



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

ESTUDIO DE LA MORFOLOGÍA RETINIANA EN SUJETOS MIOPE Y EMÉTROPE

Autora

Alicia Algás Sanz

Director

Francisco Javier Ávila Gómez

Facultad de Ciencias / Óptica y Optometría
2020-2021

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	2
▪ La retina humana	2
▪ Miopía nocturna: hipótesis y hallazgos	3
▪ Emotropía y forma retiniana	4
▪ Iluminación y morfología corio-retiniana	5
2. HIPÓTESIS	6
3. OBJETIVOS	6
4. MÉTODOS	6
4.1. Sujetos	6
4.2. Criterios de inclusión y exclusión	6
4.3. Materiales	7
4.4. Procedimiento experimental	8
4.5. Análisis de los resultados	9
4.6. Método de segmentación	10
5. RESULTADOS	12
5.1. Relación entre EE y luminancia	12
5.2. Relación entre EE y parámetros retinianos	13
5.3. Relación entre luminancia y parámetros retinianos	15
6. DISCUSIÓN	18
7. CONCLUSIÓN	20
8. BIBLIOGRAFÍA	21

1. INTRODUCCIÓN

El ojo humano se entiende como un sistema óptico formado por las lentes de la córnea y cristalino y los medios refractivos humor acuoso y vítreo mediante los cuales se forman imágenes en el plano retiniano.

Si existe un equilibrio entre la longitud axial del globo ocular y su potencia dióptrica, los rayos de luz que provienen del infinito focalizarán en la retina y formarán una imagen nítida. A este estado refractivo se le denomina emetropía.

Si se rompe este equilibrio, aparecen las ametropías. Se denomina hipermetropía a la condición en la que los rayos que inciden paralelos al eje visual focalizan posteriormente de la retina. La situación opuesta es la miopía, es decir, cuando los rayos que inciden paralelos focalizan con anterioridad a la retina. Si córnea o cristalino no tienen la misma refracción en todos sus meridianos, es decir no son superficies esféricas, se crea astigmatismo, lo que supone que los rayos que inciden paralelos no focalizan en un único punto de la retina, sino en dos. ¹

La retina humana

Se define la retina como la capa más interna del globo ocular, cuya misión es transformar la luz que recibe en un impulso nervioso que viaja por las vías visuales hasta el cerebro, donde se procesa y transforma en las imágenes que percibimos. ²

Consta de 10 capas diferenciadas, enumeradas en orden desde la retina interna hasta la externa son las siguientes: membrana limitante interna, capa de fibras nerviosas, capa de células ganglionares, capa plexiforme interna, capa nuclear interna, capa plexiforme externa, capa nuclear externa, membrana limitante externa, fotorreceptores y epitelio pigmentario. ³

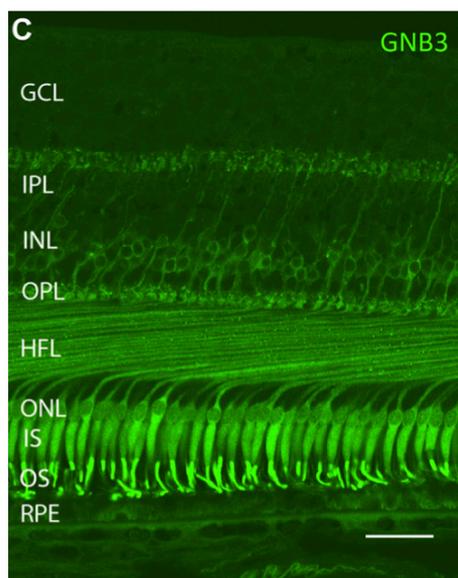


Figura 1. Sección vertical de la retina humana que muestra sus características morfológicas en la zona parafoveal identificadas por la inmunorreactividad que tienen los conos y células bipolares a la proteína b3 de unión a nucleótidos de guanina (GNB3). ⁴

La capa de fotorreceptores está formada por dos tipos de células, los conos y los bastones. En el segmento externo de estas células existen numerosos discos membranosos que contienen moléculas de pigmentos sensibles a distintos espectros de luz (rodopsina en los bastones y yodopsina en los conos), lo que proporciona una capacidad de fotosensibilidad a los fotorreceptores y, por consiguiente, a la retina.

La fotosensibilidad de los receptores hace que sea posible un proceso de adaptación a la luz. Cuando un individuo pasa de estar expuesto a una gran cantidad de luz a estarlo a una cantidad mínima o nula, existen cambios morfológicos en la pupila y bioquímicos a nivel de la síntesis y concentración de pigmento (mayormente rodopsina) en los fotorreceptores que hace que aumente la sensibilidad a la luz. ⁵

Miopía nocturna: hipótesis y hallazgos

En las últimas décadas, la miopía se ha convertido en un problema importante de salud a nivel global, y concretamente en el este de Asia, donde la prevalencia de miopes entre adolescentes es del 80-90% y de un 10-20% si se trata de miopía elevada, la cual puede conllevar graves daños a nivel retiniano.

En el resto de los países industrializados, se estima que el porcentaje de miopes está entorno al 50%, porcentaje que se prevé que continúe con un aumento exponencial en los próximos años.

Cabe destacar que en los países subdesarrollados este porcentaje es muchísimo menor, puesto que se ha comprobado que, junto con un importante componente genético, las causas de la miopía están fuertemente ligadas a una excesiva realización de trabajos de cerca, pues estos se asocian con un retraso acomodativo, que provoca un desenfoque hipermetrópico en la retina, lo que impulsa el crecimiento excesivo de la longitud axial del globo ocular. ^{6,7}

Numerosos estudios han observado que, al estar en un entorno con baja iluminación, se produce también un fenómeno denominado miopía nocturna ^{8, 9, 10, 11, 12}. La miopía nocturna es descrita como un cambio en la refracción del ojo con el nivel de luz. El valor de dicha miopía varía de un individuo a otro, siendo -1,00D su valor medio y pudiendo ser corregida de la misma forma que la miopía común.

Este fenómeno ha sido estudiado por un gran número de científicos y ha provocado una gran controversia a lo largo de la historia desde que, en 1789, el astrónomo Maskelyne se refiriera a él por primera vez. Fue a mediados del siglo XX cuando, a raíz de la Guerra Civil española y la Segunda Guerra Mundial, se produjeron grandes avances en este campo, siendo entonces los españoles José María Otero y Armando Durán quienes llevaron a cabo varios estudios pioneros para determinar el origen óptico de la miopía nocturna, llegando a la conclusión de que esta se produce porque en condiciones de baja iluminación (visión escotópica) el ojo acomoda de forma involuntaria, con lo que podría parecer que se vuelve más miope. ¹³

La tendencia a acomodar en exceso a medida que disminuye la luminancia es resultado del retorno pasivo de la acomodación a un foco de reposo intermedio, también llamado *dark focus*, el cual está cuantificado hasta -3,00D o -4,00D. En condiciones de visión normales, la acomodación es proporcional a la distancia del estímulo, pero esta se aproxima cada vez más al *dark focus* a medida que disminuye la luminancia.¹⁴

Estos cambios de acomodación a niveles decrecientes de luminosidad han sido considerados la principal causa de la miopía nocturna. Sin embargo, en 2018, un grupo de investigadores de la Universidad de Ciencias Aplicadas de Jena, Alemania, estudió la influencia de un objetivo imaginario a distancias finitas en el estado de acomodación en luminancia escotópica, además de medir el *dark focus*.

