía	Riesgo de edema	Valor original
IDRiD_323	3	2	1
IDRiD_324	3	2	1
IDRiD_325	2	2	1
IDRiD_326	2	2	1
IDRiD_327	3	2	1
IDRiD_328	2	2	1
IDRiD_329	3	2	1
IDRiD_330	3	2	1
IDRiD_332	2	2	1
IDRiD_333	2	1	1
IDRiD_334	3	2	1
IDRiD_337	2	2	1
IDRiD_338	2	2	1
IDRiD_339	3	2	1
IDRiD_340	2	1	1
IDRiD_341	3	2	1
IDRiD_343	2	2	1
IDRiD_344	3	2	1
IDRiD_347	3	2	1
IDRiD_348	2	2	1
IDRiD_349	3	2	1
IDRiD_350	2	2	1
IDRiD_354	3	2	1
IDRiD_356	3	2	1
IDRiD_357	3	2	1
IDRiD_360	2	2	1
IDRiD_361	4	2	1

Nombre imagen	Grado de retinopatía	Riesgo de edema	Valor original
IDRiD_362	4	2	1
IDRiD_363	2	1	1
IDRiD_364	3	2	1
IDRiD_366	3	2	1
IDRiD_368	3	2	1
IDRiD_369	3	2	1
IDRiD_371	3	2	1
IDRiD_372	3	2	1
IDRiD_374	2	1	1
IDRiD_375	2	1	1
IDRiD_376	3	2	1
IDRiD_377	3	2	1
IDRiD_379	1	0	1
IDRiD_380	3	2	1
IDRiD_383	3	2	1
IDRiD_384	3	2	1
IDRiD_385	3	2	1
IDRiD_388	1	0	1
IDRiD_389	4	2	1
IDRiD_390	4	2	1
IDRiD_391	2	0	1
IDRiD_392	4	2	1
IDRiD_394	4	2	1
IDRiD_397	2	0	1
IDRiD_398	2	1	1
IDRiD_401	2	1	1
IDRiD_402	1	0	1

Nombre imagen	Grado de retinopatía	Riesgo de edema	Valor original
IDRiD_403	1	0	1
IDRiD_404	2	0	1
IDRiD_405	2	1	1
IDRiD_407	2	1	1
IDRiD_408	1	0	1
IDRiD_409	2	1	1
IDRiD_410	2	0	1
IDRiD_411	2	0	1
IDRiD_412	2	0	1
IDRiD_413	2	0	1

Tabla 4. Conjunto de entrenamiento de la base de datos IDRiD

3.2 Desarrollo del software

Como se mencionó en el capítulo anterior, se siguieron los pasos para el desarrollo del software que se mencionan en la Figura 16, al agregarle una interfaz al software elaborado como en la Figura 28, se vuelve mucho más fácil para el usuario final y más intuitivo, es por ello que se realizó una interfaz sencilla pero que cumpliera con ciertas características y que, además, pudieran visualizarse a detalle las imágenes.

En la interfaz, se cuenta con una parte principal, que es el menú, en este, se tienen las opciones de procesamiento de las imágenes, primero cargar imagen, preprocesar, segmentar, extraer características y por último clasificarlo. En la parte inferior, se encuentran 2 columnas de imágenes, las cuales, se irán mostrando conforme se vaya procesando la imagen.