La acomodación se midió con un autorefractómetro, tomando medidas de acomodación para 6 m de campo vacío y a 2m, 1m y 0,5m con fijación en un optotipo. Se evaluó en condiciones fotópicas y, con la finalidad de examinar el *dark focus*, se hizo también directamente después de pasar a luminancias escotópicas y tras 10 minutos de adaptación. Los resultados indican que la adaptación a la oscuridad no tiene ningún impacto en el estado de acomodación y los cambios en la acomodación a niveles de luminancia decrecientes son bajos. Esto concluye que el *dark focus* tiene menos importancia para la miopía nocturna de lo esperado.¹⁵

Emetropía y forma retiniana

En cuanto a las diferencias que podemos detectar entre ojos con diferentes ametropías, una de ellas son las dimensiones del globo ocular, las cuales están directamente relacionadas con la forma de la retina.

Si definimos la forma retiniana en base a tres ejes (x, y, z), podemos describir su forma de una forma mucho más completa (Figura 2)

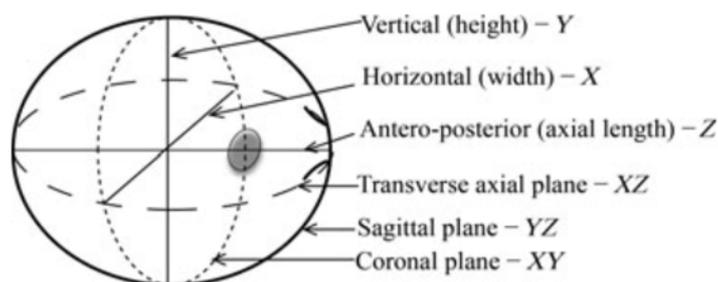


Figura 2. Imagen ilustrativa de los ejes del globo ocular.¹⁶

La retina tiene forma elipsoide, pero sus características varían entre sujetos con diferentes errores refractivos. En la mayoría de los ojos emétopes, la retina tiene forma oblata, es decir, la dimensión axial (eje z) es más pequeña que las dimensiones vertical (eje y) y horizontal (eje x). A medida que aumenta la miopía, todas las dimensiones del elipsoide aumentan, pero la dimensión axial lo hace más que la vertical, que a su vez aumenta más que horizontal (aumenta en proporciones aproximadas de 3:2:1).

La diferencia relativa en el aumento de estas dimensiones significa que a medida que aumenta el grado de miopía, la forma de la retina se hace menos oblata. Sin embargo, pocos ojos miopes llegan a tener geometría prolata.

Este hallazgo puede ser relevante para las teorías que implican a la retina periférica en el desarrollo de la miopía.¹⁷

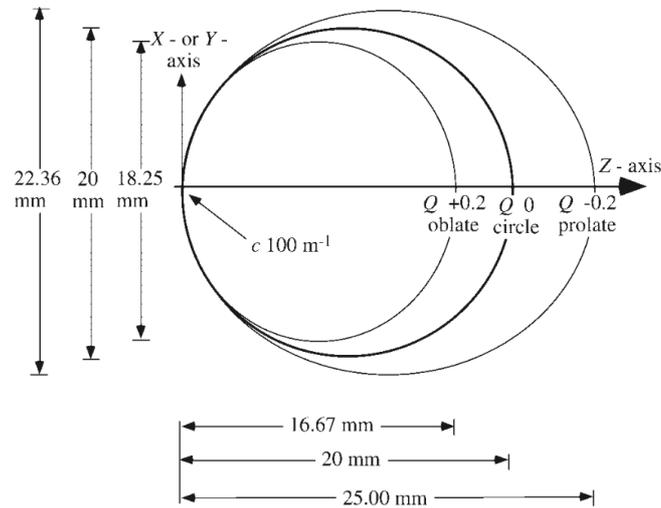


Figura 3. Muestra de 3 elipses con la misma curvatura de vértice.¹⁷

Iluminación y morfología corio-retiniana

Para estudiar la forma de la retina, es importante conocer también las características de la capa posterior a esta, la coroides, pues puede estar relacionada con la capacidad de adaptación a diferentes estímulos de la retina.

En 2020, se llevó a cabo en la *University of Houston College of Optometry* una investigación que tenía como objetivo determinar los efectos de la exposición a la luz sobre el grosor corioideo y la respuesta de la pupila en humanos.

Los sujetos fueron sometidos a una hora de exposición a luz de banda ancha, azul, roja u oscuridad. Posteriormente se evaluó el grosor corioideo mediante OCT, la longitud axial a partir de la biometría y las respuestas de la pupila.

Los resultados probaron que, en comparación con antes de la exposición, la coroides se adelgazó significativamente después de la exposición a la luz de banda ancha, la luz roja y la oscuridad, pero no después de la exposición a la luz azul.

Estos hallazgos muestran que la coroides tiene capacidad reactiva a la luz, pero no lo hace de la misma forma ante todas las longitudes de onda.¹⁸

2. HIPÓTESIS

La hipótesis del trabajo parte de la incertidumbre de si la forma retiniana depende de la refracción ocular, y si además estas variables se ven afectadas por la iluminación ambiental.

3. OBJETIVOS

El objetivo principal del estudio es comprobar si la forma de la retina humana depende del estado refractivo ocular, y si además estos factores dependen de la iluminación. Para ello se pretenden abordar los siguientes objetivos específicos:

1. Desarrollo de un método de segmentación de imagen OCT para ajustar la forma retiniana a una función cónica y calcular los parámetros característicos de excentricidad y factor de forma.
2. Investigar la relación entre la refracción ocular y la iluminación en posición primaria de mirada (PPM).
3. Investigar la relación entre refracción ocular y forma retiniana.
4. Investigar la relación entre forma retiniana e iluminación.

4. MÉTODOS

4.1. Sujetos

En este estudio participaron 85 sujetos con un rango de edad comprendido entre 18 y 63 años (edad media 25 años). Únicamente 11 de los sujetos son mayores de 40 años. De la totalidad de los sujetos de este estudio, el 74,14% (63 sujetos) son mujeres y el 25,88% restante (22 sujetos) son hombres.

En total el estudio cuenta con 170 ojos, que suponen 510 valores, puesto que cada ojo fue estudiado en 3 situaciones. El rango de equivalente esférico obtenido en el estudio se encuentra comprendido entre -11,00D y +2,00D, siendo el valor medio -1,88D.

De los 85 sujetos, 52 de ellos son miopes (considerando como miope un valor igual o superior a -0,50D). A los 33 restantes se les considera no miopes, teniendo únicamente 3 de ellos una hipermetropía igual o superior a +0,50D.

A todos los participantes se les explicó en qué consistía el estudio y se les entregó un consentimiento informado que fue firmado por todos ellos.

4.2. Criterios de inclusión y exclusión

Para la selección de los participantes se han tenido en cuenta una serie de criterios para determinar si el sujeto puede formar parte del estudio o, por el contrario, debe ser excluido. Son los siguientes:

- **Criterios de inclusión:** Podrá formar parte del estudio todo sujeto que no cumpla ninguno de los criterios de exclusión. Serán aceptados participantes sin error refractivo y con error refractivo esférico o astigmático. También serán aceptados los usuarios de lentes de contacto (LC) siempre y cuando al realizar las pruebas hayan pasado mínimo 24h desde la última vez que han portado las LC si se trata de usuarios de LC blandas y 21 días si se trata de LC rígida. Podrán participar también sujetos que hayan sido sometidos a cirugía refractiva de cualquier tipo.
- **Criterios de exclusión:** Se considera como sujeto no apto a cualquier persona con patología ocular que suponga opacidad de algún medio ocular, puesto que no se podría realizar la prueba de OCT correctamente.

4.3. Materiales

Los instrumentos necesarios para la realización del procedimiento experimental fueron un Luxómetro PCE-174, un autorefractómetro Grand Seiko WAM-550 de campo abierto y un OCT 3D OCT-1000 Optical Coherence Tomographer. Todos estos instrumentos son propiedad de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Zaragoza.

Luxómetro PCE-174 (Figura 4): Es un instrumento de precisión para medir el nivel de iluminación. Los datos obtenidos se tomaron en luxes (lx). El luxómetro fue colocado siempre en la misma posición a la hora de tomar los valores de las diferentes luminancias para que los resultados pudieran extrapolarse entre los sujetos.¹⁹



Figura 4. Luxómetro PCE-174.¹⁹

Autorefractómetro Grand Seiko WAM-550 (Figura 5): Este autorefractómetro de campo abierto fue utilizado para realizar una medición objetiva del error refractivo en PPM de ambos ojos de cada sujeto en tres condiciones distintas. El instrumento proporciona en cada medición el valor de la componente esférica y cilíndrica de la refracción ocular junto con su eje, el valor del diámetro pupilar, valores queratométricos y una medición de la distancia pupilar.

Este instrumento da la posibilidad de realizar las mediciones de ambos ojos de forma dinámica y en condiciones visuales más naturales.

Además, ofrece la posibilidad de un modo de medición para pacientes con lente intraocular, gafas o lentes de contacto, el cual no fue utilizado en este estudio.²⁰



Figura 5. Autorefractómetro Grand Seiko WAM-550.²⁰

3D OCT-1000 Optical Coherence Tomographer (Figura 6): Este OCT de dominio espectral fabricado por Topcon proporciona de manera rápida y no invasiva imágenes de polo anterior y posterior. En este estudio utilizamos únicamente la función de fondo de ojo para obtener imágenes histológicas “in vivo” de la zona macular de la retina.

Este instrumento nos va a proporcionar la información necesaria para el posterior estudio de la morfología retiniana. Las mediciones se han realizado de manera estandarizada en tres situaciones diferentes para cada paciente.²¹



Figura 6. 3D OCT-1000 Optical Coherence Tomographer.²¹

4.4. Procedimiento experimental

El procedimiento experimental consta de una serie de pasos, los cuales se describen a continuación.

Inicialmente se contactó con los sujetos vía WhatsApp y se les citó en los Gabinetes de Optometría de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Zaragoza, donde se les explicó las pruebas que se iban a realizar y la finalidad del estudio.

Se les entregó una copia del documento del consentimiento informado, el cual cada paciente leyó y, tras tener la posibilidad de resolver cualquier duda sobre sus puntos para corroborar que se comprendía, fue firmado.

Las medidas fueron realizadas en los Gabinetes de Optometría por la misma examinadora (A.A.S.). Todas las medidas fueron realizadas en una sola visita debido a que no era necesario realizar un seguimiento del paciente, sino una única medida.

En primer lugar, con el luxómetro se midió la iluminación de la sala y se utilizó para la medida de 3 niveles de iluminación diferentes [Iluminación mínima de 0 lx (L1), iluminación media de 30 lx (L2) e iluminación máxima de 300 lx (L3)].

En cada nivel de iluminación se midió la refracción en PPM con el autorefractómetro colocado a 2,30m de la pared y se realizó un OCT de polo posterior.

Se llevó la misma secuencia de medición con todos los pacientes con el objetivo de estandarizar el proceso para evitar posibles variaciones que influyeran negativamente en los resultados. Primero se ajustó la sala a las condiciones de iluminación de L1 y se esperaron aproximadamente 5 minutos para que el ojo se ajustara correctamente a esta baja luminancia. Se midió la refracción en PPM del ojo derecho (OD) y posteriormente la del ojo izquierdo (OI). Una vez apuntados los resultados, se indica al paciente que pase al OCT para examinar la retina. Una vez ajustada la mentonera a la altura necesaria y centrado el cursor en la pupila del OD del paciente, este comienza a ver un punto central de color verde, el cual se le indica que debe de estar mirando en todo momento para poder tomar las medidas de la zona macular de la retina. Tras enfocar correctamente el instrumento se avisa al paciente que va a notar un fuerte fogonazo de luz, el cual no le va a causar ningún tipo de problema ocular, y se toma la medida. Se realiza el mismo proceso para el OI.

Una vez realizadas ambas pruebas, se realizó el mismo procedimiento para el resto de las iluminaciones.

El tiempo medio necesario para la toma de todas las medidas para cada uno de los pacientes fue de aproximadamente 30 minutos.

4.5. Análisis de los resultados

Los datos de las diferentes refracciones de cada paciente se apuntaron en una plantilla de Excel, que permitió posteriormente calcular los valores medios y sus desviaciones estándar. Los valores que se van a estudiar de la forma retiniana fueron obtenidos a partir de un método de segmentación creado en MathLab.

La estadística fue calculada con el programa Sigmaplot, donde también se crearon las gráficas que se adjuntan en el aparatado de resultados.

En el primer apartado de los resultados se compara estadísticamente el equivalente esférico (EE) de cada ojo para los diferentes niveles de iluminación.