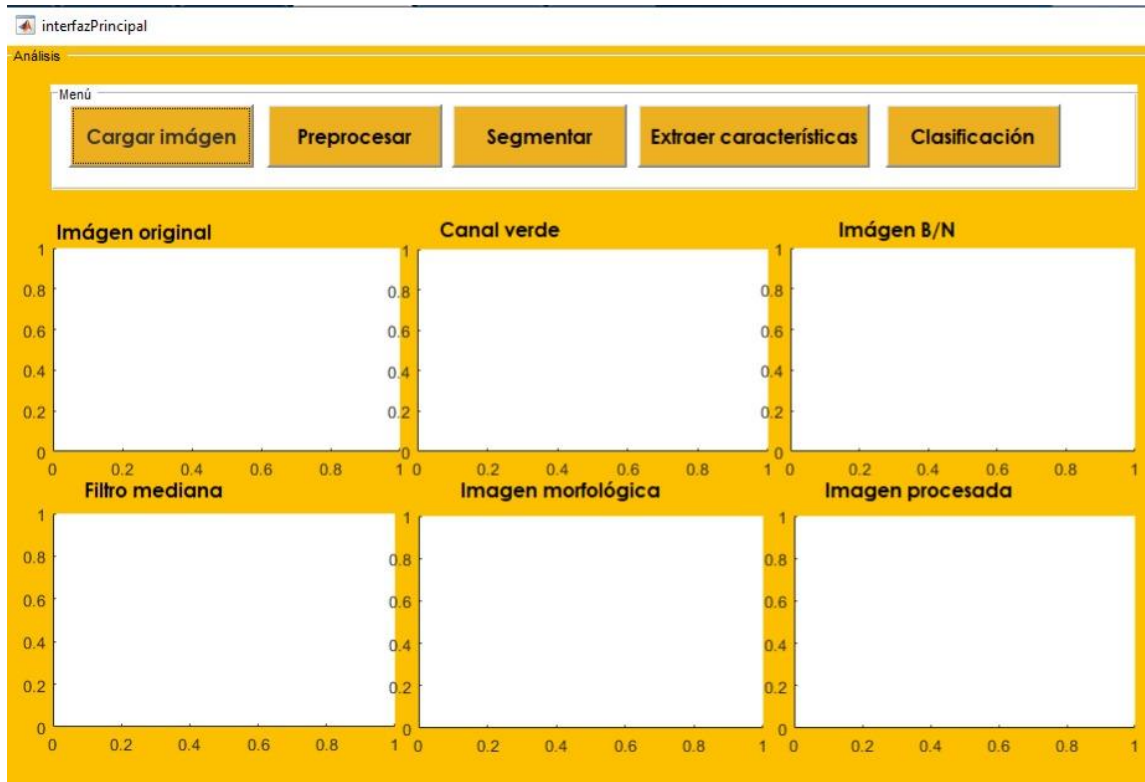


Figura 28. Interfaz principal en blanco.

Al cargar la imagen, se llena el recuadro marcado como "imagen original" dentro de este cuadro se dibuja la imagen seleccionada por el usuario, posteriormente se procede a preprocesar la imagen como se observa en la Figura 29.

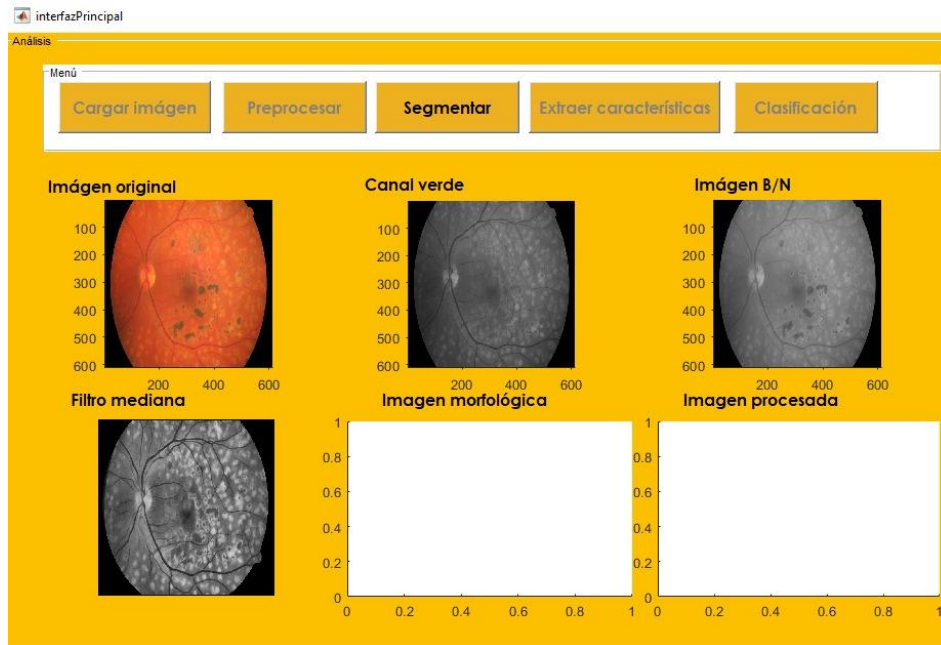


Figura 29. Imágenes procesadas.

Posteriormente, se comienza a segmentar la imagen preprocesada, y se llena el campo de imagen morfológica e imagen procesada. En la Figura 30 se puede observar dicho procesamiento.

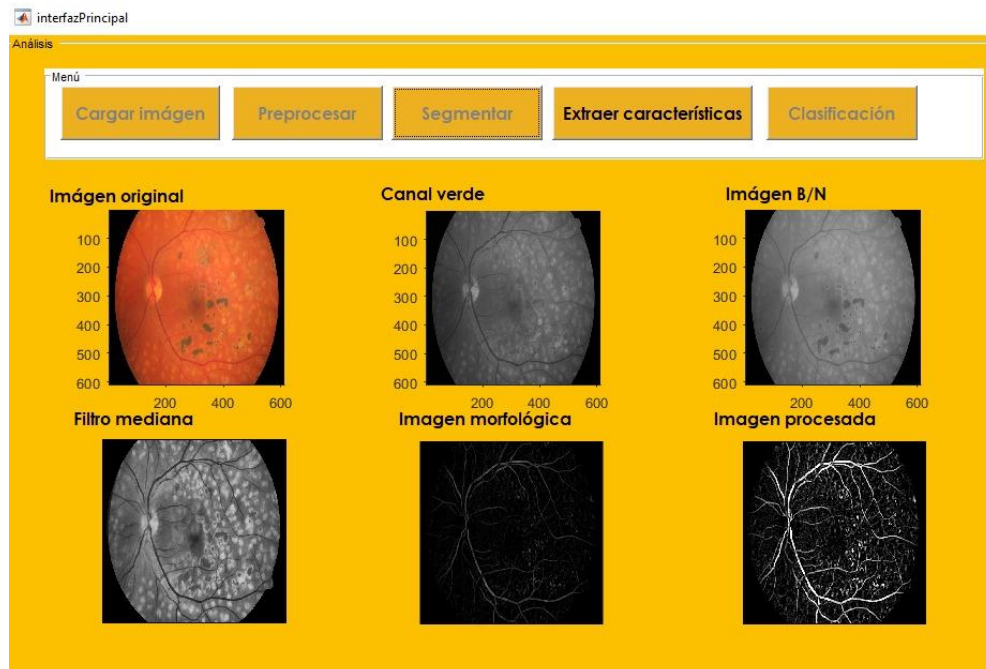


Figura 30. Segmentación de imágenes.

CAPITULO IV RESULTADOS

4.1 Análisis de datos

Para el desarrollo de este trabajo se emplearon imágenes de la Base de Datos IDRiD. IDRiD cuenta con 413 imágenes de fondos de ojos para el entrenamiento y 103 para el testeo. En dicha base de datos, pudieron detectarse algunos inconvenientes en unas cuantas imágenes, esto debido a la localización de las lesiones. En la Figura 31 se puede observar que la lesión es muy sutil y se encuentra cercana al disco óptico. Al aplicar el filtro de mediana en la Figura 32 se puede observar que se disipa, al quitar el área de disco óptico, esta resultaría como una imagen sin anomalías. Haciendo así, que pudieran darse falsos negativos.