Se muestran los valores medios de EE para cada luminancia, es decir, la potencia esférica con la que se consigue la mejor calidad visual, calculado a partir de la siguiente fórmula:

$$EE = \text{Componente esférico de } Rx + \frac{\text{Componente astigmático de } Rx}{2}$$

En cuanto a los valores retinianos, se han obtenido los valores de excentricidad y factor de forma de cada una de las imágenes de OCT, es decir, de la retina de cada ojo en las tres situaciones de iluminación.

En el segundo apartado de los resultados se comprueba la correlación entre los valores de EE en L2 y los diferentes valores retinianos para esta misma iluminación. El análisis estadístico se realizó estudiando la correlación de Spearman, que evalúa la relación monótona entre dos variables continuas.²²

En el tercer apartado, se comparan estadísticamente los valores retinianos de las diferentes iluminaciones.

El análisis estadístico se ha realizado, en el primer y tercer apartado, ejecutando el test de los rangos con signo de Wilcoxon. Este es un test no paramétrico basado en rangos, utilizado para comparar dos muestras relacionadas o para realizar una prueba de diferencias pareadas de mediciones repetidas en una sola muestra para evaluar si los rangos medios de su población difieren.²²

En este caso, se ha utilizado para comprobar como evoluciona un valor concreto en las diferentes luminancias. En el primer apartado se ha tratado el EE, mientras que en el tercero se ha realizado para los valores retinianos.

En las tres situaciones nombradas se obtuvo el valor de probabilidad (p) para comprobar si los valores obtenidos eran estadísticamente significativos. Para que un resultado sea significativo, y por lo tanto exista una relación entre los valores estudiados, p debe ser inferior a 0,050.

4.6. Método de segmentación

Con el objetivo de segmentar las imágenes retinianas obtenidas al realizar las pruebas de OCT, se ha desarrollado un software en el entorno de programación Matlab 2019b (The MathWorks, Inc.) en el que se lleva a cabo el ajuste de un conjunto de puntos seleccionados manualmente sobre la imagen a la ecuación general de la cónica:

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0 \quad (1)$$

A partir de los coeficientes de la ecuación (1), se definen los parámetros de excentricidad (e) y factor de forma (p) como:

$$e = C/A \quad (2)$$

$$p = 1 - e^2 \quad (3)$$

EL factor de forma nos permite distinguir entre superficies esféricas ($p=0$), prolatas ($p<0$) y oblatas ($p>0$), mientras que la excentricidad permite clasificar las figuras cónicas en diferentes tipos, como se muestra en la *Tabla 1*.

Circunferencia	$e=0$
Elipse	$0 < e < 1$
Parábola	$e=1$
Hipérbola	$e > 1$

Tabla 1. Clasificación de la cónica obtenida a partir del valor de excentricidad calculado.

La *Figura 7* muestra el proceso de calibración del programa para una figura generada por ordenador de excentricidad conocida. Para ello se marcaron un total de 6 puntos sobre el contorno del anillo de la figura de la izquierda (círculos rojos). El resultado obtenido se muestra sobre la figura de la derecha, donde se muestra la cónica obtenida sobre-escrita a la figura. Para facilitar el proceso de calibración, se utilizó el parámetro de elipticidad (1-excentricidad) obteniéndose un valor prácticamente de la unidad 1.025643, lo que correspondería a una excentricidad de $e=0.025643$, que según la clasificación de la *Tabla 1*, corresponde a una circunferencia.

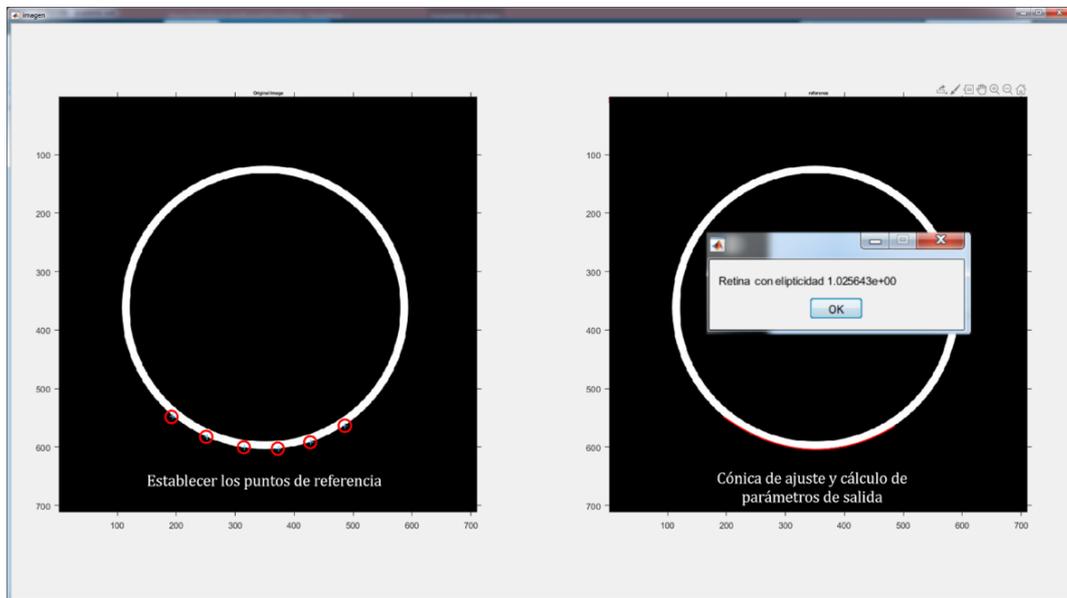


Figura 7. Ejemplo de calibración del programa de segmentación mediante una figura esférica de excentricidad conocida. Sobre la imagen se han marcado 6 puntos de referencia que son utilizados para el cálculo del ajuste cónico que aparece en la figura.

En la *Figura 8*, se muestra un ejemplo de aplicación sobre una imagen real de OCT registrada para uno de los voluntarios del TFG. Al igual que en la Figura anterior, se han marcado 6 puntos sobre el epitelio pigmentario (cruces azules, figura derecha) a partir de los cuales se ha obtenido el ajuste cónico mostrado en la figura derecha (curva roja).