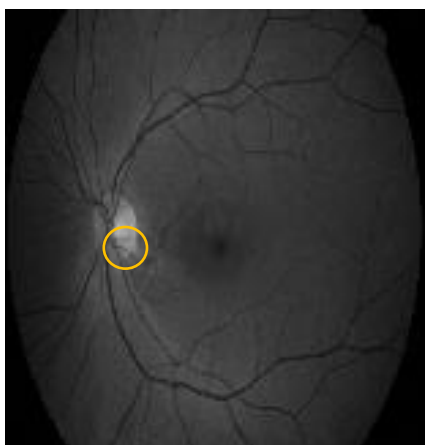


Figura 31. Localización de lesión.

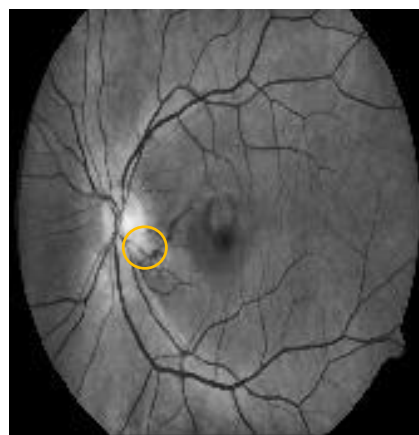
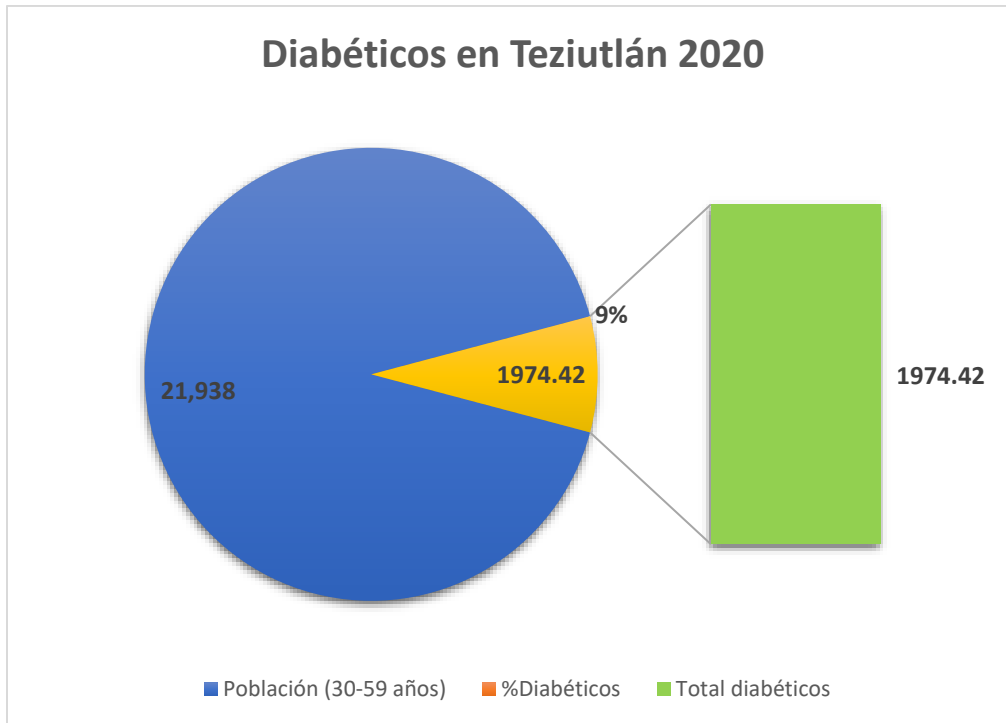


Figura 32. Aplicación de filtro de media.

4.2 Selección de pruebas estadísticas

Como se mencionó en los puntos anteriores, y de acuerdo a INEGI, existen 21,938 habitantes en edad de 30 a 59 años. Y el 9% tiene diabetes, dando así un aproximado de 1,974 personas con diabetes en Teziutlán mayores de 30 años y menores de 59.



Fórmula para determinar la muestra:

$$n = \frac{N \times Z_a^2 \times p \times q}{d^2 \times (N - 1) + Z_a^2 \times p \times q}$$

Donde:

N = Población total (sólo personas diabéticas) → 1,974 personas.

Z_a = Nivel de confianza = 90% → **1.65**.

p = Proporción esperada del 50% → **0.05**

q = 1- p = 0.5 → **0.5**

d = Margen de error 8% = 0.08 → **0.08**

Muestra:

$$n = \frac{N \times Z_{\alpha}^2 \times p \times q}{d^2 \times (N - 1) + Z_{\alpha}^2 \times p \times q}$$

$$n = \frac{1974 \times 2.7225 \times 0.5 \times 0.5}{0.0064 \times (1973) + 2.7225 \times 0.5 \times 0.5} = 100$$

Para las muestras, se empleó el conjunto de prueba de la base de datos pública IDRiD que se detalla en la sección 1.1.2. Es importante mencionar que dichas imágenes no se encuentran normalizadas y algunas fueron tomadas con entornos poco favorables para su análisis.

Base de datos	Total imágenes	Imágenes empleadas
INDIAN DIABETIC RETINOPATHY IMAGE DATASET (IDRID)		
IDRID Training	413	280
IDRID Testing	103	100
	Total	380

Tabla 5. Bases de datos empleadas.

4.3 Validación del modelo desarrollado

Como bien se menciona en el punto anterior, la base de datos se encuentra dividida en dos partes, la primera que se denomina training, la cual consta de 413 imágenes que se utilizaron para el entrenamiento del algoritmo en la etapa de clasificación. Para fines de comprobación de Hipótesis se empleó el conjunto de pruebas conformado por 100 imágenes. En la siguiente tabla se puede observar "nombre de la imagen", "grado de retinopatía", "riesgo de edema", "valor original" de la imagen (clasificación realizada por expertos en el dominio) donde 1 indica que tiene indicios de retinopatía y "valor software" que es el valor obtenido por el software desarrollado donde 1 significa indicios de retinopatía y 0 es normal.

Nombre imagen	Grado de retinopatía	Riesgo de edema	Valor original	Resultado valoración software	Valor software
IDRiD_001	4	0	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_002	4	1	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_003	4	0	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_004	4	0	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_005	4	1	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_006	3	1	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_007	3	0	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_008	2	2	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_009	2	2	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_010	2	2	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_011	2	2	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_012	2	2	1	'Indicios de retinopatía'	0
IDRiD_013	3	2	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_014	3	2	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_015	2	2	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_016	3	2	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_017	2	2	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_018	3	2	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_019	2	2	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_020	2	2	1	'Indicios de retinopatía'	1

Nombre imagen	Grado de retinopatía	Riesgo de edema	Valor original	Resultado valoración software	Valor software
IDRiD_021	3	2	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_022	3	2	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_023	2	2	1	'Indicios de retinopatía'	0
IDRiD_024	2	2	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_025	3	2	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_026	3	2	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_027	3	2	1	'Indicios de retinopatía'	0
IDRiD_028	2	2	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_031	3	1	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_032	4	1	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_033	2	2	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_034	3	2	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_035	3	2	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_036	3	2	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_040	4	1	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_042	3	1	1	Normal	0
IDRiD_046	2	1	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_048	4	2	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_049	2	2	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_051	2	2	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_053	4	2	1	'Indicios de retinopatía'	1

Nombre imagen	Grado de retinopatía	Riesgo de edema	Valor original	Resultado valoración software	Valor software
IDRiD_057	4	2	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_059	2	2	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_060	3	0	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_061	4	2	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_062	4	2	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_063	1	0	1	'Indicios de retinopatía'	0
IDRiD_064	3	0	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_065	2	2	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_066	3	2	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_067	2	2	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_072	2	2	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_073	1	0	1	'Indicios de retinopatía'	0
IDRiD_074	1	0	1	'Indicios de retinopatía'	0
IDRiD_076	2	1	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_079	2	2	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_081	2	2	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_082	2	2	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_083	2	2	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_084	2	2	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_085	1	0	1	'Indicios de retinopatía'	0