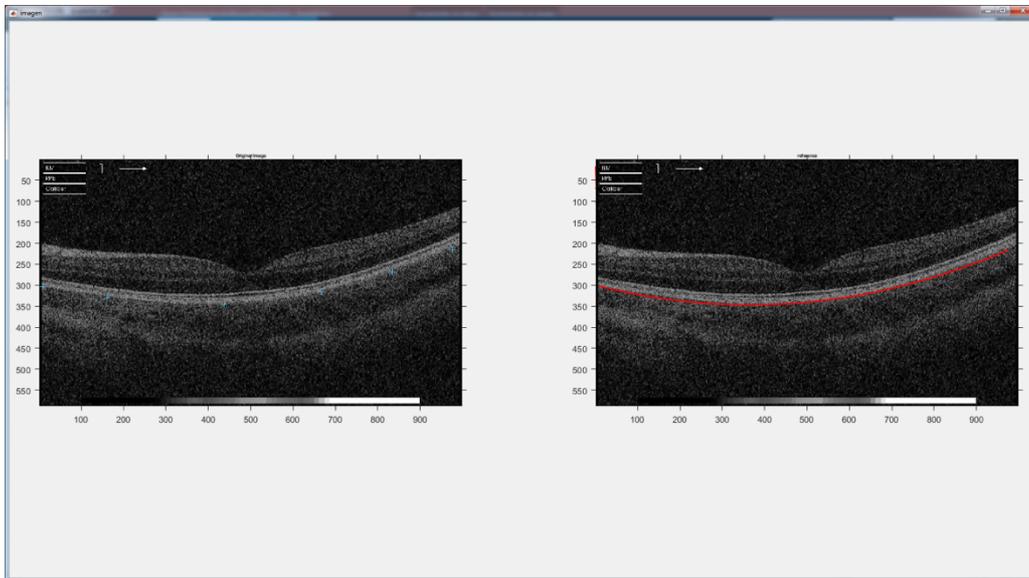


Figura 8. Ejemplo de aplicación real del programa de segmentación a una imagen de OCT correspondiente a uno de los sujetos estudiados.

5. RESULTADOS

5.1. Relación entre EE y luminancia

A continuación, se procede a presentar los resultados obtenidos en la primera parte del estudio, como se ha descrito en el apartado de análisis de los resultados.

En la *Figura 9* se representan los valores medios del EE para cada luminancia, así como su desviación estándar, representada con las barras de error. En la *Tabla 2* se indican los valores representados en la *Figura 9*.

Se puede observar como existe un cambio mínimo en el error refractivo con el cambio de iluminación. En la luminancia máxima (L3), correspondiente a 300 lx, se obtiene un EE de $-1,89 \pm 2,49D$, que es muy similar al obtenido en la luminancia mínima (L1) de 0 lx, siendo el EE de este $-1,90 \pm 2,62D$. El valor de p obtenido entre los datos de estas 2 luminancias es de $p=0,769$ ($p>0,05$).

El valor de EE correspondiente a la luminancia media (L2) de 30 lx, es $-1,85 \pm 2,50D$. El valor de probabilidad en relación con L1 es de $p=0,065$ ($p>0,05$), mientras que con L3 es $p=0,017$ ($p<0,05$), siendo este último el único estadísticamente significativo.

La mayor diferencia la encontramos entre los valores de L1 y L3, siendo esta de 0,05D, una diferencia menor de 0,25D, definida como la mínima detectable por el ojo humano.

Nivel de iluminación [lx]	Media EE [D]	Desviación estándar [D]
0 (L1)	-1,90	2,62
30 (L2)	-1,85	2,50
300 (L3)	-1,89	2,49

Tabla 2. Datos de EE medio y desviación estándar en cada uno de los niveles de iluminación.

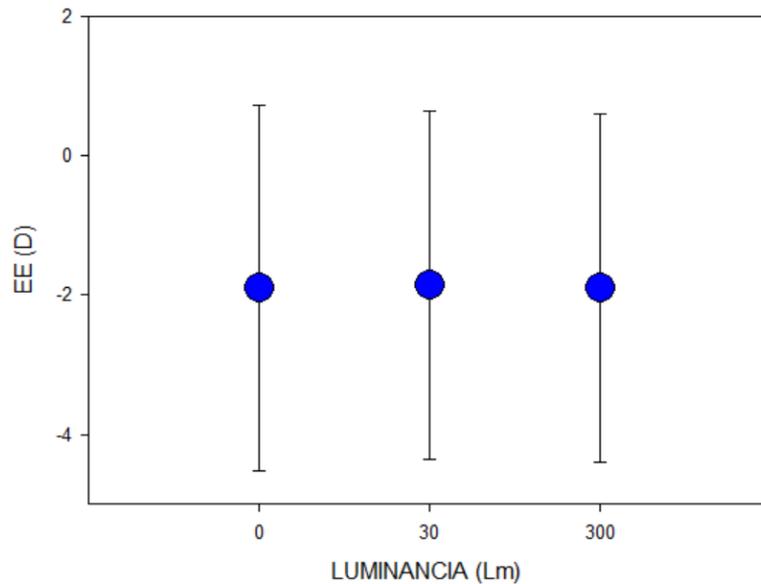


Figura 9. EE medio y desviación estándar cada uno de los niveles de iluminación.

5.2. Relación entre EE y parámetros retinianos

En este apartado se van a presentar los resultados obtenidos al estudiar la relación entre el EE y los parámetros retinianos medidos en condiciones lumínicas medias (L2).

En la *Tabla 3* se indican los valores medios de EE, excentricidad y factor de forma para L2, junto a sus desviaciones estándar.

Los valores de excentricidad y factor de forma describen la geometría de una retina hiperbólica.

	Media	Desviación estándar
Excentricidad	1,17	0,21
Factor de forma	-1,41	0,53
EE [D]	-1,85	2,50

Tabla 3. Datos media y desviación estándar de EE y parámetros retinianos.

Se evaluó la posible correlación existente entre los 170 datos de EE y los 170 de cada parámetro retiniano.

Como se ha comentado anteriormente en el apartado de análisis de los resultados, el análisis estadístico se realizó estudiando la correlación entre los dos conjuntos de datos. Se obtuvieron los valores de p y de r . El coeficiente de correlación r determina cómo es la correlación. Adquiere valores entre -1 y 1 , siendo estos correspondientes a una correlación perfecta de relación lineal, por lo tanto, cuando más próximo sea a 0 el valor de r más débil es la relación lineal. Los valores positivos indican una correlación positiva, en la que los valores de ambas variables tienden a incrementarse juntos, al contrario que los negativos, que indican que mientras los valores de una variable se incrementan, los de la otra descienden.²³

Al comparar el EE con la excentricidad retiniana, se obtuvo $p=0,00165$ ($p<0,05$) y $r=0,24$. Con respecto al factor de forma, los resultados fueron $p=0,00224$ ($p<0,05$) y $r=0,233$. Como podemos observar, en los dos casos el valor de r es positivo, es decir, a medida que el valor de EE aumenta, lo hacen también los parámetros retinianos. Además, es más próximo a 0 que a 1 , por lo que no se trata de una relación lineal fuerte. En cuanto a los valores de p , en los dos casos son estadísticamente significativos, por lo que podemos afirmar que sí existe una relación entre la refracción y la forma retiniana. Al representar de forma gráfica la relación entre los valores de EE y los parámetros retinianos, obtenemos la *Figura 10* y la *Figura 11*.