Nombre imagen	Grado de retinopatía	Riesgo de edema	Valor original	Resultado valoración software	Valor software
IDRiD_086	2	2	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_087	4	2	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_088	2	2	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_089	2	2	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_091	2	2	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_100	2	1	1	'Indicios de retinopatía'	1
IDRiD_101	1	0	1	'Indicios de retinopatía'	0
IDRiD_102	2	2	1	'Indicios de retinopatía'	1

Tabla 6. Resultado de la prueba del modelo desarrollado.

Falsos negativos	Positivos detectados	Total positivos	Porcentaje de error
9	91	100	9%

Tabla 7. Análisis de 100 imágenes.

Se pudo observar que se obtuvieron 9 falsos negativos, es decir que, en 9 casos, el software no pudo identificar las lesiones y esto debió principalmente a las características de las imágenes, es decir, la iluminación y ángulo de la imagen, además de la localización de dichas lesiones.

También se pudo observar que 91.00% de las imágenes con lesiones fueron detectadas de manera exitosa.

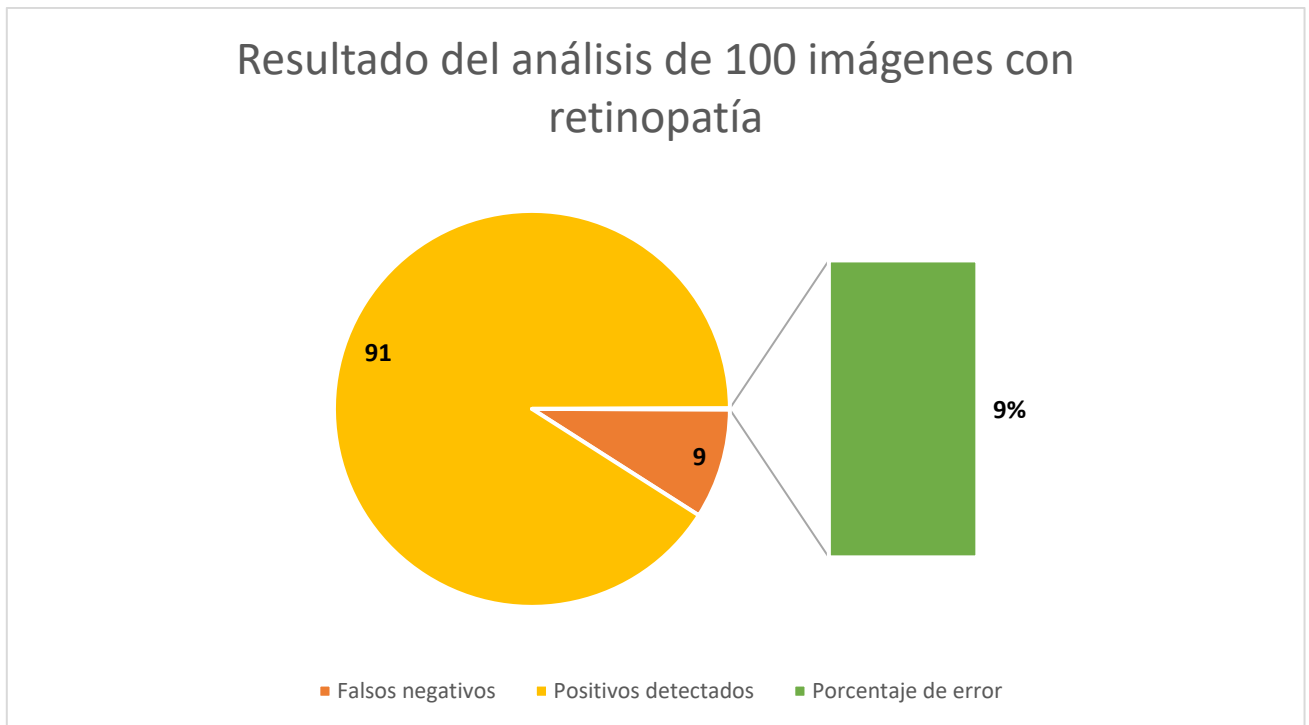


Figura 33. Análisis de 100 imágenes.

Es importante mencionar que las imágenes no se encuentran dentro de un estándar o normalización, esto es muy importante tenerlo en cuenta, ya que las imágenes proceden de diferentes aparatos y tecnologías, por ende, debe considerarse.

4.4 Comprobación de la Hipótesis

Con el presente estudio se puede llegar a varias conclusiones, entre ellas que efectivamente, el desarrollo de un sistema de predicción de retinopatía diabética mediante la examinación de fondos de ojo, servirá de apoyo para el diagnóstico clínico en personas con retinopatía diabética e informar a tiempo a quienes podrían tener indicios de dicha enfermedad, tomándose así las medidas necesarias para su tratamiento oportuno. Sin embargo, la efectividad y confianza de dichos resultados dependerá en gran medida del entorno de las imágenes que se utilicen, la ubicación de las lesiones retinianas, la etapa de la retinopatía y, la edad del paciente.

CAPITULO V CONCLUSIONES

El presente estudio fue dirigido como apoyo a los médicos y para que se optimizaran los tiempos de diagnóstico de retinopatía, esto mediante el diseño de un software, el cual cuenta con una interfaz que es muy intuitiva y amigable con los usuarios. Además de que se puede ir observando el paso a paso del procesamiento de las imágenes hasta llegar al resultado final.

Se empleó el análisis de textura empleando la matriz de coocurrencia de nivel de gris también conocida como GLCM. Y para su clasificación se empleó un modelo pre entrenado, de esta forma, se pretendió acercarse lo más posible a un resultado verdadero y confiable.

Sin embargo, la efectividad y confianza de dichos resultados dependerá en gran medida del entorno de las imágenes que se utilicen, la ubicación de las lesiones retinianas, la etapa de la retinopatía y, la edad del paciente.

Este software, cuyo principal objetivo es ayudar en el prediagnóstico oportuno de la retinopatía, por las pruebas realizadas, es certero siempre y cuando se cumplan con las características mencionadas.

En trabajos y versiones futuras, se pretende implementar el apoyo clínico de más expertos en el área, con el fin de conocer más puntos de vista y estrategias para posteriormente implementarlas.

También, realizar pruebas clínicas a mayor escala para ver el comportamiento del software en un entorno más grande, y por último, se pretende incorporar una base de datos de mayor extensión no sólo para diagnósticos sino también para un historial oftalmológico clínico.

REFERENCIAS

- Batey, D., & Taylor, R. (2012). *Handbook of Retinal Screening in Diabetes: Diagnosis and Management*. <https://doi.org/10.1002/9781119968573>.
- Brynolfsson, P. (16 de Febrero de 2016). *MathWorks*. Obtenido de Vectorized GLCM Texture features calculations: https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/55034-glcmfeatures-glcm?s_tid=srchtitle
- Chi Wing, F., Pheng Ann, H., Xiaowei, H., Xiaomeng, L., Lequan, Y., & Lei, Z. (2020). CANet: Cross-Disease Attention Network for Joint Diabetic Retinopathy and Diabetic Macular Edema Grading. *IEEE Transactions on Medical Imaging*.
- Dehnavi, A. M., Dehghani, A., Esmaili, M., & Rabbani, H. (2010). A new curvelet transform based method for extraction of red lesions in digital color retinal images. *Proceedings - International Conference on Image Processing, ICIP*.
- Dupas, B., Walter, T., Erginay, A., Ordonez, R., Deb-Joardar, N., Gain, P., . . . Massin, P. (2010). Evaluation of automated fundus photograph analysis algorithms for detecting microaneurysms, haemorrhages and exudates, and of a computer-assisted diagnostic system for grading diabetic retinopathy. *Diabetes and Metabolism*.
- ENSANUT. (2020). *Instituto Nacional de Salud Pública*. Obtenido de Resultados Puebla 2018: https://ensanut.insp.mx/encuestas/ensanut2018/doctos/informes/Resultado_Entidad_Puebla.pdf
- Federación Internacional de Diabetes. (2019). Versión Online del Atlas de la Diabetes de la FID. *Atlas de la diabetes*, 4. Obtenido de Atlas de la diabetes de la FID.
- Fleming, A., Philip, S., Goatman, K. A., Olson, J. A., & Sharp, P. (2006). Automated microaneurysm detection using local contrast normalization and local vessel detection. *IEEE Transactions on Medical Imaging*.