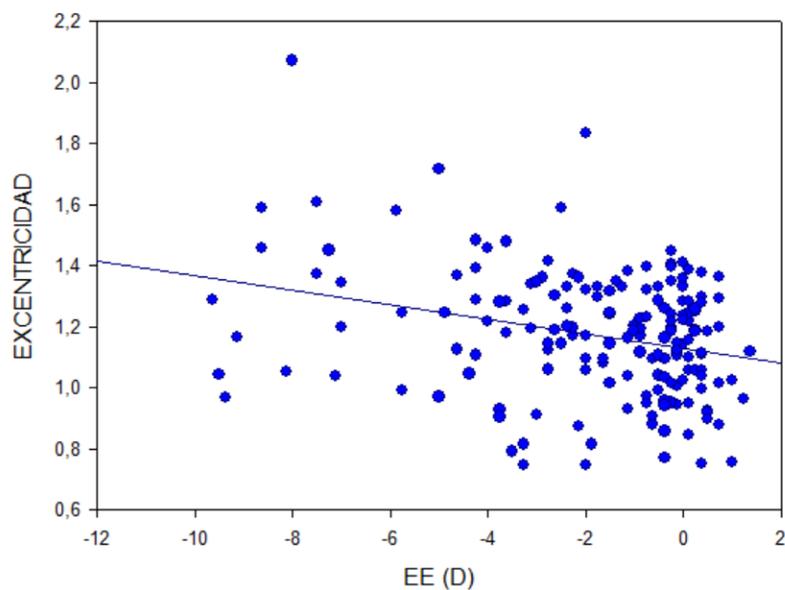


Figura 10. Gráfico de dispersión de puntos en el que se relacionan los valores de excentricidad y EE.

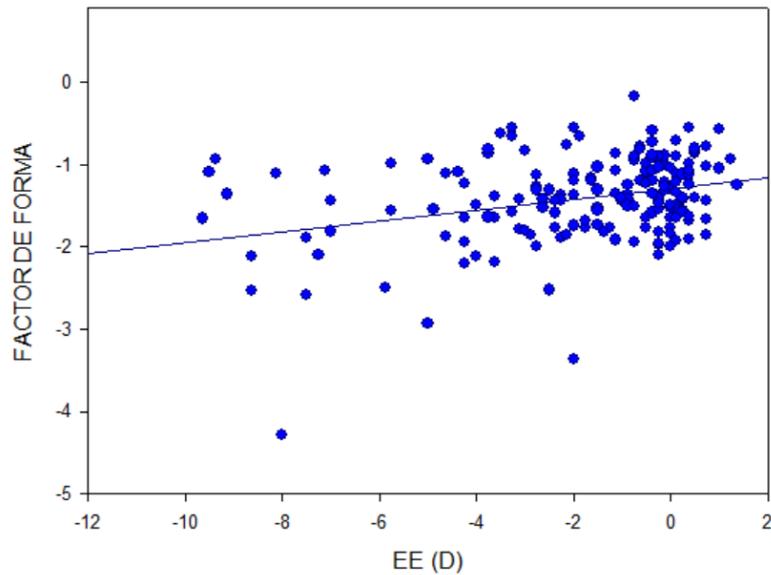


Figura 11. Gráfico de dispersión de puntos en el que se relacionan los valores de factor de forma y EE.

Como al obtener el valor de probabilidad se ha observado que existe una relación estadísticamente significativa entre las dos variables, se añade una recta de regresión a los gráficos, que representa la que mejor se ajusta a la nube de puntos.

Como podemos observar, en ambos casos hay una tendencia clara, en el caso de la excentricidad, esta aumenta cuando lo hace la miopía, al contrario que el factor de forma, que disminuye.

5.3. Relación entre luminancia y parámetros retinianos

En este apartado se van a presentar los resultados obtenidos al estudiar los cambios que se producen en los valores retinianos estudiados con las diferentes luminancias (L1, L2 y L3). Se han estudiado excentricidad y factor de forma de forma independiente, evaluando en cada uno de ellos sus valores para los tres estados iluminativos.

En la *Figura 12* se representan los valores medios de excentricidad para cada luminancia, así como su desviación estándar, representada con las barras de error. En la *Tabla 4* se indican los valores representados en la *Figura 12*.

Nivel de iluminación [lx]	Media excentricidad	Desviación estándar
0 (L1)	1,19	0,21
30 (L2)	1,17	0,20
300 (L3)	1,19	0,21

Tabla 4. Datos media y desviación estándar de excentricidad en cada uno de los niveles de iluminación.

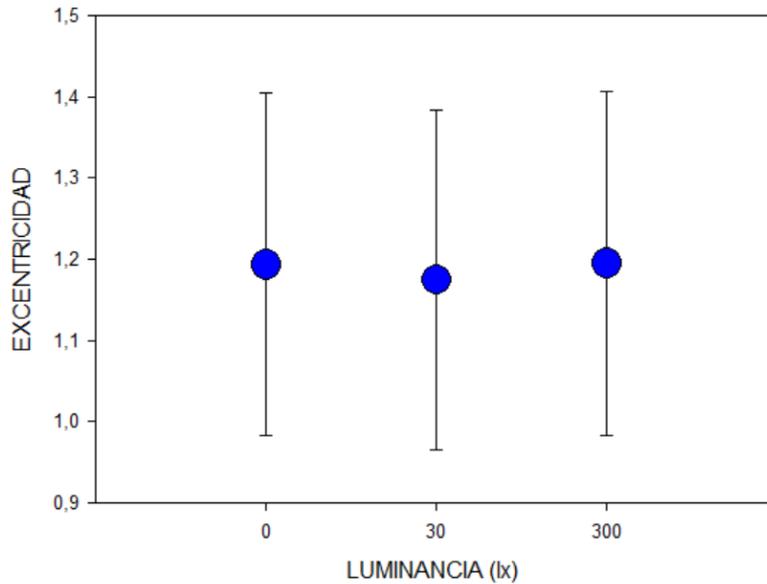


Figura 12. Excentricidad media y desviación estándar en cada uno de los niveles de iluminación.

Se puede observar como existe un cambio mínimo en el valor de la excentricidad con el cambio de iluminación. En la luminancia máxima L3, se obtiene una excentricidad retiniana de $1,19 \pm 0,21$, idéntica a la obtenida en L1. El valor de la excentricidad en L2 es $1,17 \pm 0,20$.

En cuanto a los valores de p obtenidos, al evaluar la relación entre la excentricidad de L1 y L2, el resultado fue de $p=0,083$ ($p>0,05$), entre L1 y L3 $p=0,934$ ($p>0,05$), y entre L2 y L3 $p=0,235$ ($p>0,05$).

Como podemos observar, los tres valores de p son mayores de 0,05, por lo que no son estadísticamente significativos.

Se realizó el mismo tipo de estudio para el factor de forma. En la *Figura 13* se representan los valores medios y desviación estándar del factor de forma retiniano para L1, L2 y L3. En la *Tabla 5* se indican los valores representados en la *Figura 13*.