Gargeya, R., & Leng, T. (2017). Automated Identification of Diabetic Retinopathy Using Deep Learning. *Ophthalmology*.

GNU. (s.f.). *GNU ORG*. Obtenido de GNU Octave: <https://www.gnu.org/software/octave/index>

Gulshan, V., Peng, L., Coram, M., Stumpe, M., Wu, D., Narayanaswamy, A., . . . Webster, D. (2016). Development and validation of a deep learning algorithm for detection of diabetic retinopathy in retinal fundus photographs. *JAMA - Journal of the American Medical Association*.

INEGI. (2020). *INEGI*. Obtenido de Información de México para niños; Discapacidad: <https://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/discapacidad.aspx#:~:text=De%20acuerdo%20con%20el%20Censo,mujeres%20y%2047%20%25%20son%20hombres>.

INEGI. (15 de Marzo de 2020). *INEGI*. Obtenido de México en cifras: <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=211740001#collapse-Resumen>

International Journal of Engineering and Advanced Technology. (2020). Diabetic Retinopathy Detection. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*.

Jenkins, A. J., Joglekar, M., Hardikar, A., Keech, A., O'Neal, D., & Januszewski, A. (2015). Biomarkers in diabetic retinopathy. *Review of Diabetic Studies*.

Kauppi, T., Kalesnykiene, V., Kamarainen, J.-K., Lensu, L., Sorri, I., Pietilä, J., . . . Uusitalo, H. (30 de 05 de 2007). *Imageret*. Obtenido de Standard Diabetic Retinopathy Database: <https://www.it.lut.fi/project/imageret/diaretddb0/>

Li, H., & Chutatape, O. (2004). Automated Feature Extraction in Color Retinal Images by a Model Based Approach. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*.

MATLAB. (25 de Mayo de 2021). *Image Processing Toolbox*. Obtenido de MATLAB: https://la.mathworks.com/help/images/index.html?s_tid=srchtitle

Mathworks. (2022). *Mathworks*. Obtenido de <https://www.mathworks.com/brand.html>

Pérez Muñoz, M., Casado, I. T., Pérez, R. L., & Cordové, M. I. (2012). *Medigraphic literatura biomédica*. Obtenido de Caracterización clínica de la retinopatía diabética en diabéticos tipo 2 atendidos en el Servicio de Retina del Centro Oftalmológico "Dr. Salvador Allende" de la Habana: <https://medigraphic.com/pdfs/mediciego/mdc-2012/mdc121g.pdf>

Python Official. (s.f.). *Pillow resources*. Obtenido de Pillow: <https://pillow.readthedocs.io/en/stable/>

Seoud, L., Hurtut, T., Chelbi, J., Cheriet, F., & Langlois, J. (2016). Red Lesion Detection Using Dynamic Shape Features for Diabetic Retinopathy Screening. *IEEE Transactions on Medical Imaging*.

Ting, D., Cheung, C., Lim, G., Tan, G., Quang, N., Gan, A., . . . Varma, R. (2017). Development and validation of a deep learning system for diabetic retinopathy and related eye diseases using retinal images from multiethnic populations with diabetes. *JAMA - Journal of the American Medical Association*.