Nivel de iluminación [lx]	Media factor de forma	Desviación estándar
0 (L1)	-1,44	0,52
30 (L2)	-1,41	0,53
300 (L3)	-1,46	0,57

Tabla 5. Datos media y desviación estándar del factor de forma retiniano en cada uno de los niveles de iluminación.

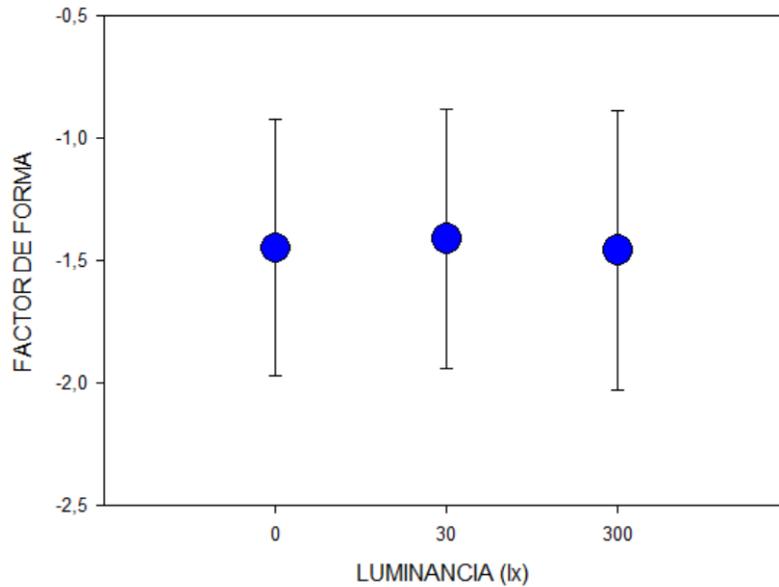


Figura 13. Factor de forma retiniano medio y desviación estándar en cada uno de los niveles de iluminación.

Podemos observar como, al igual que en la excentricidad, no existe un gran cambio en los valores obtenidos al variar la luminancia, tampoco existe un claro patrón de aumento o disminución. En L1, el factor de forma es $-1,44 \pm 0,52$, en L2 es $-1,41 \pm 0,53$, y por último en L3 es $-1,46 \pm 0,57$.

En cuanto a los valores de p obtenidos, al evaluar la relación entre el factor de forma retiniano en L1 y L2, el resultado fue de $p=0,176$ ($p>0,05$), entre L1 y L3 $p=0,876$ ($p>0,05$), y entre L2 y L3 $p=0,328$ ($p>0,05$).

Como podemos observar, los tres valores de p son mayores de 0,05, por lo que no son estadísticamente significativos, al igual que los obtenidos de la excentricidad.

6. DISCUSIÓN

El objetivo principal de este estudio es la medición del error refractivo en PPM y la evaluación de la forma de la retina para diferentes luminancias en pacientes sin opacidades oculares y, por lo tanto, evaluar el impacto de la iluminación y la refracción sobre la morfología retiniana.

El estudio ha constado de 85 sujetos, lo que ha permitido evaluar un total de 170 ojos en tres situaciones de iluminación diferentes.

En todo momento se han llevado a cabo las medidas sanitarias vigentes contra la COVID-19, por lo que la realización de las pruebas no le ha generado ningún problema de salud a los participantes ni a la propia examinadora.

A partir de los valores obtenidos en el apartado de resultados, podemos observar que, en primer lugar, el EE en PPM presenta una variación media sin progresión exacta a medida que se reduce el nivel de luminancia. No existe una clara tendencia a la miopización o hipermetropización con la disminución del nivel lumínico.

En segundo lugar, se observa que existe una tendencia estadísticamente significativa del aumento de la excentricidad retiniana cuanto mayor es la miopía del paciente. Al analizar las diferentes retinas, en todas ellas se obtuvo una geometría hiperbólica, por lo que, atendiendo a la definición de la excentricidad en este tipo de geometrías, la cual nos indica cuanto de “abierto” es una hipérbola, podemos saber que, cuanto mayor es el valor de la excentricidad, más cerrada es la hipérbola. Esto significa que, según los resultados obtenidos, cuanto mayor es la miopía del paciente, más cerrada o curvada es la forma de la retina. En cuanto al factor de forma retiniano, este nos indica cuanto dista la forma de la retina de una esfera perfecta ($p=0$), diferenciando entre geometrías prolatas ($p<0$) u oblatas ($p>0$). En los resultados obtenidos podemos observar de una forma también estadísticamente significativa, que cuanto mayor es la miopía del paciente, el valor del factor de forma adquiere valores más negativos. Esto significa que cuanto mayor es el defecto refractivo miópico del paciente, más prolata es la geometría retiniana.

En tercer lugar, podemos observar en el apartado de resultados como, la forma de la retina aparentemente no es dependiente de la luminancia. Obtenemos valores de excentricidad retiniana media que no siguen un patrón de aumento o descenso con la luz, sino que únicamente varía, disminuyendo 0,02, en L2. Se observa un comportamiento similar en el factor de forma, pues de L3 a L2 la media disminuye de -1,46 a -1,41, pero el L1 vuelve a aumentar a -1,44. Estadísticamente ninguno de los resultados es significativo, por lo que no podemos afirmar que exista una relación entre forma retiniana y luminancia.

En contradicción con otros estudios realizados con anterioridad a este (6 - 15), los resultados obtenidos muestran que no existe una miopización en la refracción ocular con la disminución de la luz. Sí es cierto que es posible que se haya inducido algún error en los datos obtenidos con baja iluminación, puesto que, pese a que se intentó ser totalmente fieles a los objetivos lumínicos, la propia pantalla del autorefractómetro emitía luz. Por ello es posible que, en alguna ocasión, esta produjera un cierto deslumbramiento al paciente, que hiciera que no se encontrara en las condiciones exactas que se buscaban. En mi opinión, este no sería el instrumento ideal para realizar un estudio exhaustivo de la miopía nocturna, pero si nos informa de forma aproximada del error refractivo del paciente, que es la información que buscábamos para llevar a cabo este estudio.

En cuanto a la diferencia de la forma retiniana entre sujetos miopes y emétopes o hipermétropes, los resultados indican una clara relación entre ambos conceptos. Como se ha podido observar en el apartado en el que se explica el método de segmentación, solo se ha evaluado la parte central de la retina, correspondiente a la mácula, por ello, al evaluar las diferentes retinas, obtenemos una hipérbola como forma retiniana. Sin embargo, si extrapolamos esa información a un concepto de retina más global, relacionándola con la forma del globo ocular, sabemos que esta no tiene forma hiperbólica, sino elipsoide.

Teniendo en cuenta como afecta a la forma de una hipérbola su excentricidad (*Figura 14*), y que, atendiendo a los resultados obtenidos en este estudio, cuanto mayor es la refracción miopía de un ojo mayor es la excentricidad de su retina, si extendemos la curva hasta cerrarla para formar un elipsoide, a medida que aumenta el grado de miopía, la forma de la retina se hace más prolata, tal y como nos indican los datos del factor de forma retiniano. Estos resultados concuerdan con los obtenidos en anteriores estudios (17)

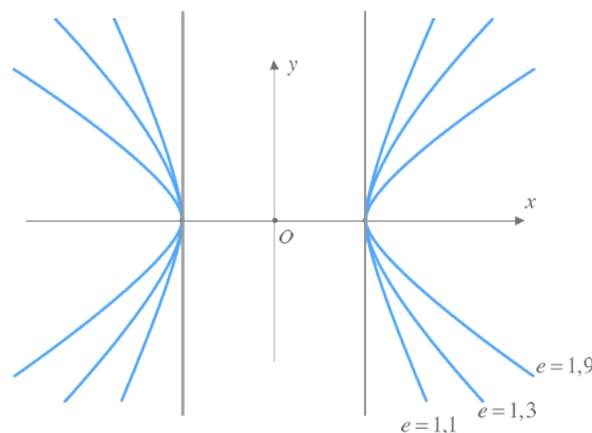


Figura 14. Tres ejemplos de hipérbolas con diferentes excentricidades (e).²⁴

Respecto a la asociación entre parámetros retinianos y la exposición a la luz, no se han conseguido obtener resultados que las relacionen. Se requieren futuros estudios experimentales para comprender mejor las asociaciones entre la exposición a la luz la miopía.

7. CONCLUSIÓN

Los resultados obtenidos en este estudio permiten recabar las siguientes conclusiones:

1. Se ha desarrollado un nuevo método de segmentación de imagen basado en ajustes cónicos a partir de imágenes retinianas de OCT.
2. La refracción ocular en PPM no depende de la iluminación.
3. La forma retiniana depende del estado refractivo ocular. Cuanto mayor es el grado de miopía, mayor es la excentricidad retiniana y menor el factor de forma, tratándose así de retinas más prolatas.
4. La forma retiniana, aunque varía con la iluminación, no lo hace de forma significativa.

8. BIBLIOGRAFÍA

- (1) Serra Castanera A. *Defectos refractivos: concepto, despistaje, diagnóstico y seguimiento* [Recurso electrónico]. Hospital de Sant Joan de Déu, Barcelona, España: Instituto de Oftalmología Castanera, 2009.
- (2) "Anatomía básica". En: American Academy of Ophthalmology. *Retina y vítreo, Curso de ciencias básicas y clínicas* [en línea]. Elsevier España, S.L., 2013, p. 3-14.
- (3) Rodríguez Moratinos A. "Fotorrecepción, el Ojo y la Visión". En: García Sacristán A. *Fisiología Veterinaria*. España: McGraw-Hill/Interamericana, 1996, p. 114-131.
- (4) Cuenca N. Et. Al. "Cellular Characterization of OCT and Outer Retinal Bands Using Specific Immunohistochemistry Markers and Clinical Implications". *American Academy of Ophthalmology* [en línea], 2018, 125 (3), p. 407-422.
- (5) Morgan I, et. al. "The epidemics of myopia: Aetiology and prevention". *Progress in Retinal and Eye Research* [en línea], 2018, 62, p. 134-149.
- (6) Cooper J, Tkatchenko A. V "A Review of Current Concepts of the Etiology and Treatment of Myopia". *Eye & contact lens* [en línea], 2018, 44 (4), p. 231-247.
- (7) *¿Qué es la retina?* [en línea]. Madrid, España: Sociedad Española de Oftalmología. Disponible en: <https://www.ofthalmoseo.com/patologias-frecuentes-2/que-es-la-retina/>
- (8) Wald G, Griffin DR. "The Change in Refractive Power of the Human Eye in Dim and Bright Light". *Journal of the Optical Society of America*, 37, 5 (1947), p. 321-336
- (9) Otero JM. "Influence of the State of Accommodation on the Visual Performance of the Human Eye". *Journal of the Optical Society of America*, 41, 12 (1951), p. 942-948
- (10) Leibowitz HW, Owens DA. "Anomalous myopias and the intermediate dark focus of accommodation". *Science*, 189, 4203 (1975), p. 646-648
- (11) Epstein D, Ingelstam E, Jansson K, Tengroth B. "low-luminance myopia as measured with a laser optometer". *Acta Ophthalmologica*, 59, 6 (1981), p. 928-943
- (12) Arumi P, Chauhan K, Charmany WN. "Accommodation and acuity under night-driving illumination levels". *Ophthalmic and Physiological Optics*, 17, 4 (1997), p. 291-299
- (13) Chirre E, Prieto P, Schwarz C, Artal P. "Night myopia is reduced in binocular vision". *Journal of Vision* (2016), 16(8):16, p. 1-10.
- (14) Leibowitz HW, Owens DA. "Night myopia and the intermediate dark focus of accommodation". *Journal of the optical society of america*, 65, 10 (1975), p. 1121-1128.

- (15) Großmann E, Hessler P, Degle S. "Night Myopia and Dark Focus of Accommodation". *Investigative Ophthalmology & Visual Science* [en línea], 2018, 59(9).
- (16) Verkicharla PK. Et. Al. "Eye shape and retinal shape, and their relation to peripheral refraction". *Ophthalmic & Physiological Optics* [en línea], 2012, 32 (3), p. 184-199.
- (17) Atchison DA, et. Al. "Shape of the Retinal Surface in Emmetropia and Myopia". *Investigative Ophthalmology & Visual Science* [en línea], 2015, 46 (8), p. 2698-2707.
- (18) Lou L, Ostrin LA. "Effects of Narrowband Light on Choroidal Thickness and the Pupil". *Investigative Ophthalmology & Visual Science* [en línea], 2020, 61 (10), p. 1-11.
- (19) Instruments PCE, Ibérica PCE, Marcoleta A Lo. Instrucciones de uso Luxómetro PCE-174. 2016;1:1–10.
- (20) WAM-5500 [en línea]. MoinMedical. [Consulta: 31 marzo 2021]. Disponible en: <https://www.moinmedical.com/producto/wam-5500/>
- (21) *Optical Coherence Tomography 3D OCT-1000*. TOPCON CORPORATION, 2008.
- (22) Xia Y. *Correlation and association analyses in microbiome study integrating multiomics in health and disease*. Elsevier, 2020.
- (23) *Coeficiente de correlación* [en línea]. Portal de formación estadística: JMP. Disponible en: <https://www.jmp.com/es/es/statistics-knowledge-portal/what-is-correlation/correlation-coefficient.html>
- (24) Fernández JL, Coronado G. *Ecuación de la Hipérbola* [en línea]. FisicaLab. Disponible en: <https://www.fisicalab.com/apartado/ecuacion-hiperbola-general>